项目合同编号：25-50K

陕西省交通运输厅2025年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术研究

承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

项目负责人：马旭东

通讯邮编、地址：西安市高新区科技四路205号 710075

传真、电话：029-61321220

起止年限： 2026年3月 至 2028年3月

签订日期：2026年 月 日

陕西省交通运输厅制

项目合同编号：25-50K

陕西省交通运输厅2025年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术研究

承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

项目负责人：马旭东

通讯邮编、地址：西安市高新区科技四路205号 710075

传真、电话：029-61321220

起止年限： 2026年3月 至 2028年3月

签订日期：2026年 月 日

陕西省交通运输厅制

一、项目主要研究内容

1．主要研究内容

（1）深埋公路隧道围岩力学性能原位测试技术研发。开展深埋秦岭天台山超长深埋隧道和川藏铁路雅安至林芝段在建工程围岩数字钻试验，阐明旋切过程中角片式钻头的压入破岩与切削破岩机制，揭示旋切破岩机理，构建软岩旋切过程的力学响应模型，提出了机-岩相互作用的理论关系及其应用。揭示现场岩体钻进速度及转速对总钻头阻力的影响规律，从理论上建立数字钻探荷载参数、运行参数与被切削的岩体材料的力学参数间的数学力学模型，建立并研制岩体力学参数的现场快速测试理论与技术。

（2）深埋公路隧道围岩高地应力确定方法。依托秦岭天台山超长深埋隧道工程和川藏铁路雅安至林芝段易贡隧道在建工程等，采用压力机对完整硬岩试样加载至特定的应力状态，同时利用室内数字钻探设备旋切钻进岩石试样，研究不同硬岩的数字钻进随高地应力的演化规律；研究不同高地应力状态下硬岩的数字钻过程旋切受力特性，分析研究岩石旋切受力特点及钻进参数与高地应力之间的关系，揭示高地应力下数字钻过程的旋切机理；建立高地应力与硬岩数字钻进之间的解析模型，提出高地应力确定方法，并验证方法的可靠性。

（3）深埋公路隧道岩爆倾向性的判别准则与预测模型。开展各种岩性岩石的单轴、三轴压缩循环加卸载试验，研究岩石非线性演化规律；研究岩石的旋切特性与能耗特征和岩爆倾向性的关联响应规律。开展不同岩爆倾向性硬岩的室内和现场数字钻探试验，提出基于硬岩旋切特性的岩爆倾向性与等级标准；研究不同岩爆倾向性岩石的旋切特性，建立基于旋切特性的岩爆倾向性判据准则与预测模型。

（4）基于数字钻的深埋公路隧道岩爆灾害预报技术。研究高地应力环境下和临近隧道爆破环境下岩爆孕育过程及相关岩体破裂机制，再现高地应力环境下岩爆隧道破坏过程，探明临近隧道爆破环境下隧道岩爆发展过程及破坏模式；开展深埋公路隧道岩爆预测及不同地应力条件对深埋公路隧道岩爆的影响研究；根据深埋公路隧道围岩岩爆实例的围岩破裂模式、岩片特征和远场弹射质量等物理因素，结合数值模拟结果验证所建立的岩爆倾向性判据与预测模型

（5）深埋公路隧道岩爆支护结构体系与防控技术研发。通过建立不同工况下隧道开挖数值模型，结合提出的岩爆能量判定指标，研究高地应力环境下隧道各个建设方案对岩爆的影响。结合现场隧道施工，通过对高地应力和临近隧道爆破环境下岩爆的不同支护结构参数的研究，确定合理的支护结构体系，分析不同应力条件下隧道开挖过程中围岩的力学与能量变化过程及岩爆发生的潜在区域，为高地应力和临近隧道爆破荷载环境下岩爆隧道的设计、施工等提供科学指导。

2．技术关键

（1）深埋公路隧道围岩力学参数原位测试技术

深埋公路隧道围岩力学参数原位测试技术是是本项目的又一技术关键。由于深部岩体应变型岩爆的孕育过程是一个非常复杂的过程，该过程不仅与岩体所赋存的地质环境、高地应力、岩石的物理力学性质等有关，而且与开挖卸荷

效应、外界动力扰动以及施工技术等有关，受这些因素的影响，在高地应力状态下深埋公路隧道围岩力学特性会发生变化，只有研究出深埋公路隧道围岩力学参数原位测试技术，本项目技术才具有可行性。

（2）基于数字钻技术的深埋公路隧道岩爆倾向性预报技术

基于数字钻技术的深部岩体岩爆预报技术是本项目的又一技术关键。近年来，岩爆判据与分级标准有所发展，直接促进了岩体工程在设计阶段和施工阶段的岩爆预警、预测技术的蓬勃发展。深部岩体岩爆判据与预测模型对岩爆超前预测提出了前所未有的要求，对于具有同一岩爆倾向性的岩石在不同地质环境下，开挖后岩体可能发生岩爆也可能不发生岩爆，只有在岩爆倾向性预报技术研究上有所突破，本项目技术才具有可行性。

3．依托工程（依托工作）

本项目以宝坪高速公路秦岭天台山超长隧道作为主要数据依托工程。该隧道目前已建成通车，但在施工阶段已开展了数字钻测试及相关现场观测工作，获取了不同埋深及不同地应力条件下的原位测试数据，为本项目提供了可靠的数据基础。在此基础上，针对该工程获取的数据，已通过室内力学试验及室内数字钻试验对相关规律进行了系统分析与验证，实现了现场数据与试验结果之间的相互印证。同时，结合本部分所述川藏铁路雅安至林芝段在建工程，进一步开展现场验证研究，通过在建工程中开展数字钻测试及围岩响应观测，对基于秦岭天台山隧道建立的方法和模型进行验证与修正，从而形成“已建工程数据分析—室内试验验证—在建工程验证”的完整研究体系。

二、考核指标

1.预期目标

本项目立足于秦岭天台山超长深埋岩体隧道工程和川藏铁路雅安至林芝段易贡隧道在建工程，重点突破深埋公铁路隧道围岩岩爆安全防护难题，研发深埋公路隧道围岩力学性能原位测试技术，提出深埋公路隧道围岩高地应力确定方法；深埋公路隧道围岩应变型岩爆倾向性的判别准则与预测模型，深研发埋公路隧道岩爆支护结构体系与防控技术，最终形成深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控技术，为解决我国深埋高速公路岩体隧道岩爆灾害预报与安全防护提供指导。

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

本工程拟采用"基于数字钻技术的岩爆倾向性原位测试键技术"对银川（宝鸡）至昆明（坪坎）（G85）高速公路的秦岭岩体隧洞进行勘察阶段和施工期勘探，超前预报工程岩体隧洞围岩的力学参数、岩体质量以及岩爆等不良地质灾害，预报长度超过 5 公里，创新勘察与施工工艺，加快工程进度，提高隧道的建设效率，节约勘察与施工成本，有效防治不良地质灾害。以岩爆预报命中率、误报率和预警提前时间为核心评价指标，目标实现岩爆预报准确率≥85%、误报率≤15%、预警提前时间>24 h。

3.经济和社会效益

研发深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术，可直接服务于我省穿越秦岭深埋公路隧道等岩体工程，为解决我国深埋公路隧道岩爆灾害预测与安全防护提供指导。可保证隧道施工安全和施工质量的前提下大幅度缩减工期并节约工程成本，应用前景广泛，推广价值大。可用于快速预报隧道工程围岩岩爆倾向性，为勘察、设计和施工提供指导，可保障工程安全及保证施工质量。

该课题将完成以数字钻技术为基础的深埋公路隧道岩爆灾害超前预报系统，其将可能成为我省的代表性科研产品，可以面向全陕西省乃至全国进行售卖，完成成果转化，赚取可观利润。在服务各大施工单位、设计勘察院的同时，大幅度提高我单位在行业内的知名度。

4.成果提供形式

本课题研究成果主要形式如下：

（1）获得深埋公路隧道围岩力学性能原位测试技术；

（2）获得高地应力的判别方法，建立高地应力与硬岩数字钻参数之间的解析模型，提高地应力确定方法；

（3）获得基于硬岩旋切特性的岩爆倾向性判据与预测模型；

（4）最终建立基于数字钻探技术的应变型岩爆倾向性的超前预测方法；

（5）发表高水平学术论文 2 篇以上，申请专利 1 项。

5.其他考核指标

应开展的宣传报道不少于 1 次，技术交流不少于 2 次。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
2026 年 03 月 -2026 年 06 月	开展深埋公路隧道围岩数字钻试验，揭示旋切破岩机理，构建软岩旋切过程的力学响应模型，提出机-岩相互作用的理论关系及其应用；研究不同岩性硬岩的数字钻探参数随高地应力的演化规律；研究不同高地应力状态下硬岩的旋切受力特性，揭示高地应力下旋切机理； 建立高地应力与硬岩数字钻探参数之间的解析模型，提出高地应力计算方法。
2026 年 07 月 -2026 年 12 月	研究岩石的能量耗散特征与耗散能的非线性演化规律，建立深部岩体岩爆的非线性能耗理论模型；提出临界耗散能的计算方法，研究岩石的旋切特性与能耗特征和岩爆倾向性的关联响应规律；研究基于硬岩旋切特性的岩爆倾向性与等级标准，建立基于数字钻探参数的岩爆倾向性预测模型，结合数值模拟结果验证所建立的岩爆倾向性判据与预测模型。发表 SCI 论文 1 篇。
2027 年 01 月 -2027 年 6 月	研究高地应力环境下岩爆孕育过程及相关岩体破裂机制，再现高地应力环境下岩爆隧道破坏过程，探明高地应力作用下隧道岩爆发展过程及破坏模式；开展深埋公路隧道岩爆预测及不同地应力条件对深埋公路隧道岩爆的影响研究。
2027 年 07 月 -2027 年 12 月	通过建立不同工况下隧道开挖数值模型，结合提出的岩爆能量判定指标，研究了高地应力环境下隧道各个建设方案对岩爆的影响；通过对高地应力环境下岩爆的不同支护结构参数的研究，确定了合理的支护结构体系；分析了不同应力条件下隧道开挖过程中围岩的力学与能量变化过程及岩爆发生的潜在区域。撰写报告，准备结题，发表论文 1 篇。

四、项目经费

项目总经费：69.8 万元

交通运输厅补助：19.8 万元

自筹资金：50 万元

经费支出预算表

科　目	总经费 （单位：万元）	厅补经费 （单位：万元）
（一）直接费用	61	18
1. 设备费	4	1
（1）购置设备费	0	0
（2）试制设备费	2	1
（3）设备改造与租赁费	2	0
2. 业务费	49	14
（4）材料支出	25	7
（5）测试化验实验加工支出	17	5
（6）燃料及动力支出	0	0
（7）差旅支出	1	0.5
（8）会议支出	1	0.5
（9）国际合作与交流支出	1	0
（10）出版/文献/信息传播/知识产权事务/印刷支出	4	1
（11）其他支出	0	0
3. 劳务费	8	3
（12）劳务性支出	5	2
（13）咨询专家支出	3	1
（二）间接费用	8.8	1.8
4. 管理费	6	1
5. 绩效支出	2.8	0.8
合　计	69.8	19.8

五、项目绩效目标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1.专利授权数（项）	0
		（1）授权发明专利	0
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	0
		2.软件著作权授权数（项）	0
		3.发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	2
		（2）其中 EI 索引收录数	0
		（3）其他	0
		4.著作（部）	0
		5.制订标准数（项）	0
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	0
	其他成果	1.填补技术空白数	0
		（1）国际	0
		（2）国家	0
		（3）省级	0
		2.获奖项数	0
		（1）国家奖项	0
		（2）部、省奖项	0
		（3）地市级奖项	0
		3.其他科技成果产出	0
		（1）新工艺（或新方法模式）	0
		（2）新产品（含农业新品种）	0
		（3）新材料	0
		（4）新装备（装置）	0
		（5）平台/基地/示范点	0
		（6）中试线	0
		（7）生产线	0

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4.研究开发情况	
		（1）小试	否
		（2）中试（样品样机）	否
		（3）小批量	否
		（4）规模化生产	否
	人才引育	1.引进高层次人才	0
		（1）博士、博士后	0
		（2）硕士	0
		2.培养高层次人才	3
		（1）博士、博士后	1
		（2）硕士	2
		3.培训从事技术创新服务人员（人次）	0
		4.是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1.开放共享仪器设备数（台/套/只等）	0
		2.科研仪器设备利用率（%）	0
		3.孵化科技型企业（个）	0
		4.转化科技成果（个）	0
效果类指标	经济效益	1.新增产值（万元）	0
		2.新增销售（万元）	0
		3.新增出口创汇（万美元）	0
		4.新增利润（万元）	0
	社会效益	1.新增税收（万元）	0
		2.新增就业人数	0
		3.就业培训（人次）	0
		4.带动农民增收（万元）	0
		5.培训和指导科技服务（人次）	0
		6.新增产业带动情况	0
		7.技术集成示范（项）	0
		8.建立示范基地（亩数）	0
		9.节约资源能源	0
		10.环保效益	0
其他需要说明的情况			

六、承担单位或研究人员分工

马旭东：项目负责人，制定项目研究方案和计划，负责岩爆预测技术研究；
袁卓亚：负责制定项目研究方案和计划，负责防控技术研发；
何明明：负责岩爆试验、岩爆理论判据、数字模拟与预报技术研究；
罗　波：负责深埋公路隧道围岩高地应力确定方法研究；
王　桢：负责深埋公路隧道岩爆支护结构体系研发；

中交第一公路勘察设计研究院有限公司
研究高地应力环境下岩爆孕育过程及相关岩体破裂机制，再现高地应力环境下岩爆隧道破坏过程，探明高地应力作用下隧道岩爆发展过程及破坏模式；开展深埋公路隧道岩爆预测及不同地应力条件对深埋公路隧道岩爆的影响研究。通过建立不同工况下隧道开挖数值模型，结合提出的岩爆能量判定指标，研究了高地应力环境下隧道各个建设方案对岩爆的影响；通过对高地应力环境下岩爆的不同支护结构参数的研究，确定了合理的支护结构体系；分析了不同应力条件下隧道开挖过程中围岩的力学与能量变化过程及岩爆发生的潜在区域。

西安理工大学
开展深埋公路隧道围岩数字钻试验，揭示旋切破岩机理，构建软岩旋切过程的力学响应模型，提出机-岩相互作用的理论关系及其应用；研究不同岩性硬岩的数字钻探参数随高地应力的演化规律；研究不同高地应力状态下硬岩的旋切受力特性，揭示高地应力下旋切机理；建立高地应力与硬岩数字钻探参数之间的解析模型，提出高地应力计算方法。研究岩石的能量耗散特征与耗散能的非线性演化规律，建立深部岩体岩爆的非线性能耗理论模型；提出临界耗散能的计算方法，研究岩石的旋切特性与能耗特征和岩爆倾向性的关联响应规律；研究基于硬岩旋切特性的岩爆倾向性与等级标准，建立基于数字钻探参数的岩爆倾向性预测模型，结合数值模拟结果验证所建立的岩爆倾向性判据与预测模型。

七、项目参加人员表

项目承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

参与单位（排序）：西安理工大学

项目负责人							
序号	姓　名	出生年月	工作单位	职称/职务	专　业	在项目中担任具体工作	签名
1	马旭东	1989-03	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	高工	岩土工程	项目负责人，制定项目研究方案和计划，负责岩爆预测技术研究	
主要研究人员							
2	袁卓亚	1971-09	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高级	桥梁与隧道工程	制定项目研究方案和计划，负责防控技术研发	
3	何明明	1986-03	西安理工大学	正高级	隧道工程	负责岩爆理论判据、数字模拟与预报技术研究	
4	罗波	1976-08	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高级	桥梁与隧道工程	负责深埋公路隧道围岩高地应力确定方法研究	
5	王桢	1986-04	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	高工	道路工程	负责深埋公路隧道岩爆支护结构体系研发	

八、信息表

<table>
<tr><td colspan="2">项目合同编号</td><td colspan="2">25-50K</td><td>密级</td><td colspan="2">/</td><td colspan="3">A：机密 B：秘密 C：内部</td></tr>
<tr><td colspan="2">项目名称</td><td colspan="8">深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术研究</td></tr>
<tr><td colspan="2">项目实施所在地</td><td colspan="2">陕西西安</td><td colspan="2">起止年限</td><td colspan="3">2026 年 3 月至 2028 年 3 月</td></tr>
<tr><td colspan="2">总 经 费</td><td colspan="2">69.8 万元</td><td colspan="2">厅 拨</td><td colspan="3">19.8 万元</td></tr>
<tr><td rowspan="4">第一承担单位</td><td>单位名称</td><td colspan="7">中交第一公路勘察设计研究院有限公司</td></tr>
<tr><td>所在地</td><td colspan="4">西安市雁塔区（区、市）</td><td>代码</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>通讯地址</td><td colspan="4">西安市高新区科技四路 205 号</td><td>邮编</td><td colspan="2">710000</td></tr>
<tr><td>单位性质</td><td colspan="4">（3）1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他</td><td>代码</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="4">参与单位</td><td>序号</td><td colspan="7">单 位 名 称</td></tr>
<tr><td>1</td><td colspan="7">西安理工大学</td></tr>
<tr><td>2</td><td colspan="7"></td></tr>
<tr><td>3</td><td colspan="7"></td></tr>
<tr><td rowspan="4">项目负责人</td><td>姓 名</td><td>马旭东</td><td colspan="2">性别（1）1.男 2.女</td><td>出生年份</td><td colspan="2">1989.03</td></tr>
<tr><td>学 历</td><td colspan="6">（1）1.研究生 2.大学 3.大专 4.中专 5.其他</td></tr>
<tr><td>职 称</td><td colspan="6">（1）1.高级 2.中级 3.初级 4.其他</td></tr>
<tr><td>联系电话</td><td colspan="2">18182655221
029-61321220</td><td>电子邮箱</td><td colspan="3">821719921@qq.com</td></tr>
<tr><td rowspan="2">项目联系人</td><td>姓名</td><td colspan="2">马旭东</td><td>性别</td><td colspan="3">男</td></tr>
<tr><td>联系电话</td><td colspan="2">18182655221
029-61321220</td><td>电子邮箱</td><td colspan="3">821719921@qq.com</td></tr>
<tr><td>项目组人数</td><td>5</td><td>高级</td><td>5</td><td>中级</td><td>0</td><td>初级</td><td>0</td><td>其他</td><td>0</td></tr>
<tr><td>主要研究内容（100 字以内）</td><td colspan="9">重点突破深埋公路隧道围岩岩爆安全防护难题，研发深埋公路隧道围岩力学性能原位测试技术，提出深埋公路隧道围岩高地应力确定方法；深埋公路隧道围岩应变型岩爆倾向性的判别准则与预测模型，深研发埋公路隧道岩爆支护结构体系与防控技术，最终形成深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控技术。</td></tr>
<tr><td>成果属性</td><td>A：新技术</td><td colspan="8">A：新技术 B：新工艺 C：新材料 D：新产品 E：软科学 F：装备 G：其他</td></tr>
<tr><td>成果形式</td><td>A：论文</td><td colspan="8">A：专著、论文 B：样机、样品 C：试验工程、产品 D：示范工程 E：产品 F：其他</td></tr>
</table>

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

1.合同执行过程中，乙方如需修改合同某项条款，应向甲方提出变更内容及理由的申请报告，经甲方审核同意后实施。未接到正式批准以前，双方仍须按原合同条款履行，否则后果由自行修改条款的一方负责。

2.乙方因任何主观或客观原因（如：与大纲评审内容有出入，挪用经费、技术措施或某种条件不落实等）致使计划无法执行而要求解除合同的，需取得甲方书面同意且应视不同情况，部分或全部退还所拨经费；出现上述情况的，甲方有权单方解除本合同且视不同情况要求乙方部分或全部退还所拨经费。

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

5.项目完成后，乙方必须按要求向甲方提交一套真实、完整、详细的技术资料及样机，并提出项目验收申请报告，由甲方审查后组织验收。

6.合同正本一式捌份，甲方单位伍份，承担单位叁份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：陕西省交通运输厅

负责人：（签字）　　2021年 3月27日

联系人：（签字）　　（公 章）

电　话：029-88869062

合同乙方：（承担单位）　中交第一公路勘察设计研究院有限公司

单位负责人：（签字）　　2021年3月29日

项目负责人：（签字）　　（公 章）

电　话：　029-61321220

财务负责人：（签字）

账 户 名：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

开户银行：农行西安科技二路支行

账　　号：26127101040000725

陕西交通科技项目科研诚信
承 诺 书

本单位承诺在科研项目实施过程中，遵守科学道德和科研诚信要求，严格执行《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》的规定和科技项目合同书约定，保证所提交材料的真实性，确保专款专用。如违背以上承诺，愿意承担相关责任，并同意主管部门将相关失信信息记入公共信用信息系统。

项目承担单位：（盖章）

项目负责人：

2016年 3 月 日

项目编号：25-50K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目

研究大纲

项目名称：深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术研究

申请单位：（盖章）

联 系 人：马旭东

电　　话：18182655221

陕西省交通运输厅制

2026年 3 月

应用技术、信息化类及软科学类
编写主要内容

一、项目研究的背景和必要性

提出的背景、研究目的、项目概括、市场需求前景或推广应用领域，达到的技术水平及在国民经济发展中的作用等。

“十四五”科技规划纲要明确指出，强化“深地”等前沿领域的国家战略科技力量。随着国家经济、科技和社会的高速发展，我国日益增长的能源与资源的刚性需求促使地下资源开发、地下基础建设以前所未有的速度向深部发展，深部岩体工程建设必将趋于常态化，在交通、能源、国防等国家建设中占有极其重要的地位，如国家正在实施的“一带一路”战略，川藏铁路等“交通强国建设工程”，如图1所示。习总书记指出：“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”[1]。“深地”探测开发作为国家重大发展战略日前已被提上了日程[2-3]，伴随着国家一系列重大深部工程的陆续开工建设，解决“深地”科学中的岩石力学问题迫在眉睫[4-7]。深部工程建设时的强扰动，往往引起深部岩体发生岩爆、板裂、岩体分区破裂等深部高能级动力灾害问题，严重威胁着深部工程建设的安全与稳定[8-11]。随着埋深的增加和地应力水平的增高，在交通隧道与地下矿山的施工过程中开挖诱发的岩爆灾害更加突出和严重[6-7]。**鉴于岩爆灾害的巨大危害性和复杂性，岩爆研究已成为岩石力学领域中的一个研究热点和难题，也是当前深部能源和资源开采以及深地科学研究中亟待解决的关键科学问题之一。**



图1 国家正在实施的“一带一路”战略，川藏铁路等“交通强国建设工程”

岩爆也被誉为一种地质“顽症”，是困扰岩石力学界的百年难题！随着“一

带一路”伟大构思和第二轮西部大开发战略的推进，穿越高地应力环境的隧道工程大量出现，由此带来了近些年在隧道开挖过程中岩爆问题呈现出频发的态势。岩爆是深部岩体中最为突出的动力灾害，其力学机制十分复杂，一般认为是在高地应力条件下地下工程开挖过程中，硬脆性围岩因开挖卸载导致洞壁应力分异，岩体中聚积的弹性应变能突发释放而引起的一种动力破坏灾害[12,13]，如川藏公路上的二郎山隧道[14]、邵阳至怀化公路上的雪峰山隧道[15]、台州至金华高速公路上的苍岭隧道[16]、雅安至西昌高速公路上的大相岭公路隧道[17]、西安至安康高速公路上的秦岭终南山隧道[18]、新建的拉林铁路线上的巴玉隧道[19]、成兰高速铁路线上的平安隧道等诸多长大深埋隧道工程均发生了强烈岩爆灾害[20]，严重威胁到施工中的机械和人员安全。天生桥水电站引水隧洞[21]、太平驿电站引水隧洞[22]、锦屏二级水电站施工排水洞和巴基斯坦 NJ 水电站引水隧洞（图 2）等相继发生严重岩爆[23,24]。由于岩爆灾害具有普发性、易发性和突发性的特征，目前人们对于其发生机制、判定标准及控制方式仍没有一个统一的认识，还存在很大的争议，对岩爆从孕育到发生的整个过程地准确阐释及有效地预测防控仍是一大难题。岩爆已成为制约深部地下工程进一步发展的技术瓶颈问题，给相关工程的建设带来了巨大的困扰。因此，开展深埋公路隧道岩爆发生机制及预警与控制技术的研究，具有十分重要的现实意义。



图 2 交通隧道、水电硐室与地下矿山的施工过程中开挖诱发的岩爆灾害

川藏铁路雅安至林芝段位于四川省西部和西藏自治区东南部，翻越横断山脉，跨七江、穿八山，沿线雪山叠嶂、河流纵横、山高谷深、地势陡峻，受板块活动和隆升影响，地质极为复杂、生态脆弱、建设条件恶劣、工程艰巨。线路自既有成雅铁路雅安站引出，经天全、泸定、康定、雅江、理塘、巴塘、白玉跨金沙江进入西藏自治区境内，经贡觉、昌都、波密至拉林铁路林芝站，全长 1017 km，其中海拔 3000m 以上线路约 732 km,占比 71.8%。新建桥隧总长 954.6 km，桥隧比 93.7%。采用时速 120～200 km 客货共线双线电气化铁路标准。川藏铁路地处

青藏高原南部印度板块与亚欧板块挤压造山带，平均海拔 3000m 以上，具有“四高”（高海拔、高地热、高地应力、高地震烈度）、“四活跃”（活跃的新构造运动、活跃的地热水环境、活跃的外动力地质条件、活跃的岸坡浅表改造过程）的环境特点，具有高海拔、大高差、板块运动强烈、地质灾害多样且频发、自然环境恶劣等显著工程特征，且建设工期紧、任务重、施工技术难度极大，建设难度世所罕见，被称作为“最难建的铁路”和“最难天路”。川藏铁路“显著的地形高差”、“强烈的板块活动”、“复杂的岩性构造”和“极端的气候条件”等宏观特征，造就了川藏铁路隧道工程岩爆等诸多地质灾害，使得隧道建设面临严峻挑战。



图 3 新建铁路川藏线雅安至林芝段平纵断面示意图

虽然，岩爆灾害越来越受到关注，国内外学者也开展了深入研究，但由于岩爆问题的复杂性，现有理论对岩爆的形成机制及预警和控制技术仍存在很大的争议，人们对于岩爆的发生机制、判定标准及控制方式还没有一个统一的认识，对岩爆从孕育到发生的整个过程进行准确地阐释，进而有效地对其预测防控仍是一大难题。因此，本项目针对原位测试技术—岩爆倾向性预测—岩爆支护结构体系与防控三方面，**研发深埋公路隧道围岩力学性能原位测试理论与技术，建立深埋公路隧道岩爆灾害预测方法，开发深埋公路隧道岩爆支护结构体系与防控技术，实现深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控。**研究成果可直接服务于引汉济渭秦岭隧洞、川藏铁路、宝鸡至坪坎高速公路隧道、“一带一路”沿线深埋隧道等工程。

二、前期科研及工作基础

1.对项目领域国内外（省内外）研究现状，研究水平和发展趋势的分析和评价（应进行查新分析，主要分析本项目的技术领域发展状

况和水平，有那些技术尚未解决，需要这次攻克的技术难点）

1.1 基于数字钻技术的岩体力学参数测试理论研究现状

随着我国国民建设的发展，各种岩体工程如边坡工程、洞室工程、基础工程等工程问题日益增多。如何快速准确获取各种工程岩体力学信息是各类岩体工程设计与施工的关键问题。目前获取岩体力学参数主要有：一、经验类比法；二、现场试验。经验类比法的盲目性、非科学性日益严重，使所得的力学指标严重"失真"；而现有的现场试验方法非常耗时费力（一般几周到几个月）且非常昂贵（一组参数就需要十几万到几十万不等），代表性还很差。

因此，研究人员寻求引入跨学科技术手段，旨在提高原位测试方法获取岩体力学参数的精度与效率，以保证工程施工的安全开展。工程钻孔作为岩土工程勘探的常规手段，用于完成锚杆、桩基施工、灌浆、爆破等施工工序等[25,26]，通常岩体结构与力学特征发生变化造成钻进参数波动显著，这种响应关系表明钻井信息与岩体性质间存在潜在的联系[27,28]。受此启发，一种根据钻进响应参数确定岩体力学参数的原位测试方法应运而生[29]。根据剪切面平衡方程，Merchant[30,31]建立了半经验金属切削模型。Nishimatsu[32]根据岩屑的形成提出了第一个岩石切割模型，结果表明岩石破碎程度取决于岩石的抗剪强度。然而，该模型无法描述岩石在切削过程中发生的韧性破坏。以上模型均参考了弹性力学有关理论，对岩石切削受力状态假设为单一平面上的线性问题[33]，这种简化值得商榷。此外，旋转切削过程包含贯入破碎与旋转切碎两种破岩方式，伴随有摩擦与碾碎等微小破坏，与之相关的表征指标仍不明确[34]。综上所述，现有对钻进过程中岩石破碎的研究应以机-岩钻井响应与岩石的破坏机理为重点[35,36,37]。在此基础上，Teale[38]最早根据切削能量平衡的角度入手建立了钻进响应模型：定义了钻进比能参数[27]，计算为钻井机械所做机械功之和，用于评价岩体可钻性。陆续有学者根据钻进比能提出了多种岩体工程指标的经验评价方法，如脆性[39]、不连续性[40]、各向异性[41]、渗透性[42]等。然而，钻进比能考虑的钻井机械输出功并不完全消耗于岩石的破碎行为，还包含了钻井过程中复杂的摩擦接触、钻井液耗能与转化热能，导致破岩能耗被高估[43]。因此，需要排除原位因素对钻进比能的影响，建立准确的岩体评价指标。

1.2 岩爆能量机制方面的研究现状

著名岩石力学学者Brown指出："岩爆的成功解决代表着岩石力学的发展和重

大突破”。近年来，国内外学者从刚度、断裂、损伤及非线性等不同科学角度对岩爆机制开展了深入研究，特别是蔡美峰、谢和平、何满潮、冯夏庭、伍法权、唐春安、李夕兵、李天斌等国内学者的研究团队获得的研究成果极具有实用性和创新性。但是，由于岩石所赋存的地质环境和施工因素的影响，岩爆的机理极其复杂属于世界性难题[44]。

一些学者从能量积聚与释放角度研究了岩爆的破坏行为和孕育过程，如邱士利等[56]从局部能量释放率基本理论出发，提出了相对能量释放指数评估岩爆倾向性，并将此指标成功应用于锦屏二级水电站引水隧洞。宫凤强等[45,57]开展了不同应力水平下的单轴压缩一次加卸载试验，研究了深部岩体应变型岩爆的线性能量驱动机制，并建立了岩石岩爆倾向性判据。苏国韶等[79, 80]利用真三轴岩爆试验系统研究了不同荷载影响因素对岩爆的影响，揭示了岩爆发生的能量机制。梁鹏等[53]分析了岩爆宏观破坏过程能量积聚、释放规律及能量的时间效应，探讨了能量演化规律，揭示了巷道岩爆发生的能量机制。李浪等[81]开展了深部岩体开挖卸荷诱发应变型岩爆试验，研究了深部岩体能量耗散与转移规律。严鹏等[82]从动力扰动对岩爆孕育的影响、岩爆能量释放及耗散等方面总结了岩爆动力机理。何明明等[77]研究了岩石的能量耗散非线性特征，建立了岩石的非线性能量耗散模型。可见，从能量耗散角度出发，岩爆的孕育过程可分为：能量积聚、能量耗散和能量释放三个过程，研究成果对工程实践具有非常重要的指导意义。

然而，岩爆孕育过程中弹性应变能定量地转化为耗散能的非线性行为难以捕捉，且岩爆孕育过程中非线性能耗规律和理论研究尚不够深入。因此，**研究岩石岩爆的能耗特征，揭示非线性能耗规律，构建非线性耗散理论模型**，为岩爆前兆、发生可能性的确定提供合理的理论支撑，对岩爆的认识具有重要的理论意义和科学价值。

1.3 岩爆判据方面的研究现状

岩爆判据属于岩爆研究中最关键的科学问题之一[3]。岩爆判据目前主要分为单指标经验判据方法和多因素经验评价指标及系统方法[44, 62]。其中前一类判据分为两种形式：(1) 从岩石本身的力学性质出发，研究岩石材料的岩爆倾向性；(2) 结合工程现场应力条件对岩爆发生等级进行判别。由于考虑的方面各有侧重，这两种判据形式的研究均处于不断发展过程中[56]。在研究岩石材料的岩爆倾向性时，有的判据主要考虑应力或应变因素，例如能量储耗系数和脆性系数[57, 77]。由于岩爆作为一种动力现象，伴随着能量的积聚与释放，因此，从能量角度研究岩

爆倾向性判别准则具有其合理的一面，这方面代表性判据主要包括剩余弹性能指数、能量释放指数、能量冲击性指数和弹性应变势能等能量指标[45, 56-58, 62, 77]。由于目前缺少对岩石试样破坏后岩爆倾向性程度的具体划分标准，经常存在现有判据的判别结果跟岩石破坏后岩爆倾向性状态互相不印证的现象[57]。许多岩爆倾向性评价指标无法定量地刻画岩爆倾向性的实际程度，并且这些指标试验困难，各个指标难以统一，更难以直接原位测量[58,62, 78]。因此，何明明等[77]建立了数字钻探参数与剩余弹性能指数之间的经验关系，可现场判断岩石材料的岩爆倾向性，但是该方法具有一定的经验性，不能直接预测深埋隧道岩爆倾向性，**亟需提出可原位测量的岩爆倾向性评价指标，建立岩爆倾向性的判别准则与预测模型，**对于深部岩体岩爆的超前预测具有重要的科学意义与工程价值。

1.4 岩爆预测方法方面的研究现状

岩爆孕育过程的现场原位综合观测是基于数字钻孔摄像、声波测试、位移计和滑动测微计、声发射等综合监测手段[83,84]，通过地质环境、岩体结构、数值模拟、测试钻孔布设方案等设计分析，实施直接、实时、原位、连续地获取围岩裂隙、损伤、变形和能量释放率的岩爆灾害原位观测方法。对于监测孔的布置，其基本原则是覆盖岩爆风险较大的区域获取岩体力学响应全过程的综合原位信息，从而对岩爆进行预测[46]。岩爆孕育过程现场实时监测，包括应力、扰动应力、微震、声发射、电磁辐射等监测，其中微震监测是岩爆最为广泛的监测方法[4,44]，国内外很多研究团队研发了基于微震监测系统的岩爆预警系统，推动了岩爆预警技术的发展，并将技术成功应用于国内外多个隧洞工程。

还有一些学者基于试验获得的各种指标与原位信息，利用理论与经验方法、数值模拟与人工智能等方法预测岩爆的倾向性及发生风险性[51, 62, 85-88]，如Huang等[51]利用卷积神经网络(CNN)和深度学习技术开发了一种确定地下矿井微震源位置的新方法。Liang等[85]利用扩展MABAC的方法评估复杂环境下岩爆发生的风险性。陈炳瑞等[86]提出了微震信号递归STA/LTA-BP神经网络综合识别方法，建立了基于PTP高精度时间同步策略的速度模型数据库速配微震源定位算法，实现了综合集成高精度智能微震监测技术。Xu等[87]通过层次分析法和熵权理论计算主客观权重，综合确定了各个指标的权重系数，构建了应变型岩爆组合权重-理想点法预测分析模型。吴顺川等[88]基于概率神经网络与主成分分析法建立了岩爆的间接预测方法。这些技术不仅对预测岩爆的发生具有重要意义，而且推动了岩爆预测、预警朝着自动化与智能化方向快速发展。**然而，目前报道的勘察方法与**

岩爆判据无法很好的融合，在深部工程岩体的勘察过程中难以实现岩爆倾向性的直接预测。

近年来，随钻监测技术的飞速发展为超前探测岩体力学特性提供了新的途径。国内外学者采用随钻监测技术获取岩体几何特征及其力学参数，相关研究取得了丰富成果，特别需要提到的是，蔡美峰、李术才、谭卓英和岳中琦等学者的研究团队对随钻监测技术在岩体工程的应用进行了多年研究，研究成果极具有创新性。其中岳中琦[25]利用随钻监测技术有效地测量了岩石的单轴抗压强度及结构面的产状和平整度，并成功应用于实际工程。Zhang等[89]分析了各种岩性岩体的钻进参数的变化规律，提出了基于随钻监测技术的岩性分类方法。王玉杰等[90]开展了不同强度等级完整岩石的室内数字钻进试验，研究了岩石单位体积研磨特性，提出了单轴抗压强度的预测模型。王琦等[91, 92]研发了多功能真三轴岩体钻探测试系统，实现了岩层界面准确识别、岩体等效力学参数实时测试和破碎岩体注浆效果的定量评价。曹瑞琅等[93]通过解译钻进数据，定量评价了岩体完整性，提出了用于表达岩体完整性的新指标—钻进过程指数。申请人所在研究团队利用室内数字钻探仪[71-72]，研究了岩体的旋切机理 [71,74, 94-96]。团队于2016年研发了XCY-1型岩体力学参数现场数字钻探仪（见图4），团队于2019年研发了便携式数字钻探仪（见图4），提出了岩石软硬程度、结构面和岩体基本质量的预测方法[71]，构建了岩石旋切强度与普通强度参数之间的理论关系（见公式（1）），建立了基于数字钻探技术的岩体力学参数的确定方法[47, 71-74, 78, 97, 99]。数字钻探技术能够成功获取岩体的力学参数，这也为深部岩体力学性质及岩爆研究提供了新的思路。在岩爆的孕育演化过程中深部岩体的力学性质随之发生演化[4]，以至于岩石旋切特性在岩爆孕育过程中也会发生演化。基于此力学现象，申请人基于数字钻探技术初步提出了硬岩岩爆倾向性量化判据及其预测方法[47, 78]，但是深部高地应力下硬岩的旋切机理仍不清楚。因此，**研究高地应力状态下岩石旋切特性以及数字钻探参数相互之间关系，揭示高地应力下硬岩的旋切机理，建立岩爆倾向性的预测模型**，对岩爆的认识及其预测研究具有重要的理论意义与工程应用价值。

$$\frac{\sigma_c}{S_c}=\frac{\sin(\alpha+\theta)\cos\varphi}{(\tan\alpha+\tan\varphi')(1-\sin\varphi)}\frac{(1+\tan\varphi\tan\varphi')[\cos(\varphi'-\varphi)-\sin^2(\varphi'-\varphi)+\sin(\varphi'-\varphi)]}{\cos(\varphi'-\varphi)} \tag{1}$$

式中σ_c为岩石单轴抗压强度，φ为岩石内摩擦角，φ'为旋切过程中岩石压缩区的摩擦角，S_c为旋切强度，α为钻头几何参数，θ为岩石的摩擦系数。

1.5 当前岩爆预测研究中存在的问题

近年来，岩爆灾害预报与防护等方面研究取得了可喜成果，为本项目实施提供了宝贵的研究思路，但存在以下几方面问题：

① 目前报道的勘察方法与岩爆判据无法较好的融合，缺乏可原位测量的岩爆倾向性的评价指标及其预测模型，以至于在深部工程岩体的勘察过程中难以实现岩爆倾向性的准确预测。

② 深部高地应力条件下岩爆岩石的旋切机理仍然不清楚，尚未建立岩爆岩石的数字钻参数与高地应力之间的解析关系。

③ 对岩爆倾向性与岩石力学性质之间的关联机制缺乏深入认识，尚未建立基于深部硬岩旋切特性的岩爆倾向性预测模型。

因此，本项目研究深部高地应力下岩爆岩石的旋切特性，研发深埋公路隧道围岩力学性能原位测试理论与技术，建立深埋公路隧道岩爆灾害预测方法，开发深埋公路隧道岩爆支护结构体系与防控技术，实现深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控，可直接应用于深埋公路隧道、矿业开采等深部工程建设中，具有广阔应用前景。



图 4 2016 年研发的现场数字钻探设备和 2019 年研发的便携式数字钻探仪

2.项目前期科研及现有工作条件（项目的支撑条件，过去相关研究的工作基础，获奖情况，现有的试验手段（设施.设备）.研究人员情况及协作条件等）

2.1 项目前期科研

近年来，本研究团队在《International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences》、《Rock Mechanics and Rock Engineering》、《Journal of Petroleum Science and Engineering》、《岩石力学与工程学报》、《岩土力学》等期刊发表论文 60

余篇，其中 SCI 论文 50 余篇；申报国家专利 25 项；准备工作情况如下：

（1）岩石的旋切特性与旋切钻进理论模型

开展了不同旋切钻进条件下的岩石数字钻探试验，分析了钻头旋切受力特性，研究了旋切钻进过程中岩石压缩区的受力机理，获得了给进力和扭矩力随每转进尺的变化规律；推导了机械运行参数与响应参数间的数学关系，建立了给进力和扭矩力与岩石强度参数之关系的理论模型，提出了岩石单轴抗压强度的现场确定方法，并且通过现场试验验证了理论模型的可靠性。部分研究成果发表在 SCI 收录期刊《Journal of Petroleum Science and Engineering》上，Advanced prediction for field strength parameters of rock using drilling operational data from impregnated diamond bit （部分成果见图 5）。本项目基于岩石旋切特性提出岩爆判据和预测模型是前期工作的继续和提高。上述研究为完成本项目中高地应力下岩石旋切机理研究奠定了良好的基础。

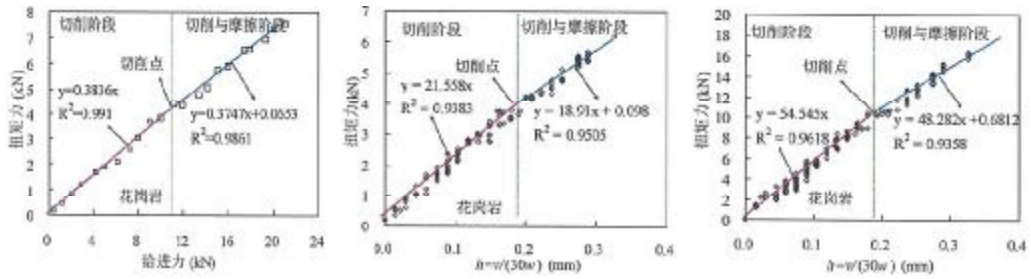


图 5 运行参数与响应参数间之间的关系（注：v 为钻速，w 为转速，h 为每转进尺）

（2）基于数字钻探技术的预测岩石力学参数的深度人工智能模型

基于随机汇池网络和 softmax 损失函数建立了深度学习的人工智能模型（Deep convolutional neural network, DCNN，如图 6），提出了融合 DCNN 和数字钻探技术的确定岩石强度参数的计算方法（如图 7），该方法已经被应用于引汉济渭大河坝水利枢纽工程，研究成果发表在岩石力学与采矿领域顶级期刊《International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences》上，Deep convolutional neural network for fast determination of the rock strength parameters using drilling data，得到了 Candan Gokceoglu 教授的高度认可："In fact, the subject is hot topics in all research areas throught the world. Especially, deep learning and CNN are extremely important for rock mechanics and rock engineering. I believe that these artificial intelligence methods will open new horizons to rock engineering discipline."根据申请人建立的岩石力学参数与旋切参数之间的关系，该研究成果为高地应力下数字钻探参数的数据处理提供了方法。

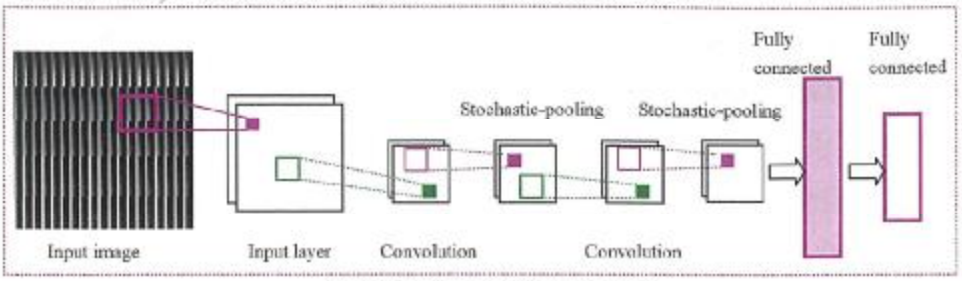


图 6 深度学习的 CNN 结构图

（3）基于数字钻探技术的节理岩体力学参数确定方法研究

团队开展了节理岩体的数字钻探试验，研究了钻能与非连续频率和 RQD 之间的关系，提出了基于数字钻探技术获取节理岩体变形模量和抗压强度的经验方法，并应用于引汉济渭大河坝工程，该研究成果发表在岩石力学与采矿领域顶级期刊《International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences》上，An empirical method for determining the mechanical properties of jointed rock mass using drilling energy，2019，116：64-74（部分研究成果见图 8），得到期刊编辑的高度评价："The topic is of significant interest to the readership of International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, I find it……"。并且获得陕西省水力发电工程学会第六届青年优秀学术论文一等奖。应变型岩爆大多发生在完整岩石，该研究成果为确定节理岩体和完整岩石的分布提供了技术手段，并且为潜在岩爆区域位置的超前预测奠定了基础。

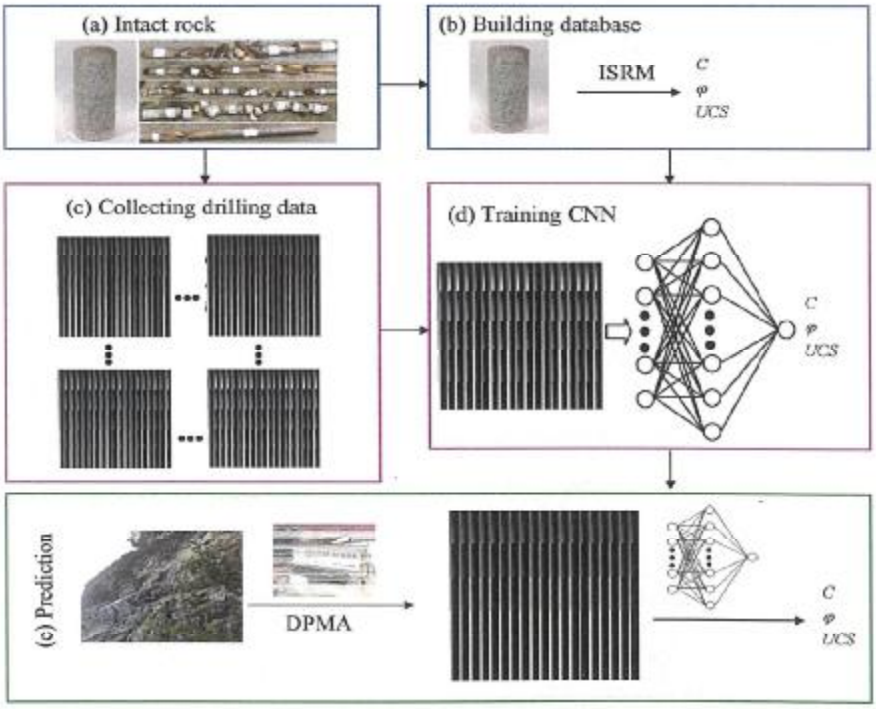


图 7 深度学习的 CNN 计算框架图

（4）岩石能耗特征方面的研究

从 2011 年至今，本研究团队一直致力于岩石能耗特征的研究，主要研究了荷载幅值、加载频率、应力路径、应力水平、含水率等对岩石的能耗特征的影响，揭示了岩石的能耗机理，获得了岩石能量耗散的非线性规律，并且建立了非线性能量耗散模型，相关研究成果发表在《Rock Mechanics and Rock Engineering》、《Journal of Petroleum Science and Engineering》等 SCI 收录的期刊上，另外也有一些成果发表在《岩石力学与工程学报》、《固体力学学报》、《岩土力学》和《煤炭学报》等国内权威期刊上。部分代表作如下：

[1] Mingming He*, Bingqian Huang, Caihui Zhu, Yunsheng Chen, Ning Li. Energy Dissipation-Based Method for Fatigue Life Prediction of Rock Salt[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51: 1447-1455.

[2] Mingming He*, Ning Li, Bingqian Huang, Caihui Zhu, Yunsheng Chen. Plastic Strain Energy Model for Rock Salt Under Fatigue Loading[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2018, 31(3): 322-331.

[3] Yang Beibei, He Mingming*, Chen Yunsheng. Experimental study of nonlinear damping characteristics on granite and red sandstone under the multi-level cyclic loading-unloading triaxial compression[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13: 72.

[4] Mingming He*, Yunsheng Chen, Ning Li. Laboratory measurements of the mechanical damping capacities in partially saturated sandstone[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12: 444.

[5] 何明明*，陈蕴生，李宁，朱才辉. 单轴循环荷载作用下砂岩变形特性与能量特征[J]. 煤炭学报，2015, 40(8): 1805-1976.

[6] 何明明*，陈蕴生，韩铁林，余朝，韩康. 不同应力路径下砂岩能耗特征的研究[J]. 岩石力学与工程学报，2015, 34(s1)：2632-2638.

[7] 何明明*，李宁，陈蕴生，朱才辉. 循环荷载下软岩阻尼行为的试验研究[J]. 固体力学学报，2016，37(1): 74-82.

[8] 何明明*，李宁，陈蕴生，朱才辉. 不同循环加载条件下岩石阻尼比和阻尼系数研究[J]. 岩土力学，2017, 38(9): 2531-2538.

[9] 何明明*，李宁，陈蕴生，朱才辉. 分级循环荷载下岩石动力学行为试验研究[J]. 岩土力学，2015，36(10)：2907-2913.

[10] Wang Haoteng, He Mingming*, Pang Fan, Chen Yunsheng, Zhang Zhiqiang. Energy dissipation-based method for brittleness evolution and yield strength determination of rock[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021, 200: 108376.

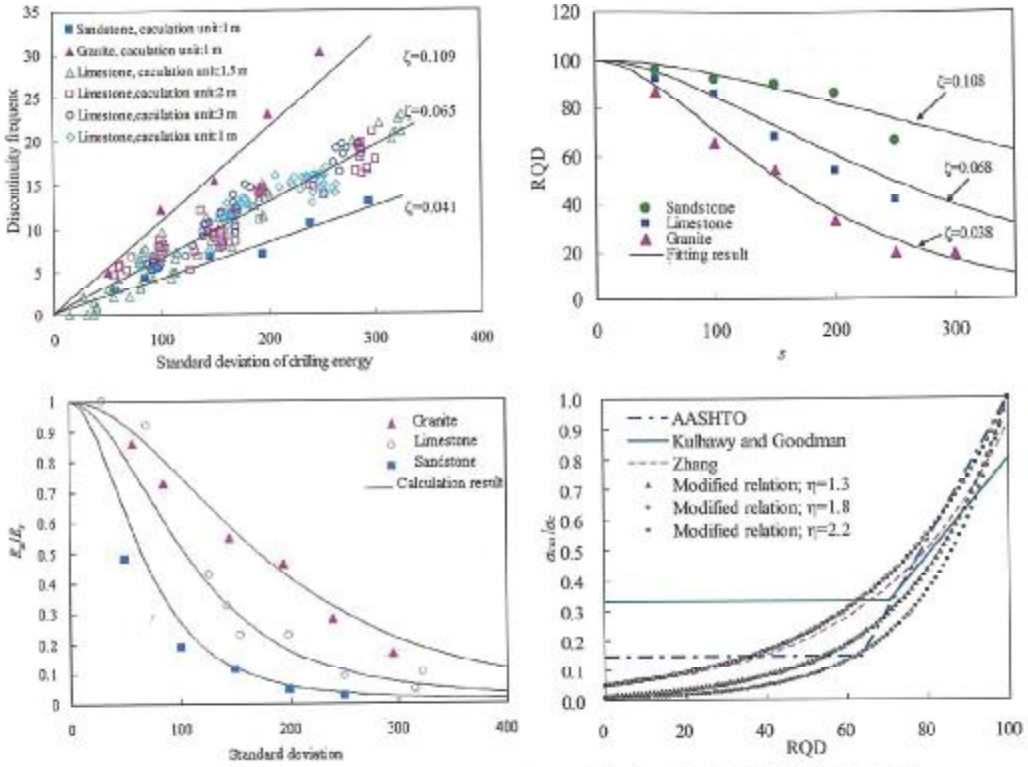
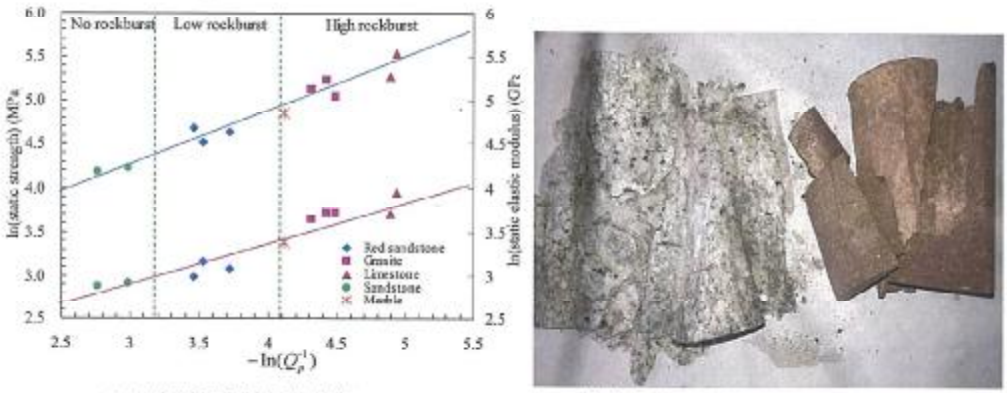


图 8 节理岩体非连续频率和 RQD 与强度参数和变形参数之间的关系

（5）岩爆判据方面的研究

研究团队开展了岩石的单轴压缩加卸载实验，研究了花岗岩、大理岩、灰岩、砂岩和红砂岩的能耗特性，获得了峰值能耗与抗压强度和弹性模量之间的关系，并利用噪音分贝、高速摄像等测试技术，获得了岩样破裂及运动特征、声学特征、噪音分贝、岩片特征和远场弹射质量等物理因素，研究各种岩石的岩爆倾向性，将岩爆划分为高、低和无 3 个等级，部分成果见图 9。

为了超前预测岩石材料岩爆倾向性，建立了岩石内摩擦角与数字钻参数之间关系的解析模型，构建了内摩擦系数与剩余弹性能指数之间的关系，通过室内三轴试验研究了岩石力学参数与剩余弹性能指数之间的相关性，提出了基于数字钻探技术的岩石材料的岩爆倾向性的超前预测方法。结果表明：在不同围压状态下，岩石的剩余弹性能指数与弹性模量、抗压强度均呈线性正相关关系；泊松比与剩余弹性能指数呈线性负相关关系；预测的岩石岩爆倾向性与室内试验结果基本一致，从而验证了该方法的可靠性（见表 1）。



（a）岩爆倾向性量化等级　　（b）花岗岩和红砂岩的岩爆破坏模式

图 9 岩爆倾向性量化等级及破坏模式

表 1 基于数字钻技术的岩石力学参数的预测结果

岩石	σ_c (MPa)	φ (°)	φ_{DS} (%)	室内试验 A_{ESI}(kJ·m^{-3})	预测 A_{ESI}(kJ·m^{-3})	φ' (°)	θ (°)	$\tan(\alpha+\theta)$	室内岩石岩爆倾向性	岩爆倾向预测
灰岩	52.64	33.7	1.89	32.31	1.60	46.68	47.01	1.06	No	No
板岩	93.01	41.6	-3.82	108.19	94.32	51.56	52.83	1.32	Low	Low
花岗岩	144.41	49.9	1.68	252.29	212.40	59.82	62.54	1.73	High	High
闪长岩	105.57	41.8	8.06	115.15	123.20	54.11	55.82	1.38	Low	Low
石英岩	98.90	41.3	-3.68	105.04	107.86	51.37	52.58	1.25	Low	Low
页岩	16.92	28.0	0.89	-6.34	-80.47	40.92	40.15	0.87	No	No

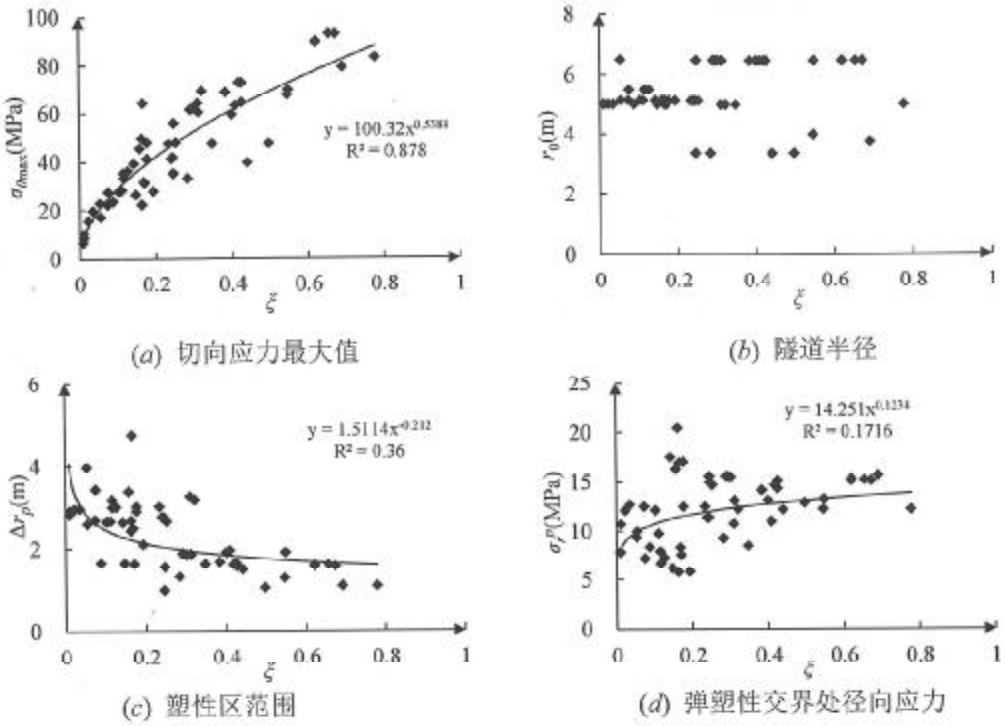
另外，依据隧道围岩的弹塑性分析，把围岩内的塑性区半径和弹塑性交界面处的径向应力引入岩爆判据，提出了一个新的隧道岩爆倾向性判别指数ξ，见公式（2），建立了考虑径向应力的岩爆判据。通过对比发生岩爆的实际工程的工程条件和参数ξ之间的关系，验证了参数ξ取值的合理性。通过对发生岩爆的大量工程实例划分岩爆等级，得到该判据的准确率达到了 80.36%，中强等级岩爆的准确率达到了 83.33%。并且研究了隧道岩爆倾向性判别指数ξ与围岩切向应力最大值、隧道半径、塑性区范围、弹塑性交界处径向应力之间的关系，如图 10 所示。该研究成果暂未公开发表，目前处于投稿阶段。

$$\xi = \frac{\sigma_{\theta\max}}{R_c} \cdot \frac{\sigma_{\theta\max}}{\sigma_r^p} \cdot \frac{1}{r_p} = \frac{\sigma_{\theta\max}^2}{r_p R_c \sigma_r^p} \tag{2}$$

式中σ_r^p表示围岩最大切向应力方向在弹塑性交界面处的径向应力，σ_r^p表示开挖完成后洞壁的最大切向应力，r_p表示塑性区半径。

表 2 径向应力判据

径向应力判据	无岩爆	弱岩爆	中岩爆	强岩爆
ξ	<0.13	0.13~0.28	0.28~0.63	≥0.63



(a) 切向应力最大值　(b) 隧道半径

(c) 塑性区范围　(d) 弹塑性交界处径向应力

图 10 径向应力判据指数与围岩切向应力最大值、隧道半径、塑性区和径向应力之间的关系

综上所述，本研究团队通过前期的研究积累，掌握了岩石旋切特性、岩爆倾向性的相关实验和分析手段。能熟练的应用数字钻探仪开展各种复杂环境下室内和现场的数字钻探试验，能够应用能量耗散理论、非线性理论对岩爆的非线性过程进行分析，对岩石的旋切特性和岩爆倾向性有了很好理解。并且**根据《工程岩体分级标准》GB/T 50218-2014，研发了 XCY-1 型岩体力学参数数字钻探评价系统，该系统能够利用数字钻探技术现场、快速、智能地确定岩石力学参数、坚硬程度、岩体结构面产状、岩体完整性与节理岩体力学参数**，这些研究工作的完成为开展本项目奠定了坚实基础。

2.2 现有工作条件

本研究团队从 2006 年至今共研制了 3 台适用于室内试验和现场试验的数字钻探设备，其中围岩力学参数室内测试系统已于 2010 年 9 月获得发明专利，可以在不同应力状态、不同转速、不同触探速度等条件下进行数字钻探试验。于 2016 年研发了 XCY-1 型现场岩体力学参数数字钻探仪，又于 2019 年研发了便携式室内和现场数字钻探仪，为本课题提供了可靠的硬件条件。申请人将根据本项目需要对触探仪作必要的改装，如加装位移传感器、水平方向压力传感器等，完全能满足本项目研究的需要。本研究团队可充分利用本团队所拥有的岩体力学参

数数字钻探仪、室内数字钻探仪、野外声波测试全套设备、三维激光扫描仪、数字全景钻孔摄像系统、大型室内地质力学模型三向荷载试验台及配套测试设备；最新研制的可进行裂隙大试样的岩石动三轴试验机等相关设备。

本项目合作单位西安理工大学岩土工程学科是85年批准的西部地区最早的岩土工程博士学科，学科学术氛围浓厚，学术研究积淀丰富，具有一批学术思想活跃、学术水平较高的学术带头人定期进行学术研讨、交流。西安理工大学土木建筑工程学院拥有省部共建西北旱区生态水利工程国家重点实验室、陕西省黄土力学与工程重点实验室、岩土工程实验室、工程结构实验室、建筑材料实验室、力学实验室、工程测量实验室等8个专业实验室和水利水电土木建筑研究设计院。学院获得4项全国科学大会奖；获国家科技进步奖3项，其中一等奖1项；获陕西省科技进步奖6项，其中一等奖2项。

本研究团队科研能力较强，多年来在岩石力学与工程、黄土力学与工程方面的理论研究，现场和室内试验等方面积累了丰富的经验，具有陕西省交通厅科技项目的能力。

3.参考文献

[1] 习近平. 为建设世界科技强国而奋斗——在全国科技创新大会、两院院士大会、中国科协第九次全国代表大会上的讲话[J]. 中国应急管理, 2016, 06: 4-8.

[2] 谢和平, 李存宝, 高明忠, 等. 深部原位岩石力学构想与初步探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(02): 217-232.

[3] 赵阳升. 岩体力学发展的一些回顾与若干未解之百年问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(07): 1297-1336.

[4] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究与探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161-2178.

[5] 冯夏庭, 肖亚勋, 丰光亮, 等. 岩爆孕育过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(04): 649-673.

[6] 冯夏庭, 张传庆, 陈炳瑞, 等. 岩爆孕育过程的动态调控[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1983-1997.

[7] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, (16): 2803-2813.

[8] 蔡美峰, 冀东, 郭奇峰. 基于地应力现场实测与开采扰动能量积聚理论的岩爆预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 1973-1980.

[9] Li X, Gong F, Ming T, et al. Failure mechanism and coupled static-dynamic loading theory in deep hard rock mining: A review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9 (004): 767-782.

[10] 何满潮, 刘冬桥, 宫伟力, 等. 冲击岩爆试验系统研发及试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1729-1739.

[11] 赵国彦, 李振阳, 梁伟章, 等. 岩爆预测的 Vague 集模型[J]. 矿冶工程, 2005, (16): 2803-2813.

[12] 何满潮, 钱七虎. 深部岩体力学基础:The basis of deep rock mechanics[M]. 2010.

[13] 徐林生. 二郎山隧道岩爆形成机理研究[C]. 全国公路隧道学术会议, 2007.

[14] 徐林生. 二郎山公路隧道岩爆特征与防治措施的研究[J].土木工程学报, 2005, (16): 2803-2813.

[15] 张志龙, 李天斌, 王兰生,等. 雪峰山隧道岩爆问题预测研究[J]. 煤田地质与探, 2005, (16): 2803-2813.

[16] 吴德兴, 杨健. 苍岭特长公路隧道岩爆预测和工程对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21):

3965-3965.

[17] 程向阳. 大相岭深埋隧道围岩稳定性及岩爆段快速施工研究[D]. 西南交通大学, 2010.

[18] 郭志强. 秦岭终南山特长公路隧道岩爆特征与施工对策[J]. 现代隧道技术, 2005, (16): 2803-2813.

[19] 王庆武, 巨能攀, 杜玲丽, 等. 深埋长大隧道岩爆预测与工程防治研究[J]. 水地质工程地质, 2016, 43(06): 88-94+100.

[20] 宋章, 袁传保, 杜宇本, 等. 成兰铁路某长大深埋隧道岩爆特征及成因机制[J].铁道工程学报, 2017, 34(10): 66-72.

[21] 张神生, 陆家佑. 天生桥二级水电站引水隧洞岩爆研究[J].水力发电, 1991, (10): 34-37+76.

[22] 周德培, 洪开荣. 太平驿隧洞岩爆特征及防治措施[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, (10): 34-37+76.

[23] 张文东, 马天辉, 唐春安, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞岩爆特征及微震监测规律研究[J].岩石力学与工程学报, 2014, 33 (2): 339-348.

[24] 鲁永华, 王水山, 李淼, 等. 巴基斯坦 N-J 水电站工程岩爆预警与防治[J]. 水利水电工程设计, 2018, 37(04): 1-3+27.

[25] 岳中琦. 钻孔过程监测(DPM)对工程岩体质量评价方法的完善与提升[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 1977-1996.

[26] 刘泉声, 邓鹏海, 毕晨, 等. 深部巷道软弱围岩破裂碎胀过程及锚喷-注浆加固 FDEM 数值模拟[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 4065-4083.

[27] Teale R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1965, 2: 57-73.

[28] Dahl F, Bruland A, Jakobsen PD, et al. Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 150-158.

[29] 岳中琦, 李焯芬, 罗锦漆, 等. 香港大学钻孔数字监测仪在土钉加固斜坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1685-1690.

[30] Merchant ME. Mechanics of the metal cutting process. I. orthogonal cutting and a type 2 chip[J]. Journal of Applied Physics, 1945, 16: 267-275.

[31] Merchant ME. Mechanics of the metal cutting process. II. plasticity conditions in orthogonal cutting[J]. Journal of Applied Physics, 1945, 16: 318-324.

[32] Nishimatsu Y. The mechanics of rock cutting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomech. Abstr, 1972, 9: 261-270.

[33] Evans I. A theory of the basic mechanics of coal ploughing[J]. Mining Research, 1962: 761-798.

[34] 屠厚泽, 高森. 岩石破碎学[M]. 北京: 地质出版社, 1990.

[35] 王琦, 高红科, 蒋振华, 等. 地下工程围岩数字钻探测试系统研发与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(02): 301-310.

[36] He MM, Li N, Zhang ZQ, et al. An empirical method for determining the mechanical properties of jointed rock mass using drilling energy[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 116: 64-74.

[37] 王浩, 覃卫民, 焦玉勇, 等. 大数据时代的岩土工程监测——转折与机遇[J]. 岩土力学, 2014, 35(09): 2634-2641.

[38] Kalantari S, Hashemolhosseini H, Baghbanan A. Estimating rock strength parameters using drilling data[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 104: 45-52.

[39] Munoz H, Taheri A, Chanda E. Rock cutting characteristics on soft-to-hard rocks under different cutter inclinations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 87: 85-89.

[40] He M, Zhang Z, Li N. Deep convolutional neural network-based method for strength parameter prediction of

jointed rock mass using drilling logging data[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(7): 04021111.

[41] He MM, Wang J, Yuan ZY, et al. Anisotropy on the ductile-to-brittle transition for rock in process of drilling[J]. Acta Geophysica, 2023, 71(5): 2107-2124.

[42] 时新磊, 崔云江, 许万坤, 等. 基于随钻测压流度的地层渗透率评价方法及产能预测[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(01): 140-147.

[43] Wang HT, He MM, Zhao JB, et al. Cutting energy characteristics for brittleness evaluation of rock using digital drilling method[J]. Engineering Geology, 2023, 319, 107099.

[44] 冯夏庭, 陈炳瑞, 张传庆, 李邵军, 吴世勇, 等. 岩爆孕育过程的机制、预警与动态调控[M]. 科学出版社. 2013.

[45] Gong FQ, Yan JY, Li XB, Luo S. A peak-strength strain energy storage index for rock burst proneness of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019, 117: 76-89.

[46] Li SJ, Feng XT, Li ZH, Chen BR, Zhang, CQ, Zhou, H. In situ monitoring of rockburst nucleation and evolution in the deeply buried tunnels of Jinping II hydropower station[J]. Engineering Geology. 2012, 137-138: 85-96.

[47] He MM, Zhang ZQ, Zhu JW, Li N, Li GF, Chen YS. Correlation between the rockburst proneness and friction characteristics of rock materials and a new method for rockburst proneness prediction: Field demonstration [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering. (评审中)

[48] Xiao YX, Feng XT, Feng GL, Liu H, Jiang Q, Qiu S. Mechanism of evolution of stress-structure controlled collapse of surrounding rock in caverns: A case study from the Baihetan hydropower station in China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2016, 51: 56.

[49] Xiao YX, Feng XT, Yu Y, Chen BR, Feng GL. Frequency fractal feature of microseismic events in the process of immediate rockburst in deep tunnel[C]. In: SINOROCK, June 18-June 20, Shanghai, China. 2013. 793-798.

[50] Ma TH, Tang CA, Tang SB, Kuang L, Yu Q, Kong DQ, Zhu X. Rockburst mechanism and prediction based on microseismic monitoring[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018, 110: 177-188.

[51] Huang LQ, Li J, Hao H, Li XB. Micro-seismic event detection and location in underground mines by using Convolutional Neural Networks (CNN) and deep learning[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, 81: 265-276.

[52] Gao, FQ, Kang HP, Yang L. An Experimental Investigation into the Strainburst Process Under Quasi-static Loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020, 53: 5617-5629.

[53] 梁鹏, 张艳博, 田宝柱, 姚旭龙, 孙林, 刘祥鑫. 巷道岩爆过程能量演化特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4):736-746.

[54] Wang HT, He MM, Pang F, Chen YS, Zhang ZQ. Energy dissipation-based method for brittleness evolution and yield strength determination of rock[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021, 200: 108376.

[55] 何明明, 李宁, 陈蕴生, 朱才辉. 不同循环加载条件下岩石阻尼比和阻尼系数研究[J]. 岩土力学. 2017, 38(9): 2531-2538.

[56] 邱士利, 冯夏庭, 江权, 张传庆. 深埋隧洞应变型岩爆倾向性评估的新数值指标研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2014, 33(10): 2007-2017.

[57] 宫凤强, 闫景一, 李夕兵. 基于线性储能规律和剩余弹性能指数的岩爆倾向性判据[J]. 岩石力学与工程学报. 2018, 37(9): 1993-2013.

[58] 张传庆, 卢景景, 陈珺, 周辉, 杨凡杰. 岩爆倾向性指标及其相互关系探讨[J].岩土力学. 2017, 38(5):

1397-1404.

[59] 李绍红, 王少阳, 朱建东, 李部, 杨戒, 吴礼舟. 基于权重融合和云模型的岩爆倾向性预测研究[J]. 岩土工程学报. 2018, 40(6): 1075-1083.

[60] 郭建强, 刘新荣. 强度准则与岩爆判据统一的研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2018, 37(s1): 3340-3351.

[61] 李夕兵, 宫凤强, 王少锋, 李地元, 陶明, 周健, 黄麟淇, 马春德, 杜坤, 冯帆. 深部硬岩矿山岩爆的动静组合加载力学机制与动力判据[J]. 岩石力学与工程学报. 2019, 38(4): 208-723.

[62] Zhou J, Li XB, Mitri HS. Evaluation method of rockburst: State-of-the-art literature review[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, 81: 632-659

[63] Feng GL, Feng XT, Chen BR, Xiao YX, Zhao ZN. Effects of structural planes on the microseismicity associated with rockburst development processes in deep tunnels of the Jinping-II Hydropower Station, China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 84: 273-280.

[64] Tang SB, Wang JX, Tang CA. Identification of Microseismic Events in Rock Engineering by a Convolutional Neural Network Combined with an Attention Mechanism[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021, 54: 47-69.

[65] Liu XX, Liang ZZ, Zhang YB. Liang P, Tian BZ. Experimental study on the monitoring of rockburst in tunnels under dry and saturated conditions using AE and infrared monitoring[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, 82: 517-528.

[66] Cheng GW, Li LC, Zhu WC, Yang TH, Tang CA, Zhang Y, Wang Y. Microseismic investigation of mining-induced brittle fault activation in a Chinese coal mine[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019, 123: 104096.

[67] Liu QS, Wu J, Zhang XP, Tang LX, Chen B, Li WW, Xu JL. Microseismic Monitoring to Characterize Structure-Type Rockbursts: A Case Study of a TBM-Excavated Tunnel[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020, 53: 2995-3013

[68] Lu CP, Liu Y, Zhang N, Zhao TB, Wang HY. In-situ and experimental investigations of rockburst precursor and prevention induced by fault slip[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018, 108: 86-95.

[69] Liu F, Ma TH, Tang CA, Chen F. Prediction of rockburst in tunnels at the Jinping II hydropower station using microseismic monitoring technique[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, 81: 480-493.

[70] Cai W, Bai XX, Si GY, Cao WZ, Gong SY, Dou LM. A Monitoring Investigation into Rock Burst Mechanism Based on the Coupled Theory of Static and Dynamic Stresses[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020, 53: 5451-5471.

[71] 何明明. 基于旋切触探技术的岩体力学参数预报研究[D]. 西安理工大学, 2017.

[72] He MM, Zhang ZQ, Ren J, Huan JY, Li GF, Chen YS, Li N. Deep convolutional neural network for fast determination of the rock strength parameters using drilling data[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019, 123: 104084.

[73] He MM, Li N, Zhang ZQ, Yao XC, ChenYS. An empirical method for determining the mechanical properties of jointed rock mass using drilling energy[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019, 116: 64-74.

[74] He MM, Li N, Zhu J, Chen YS. Advanced prediction for field strength parameters of rock using drilling operational data from impregnated diamond bit[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020, 187: 106847

[75] He MM, Huang BQ, Zhu CH, Chen YS, Li N. Energy dissipation-based method for fatigue life prediction of rock salt[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018, 51: 1447-1455.

[76] He MM, Li N, Huang BQ, Zhu CH, Chen YS. Plastic Strain Energy Model for Rock Salt Under Fatigue Loading[J]. Acta Mechanica Solida Sinica. 2018, 31(3): 322-331.

[77] He MM, Li N, Zhu J, Zhang ZQ, Zhu CH, Chen Y. Investigation of nonlinear energy dissipation and storage characteristics for evaluating rockburst proneness of granite and sandstone [J]. AIP Advances. 2020, 10, 095316.

[78] 何明明，杨贝贝，张志强，刘新星，李宁. 基于数字钻技术的岩石材料岩爆倾向性预测研究[J]. 中南大学学报(自然科学版). 2021, 52(08): 2736-2747.

[79] 苏国韶, 胡李华, 冯夏庭, 王金欢, 张晓帆. 低频周期扰动荷载与静载联合作用下岩爆过程的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2016, 35(7): 1309-1322.

[80] Su GS, Hu LH, Feng XT, Yan LB, Zhang GL, Yan SZ, Zhao B, Yan ZF. True triaxial experimental study of rockbursts induced by ramp and cyclic dynamic disturbances[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018, 51(4): 1027-1045.

[81] 李浪, 蒋海明, 陈显波, 罗中兴. 应变型岩爆模型试验及其力学机制研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2018, 37(12): 2733-2741.

[82] 严鹏, 陈拓, 卢文波, 谢良涛. 岩爆动力学机理及其控制研究进展[J]. 武汉大学学报. 2018, 51(1): 1-14.

[83] Li SJ, Feng XT, Wang CY, Hudson, JA. ISRM suggested method for rock fractures observations using a borehole digital optical televiewer[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2013, 46(3): 635-644.

[84] Li SJ, Feng XT, Hudson, JA. ISRM Suggested method for measuring rock mass displacement using a sliding micrometer[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2013, 46(3): 645-653.

[85] Liang WZ, Zhao GY, Wu H, Dai B. Risk assessment of rockburst via an extended MABAC method under fuzzy Environment[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2019, 83: 533-544

[86] 陈炳瑞, 冯夏庭, 符启卿, 王搏, 朱新豪, 李涛, 陆菜平, 夏欢. 综合集成高精度智能微震监测技术及其在深部岩石工程中的应用[J]. 岩土力学. 2020, 41(5): 1-10.

[87] Xu C, Liu XL, Wang EZ, Zheng YL, Wang SJ. Rockburst prediction and classification based on the ideal-point method of information theory[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, 81: 382-390.

[88] 吴顺川, 张晨曦, 成子桥. 基于 PCA-PNN 原理的岩爆烈度分级预测方法[J]. 煤炭学报. 2019, 44(9): 2767-2776.

[89] Zhang K, Hou RB, Zhang GH, Zhang GM , Zhang HQ. Rock drillability assessment and lithology classification based on the operating parameters of a drifter: Case study in a coal mine in China[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016, 49(1): 329-334.

[90] 王玉杰, 余磊, 赵宇飞, 曹瑞琅. 基于数字钻进技术的岩石强度参数测定试验研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2020, 42(9): 1659-1668.

[91] Wang Q, Qin Q, Jiang B, Li SC. Upper bound analytic mechanics model for rock cutting and its application in field testing[J]. Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, 73: 287–294.

[92] 王琦, 高红科, 蒋振华, 李术才, 江贝. 地下工程围岩数字钻探测试系统研发与应用[J]. 岩石力学与工程学报. 2020, 39(2): 301-310.

[93] 曹瑞琅, 王玉杰, 赵宇飞, 汪小刚, 和孙文, 彭林军. 基于钻进过程指数定量评价岩体完整性原位试验研究[J]. 岩土工程学报. 2021, 43(04): 679-687.

[94] 李赛, 李宁, 徐春杰, 刘乃飞. 类岩石材料的旋进式触探试验切削性质研究[J]. 东北大学学报. 2015, 36(5): 49-53.

[95] 李赛, 李宁, 宋玲. 岩石回转触探试验研究[J]. 水利学报. 2014, 45(S1): 116-123.

[96] 宋玲, 李宁, 李赛. 软岩的旋转触探参数与力学参数的内在关系研究[J]. 岩石力学与工程学报. 2011, 30(6): 1274-1282.

[97] He MM, Li N, Yao XC, Chen YS. A new method for prediction of rock quality designation in borehole using energy of rotary drilling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020, 53(7): 3383-3394 .

[98] 李宁，李骞，宋玲. 基于回转切削的岩石力学参数获取新思路[J]. 岩石力学与工程学报. 2015, 34(2): 323-329.

[99] He MM, Zhang ZQ, Zheng J, Chen FF, Li N. A New Perspective on the Constant m(i) of the Hoek-Brown Failure Criterion and a New Model for Determining the Residual Strength of Rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering. 2020, 53(9): 3953-3967.

三、实施方案

1．拟解决的关键问题（指对项目成果水平起决定作用的技术难点，或研究中能形成较强竞争力，具有自主知识产权的创新技术）

（1）深埋公路隧道围岩力学参数原位测试技术

深埋公路隧道围岩力学参数原位测试技术是是本项目的又一技术关键。由于深部岩体应变型岩爆的孕育过程是一个非常复杂的过程，该过程不仅与岩体所赋存的地质环境、高地应力、岩石的物理力学性质等有关，而且与开挖卸荷效应、外界动力扰动以及施工技术等有关，受这些因素的影响，在高地应力状态下深埋公路隧道围岩力学特性会发生变化。因此，开展围岩力学参数的原位测试，是获取真实力学响应与参数演化规律的关键手段，不仅为揭示深部岩体力学行为提供基础数据，同时为基于数字钻技术的岩爆倾向性预报提供必要的参数支撑，只有研究出深埋公路隧道围岩力学参数原位测试技术，本项目技术才具有可行性。

（2）基于数字钻技术的深埋公路隧道岩爆倾向性预报技术

基于数字钻技术的深部岩体岩爆预报技术是本项目的又一技术关键。近年来，岩爆判据与分级标准有所发展，直接促进了岩体工程在设计阶段和施工阶段的岩爆预警、预测技术的蓬勃发展。深部岩体岩爆判据与预测模型对岩爆超前预测提出了前所未有的要求，对于具有同一岩爆倾向性的岩石在不同地质环境下，开挖后岩体可能发生岩爆也可能不发生岩爆，表明岩爆预测对围岩真实力学状态具有较强依赖性。围岩力学参数原位测试获取的力学数据及其演化规律，为岩爆倾向性判别与预测提供基础支撑，并据此建立基于数字钻参数的预测方法，实现岩爆风险的定量评价与超前预报。因此，只有在岩爆倾向性预报技术研究上有所突破，本项目技术才具有可行性。

2．主要研究内容及实施方案（根据研究目的和考核目标合理地分解确定研究专题，突出重点，各专题研究内容要具体，避免交叉重

复）

（1）深埋公路隧道围岩力学性能原位测试技术研发。开展深埋秦岭天台山超长深埋隧道围岩数字钻试验，阐明了旋切过程中角片式钻头的压入破岩与切削破岩机制，揭示了旋切破岩机理，构建了硬岩旋切过程的力学响应模型，提出了机-岩相互作用的理论关系及其应用。揭示现场岩体钻进速度及转速对总锥尖阻力的影响规律，从理论上建立数字钻探荷载参数、运行参数与被切削的岩体材料的力学参数间的数学力学模型，建立并研制岩体力学参数的现场快速测试理论与技术。

（2）深埋公路隧道围岩高地应力确定方法。依托秦岭天台山超长深埋隧道工程等，采用压力机对完整硬岩试样加载至特定的应力状态，同时利用室内数字钻探设备旋切钻进岩石试样，研究不同硬岩的数字钻进随高地应力的演化规律；研究不同高地应力状态下硬岩的数字钻过程旋切受力特性，分析研究岩石旋切受力特点及钻进参数与高地应力之间的关系，揭示高地应力下数字钻过程的旋切机理；建立高地应力与硬岩数字钻进之间的解析模型，提出高地应力确定方法，并验证方法的可靠性。

（3）深埋公路隧道岩爆倾向性的判别准则与预测模型。开展各种岩性岩石的单轴、三轴压缩循环加卸载试验，研究岩石非线性演化规律；研究岩石的旋切特性与能耗特征和岩爆倾向性的关联响应规律。开展不同岩爆倾向性硬岩的室内和现场数字钻探试验，提出基于硬岩旋切特性的岩爆倾向性与等级标准；研究不同岩爆倾向性岩石的旋切特性，建立基于旋切特性的岩爆倾向性判别准则与预测模型。

（4）基于数字钻的深埋公路隧道岩爆灾害预报技术。研究高地应力环境下和临近隧道爆破环境下岩爆孕育过程及相关岩体破裂机制，再现高地应力环境下岩爆隧道破坏过程，探明临近隧道爆破环境下隧道岩爆发展过程及破坏模式；开展深埋公路隧道岩爆预测及不同地应力条件对深埋公路隧道岩爆的影响研究；根据深埋公路隧道围岩岩爆实例的围岩破裂模式、岩片特征和远场弹射质量等物理因素，结合数值模拟结果验证所建立的岩爆倾向性判据与预测模型

（5）深埋公路隧道岩爆支护结构体系与防控技术研发。通过建立不同工况下隧道开挖数值模型，结合提出的岩爆能量判定指标，研究高地应力环境下隧道各个建设方案对岩爆的影响。结合现场隧道施工，通过对高地应力和临近隧道爆破环境下岩爆的不同支护结构参数的研究，确定合理的支护结构体系，分析不同

应力条件下隧道开挖过程中围岩的力学与能量变化过程及岩爆发生的潜在区域，为高地应力和临近隧道爆破荷载环境下岩爆隧道的设计、施工等提供科学指导。

3．技术路线（包括研究技术方案和工作流程两部分。研究技术方案：应清楚表达拟运用的理论和方法，如调查研究，要表述调查的对象、范围、数量和调查材料（数据），取得的方法及手段；室内外试验，要拟定出试验的种类、规模、数量及相应的方案；理论研究与分析，要提出分析依据的理论和拟采用的分析方法，明确有否创新或改进的内容，要做到思路清晰，技术可行，能全面包括研究全过程的各个环节；研究工作流程反映各项研究工作之间的顺序和相互关系，可用树状框图表达）

本项目技术路线以依托工程为核心载体，构建“已建工程数据支撑—室内试验机理分析—在建工程现场验证”的一体化研究与应用路径。首先，依托宝坪高速公路秦岭天台山隧道施工阶段获取的数字钻测试数据、地应力测试成果及围岩响应监测资料，系统分析深埋高地应力条件下钻进参数与围岩力学性质及岩爆响应之间的关系，建立基础数据体系与初步参数模型；其次，针对现场观测结果，通过室内单轴、三轴及循环加载试验以及室内数字钻试验，在可控应力条件下对围岩强度特性、能量演化规律及钻进响应机制进行机理验证，实现现场数据与试验结果的相互印证与参数标定；在此基础上，依托川藏铁路雅安至林芝段在建工程开展现场测试研究，选择具有高地应力及岩爆风险的典型隧道区段布设数字钻试验断面，获取不同地质与应力环境下的原位响应数据，并与天台山隧道既有成果进行对比分析，对相关模型进行工程验证与修正。通过上述“数据获取—机理验证—工程验证”的递进式研究方法，将理论分析、试验研究与工程实践紧密结合，形成可在不同工程条件下推广应用的技术路线与实施方法，确保研究成果的可靠性、适用性及工程可落地性。

3.1 深埋公路隧道围岩力学性能原位测试技术研发

(1) 天台山隧道现场试验选取隧道埋深大于 800 m 的典型区段作为主试验段，并在同一隧道内选取埋深 500～800 m 区段作为对比段，以分析不同应力水平下钻进响应差异。在每个试验断面掌子面布设不少于 3 个数字钻测试孔，孔深

控制在 2.0 m 左右，以保证钻进过程中始终处于围岩原始应力影响范围内。测试孔布置于掌子面中心及两侧拱腰位置（距边墙约 1.0~1.5 m），以反映不同应力分布区域的响应差异。钻进测试采用不同规格钻头（8 mm、12 mm、16 mm）进行对比试验，系统采集钻进过程中的给进力、扭矩、转速、钻速及单位进尺能量等参数，并记录钻进过程中卡钻、振动突变及岩粉粒径变化等异常响应特征。针对该隧道高强花岗岩特性，重点分析钻进参数突变与围岩脆性破裂及岩爆前兆之间的关系。同时，结合依托工程已有地质编录、地应力测试数据及施工监测资料（如围岩收敛、初支受力及岩爆显现记录），建立“钻进参数—围岩强度—地应力水平—岩爆响应”多参数耦合数据库。现场试验按照“试验段选取—设备标定—多孔位测试—数据同步采集—开挖后对比验证—参数反演分析”的流程实施，每个断面重复测试不少于 3 次，确保数据稳定性与可重复性。最终形成适用于高地应力花岗岩隧道的数字钻原位测试方法及参数解释模型，实现围岩力学参数快速识别及岩爆风险现场判定。

川藏铁路雅安至林芝段现场试验选取沿线深埋隧道中具有高地应力特征的典型区段作为主试验段，并在同一工程中选取相对较浅埋深区段作为对比段，以分析不同应力水平及不同构造环境下钻进响应差异。其中，在埋深约 2000 m 处实测最小水平主应力约 38 MPa、最大水平主应力约 53 MPa，表明该区段处于极高地应力环境，可作为重点试验区段。在每个试验断面掌子面布设不少于 3 个数字钻测试孔，孔深控制在 2.0 m 左右，以保证钻进过程中始终处于围岩原始应力影响范围内。测试孔布置于掌子面中心及两侧拱腰位置（距边墙约 1.0~1.5 m），必要时根据围岩结构特征及局部应力集中情况在拱顶或边墙区域补充布孔，以反映不同应力分布及构造影响下的响应差异。钻进测试采用不同规格钻头（8 mm、12 mm、16 mm）进行对比试验，系统采集钻进过程中的给进力、扭矩、转速、钻速及单位进尺能量等参数，并记录钻进过程中卡钻、振动突变及岩粉粒径变化等异常响应特征。针对川藏铁路沿线高地应力、强构造活动及复杂岩性条件，重点分析钻进参数突变与围岩破裂、结构面控制破坏及岩爆前兆之间的关系。同时，结合依托工程已有地质编录、超前地质预报成果及施工监测资料（如围岩变形、支护受力及岩爆显现记录），建立“钻进参数—围岩条件—地应力水平—岩爆响应”多参数耦合数据库，并分析不同工程环境下参数响应的差异性及规律性。现场试验按照“试验段选取—设备标定—多孔位测试—数据同步采集—开挖后对比验证—参数修正分析”的流程实施，每个断面重复测试不少于 3 次，确保数据稳

定性与可重复性。通过与秦岭天台山隧道既有研究成果进行对比，对相关参数及模型进行验证与修正。

(2) 数字钻探的受力机理研究：在课题组已建立的数字钻探荷载参数与岩石力学参数的解析关系基础上，进一步考虑切削碎屑的拥堵效应、旋转切削之惯性效应、切刀的动摩擦效应等；推导更精细、可靠的切削——抗切削之力学关系；并与室内已研究成功的旋切仪试验指标、试验结果对比分析。

(3) 岩石的抗切削强度内在机理以及与抗拉、抗剪强度之内在关系研究：借助切削原理、在室内分批研究具有不同硬度、不同切削强度的岩石试验的抗拉强度、内聚力值的变化规律；寻找旋切条件下岩石抗切削强度与抗拉强度与抗剪强度之内在关系，细观分析切削破坏与抗拉、抗剪破坏之内在关系。

(4) 力学参数对数字钻探参数的影响关系：在已研发的室内旋切仪上分批试验研究不同弹性模量、不同剪切强度参数与不同抗拉强度的岩样在旋切时，在一定旋转速度、钻进速度下所需的扭矩与压力。

(5) 钻进速度及转速对锥尖阻力和扭矩的影响规律研究：对同一岩样，研究总旋切所需能量与四个旋切参量之内在关系(旋转速度、钻进速度与扭矩、压力)：a、在已研发的仪器上试验研究同一岩样，旋转速度不变时，要达到某钻进速度所需的钻头压力与扭矩；b、在已研究的仪器上试验研究，同一岩样扭矩不变时，要达到某钻进速度所需的钻头压力与转速。

(6) 总锥尖阻力模型：通过细化钻头与被钻岩样的简化动态力学模型、推导总锥尖阻力与四个旋转物理量及材料总抗力之动力学关系，进而建立总钻进阻力模型与总锥尖阻力模型；并与批量的室内试验结果验证标定。

(7) 不同材料的钻压、扭矩与钻进速度、旋转速度四参量之关系研究：对各种不同硬度、不同强度的岩样、砂浆样、石膏样、硬土样等进行系统的室内数字钻试验；a、试验研究不同硬度、强度岩样在钻头旋转速度不变时，要达到某钻进速度所需的钻头压力与扭矩；b、试验研究不同硬度、强度岩样在钻头扭矩不变时，要达到某钻进速度所需的钻头压力与转速。

(8) 数字钻参数与岩石力学参数间的物理关系研究：解析分析切削过程中各力学量的动平衡关系研究；解析分析推导不同岩土材料在触探速率、探头尺寸、上覆压力、侧向压力等条件下，四个钻探物理量与锥尖阻力——材料抗切削强度——材料粘聚力与抗拉强度、变形模量之力学关系。

(9) 数字钻参数及岩石力学参数间的数学关系研究：拟通过推导的数字钻过

程中钻头阻力的解析解，通过对上述不同影响因素进行敏感性数值试验分析。运过数值分析的方法，开展数字钻过程中岩石的破坏过程以及探入动力、探入速度与岩性、岩体力学参数等的内在关系。

3.2 深埋公路隧道围岩高地应力确定方法

（1）室内试验岩样取自秦岭天台山隧道掌子面及超前钻孔中的典型微风化中粗粒黑云母花岗岩，优先选取完整性较好、无明显节理裂隙的岩芯及大块岩样。考虑现场围岩单轴抗压强度为45.4~52.3 MPa、最大水平主应力为6.7~15.4 MPa的实际特征，室内试验采用伺服加载系统对试样施加0 MPa、5 MPa、10 MPa、15 MPa四级围压，将岩石加工为50 mm的立方体试样。试验前对岩样进行波速测试、密度测试和初始缺陷筛查，确保各组样品离散性可控。考虑秦岭天台山隧道围岩以完整花岗岩为主，同时局部受断层影响存在结构性差异，试验中设置完整岩样组和含人工切缝弱面组两类，以分别模拟完整围岩段和构造影响段的钻进响应差异。钻进装备采用室内数字钻探系统，钻头形式与现场数字钻设备保持一致，优先选取角片式钻头；钻头直径设置为8 mm、12 mm、16 mm三档，以对应现场不同测试工况。钻进参数结合现场便携式数字钻装备能力与硬岩钻进实际工况设置，转速控制在300 r/min、500 r/min、700 r/min三级，推进速度控制在0.3 mm/s、0.8 mm/s、1.5 mm/s三级。每一应力等级下均开展“钻头直径—转速—推进速度”正交组合试验，实时采集钻压、扭矩、钻速、转速、单位进尺能量、瞬时功率和钻进时间等参数，并同步记录钻屑粒径、粉屑颜色、孔壁粗糙程度及局部剥落特征。研究围岩由稳定状态向损伤积累状态演化过程中钻进参数的变化规律。通过对比不同应力水平下钻压、扭矩和单位进尺能量的增减趋势，识别高地应力及临界损伤状态下的敏感参数。每组工况重复试验不少于3次，重点统计不同围压与损伤水平下数字钻参数的平均值、离散系数和异常波动区间；结合试验后岩样破坏形态和微裂隙发育情况，建立“围压—损伤水平—数字钻参数”响应关系，最终将室内数字钻结果与秦岭天台山隧道现场数字钻测试结果进行标定和对比，形成适用于深埋公路隧道高地应力环境的数字钻参数解释方法，为围岩高地应力快速识别与分级评价提供试验依据。

（2）旋切参数对岩体断裂构造与高地应力等响应特征以及高地应力的判别方法：基于数字钻技术已经建立了沿钻孔深度各点的岩体力学参数与岩体几何特征的空间分布识别方法，能够准确地确定岩体结构面的位置和规模等几何信息。在此基础上开展深部岩体现场数字钻试验，分析不同岩性岩体的数字钻参数（钻

压、扭矩、钻速与转速）对深部断裂构造和高地应力等响应特征，将获得的数字钻参数进行如下分析：利用数字钻参数计算岩体的旋切钻进能，对所得到的旋切钻进能进行归一化处理，并计算数据的离散程度，可得到处理后的数字钻参数的离散程度随钻孔长度变化的曲线。根据数字钻参数的离散度可判断钻孔中断裂构造和完整岩石的分布情况。接着，根据深埋岩石数字钻的给进力和扭矩力的变化规律，可以判断深部岩体中高地应力的分布情况。从而，可以根据数字钻参数对断裂构造与高地应力的响应特征，提出断裂构造与高地应力的判别方法。

（3）研究不同岩性硬岩的旋切触探参数随高地应力的演化规律：开展各种岩性岩石在不同高应力状态下的室内和现场数字钻试验：不同高地应力状态下各种岩性岩石在钻头转速一定时，研究达到特定钻速所需的钻压与扭矩；开展不同高应力状态下在钻头转速和钻速一定时，研究钻压和扭矩与高地应力之间的关系。不同高地应力状态下各种岩性岩石在钻头钻压一定时，研究达到特定扭矩所需的钻速与转速；在钻头转速和钻压一定时，研究钻速和扭矩与高地应力之间的关系。基于此可以获得硬岩的数字钻参数随高地应力的变化规律。以上试验都采用统一规格的钻头获取数字钻数据，以 1mm 的钻孔长度作为一个获取单元，对所得到的钻监测数据进行归一化处理，由于获取的数字钻数据可能会相对离散，因此，利用聚类分析中的距离判别法，剔除相对离散的数字钻数据。

（4）不同高地应力状态下硬岩的数字钻受力特性与旋切机理：岩石的数字钻进过程分为两个阶段：切削阶段和摩擦阶段；在切削阶段，钻头底面的切削作用起主导作用，在摩擦阶段，钻头底面与岩石的摩擦力起主导作用。在数字钻进过程中切削力与给进力会发生变化，基于各个数字钻参数的内在关系，通过室内和现场试验分批研究在不同高地应力下不同强度、岩性的岩石的数字钻特性，以及旋切强度随高地应力的变化规律。在此基础上，通过现场数字钻试验研究切削阶段的旋切系数和摩擦阶段的摩擦系数随高地应力的变化规律，继而研究切削力与给进力随高地应力的变化规律。基于已建立的数字钻参数与岩石力学参数的解析关系，深入研究高应力下岩石压缩区的受力机理，以及钻头旋切的惯性、岩屑的摩擦和滑移等效应。

（5）建立高地应力与硬岩旋切触探参数之间的解析模型，提出高地应力计算方法：由于在高地应力条件下，临界岩爆突然释放时，岩石在旋切过程中的法向力与切削力的变化规律都会发生突然的变化。利用已经建立的切削受力模型，基于极限平衡理论、滑移线场等理论，推导高地应力状态下钻头的力学平衡方程，

及切削力和给进力之间的理论关系，建立高地应力条件下的岩石切削力与给进力的理论模型，并与不同岩性岩石的室内和现场旋切触探试验结果进行对比分析，验证模型的可靠性。在此基础上，基于极限平衡理论解析旋切过程中各力的动平衡关系，推导岩石在不同高地应力状态下钻头钻压、扭矩、钻速与转速之间的解析关系；基于岩石的旋切受力特点，采用极限平衡理论、摩尔-库伦等理论，利用已经建立的数字钻过程中岩石压缩区正应力与剪应力的理论公式，采用已经建立的岩石旋切强度与岩石普通强度参数之间的理论模型，可推导出岩石旋切强度与高地应力之间的解析关系；因为滑动摩擦系数和旋切触探参数之间存在解析关系，以滑动摩擦系数和旋切强度为桥梁，进而可建立高地应力与硬岩数字钻参数之间的解析模型；最后结合数字钻参数随高地应力的演化规律，以及根据建立高地应力与硬岩数字钻参数之间的解析模型，可以提出高地应力确定方法。

3.3 深埋公路隧道岩爆倾向性的判别准则与预测模型

（1）室内力学试验岩样取自秦岭天台山隧道典型花岗岩围岩。试样加工为Φ50 mm×100 mm 标准圆柱体，每组试验不少于 5 个平行试件，以保证结果的统计可靠性。单轴压缩试验采用位移控制加载，加载速率控制在 0.002~0.005 mm/s 范围内，获取岩石单轴抗压强度、弹性模量、峰值应变及破坏模式等基本参数。试验过程中同步记录应力—应变全过程曲线，并结合破坏形态分析岩石脆性特征。三轴压缩试验结合依托工程地应力水平设置围压等级为 5 MPa、10 MPa、15 MPa，并增加 20 MPa 作为高应力集中条件，对应不同埋深及局部应力集中区。试验采用恒围压加载方式，获取不同围压条件下岩石峰值强度、残余强度及体积变形特征，建立围压—强度关系。循环加卸载试验用于分析岩石能量积聚与耗散过程。单轴循环加载按峰值强度的 20%、40%、60%、80%、90%分级进行；三轴循环试验在不同围压条件下采用相同加载路径。通过计算加载曲线和卸载曲线面积，获取输入能、弹性能及耗散能，并分析其随应力水平变化的演化规律。结合试验结果，建立“强度参数—能量参数—破坏模式”之间的关系，并与现场岩爆显现特征进行对比分析，提出适用于深埋公路隧道的岩爆倾向性判别参数和分级标准。

（2）不同围压、应力水平和卸荷速率下各类岩石的耗散能非线性演化规律：能量耗散是岩石变形破坏的本质属性，就自然界中的岩石而言，不仅承受着外载产生的机械能，还可能受到热能、辐射能等的影响，这些能量作用于岩石又会导致岩石发生热辐射、红外辐射、声发射等能量输出，同时岩石与环境之间产生物

质交换。开展各种岩性岩石的单轴、三轴压缩一次循环加卸载试验，研究围压、应力水平和卸荷速率等因素对岩石耗散能和弹性应变能的影响，分析单轴、三轴压缩一次循环加卸载过程中能量积聚与能量耗散规律。

（3）建立岩石的非线性能耗理论模型，提出临界耗散能的计算方法：岩爆的孕育过程本质上是能量积聚、耗散与释放的非线性动力过程。能耗特征是岩石的动力特性，能够反映岩爆的岩石弹性应变能与耗散能等各种能量的之间相互转换特性。按照实验原理研究各种岩石的耗散能，分析围压、卸荷速率、应力水平等因素对岩石耗散能的影响机制，进一步分析不同围压、卸荷速率等条件下耗散能随应力水平的非线性演化规律。基于非线性力学、弹性力学等理论及申请人已建立的能量耗散模型，首先建立耗散能演化规律模型，接着计算弹性能与耗散能的比值，进而推导岩石非线性能耗理论模型，最后分析围压、卸荷速率、应力水平等因素对模型参数的影响，并对所建立的模型进行验证和修正。利用试验结果分析岩石成因、弹塑性、力学特征、加载过程等对岩石临界破坏状态时的能耗特征的影响，并且研究这些因素对非线性能耗规律的影响。根据所建立的非线性能耗模型，可以准确计算岩石在临界破坏时耗散能：根据单轴压缩一次加卸载应力-应变曲线获得每个试样在峰值点处应力水平的值，将该值代入非线性能耗模型的函数表达式，即可得出岩石峰值强度点处的耗散能。该方法克服了岩石材料在峰值强度处的耗散能无法根据循环加卸载曲线计算的不足，对脆性岩石更加具有优越性。

（4）岩石的旋切特性与能耗特征和岩爆倾向性的关联响应规律：

岩爆倾向性判据的有效性必须结合岩石试样试验破坏过程和破坏后的实际现象进行判定。利用应力应变、噪音分贝、高速摄像等测试技术，确定岩样破裂及运动特征、破坏声学特征、噪音分贝、岩片特征和远场弹射质量等物理因素，定性和定量研究各种岩石的岩爆倾向性，并结合物理力学特点，从岩样破裂及运动特征、噪音分贝、岩片特征、远场弹射质量比、弹性模量、泊松比、单轴抗压强度、抗拉强度、密度、硬度等方面，将岩爆划分为强、中、轻和无 4 个等级。然后，开展不同岩爆倾向性硬岩的室内旋切触探试验，获得岩石旋切参数，利用研究内容（1）所建立的岩石旋切模型和能耗模型，分别计算岩石的旋切强度和临界耗散能，进而在申请人所发现的耗散能、剩余弹性应变能与单轴抗压强度和旋切强度之间关系的基础上，分别研究岩石的临界耗散能和旋切强度与岩爆倾向性等级之间的关系，划分岩爆四个等级所对应的临界耗散能和旋切强度的范围，

以此研究旋切触探参数与岩爆倾向性之间的关系。

（5）研究基于硬岩旋切特性的岩爆倾向性与等级标准：开展不同岩爆倾向性硬岩的室内和现场旋切触探试验，进一步研究旋切触探参数与岩爆倾向性之间的关系，并结合各种岩石整体破坏过程中的破裂及运动特征、噪音分贝、岩片特征、远场弹射质量比等方面，建立基于旋切触探参数的岩爆倾向性与等级标准。并与已有的岩爆判据，如基于弹性能指数、能量储耗指数、脆性系数和弹性应变势能等指数所建立的岩爆判据进行对比分析，进一步修正和完善基于旋切触探参数的岩爆倾向性判据。

（6）建立基于旋切触探参数的岩爆倾向性预测模型：基于不同高地应力下室内和现场旋切触探试验，综合研究内容（1）中建立的高地应力下旋切参数与旋切强度和高地应力之间的理论关系和解析模型，以及研究内容（2）中建立的非线性能耗理论模型与岩爆倾向性判据，基于力的极限平衡理论和摩尔-库伦强度理论，以摩擦系数和旋切强度为桥梁，建立基于旋切触探参数的岩爆倾向性预测模型。

3.4 基于数字钻技术的深部岩体岩爆灾害预报技术

（1）高地应力环境下公路隧道岩爆发生机制研究：研究高地应力环境下岩爆孕育过程及相关岩体破裂机制，再现高地应力环境下岩爆隧道破坏过程，探明高地应力作用下隧道岩爆发展过程及破坏模式；建立了基于隧道初始应力场及围岩储能极限的高地应力环境隧道岩爆预警方法，并利用预测方法开展了深埋公路隧道岩爆预测及不同地应力条件对深埋公路隧道岩爆的影响研究，为深埋公路隧道岩爆倾向性与位置的预测提供有效手段。

（2）深部工程岩体已发生岩爆区域的岩爆孕育过程反分析研究：以引汉济渭秦岭引水隧洞工程为研究背景，利用岩石的破裂及运动特征、噪音分贝、岩片特征、远场弹射质量比等现场资料，结合数值模拟方法验证所建岩爆判据的可靠性，进而开展已发生岩爆区域的岩石现场旋切触探试验和室内能耗试验，采用所建立岩石旋切模型和耗散能演化模型，反分析岩石的旋切强度特性和能量耗散特征，推演耗散能演化规律，根据正向计算结果和反向分析结果的差别，修正和完善所建立的模型。

（3）支护条件下已开挖深部岩体的潜在岩爆区域的探测研究：以支护条件下已开挖深部岩体的潜在岩爆区域为研究对象，开展现场旋切触探试验、室内能耗实验和常规力学参数测试，获取岩石的强度参数、变形参数和临界耗散能等关

键的岩石力学参数，采用所建立的模型和耗散能演化模型，推演支护条件下潜在岩爆区域的岩石旋切强度特性，进一步分析岩爆的非线性能耗规律和能耗特征，探讨支护措施对岩石的非线性耗散能的抑制作用。

（4）未开挖深部工程岩体的岩爆超前探测的应用研究：开展引汉济渭工程、东庄水利枢纽等工程高地应力条件下未开挖深部工程岩体的旋切触探试验，超前探测潜在岩爆的位置、等级及发生的可能性，特别是沿隧洞洞轴线进行旋切触探，获取所需的关键参数，确定岩爆的位置、等级及发生的可能性，待开挖后与实际岩爆情况进行对比分析，结合数值模拟方法进一步验证和完善所建立的模型和方。

3.5 深埋公路隧道岩爆支护结构体系与防控技术研发

（1）临近隧道爆破荷载岩爆隧道的影响：开展临近隧道爆破隧道岩爆数值试验研究，根据数值计算得到不同位置的真实能量密度，采用提出的瞬态卸荷诱导的岩爆判定指标，判定的岩爆等级。根据临近隧道爆破隧道岩爆数值试验成果，结合施工期间隧道开挖过程中岩爆发生及烈度分级的判定指标。结合隧道开挖过程中围岩应力由前方集中向掌子面及其后方转移的特点，提出基于纵向分区的岩爆施工控制机制，将掌子面前后一定范围划分为外围区、邻近区和核心区。其中，外围区主要位于掌子面前方约 20～50 m 及后方 10～30 m 范围内，为应力集中逐渐形成但围岩尚未显著破裂的区域；邻近区位于掌子面前方约 5～20 m 及后方 5～10 m 范围内，为应力集中显著、微裂隙快速发育的敏感区域；核心区则为掌子面前方 0～5 m 及开挖暴露区，为应力集中与瞬时卸荷叠加作用下岩爆最易发生的关键区域。基于上述分区特征，构建差异化的岩爆防控措施体系：在外围区以超前预防为主，通过超前地质预报、数字钻测试及卸压孔或预裂爆破等措施实现应力调控与风险预判；在邻近区以过程控制为主，采用短进尺开挖、动态支护及局部卸压等手段，抑制围岩能量积聚与快速释放；在核心区以抗冲击支护与应急防护为主，强化高延性锚杆、钢拱架及钢纤维喷射混凝土等组合支护，同时结合防护设施及施工组织控制降低岩爆危害。通过将支护结构优化与施工方法调控、应力释放措施及监测预警手段相结合，形成“分区控制—分级防护—动态调整”的岩爆综合防控技术体系，实现从岩爆孕育到发生全过程的有效控制，并为深埋高地应力隧道岩爆灾害的工程防治提供技术支撑。

（2）临近隧道爆破环境下岩爆隧道的合理支护结构体系研究：建立岩爆区围岩-支护体系相互作用的二、三维数值力学模型，结合现场隧道施工，分析支

护结构体系与围岩、不同支护结构间以及支护结构要素间三个层次的协同作比关系；研究隧道喷砼对岩爆的控制作用、钢纤维混凝土、隧道锚杆对岩爆的控制作用、岩爆隧道支护结构损伤特性，提出临近隧道爆破环境下岩爆围岩的支护优化设计；分析不同应力条件下隧道开挖过程中围岩的力学与能量变化过程及岩爆发生的潜在区域，研究支护时机对临近隧道爆破环境下岩爆的控制作用，确定合理的支护结构体系及参数，形成一套针对高地应力岩爆的隧道支护结构体系。

（3）隧道岩爆施工防控技术研究：根据已开挖隧道段发生的岩爆情况，并结合实际地质条件及隧道现场监测数据，分析不同地应力条件下隧道开挖应力场，采用微震监测技术或基于隧道初始应力场及围岩储能极限的岩爆预警方法，对岩爆的发生可能性及岩爆的等级进行预判。研究施工进尺对岩爆的控制作用，提出岩爆条件下的施工控制措施，分析台阶法、全断面及全断面含仰拱施工对岩爆的防治效果，提出爆破设计、施工进尺及工序管理，形成岩爆防治技术。

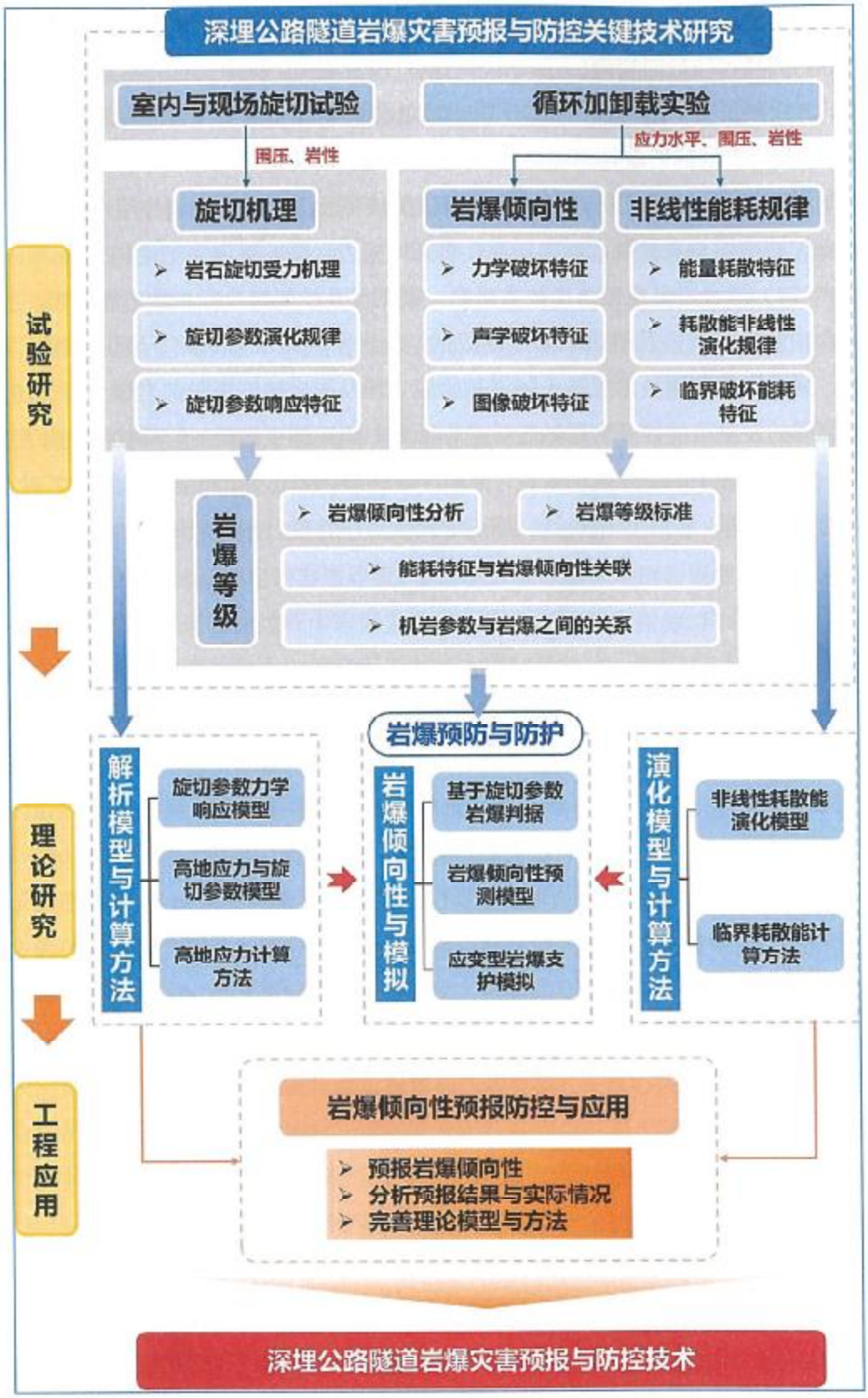

深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术研究
室内与现场旋切试验
循环加卸载实验
围压、岩性
应力水平、围压、岩性
旋切机理
岩爆倾向性
非线性能耗规律
岩石旋切受力机理
旋切参数演化规律
旋切参数响应特征
力学破坏特征
声学破坏特征
图像破坏特征
能量耗散特征
耗散能非线性演化规律
临界破坏能耗特征
试验研究
岩爆等级
岩爆倾向性分析
岩爆等级标准
能耗特征与岩爆倾向性关联
机岩参数与岩爆之间的关系
岩爆预防与防护
解析模型与计算方法
旋切参数力学响应模型
高地应力与旋切参数模型
高地应力计算方法
岩爆倾向性与模拟
基于旋切参数岩爆判据
岩爆倾向性预测模型
应变型岩爆支护模拟
演化模型与计算方法
非线性耗散能演化模型
临界耗散能计算方法
理论研究
工程应用
岩爆倾向性预报防控与应用
预报岩爆倾向性
分析预报结果与实际情况
完善理论模型与方法
深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控技术

图 11. 技术路线图

为进一步完善项目实施内容，满足科研项目管理要求，补充项目风险控制、知识产权管理及成果推广应用相关内容如下：

（1）项目风险分析与控制措施

本项目围绕深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术开展研究，涉及深部高地应力环境下岩体力学行为、岩爆孕育机制、多源监测信息融合及工程应用等多个复杂环节，具有显著的系统性、交叉性与不确定性。在项目实施过程中，可能面临以下主要风险：

首先，理论模型与方法适用性风险。深埋隧道岩爆孕育与发生机制复杂，受地应力水平、岩性结构、施工扰动等多因素耦合作用影响，现有理论模型难以全面刻画其非线性演化过程，可能导致所建立的岩爆预测模型在不同工程条件下适用性存在差异。对此，本项目将通过“理论分析—室内试验—现场实测”多尺度、多手段协同研究路径，对模型进行动态修正与迭代优化，建立具有良好泛化能力的预测模型体系。其次，现场试验与数据获取风险。深埋隧道施工环境复杂，现场测试条件受空间、施工进度及安全等因素限制，可能导致数据获取不连续或精度不足。针对该问题，项目将合理制定现场试验方案，优化监测布置，综合采用数字钻探、声发射、微震监测等多源信息获取手段，通过多源数据交叉验证与融合分析，提高数据的完整性与可靠性。再次，关键技术集成与协同风险。本项目涉及数字钻探测试技术、岩爆倾向性预测模型及支护防控技术等多项关键技术，技术间存在耦合与集成问题，若处理不当，可能影响整体技术体系的稳定性与工程适用性。为此，将按照“分模块研发—分阶段集成—系统验证”的技术路线，逐步推进各子系统之间的协同融合，构建统一的数据接口与分析平台，确保系统运行的稳定性与协调性。此外，成果工程转化与推广风险。科研成果在从实验室研究向工程应用转化过程中，可能因地质条件差异及施工环境复杂性而出现适应性不足的问题。针对该风险，项目将依托典型工程开展示范应用，持续优化技术参数与应用方案，同时加强与设计、施工单位的协同合作，提高成果的工程适配性与推广可行性。综上，通过对上述风险的系统识别与针对性应对，本项目具备良好的风险可控性，可有效保障研究任务的顺利实施及预期目标的实现。

（2）知识产权归属及权益分配

本项目研究成果（包括专利、软件著作权及技术标准等）原则上由牵头单位与合作单位共同所有，按照各方在项目中的实际贡献比例进行权益分配；优先保障牵头单位的成果转化主导权，同时通过签订技术合作协议，明确成果使用权、

转化收益分配比例及推广责任，确保各参与单位合法权益。

（3）科研诚信与数据真实性保障机制

为确保项目研究过程规范、数据真实可靠及成果具有原创性，全面落实科研诚信要求，项目在实施过程中将严格遵守国家及陕西省关于科研诚信管理的相关规定，建立全过程科研诚信保障机制。

首先，在科研诚信承诺方面，项目组全体成员在项目启动阶段签署科研诚信承诺书，明确遵守学术规范、杜绝学术不端行为的责任要求，强化科研人员诚信意识，确保研究过程规范开展。其次，在数据真实性与可追溯性方面，建立统一的数据采集、记录与存储管理制度，对试验数据、监测数据及计算结果实行全过程记录与归档管理，确保数据来源清晰、过程可追溯、结果可复核。重要试验数据须保留原始记录，并建立数据备份机制，防止数据丢失或篡改。再次，在成果原创性与学术规范方面，严格执行论文发表、成果申报及技术报告编制的学术规范要求，杜绝抄袭、剽窃、重复发表及不当署名等行为。项目形成的研究成果须通过内部审核后方可对外发布，确保成果真实可靠、具有创新性。同时，在科研诚信负面清单管理方面，明确禁止数据造假、篡改数据、虚构实验结果、重复申报成果、违规使用经费等行为，一旦发现上述问题，将按照相关规定严肃处理。最后，在责任追究机制方面，建立“项目负责人—课题负责人—具体执行人员”三级责任体系，明确各层级科研诚信责任。对违反科研诚信要求的行为，依据国家及相关主管部门规定，追究相关责任人的责任，并视情节轻重采取通报批评、取消成果认定或终止项目等措施。

通过上述措施，构建覆盖项目全过程的科研诚信保障体系，确保项目研究过程规范、数据真实可靠、成果具有良好的科学性与可信度。

（4）应用技术类验收标准与工程验证方案

本项目属于应用技术类科研项目，研究成果需面向工程实际应用并具备明确的工程验证与验收标准。为提高项目成果的工程适用性与可落地性，结合深埋公路隧道工程特点，制定如下验收标准与工程验证方案。

首先，在项目验收标准方面，围绕“技术可用性、工程适应性及应用效果”三个维度，明确项目成果验收指标：一是形成完整的深埋公路隧道岩爆灾害预测与防控技术体系，包括岩体力学参数获取方法、岩爆倾向性预测模型及支护防控技术方案；二是建立基于数字钻探参数的岩爆预测方法，其预测结果与现场监测或工程实际情况具有良好一致性，预测准确率达到工程应用要求；三是形成相关

技术报告、模型方法、软件工具及工程应用指南等成果，具备工程推广应用条件；四是完成规定数量的学术论文及技术成果，满足项目考核要求。

在依托工程验证方案方面，本项目将依托典型深埋公路隧道工程（如引汉济渭工程、陕西省在建深埋隧道或类似工程项目），开展现场试验与工程验证工作。通过在工程现场布设数字钻探测试、声发射或微震监测等手段，获取围岩力学参数及岩爆响应特征数据，将所建立的预测模型应用于实际工程条件下进行验证，对比分析预测结果与实际岩爆发生情况的一致性，评估模型的工程适用性。同时，结合工程施工过程，对提出的支护与防控技术进行现场应用与效果评价，形成工程应用反馈机制。

在成果落地与应用评价指标方面，以“可应用、可推广、可评价”为原则，明确成果落地指标：一是技术方法在实际工程中可直接应用，能够实现围岩力学参数快速获取及岩爆风险预判；二是预测结果能够为施工决策提供有效支撑，提升隧道施工安全性；三是支护与防控技术能够在工程中实施并取得良好效果；四是形成可推广的技术体系或应用模式，在类似工程中具备复制推广条件。

通过明确验收标准、依托工程验证及成果应用评价指标，确保项目研究成果真正服务于工程实践，实现由理论研究向工程应用的有效转化。

4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接（项目研究的成果提出的技术或理论可供实际对象应用的推测，在一定程度上反映成果的成熟性和市场需求情况）

本项目在形成数字钻原位测试方法、岩爆倾向性判别模型及分区防控技术体系的基础上，构建面向工程实际的应用路径与评价体系。研究成果首先依托宝坪高速公路秦岭天台山隧道既有数据进行参数标定与方法固化，形成适用于高地应力硬岩隧道的标准化测试流程与参数解释方法；在此基础上，结合川藏铁路雅安至林芝段在建工程开展现场应用，将数字钻测试、围岩地质编录、施工监测及岩爆显现信息进行融合分析，实现围岩力学状态快速识别与岩爆风险动态评估，并指导施工参数调整及支护措施优化。通过在不同工程条件下的应用对比，对模型参数进行修正与统一，形成具有区域适应性的技术体系。在应用效果评价方面，建立“预测能力—控制效果—工程适应性”三类指标体系：一是通过对比预测结果与实际岩爆发生位置、强度等级及时间的吻合程度，评价岩爆预测准确性；二是通过分析应用技术前后围岩破坏程度、岩爆发生频次及支护受力与变形变化情

况，评价防控措施的有效性；三是通过不同埋深、不同地质条件及不同施工环境下的应用结果对比，评价技术体系的运用范围与稳定性。结合现场实测数据与施工反馈，对关键参数及判据进行动态修正，形成可持续优化的工程应用机制。最终，形成集“测试方法—判别模型—分区防控—应用评价”为一体的技术成果体系，并通过技术指南、应用流程及工程示范推广至类似深埋高地应力隧道工程，实现研究成果由理论模型向工程应用的有效转化，提高隧道施工安全性与灾害防控水平。

研发深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术，可直接服务于我省在建的秦岭天台山特长隧道、引汉济渭秦岭引水隧洞等岩体工程，为解决我国深埋公路隧道岩爆灾害预测与安全防护提供指导。可保证隧道施工安全和施工质量的前提下大幅度缩减工期并节约工程成本，应用前景广泛，推广价值大。可用于快速预报隧道工程围岩岩爆倾向性，为勘察、设计和施工提供指导，可保障工程安全及保证施工质量。

该课题将完成以数字钻技术为基础的深埋公路隧道岩爆灾害超前预报系统，其将可能成为我省的代表性科研产品，可以面向全陕西省乃至全国进行售卖，完成成果转化，赚取可观利润。在服务各大施工单位、设计勘察院的同时，大幅度提高我单位在行业内的知名度。

5．有关技术经济指标（叙述项目取得的成果中研究开发的技术、产品具体的技术经济指标（如适用条件、单位耗材、单位造价等）以及性能指标（如技术参数、精度等）。定性描述与定量相结合，以定量为主）

本工程拟采用了“基于数字钻技术的岩爆倾向性原位测试键技术”对银川（宝鸡）至昆明（坪坎）（G85）高速公路的秦岭岩体隧洞进行了勘察阶段和施工期勘探，超前预报了工程岩体隧洞围岩的力学参数、岩体质量以及岩爆等不良地质灾害，预报长度超过 5 公里，创新了勘察与施工工艺，加快了工程进度，提高了隧道的建设效率，节约了勘察与施工成本，有效防治了不良地质灾害，确保了工程安全与工程质量，预计直接节省工程投资约 0.957 亿元、产生综合经济效益约 3.15 亿元。研发深埋公路隧道围岩力学性能原位测试技术，获得深埋公路隧道围岩高地应力确定方法，建立深埋公路隧道岩爆倾向性的判别准则与预测模型，

提获得深埋公路隧道岩爆灾害预报方法，研发埋公路隧道岩爆支护结构体系与防控技术。研究报告：1部；发表sci论文：5篇；申报专利：4项，其中发明专利2项，其他专利2项；申报奖项：1项。

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

中交第一公路勘察设计研究院有限公司始建于1952年，原属交通运输部，现为中国交通建设集团的二级子公司，是我国交通工程行业规划设计咨询的领军企业，是行业标准规范的制定者和行业科技创新的引领者。拥有包括工程勘察、工程设计综合甲级在内的各类各级资质30余项。先后荣获省部级以上奖项600余项，其中国家科技进步一等奖3项、二等奖7项、国家技术发明二等奖1项。多年冻土区公路建设与养护技术代表着我国在该领域的国际最高水平。

本项目合作单位西安理工大学岩土工程学科是85年批准的西部地区最早的岩土工程博士学科，学科学术氛围浓厚，学术研究积淀丰富，具有一批学术思想活跃、学术水平较高的学术带头人定期进行学术研讨、交流。西安理工大学土木建筑工程学院拥有省部共建西北旱区生态水利工程国家重点实验室、陕西省黄土力学与工程重点实验室、岩土工程实验室、工程结构实验室、建筑材料实验室、力学实验室、工程测量实验室等8个专业实验室和水利水电土木建筑研究设计院。学院获得4项全国科学大会奖；获国家科技进步奖3项，其中一等奖1项；获陕西省科技进步奖6项，其中一等奖2项。

2. 技术力量及人员构成

姓　名	单　位	性别	年龄	技术职称	专业	在项目中担任具体工作
马旭东	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	37	副高级	隧道工程	项目负责人，制定项目研究方案和计划，负责岩爆预测技术研究
袁卓亚	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	女	55	正高级	桥梁与隧道工程	负责现场和室内岩爆试验研究
何明明	西安理工大学	男	40	副高级	隧道工程	负责岩爆理论判据、数字模拟与预报技术研究

罗波	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	50	正高级	桥梁与隧道工程	负责深埋公路隧道围岩高地应力确定方法研究
王桢	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	40	副高级	桥梁与隧道工程	负责深埋公路隧道岩爆支护结构体系与防控技术研发

3. 各自承担的主要工作

马旭东：项目负责人，制定项目研究方案和计划，负责岩爆预测技术研究

袁卓亚：负责制定项目研究方案和计划

何明明：负责现场和室内岩爆试验、岩爆理论判据、数字模拟与预报技术研究

罗　波：负责深埋公路隧道围岩高地应力确定方法研究

王　桢：负责深埋公路隧道岩爆支护结构体系与防控技术研发

4. 项目主要负责人情况

马旭东：男，1989 年生，硕士研究生，中交第一公路勘察设计研究院有限公司高级工程师，从事道路地质、隧道工程等方向研究。先后参与、负责十余个高速公路、国省干线的勘察设计工作以及海外设计咨询工作，参与的项目获得多项省部级、集团优秀勘察设计奖。参与发表高水平期刊近 10 篇，专利 4 项，获得包括陕西省公路学会一等奖、陕西省高等学校科学技术特等奖等 3 项奖励。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

1. 依托工程（工作）概况

本项目以宝坪高速公路秦岭天台山超长隧道作为主要数据依托工程。该隧道目前已建成通车，但在施工阶段已开展了数字钻测试及相关现场观测工作，获取了不同埋深及不同地应力条件下的原位测试数据，为本项目提供了可靠的数据基础。在此基础上，针对该工程获取的数据，已通过室内力学试验及室内数字钻试验对相关规律进行了系统分析与验证，实现了现场数据与试验结果之间的相互印证。同时，结合本部分所述川藏铁路雅安至林芝段在建工程，进一步开展现场验证研究，通过在建工程中开展数字钻测试及围岩响应观测，对基于秦岭天台山隧

道建立的方法和模型进行验证与修正，从而形成“已建工程数据分析—室内试验验证—在建工程验证”的完整研究体系。

川藏铁路雅安至林芝段位于四川省西部和西藏自治区东南部，翻越横断山脉，跨七江、穿八山，沿线雪山叠嶂、河流纵横、山高谷深、地势陡峻，受板块活动和隆升影响，地质极为复杂、生态脆弱、建设条件恶劣、工程艰巨。线路自既有成雅铁路雅安站引出，经天全、泸定、康定、雅江、理塘、巴塘、白玉跨金沙江进入西藏自治区境内，经贡觉、昌都、波密至拉林铁路林芝站，全长 1017 km，其中海拔 3000m 以上线路约 732 km，占比 71.8%。新建桥隧总长 954.6 km，桥隧比 93.7%。采用时速 120～200 km 客货共线双线电气化铁路标准。川藏铁路地处青藏高原南部印度板块与亚欧板块挤压造山带，平均海拔 3000m 以上，具有“四高”（高海拔、高地热、高地应力、高地震烈度）、“四活跃”（活跃的新构造运动、活跃的地热水环境、活跃的外动力地质条件、活跃的岸坡浅表改造过程）的环境特点，具有高海拔、大高差、板块运动强烈、地质灾害多样且频发、自然环境恶劣等显著工程特征，且建设工期紧、任务重、施工技术难度极大，建设难度世所罕见，被称作为“最难建的铁路”和“最难天路”。川藏铁路“显著的地形高差”、“强烈的板块活动”、“复杂的岩性构造”和“极端的气候条件”等宏观特征，造就了川藏铁路隧道工程高地应力岩爆等诸多地质灾害，使得隧道建设面临严峻挑战。

川藏铁路地处青藏高原南部印度板块与亚欧板块挤压造山带，高原地质环境突出。实测最大水平地应力为 53MPa，最小水平地应力为 38MPa(埋深 2000m)，明显高于其它地块。易贡隧道、伯舒拉岭隧道、格聂山等隧道均存在岩爆和大变形的风险（图 11）。其中易贡隧道最大埋深处（1506m）推测最大水平主应力 48.91MPa，预测左右线轻微岩爆段落占比 24.08%，中等岩爆占比为 13.12%，强烈岩爆占比 1.88%；Ⅰ级围岩大变形占比 2.12%。2023 年 10 月 9 日，易贡隧道 2 号横洞 DyK1112+456～DyK1112+545 段在仰拱和初支施作完成后发生迟滞性岩爆，造成仰拱隆起及两侧拱脚初支混凝土开裂，对施工进度和人员财产安全造成了极大影响。



图 11 川藏铁路隧道现场岩爆

2. 工程进度与项目科研进度的配合

（1）2026 年 03 月-2026 年 06 月：在川藏铁路隧道开展深埋公路隧道围岩数字钻试验，揭示旋切破岩机理，构建岩石旋切过程的力学响应模型，提出机-岩相互作用的理论关系及其应用；研究不同岩性硬岩的数字钻探参数随高地应力的演化规律；研究不同高地应力状态下硬岩的旋切受力特性，揭示高地应力下旋切机理；建立高地应力与硬岩数字钻探参数之间的解析模型，提出高地应力计算方法。在本阶段实施过程中，按月设置关键节点（2026 年 03 月、2026 年 06 月），分别完成阶段性试验数据采集与模型初步构建，并形成阶段研究报告。由项目负责人统筹组织，课题负责人具体实施，定期开展内部检查与评估，确保试验数据真实可靠、模型构建过程可追溯。

（2）2026 年 07 月-2026 年 12 月：研究岩石的能量耗散特征与耗散能的非线性演化规律，建立深部岩体岩爆的非线性能耗理论模型；提出临界耗散能的计算方法，研究岩石的旋切特性与能耗特征和岩爆倾向性的关联响应规律；研究基于硬岩旋切特性的岩爆倾向性与等级标准，建立基于数字钻探参数的岩爆倾向性预测模型，结合数值模拟结果验证所建立的岩爆倾向性判据与预测模型。发表 SCI 论文 1 篇。本阶段设置中期检查节点（2026 年 09 月）及阶段验收节点（2026 年 12 月），重点对理论模型、预测方法及验证结果进行检查评估。明确成果交付形式，包括阶段技术报告、模型算法及论文成果等，由项目负责人牵头组织阶段评审，并对研究成果质量进行把关，确保研究内容按计划推进。

（3）2027 年 01 月-2027 年 6 月：研究高地应力环境下岩爆孕育过程及相关岩体破裂机制，再现高地应力环境下岩爆隧道破坏过程，探明高地应力作用下隧道岩爆发展过程及破坏模式；开展深埋公路隧道岩爆预测及不同地应力条件对深

埋公路隧道岩爆的影响研究。本阶段设置关键节点（2027 年 03 月、2027 年 06 月），分别完成岩爆孕育机制分析及预测方法初步建立。通过阶段性成果检查与技术讨论，对研究进展进行动态评估，并根据实际工程反馈对研究方案进行适当调整，确保科研工作与工程实际紧密结合。

（4）2027 年 07 月-2027 年 12 月：通过建立不同工况下隧道开挖数值模型，结合提出的岩爆能量判定指标，研究了高地应力环境下隧道各个建设方案对岩爆的影响；通过对高地应力环境下岩爆的不同支护结构参数的研究，确定了合理的支护结构体系；分析了不同应力条件下隧道开挖过程中围岩的力学与能量变化过程及岩爆发生的潜在区域。撰写报告，准备结题，发表论文 1 篇。本阶段设置成果验收节点（2027 年 09 月）及结题验收节点（2027 年 12 月），明确最终成果交付内容，包括研究报告、技术方法、模型软件及论文成果等。建立成果审核与归档机制，确保成果完整、规范、可追溯。

此外，在项目实施全过程中，建立经费使用与过程管理的监督机制，严格按照相关科研经费管理规定执行，明确项目负责人为第一责任人，配备专人负责经费台账管理与审核，定期开展经费使用情况检查，确保经费使用规范透明。同时，建立偏差整改机制，当出现进度滞后或研究偏差时，及时分析原因，制定调整措施并明确责任人和整改时限，保障项目按计划顺利实施。

六、项目经费估算及资金筹措情况

对经费估算及资金筹措情况说明，提供所需经费测算说明。

经费测算说明

本项目经费预算依据《陕西省人民政府办公厅关于改革完善省级财政科研经费管理的实施意见》（陕政办发〔2022〕3号）相关规定编制，结合项目研究内容和实施方案进行测算，确保经费安排合理、依据充分、使用合规。

（1）设备费（设备改造及租赁）

本项目不新增大型设备，主要为现有数字钻探设备的功能改造及及短期租赁使用。

设备改造费用主要包括：传感器加装（约2套×0.8万元/套）、数据采集模块升级（约1套×1.4万元），合计约3万元；

设备租赁费用主要用于现场试验期间辅助设备租赁（如监测设备及配套装置），按约2次现场试验，每次约0.5万元测算，合计约1万元。

上述费用根据设备市场价格及项目试验需求测算，具有明确数量及单价依据。

（2）业务费

材料费根据试验材料消耗量及市场单价测算；测试化验加工费依据试验次数及单次检测费用标准测算；差旅及会议费结合现场试验及技术交流需求，按照相关差旅标准执行；出版及知识产权费用依据论文发表及专利申请数量进行测算。

（3）劳务费（含专家咨询费）

专家咨询费根据项目技术咨询及成果评审需求测算，拟组织专家咨询约2次，每次约5人，按照每人每次约0.3万元标准计算，合计约3万元。

其他劳务费根据参与项目的研究人员数量及工作量测算，主要用于试验辅助、数据整理及分析等工作支出，按照实际参与时间及任务分配合理确定，符合科研劳务费管理规定。

（4）间接费用

间接费用按照陕政办发〔2022〕3号文件规定，根据直接费用扣除设备购置费后的比例计提，统筹用于项目管理、绩效支出及科研条件支撑等支出，计提比例符合政策要求。

（5）经费管理与使用

项目经费实行专账管理，严格执行审批制度，明确项目负责人为第一责任人，确

保经费使用真实、合规、可追溯，并与项目研究任务相匹配。

经费投入（万元）		经费支出（万元）			
科　目	估算数	科　目	总经费	厅补经费	其他经费
省交通运输厅补助	19.8	合　计	69.8	19.8	50
工程配套研究经费	20	1.设备费	4	1	3
单位自筹	30	（1）购置设备费	0	0	0
其他经费	0	（2）设备改造与租赁费	4	1	3
		2.业务费	49	14	35
		（1）材料费	25	7	18
		（2）测试化验实验加工费	17	5	12
		（3）燃料动力费	0	0	0
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	3	1	2
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	4	1	3
		（6）其他费用	0	0	0
		3.劳务费	8	3	5
		（1）专家咨询费	3	1	2
		（2）聘用人员劳务费	0	0	0
		（3）其他劳务费	5	2	3
		（二）间接费用	8.8	1.8	7
		4.管理费	6	1	5
		5.绩效支出	2.8	0.8	2

七、项目绩效指标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1、专利授权数（项）	0
		（1）授权发明专利	0
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	0
		2、软件著作权授权数（项）	0
		3、发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	2
		（2）其中 EI 索引收录数	0
		（3）其它	0
		4、著作（部）	0
		5、制订标准数（项）	0
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	0
	其他成果	1、填补技术空白数	0
		（1）国际	0
		（2）国家	0
		（3）省级	0
		2、获奖项数	0
		（1）国家奖项	0
		（2）部、省奖项	0
		（3）地市级奖项	0
		3、其他科技成果产出	0
		（1）新工艺（或新方法模式）	0
		（2）新产品（含农业新品种）	0
		（3）新材料	0
		（4）新装备（装置）	0
		（5）平台/基地/示范点	0
		（6）中试线	0
		（7）生产线	0

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4、研究开发情况	
		（1）小试	否
		（2）中试（样品样机）	否
		（3）小批量	否
		（4）规模化生产	否
	人才引育	1、引进高层次人才	0
		（1）博士、博士后	0
		（2）硕士	0
		2、培养高层次人才	3
		（1）博士、博士后	1
		（2）硕士	2
		3、培训从事技术创新服务人员（人次）	0
		4、是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1、开放共享仪器设备数（台/套/只等）	0
		2、科研仪器设备利用率（%）	0
		3、孵化科技型企业（个）	0
		4、转化科技成果（个）	0
效果类指标	经济效益	1、新增产值（万元）	0
		2、新增销售（万元）	0
		3、新增出口创汇（万美元）	0
		4、新增利润（万元）	0
	社会效益	1、新增税收（万元）	0
		2、新增就业人数	0
		3、就业培训（人次）	0
		4、带动农民增收（万元）	0
		5、培训和指导科技服务（人次）	0
		6、新增产业带动情况	0
		7、技术集成示范（项）	0
		8、建立示范基地（亩数）	0
		9、节约资源能源	0
		10、环保效益	0
其他需要说明的情况			

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

1.项目预期目标（项目的考核目标）

本项目立足于秦岭天台山超长深埋岩体隧道工程，重点突破深埋公路隧道围岩岩爆安全防护难题，研发深埋公路隧道围岩力学性能原位测试技术，提出深埋公路隧道围岩高地应力确定方法；深埋公路隧道围岩应变型岩爆倾向性的判别准则与预测模型，深研发埋公路隧道岩爆支护结构体系与防控技术，最终形成深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控技术，为解决我国深埋高速公路岩体隧道岩爆灾害预报与安全防护提供指导。

高地应力隧道岩爆预测成果应用：基于本项目建立的高地应力环境下隧道岩爆预警方法和岩爆倾向性预测模型，可直接在深埋公路隧道及水利枢纽、地铁隧洞等深部工程施工中应用。通过与施工单位、监测机构合作，将旋切触探参数、耗散能分析和高地应力判定方法嵌入施工监测流程，实现对潜在岩爆区域的实时预警与安全决策支持。以岩爆预报命中率、误报率和预警提前时间为核心评价指标，目标实现岩爆预报准确率≥85%、误报率≤15%、预警提前时间≥24 h。

研究成果的工程标准化推广：依据研究中建立的岩爆倾向性等级划分、旋切触探参数标准及高地应力计算方法，形成可落地应用的技术规范、操作手册和评价标准，便于工程单位在不同地质条件下快速实施岩爆预测与风险评估。

技术平台与培训体系建设：依托项目研究成果，建立“深部岩体岩爆预测与防控技术平台”，提供现场旋切触探试验、能耗测定及模型计算服务，同时开展面向施工单位和监测人员的培训，确保技术在工程中的准确使用和推广。

成果转化示范工程：选择已建成或在建的深埋隧洞工程（如引汉济渭隧洞、东庄水利枢纽等）作为示范工程，现场验证岩爆预测模型及旋切触探方法的可行性和精度，并总结形成可复制、可推广的工程实施方案，推动成果向行业标准化应用发展。以支护防护效果为核心指标，目标实现岩爆发生强度降低20%以上、围岩破坏范围降低15%以上、支护结构失效率明显下降。

知识产权与产业化推进：围绕旋切触探仪设计、岩爆判据算法、高地应力计算方法等关键技术，申请发明专利和软件著作权，推动科研成果向技术服务、智能监测设备及工程施工方案产业化转化。

2.提交的研究成果及其形式

◇ 获得深埋公路隧道围岩力学性能原位测试技术；

- ✧ 获得高地应力的判别方法，建立高地应力与硬岩数字钻参数之间的解析模型，提出高地应力确定方法；
- ✧ 获得基于硬岩旋切特性的岩爆倾向性判据与预测模型；
- ✧ 最终建立基于数字钻探技术的应变型岩爆倾向性的超前预测方法；
- ✧ 深研发埋公路隧道岩爆支护结构体系与防控技术，最终形成深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控技术；
- ✧ 发表高水平学术论文 2 篇以上，其中高水平 SCI 论文 2 篇以上，申请专利 1 项，参加国内外学术会议 1-2 次。

3.经济、社会、环境效益分析

本工程拟采用了“基于数字钻技术的岩爆倾向性原位测试键技术”对银川（宝鸡）至昆明（坪坎）（G85）高速公路的秦岭岩体隧洞进行了勘察阶段和施工期勘探，超前预报了工程岩体隧洞围岩的力学参数、岩体质量以及岩爆等不良地质灾害，预报长度超过 5 公里，创新了勘察与施工工艺，加快了工程进度，提高了隧道的建设效率，节约了勘察与施工成本，有效防治了不良地质灾害，确保了工程安全与工程质量，预计直接节省工程投资约 0.957 亿元、产生综合经济效益约 3.15 亿元。

研发深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术，可直接服务于我省在建的秦岭天台山特长隧道、引汉济渭秦岭引水隧洞等岩体工程，为解决我国深埋公路隧道岩爆灾害预测与安全防护提供指导。可保证隧道施工安全和施工质量的前提下大幅度缩减工期并节约工程成本，应用前景广泛，推广价值大。可用于快速预报隧道工程围岩岩爆倾向性，为勘察、设计和施工提供指导，可保障工程安全及保证施工质量。

该课题将完成以数字钻技术为基础的深埋公路隧道岩爆灾害超前预报系统，其将可能成为我省的代表性科研产品，可以面向全陕西省乃至全国进行售卖，完成成果转化，赚取可观利润。在服务各大施工单位、设计勘察院的同时，大幅度提高我单位在行业内的知名度。

九、其它需要说明的问题

无

十、申请单位意见

该项目依托工程明确，配套经费落实到位。

（公章）

单位负责人：（签字）

年　月　日

深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术研究
大纲评审意见

2026年3月18日，陕西省公路局受陕西省交通运输厅委托在西安主持召开了“深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术研究”（项目编号：25-50K）项目大纲评审会。与会专家（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了项目研究大纲，经质询讨论，形成如下评审意见。

一、项目研究内容比较全面，研究目标明确，技术路线可行。

二、项目研究人员组成合理，前期研究基础比较扎实，试验设备齐全，依托工程基本落实，经费预算符合规定，具备开展研究工作的条件。

三、预期成果覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

1.完善技术经济指标，增加岩爆预报精度、支护防护效果等核心指标；

2.进一步细化现场试验实施方案；

3.完善技术路线图。

主任委员：

2026年3月18日

专家审查意见表

项目名称	深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术研究				
专家姓名	韦虎	职务/职称	正高级工程师	专　业	隧道与地下工程
专家单位	陕西省交通规划设计研究院有限公司			联系电话	13909260723

评　审　意　见

该项目研究大纲选题具有一定的理论意义和应用价值，研究目标明确，内容完整，重点突出，技术路线清晰可行，研究方法科学合理，进度安排与预期成果符合项目要求。

同意通过大纲评审

意见与建议

1. 补充两大关键问题的内在关联，明确围岩力学参数原位测试技术对基于数字钻技术岩爆倾向性预报技术的支撑作用，完善逻辑闭环；

2. 细化各研究内容的试验方案，明确室内/现场试验的工况、样本数量及测试标准，增强实施方案的可验证性；

3. 完善成果转化具体方案，推动研究成果落地应用；

4. 增加岩爆预报精度、支护防护效果等核心指标，增强指标科学性。

评审专家（签字）：韦虎

2026 年 3 月 18 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术研究（项目编号：25-50K）				
专家姓名	卜东平	职务/职称	正高级工程师	专　业	土木工程
专家单位	中铁一局集团有限公司			联系电话	18991319680

评　审　意　见

一、总体评价

项目选题聚焦深埋公路隧道岩爆防控行业关键问题，契合国家及陕西省交通科技发展方向，依托秦岭天台山隧道等重大工程，研究团队具备扎实前期基础，技术路线整体可行，综合评定为基本合格。

二、存在主要问题

1.完整性不足，缺失风险分析与应对措施、合作单位知识产权归属及权益分配内容，成果推广路径未细化，不符合省交通厅科研项目管理办法对大纲核心模块的要求。

2.成果指标矛盾，技术经济指标提及 SCI 论文 3 篇、专利 1 项，绩效指标仅列 SCI 论文 2 篇、专利授权 0 项，前后不统一，考核指标不明确。

3.经费预算不规范，设备改造租赁、专家咨询费等无明细支撑，间接费用计提依据未说明，与省级科研经费管理办法要求不符。

4.监督可追溯性弱，研究进度仅分阶段无具体节点，未明确成果交付、经费使用的检查方式及责任人，未制定偏差整改预案。

5.科研诚信内容未明确，未单独列明科研诚信承诺、数据真实性及成果原创性要求，未体现诚信负面清单及责任追究。

6.分类管理贴合性差，作为应用技术类项目，未明确专属验收标准、依托工程试验验证方案及成果落地验收指标。

评审专家（签字）：卜东平

2026 年 3 月 18 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术研究				
专家姓名	李宗华	职务/职称	正高工	专　业	交通运输
专家单位	陕西西韩城际铁路有限公司			联系电话	15029929222

评　审　意　见

本课题围绕原位测试技术—岩爆倾向性预测—岩爆支护结构体系与防控三方面技术研究，研发
埋公路隧道围岩力学性能原位测试理论与技术，建立深埋公路隧道岩爆灾害预测方法，开发深埋公路
道岩爆支护结构体系与防控技术，实现深埋公路隧道岩爆灾害的预报与防控，该技术研究成果在深埋
路隧道、矿业开采等深部工程建设中具有广阔的应用前景和较好的使用价值，研究的必要性强。课题
前期调研比较充分且相关研究成果较好，工作基础扎实，研究内容全面，技术路线清晰，方案合理可
研究人员结构合理，依托工程结合较好，计划进度安排合理。

建议：

1、 明确该技术路线如何有效的结合依托工程开展测试研究的途径和方法；

2、 完善研究成果与理论体系如何有效应用工程实际及应用评价效果分析等内容。

评审专家（签字）：李宗华

2026 年 3 月 18 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	25-50K深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术研究				
专家姓名	许崇帮	职务/职称	正高	专　业	隧道工程
专家单位	交通运输部公路科学研究院			联系电话	15120081075

评 审 意 见

项目研究目标明确，研究内容设置恰当，技术路线基本可行。主要问题与建议：

（1）深埋公路隧道围岩力学性能原位测试技术研发内容中提出"构建了软岩旋切过程的力学响应模型"，需要核查确认，软岩是否发生岩爆。

（2）深埋公路隧道围岩力学性能原位测试技术研发中对岩体材料力学参数的研究应从三轴力学状态给予考虑，直接分析三轴状态下的力学参数。

（3）深埋公路隧道岩爆支护结构体系与防控技术研发内容，建议研究隧道纵向岩爆施工控制分区机制，可划分外围区、邻近区和核心区，给出划分距离及工程岩爆控制措施，同时工程措施不宜仅限于支护结构参数。

（4）补充技术路线图。

评审专家（签字）：许崇帮

年　月　日　2016年3月18日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术研究				
专家姓名	王明年	职务/职称	教授	专　业	隧道工程
专家单位	西南交通大学			联系电话	13808029798

评　审　意　见

一、总体评价

项目研究内容全面，思路清晰，方法正确。达到了评审要求。

二、建议

1. 进一步完善现场试验方案？
2. 细化依托工程选择？

评审专家（签字）：

2026 年 3 月 18 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术研究（项目编号：25-50K）

大纲评审专家委员会名单

序号	评审会职务	姓 名	工作单位	所学专业	从事专业	职称/职务	签 名
1	主任委员	韦虎	陕西省交通规划设计研究院有限公司	桥梁工程	隧道与地下工程	正高工	韦虎
2	委员	李宗华	陕西西韩城际铁路集团公司	交通运输	公路工程	正高工	李宗华
3	委员	卜东平	中铁一局集团有限公司	土木工程	土木工程	正高工	卜东平
4	委员	许崇帮	交通运输部公路科学研究院	隧道工程	隧道工程	正高工	网上评审
5	委员	王明年	西南交通大学	隧道工程	隧道工程	教授	网上评审

评审会参会人员签到表

姓 名	职称/职务	工作单位	联系电话
申虎	正高	省交通设计院	13909260723
李锦萍	正高	陕西路桥集团	15029929222
张小军	正高	中铁一局集团	18991319880
王海亮	高工	陕西公路局	13609198511
赵少华	高工	中交一公院	18186552211
何明明	教授	西安理工大学	15339293694

2026 年 3 月 18 日

专家意见处理表

项目名称：深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术研究　　（项目编号：25-50K）

序号	姓名	建议内容	处理意见 （逐条回应，详细说明修改情况）
1	韦虎	补充两大关键问题的内在关联，明确围岩力学参数原位测试技术对基于数字钻技术岩爆倾向性预报技术的支撑作用，完善逻辑闭环	针对原稿中“围岩力学参数原位测试技术”与“基于数字钻技术的岩爆倾向性预报技术”之间内在关联不够明确、逻辑衔接不够紧密的问题，已对相关内容进行了系统性补充与优化。 （1）深埋公路隧道围岩力学参数原位测试技术 深埋公路隧道围岩力学参数原位测试技术是是本项目的又一技术关键。由于深部岩体应变型岩爆的孕育过程是一个非常复杂的过程，该过程不仅与岩体所赋存的地质环境、高地应力、岩石的物理力学性质等有关，而且与开挖卸荷效应、外界动力扰动以及施工技术等有关，受这些因素的影响，在高地应力状态下深埋公路隧道围岩力学特性会发生变化。因此，开展围岩力学参数的原位测试，是获取真实力学响应与参数演化规律的关键手段，不仅为揭示深部岩体力学行为提供基础数据，同时为基于数字钻技术的岩爆倾向性预报提供必要的参数支撑,只有研究出深埋公路隧道围岩力学参数原位测试技术，本项目技术才具有可行性。 （2）基于数字钻技术的深埋公路隧道岩爆倾向性预报技术 基于数字钻技术的深部岩体岩爆预报技术是本项目的又一技术关键。近年来，岩爆判据与分级标准有所发展，直接促进了岩体工程在设计阶段和施工阶段的岩爆预警、预测技术的蓬勃发展。深部岩体岩爆判据与预测模型对岩爆超前预测提出了前所未有的要求，对于具有同一岩爆倾向性的岩石在不同地质环境下，开挖后岩体可能发生岩爆也可能不发生岩爆,表明岩爆预测对围岩真实力学状态具有较

			强依赖性。围岩力学参数原位测试获取的力学数据及其演化规律，为岩爆倾向性判别与预测提供基础支撑，并据此建立基于数字钻参数的预测方法，实现岩爆风险的定量评价与超前预报。因此，只有在岩爆倾向性预报技术研究上有所突破，本项目技术才具有可行性。
2	韦虎	细化各研究内容的试验方案，明确室内／现场试验的工况、样本数量及测试标准，增强实施方案的可验证性	针对原稿中试验研究方案不够具体的问题，已经在技术路线中对这部分内容进行了补充： 天台山隧道现场试验选取隧道埋深大于 800 m 的典型区段作为主试验段，并在同一隧道内选取埋深 500～800 m 区段作为对比段，以分析不同应力水平下钻进响应差异。在每个试验断面掌子面布设不少于 3 个数字钻测试孔，孔深控制在 2.0 m 左右，以保证钻进过程中始终处于围岩原始应力影响范围内。测试孔布置于掌子面中心及两侧拱腰位置（距边墙约 1.0～1.5 m），以反映不同应力分布区域的响应差异。钻进测试采用不同规格钻头（8 mm、12 mm、16 mm）进行对比试验，系统采集钻进过程中的给进力、扭矩、转速、钻速及单位进尺能量等参数，并记录钻进过程中卡钻、振动突变及岩粉粒径变化等异常响应特征。针对该隧道高强花岗岩特性，重点分析钻进参数突变与围岩脆性破裂及岩爆前兆之间的关系。同时，结合依托工程已有地质编录、地应力测试数据及施工监测资料（如围岩收敛、初支受力及岩爆显现记录），建立“钻进参数—围岩强度—地应力水平—岩爆响应”多参数耦合数据库。现场试验按照“试验段选取—设备标定—多孔位测试—数据同步采集—开挖后对比验证—参数反演分析”的流程实施，每个断面重复测试不少于 3 次，确保数据稳定性与可重复性。最终形成适用于高地应力花岗岩隧道的数字钻原位测试方法及参数解释模型，实现围岩力学参数快速识别及岩爆风险现场判定。 川藏铁路雅安至林芝段现场试验选取沿线深埋隧道中具有高地应力特征的典型区段作为主试验段，并在同一工程中选取相对较浅埋深区段作为对比段，以分析不同应力水平及不同构造环境下钻进响应差异。其中，在埋深约 2000 m 处实测最小水平主应力约 38 MPa、最大水平主应力约 53 MPa，表明该区段处于极高地

			应力环境，可作为重点试验区段。在每个试验断面掌子面布设不少于 3 个数字钻测试孔，孔深控制在 2.0 m 左右，以保证钻进过程中始终处于围岩原始应力影响范围内。测试孔布置于掌子面中心及两侧拱腰位置（距边墙约 1.0～1.5 m），必要时根据围岩结构特征及局部应力集中情况在拱顶或边墙区域补充布孔，以反映不同应力分布及构造影响下的响应差异。钻进测试采用不同规格钻头（8 mm、12 mm、16 mm）进行对比试验，系统采集钻进过程中的给进力、扭矩、转速、钻速及单位进尺能量等参数，并记录钻进过程中卡钻、振动突变及岩粉粒径变化等异常响应特征。针对川藏铁路沿线高地应力、强构造活动及复杂岩性条件，重点分析钻进参数突变与围岩破裂、结构面控制破坏及岩爆前兆之间的关系。同时，结合依托工程已有地质编录、超前地质预报成果及施工监测资料（如围岩变形、支护受力及岩爆显现记录），建立“钻进参数—围岩条件—地应力水平—岩爆响应”多参数耦合数据库，并分析不同工程环境下参数响应的差异性及规律性。现场试验按照“试验段选取—设备标定—多孔位测试—数据同步采集—开挖后对比验证—参数修正分析”的流程实施，每个断面重复测试不少于 3 次，确保数据稳定性与可重复性。通过与秦岭天台山隧道既有研究成果进行对比，对相关参数及模型进行验证与修正。 室内试验岩样取自秦岭天台山隧道掌子面及超前钻孔中的典型微风化中粗粒黑云母花岗岩，优先选取完整性较好、无明显节理裂隙的岩芯及大块岩样。考虑现场围岩单轴抗压强度为 45.4~52.3 MPa、最大水平主应力为 6.7～15.4 MPa 的实际特征，室内试验采用伺服加载系统对试样施加 0 MPa、5 MPa、10 MPa、15 MPa 四级围压，将岩石加工为 50 mm 的立方体试样。试验前对岩样进行波速测试、密度测试和初始缺陷筛查，确保各组样品离散性可控。考虑秦岭天台山隧道围岩以完整花岗岩为主，同时局部受断层影响存在结构性差异，试验中设置完整岩样组和含人工切缝弱面组两类，以分别模拟完整围岩段和构造影响段的钻进响应差异。钻进设备采用室内数字钻探系统，钻头形式与现场数字钻设备保持一致，优先选取角片式钻头；钻头直径设置为 8 mm、12 mm、16 mm 三档，以对应现场

			不同测试工况。钻进参数结合现场便携式数字钻装备能力与硬岩钻进实际工况设置，转速控制在 300 r/min、500 r/min、700 r/min 三级，推进速度控制在 0.3 mm/s、0.8 mm/s、1.5 mm/s 三级。每一应力等级下均开展“钻头直径—转速—推进速度”正交组合试验，实时采集钻压、扭矩、钻速、转速、单位进尺能量、瞬时功率和钻进时间等参数，并同步记录钻屑粒径、粉屑颜色、孔壁粗糙程度及局部剥落特征。研究围岩由稳定状态向损伤积累状态演化过程中钻进参数的变化规律。通过对比不同应力水平下钻压、扭矩和单位进尺能量的增减趋势，识别高地应力及临界损伤状态下的敏感参数。每组工况重复试验不少于 3 次，重点统计不同围压与损伤水平下数字钻参数的平均值、离散系数和异常波动区间；结合试验后岩样破坏形态和微裂隙发育情况，建立“围压—损伤水平—数字钻参数”响应关系。最终将室内数字钻结果与秦岭天台山隧道现场数字钻测试结果进行标定和对比，形成适用于深埋公路隧道高地应力环境的数字钻参数解释方法，为围岩高地应力快速识别与分级评价提供试验依据。 室内力学试验岩样取自秦岭天台山隧道典型花岗岩围岩。试样加工为Φ50 mm×100 mm 标准圆柱体，每组试验不少于 5 个平行试件，以保证结果的统计可靠性。单轴压缩试验采用位移控制加载，加载速率控制在 0.002～0.005 mm/s 范围内，获取岩石单轴抗压强度、弹性模量、峰值应变及破坏模式等基本参数。试验过程中同步记录应力—应变全过程曲线，并结合破坏形态分析岩石脆性特征。三轴压缩试验结合依托工程地应力水平设置围压等级为 5 MPa、10 MPa、15 MPa，并增加 20 MPa 作为高应力集中条件，对应不同埋深及局部应力集中区。试验采用恒围压加载方式，获取不同围压条件下岩石峰值强度、残余强度及体积变形特征，建立围压—强度关系。循环加卸载试验用于分析岩石能量积聚与耗散过程。单轴循环加载按峰值强度的 20%、40%、60%、80%、90%分级进行；三轴循环试验在不同围压条件下采用相同加载路径。通过计算加载曲线和卸载曲线面积，获取输入能、弹性能及耗散能，并分析其随应力水平变化的演化规律。结合试验结果，建立“强度参数—能量参数—破坏模式”之间的关系，并与现场岩爆显现特

			征进行对比分析，提出适用于深埋公路隧道的岩爆倾向性判别参数和分级标准。
3	韦虎	完善成果转化具体方案，推动研究成果落地应用	针对原稿中成果转化路径不够具体、工程应用措施不够明确的问题，已对成果推广与应用内容进行了补充与细化。 高地应力隧道岩爆预测成果应用：基于本项目建立的高地应力环境下隧道岩爆预警方法和岩爆倾向性预测模型，可直接在深埋公路隧道及水利枢纽、地铁隧洞等深部工程施工中应用。通过与施工单位、监测机构合作，将旋切触探参数、耗散能分析和高地应力判定方法嵌入施工监测流程，实现对潜在岩爆区域的实时预警与安全决策支持。 研究成果的工程标准化推广：依据研究中建立的岩爆倾向性等级划分、旋切触探参数标准及高地应力计算方法，形成可落地应用的技术规范、操作手册和评价标准，便于工程单位在不同地质条件下快速实施岩爆预测与风险评估。 技术平台与培训体系建设：依托项目研究成果，建立“深部岩体岩爆预测与防控技术平台”，提供现场旋切触探试验、能耗测定及模型计算服务，同时开展面向施工单位和监测人员的培训，确保技术在工程中的准确使用和推广。 成果转化示范工程：选择已建成或在建的深埋隧洞工程（如引汉济渭隧洞、东庄水利枢纽等）作为示范工程，现场验证岩爆预测模型及旋切触探方法的可行性和精度，并总结形成可复制、可推广的工程实施方案，推动成果向行业标准化应用发展。 知识产权与产业化推进：围绕旋切触探仪设计、岩爆判据算法、高地应力计算方法等关键技术，申请发明专利和软件著作权，推动科研成果向技术服务、智能监测设备及工程施工方案产业化转化。

4	韦虎	增加岩爆预报精度、支护防护效果等核心指标，增强指标科学性	针对原稿中核心考核指标不够量化、工程效果指标不够突出的问题，已对相关内容进行了补充与完善。 以岩爆预报命中率、误报率和预警提前时间为核心评价指标，目标实现岩爆预报准确率≥85%、误报率≤15%、预警提前时间≥24 h。 以支护防护效果为核心指标，目标实现岩爆发生强度降低20%以上、围岩破坏范围降低15%以上、支护结构失效率明显下降。
5	卜东平	完整性不足，缺失风险分析与应对措施、合作单位知识产权归属及权益分配内容，成果推广路径未细化，不符合省交通厅科研项目管理办法对大纲核心模块的要求	针对原稿中项目管理与实施保障内容不够完整的问题，已依据陕西省交通运输厅科研项目管理相关要求，对大纲内容进行了系统补充与完善。 （1）项目风险分析与控制措施 本项目围绕深埋公路隧道岩爆灾害预报与防控关键技术开展研究，涉及深部高地应力环境下岩体力学行为、岩爆孕育机制、多源监测信息融合及工程应用等多个复杂环节，具有显著的系统性、交叉性与不确定性。在项目实施过程中，可能面临以下主要风险： 首先，理论模型与方法适用性风险。深埋隧道岩爆孕育与发生机制复杂，受地应力水平、岩性结构、施工扰动等多因素耦合作用影响，现有理论模型难以全面刻画其非线性演化过程，可能导致所建立的岩爆预测模型在不同工程条件下适用性存在差异。对此，本项目将通过“理论分析—室内试验—现场实测”多尺度、多手段协同研究路径，对模型进行动态修正与迭代优化，建立具有良好泛化能力的预测模型体系。其次，现场试验与数据获取风险。深埋隧道施工环境复杂，现场测试条件受空间、施工进度及安全等因素限制，可能导致数据获取不连续或精度不足。针对该问题，项目将合理制定现场试验方案，优化监测布置，综合采用数字钻探、声发射、微震监测等多源信息获取手段，通过多源数据交叉验证与融合分析，提高数据的完整性与可靠性。再次，关键技术集成与协同风险。本项目涉及数字钻探测试技术、岩爆倾向性预测模型及支护防控技术等多项关键技术，技术间存在耦合与集成问题，若处理不当，可能影响整体技术体系的稳定性与工程适用性。为此，将按照“分模块研发　分阶段集成—系统验证”的技术路线，逐

			步推进各子系统之间的协同融合，构建统一的数据接口与分析平台，确保系统运行的稳定性与协调性。此外，成果工程转化与推广风险。科研成果在从实验室研究向工程应用转化过程中，可能因地质条件差异及施工环境复杂性而出现适应性不足的问题。针对该风险，项目将依托典型工程开展示范应用，持续优化技术参数与应用方案，同时加强与设计、施工单位的协同合作，提高成果的工程适配性与推广可行性。综上，通过对上述风险的系统识别与针对性应对，本项目具备良好的风险可控性，可有效保障研究任务的顺利实施及预期目标的实现。 （2）知识产权归属及权益分配 本项目研究成果（包括专利、软件著作权及技术标准等）原则上由牵头单位与合作单位共同所有，按照各方在项目中的实际贡献比例进行权益分配；优先保障牵头单位的成果转化主导权，同时通过签订技术合作协议，明确成果使用权、转化收益分配比例及推广责任，确保各参与单位合法权益。 （3）成果推广路径 研究成果的工程标准化推广：依据研究中建立的岩爆倾向性等级划分、旋切触探参数标准及高地应力计算方法，形成可落地应用的技术规范、操作手册和评价标准，便于工程单位在不同地质条件下快速实施岩爆预测与风险评估。
6	卜东平	成果指标矛盾，技术经济指标提及 SCI 论文 3 篇、专利 1 项，绩效指标仅列 SCI 论文 2 篇、专利授权 0 项，前后不统一，考核指标不明确	针对原稿中技术经济指标与绩效指标表述不一致、考核指标不统一的问题，已对相关内容进行了全面梳理与统一修订为： 发表 sci 论文：2 篇；新型实用专利：1 项。
7	卜东平	经费预算不规范，设备改造租赁、专家咨询费等无明细支撑，间接费用计提依据未说明，与省级科研经费管理办法要求不符	针对原稿中经费预算说明不够细化、部分费用缺乏测算依据及间接费用计提说明不明确的问题，已对经费预算相关内容进行了系统补充与规范完善。 经费测算说明： 本项目经费预算依据《陕西省人民政府办公厅关于改革完善省级财政科研经费管理的实施意见》（陕政办发〔2022〕3 号）相关规定编制，结合项目研究内容和实

			施方案进行测算，确保经费安排合理、依据充分、使用合规。 （1）设备费（设备改造及租赁） 本项目不新增大型设备，主要为现有数字钻探设备的功能改造及及短期租赁使用。 设备改造费用主要包括：传感器加装（约 2 套×0.8 万元/套）、数据采集模块升级（约 1 套×1.4 万元），合计约 3 万元；设备租赁费用主要用于现场试验期间辅助设备租赁（如监测设备及配套装置），按约 2 次现场试验，每次约 0.5 万元测算，合计约 1 万元。上述费用根据设备市场价格及项目试验需求测算，具有明确数量及单价依据。 （2）业务费 材料费根据试验材料消耗量及市场单价测算；测试化验加工费依据试验次数及单次检测费用标准测算；差旅及会议费结合现场试验及技术交流需求，按照相关差旅标准执行；出版及知识产权费用依据论文发表及专利申请数量进行测算。 （3）劳务费（含专家咨询费） 专家咨询费根据项目技术咨询及成果评审需求测算，拟组织专家咨询约 2 次，每次约 5 人，按照每人每次约 0.3 万元标准计算，合计约 3 万元。 其他劳务费根据参与项目的研究人员数量及工作量测算，主要用于试验辅助、数据整理及分析等工作支出，按照实际参与时间及任务分配合理确定，符合科研劳务费管理规定。 （4）间接费用 间接费用按照陕政办发〔2022〕3 号文件规定，根据直接费用扣除设备购置费后的比例计提，统筹用于项目管理、绩效支出及科研条件支撑等支出，计提比例符合政策要求。 （5）经费管理与使用 项目经费实行专账管理，严格执行审批制度，明确项目负责人为第一责任人，确保经费使用真实、合规、可追溯，并与项目研究任务相匹配。

8	卜东平	监督可追溯性弱，研究进度仅分阶段无具体节点，未明确成果交付、经费使用的检查方式及责任人，未制定偏差整改预案	针对原稿中项目实施过程监督与管理不够细化、可追溯性不足的问题，已在修订稿中对相关内容进行了重点完善和补充说明。 （1）2026 年 03 月-2026 年 06 月：在本阶段实施过程中，按月设置关键节点（2026 年 03 月、2026 年 06 月），分别完成阶段性试验数据采集与模型初步构建，并形成阶段研究报告。由项目负责人统筹组织，课题负责人具体实施，定期开展内部检查与评估，确保试验数据真实可靠、模型构建过程可追溯。 （2）2026 年 07 月-2026 年 12 月：本阶段设置中期检查节点（2026 年 09 月）及阶段验收节点（2026 年 12 月），重点对理论模型、预测方法及验证结果进行检查评估。明确成果交付形式，包括阶段技术报告、模型算法及论文成果等，由项目负责人牵头组织阶段评审，并对研究成果质量进行把关，确保研究内容按计划推进。 （3）2027 年 01 月-2027 年 6 月：本阶段设置关键节点（2027 年 03 月、2027 年 06 月），分别完成岩爆孕育机制分析及预测方法初步建立。通过阶段性成果检查与技术讨论，对研究进展进行动态评估，并根据实际工程反馈对研究方案进行适当调整，确保科研工作与工程实际紧密结合。 （4）2027 年 07 月-2027 年 12 月：本阶段设置成果验收节点（2027 年 09 月）及结题验收节点（2027 年 12 月），明确最终成果交付内容，包括研究报告、技术方法、模型软件及论文成果等。建立成果审核与归档机制，确保成果完整、规范、可追溯。 此外，在项目实施全过程中，建立经费使用与过程管理的监督机制，严格按照相关科研经费管理规定执行，明确项目负责人为第一责任人，配备专人负责经费台账管理与审核，定期开展经费使用情况检查，确保经费使用规范透明。同时，建立偏差整改机制，当出现进度滞后或研究偏差时，及时分析原因，制定调整措施并明确责任人和整改时限，保障项目按计划顺利实施。

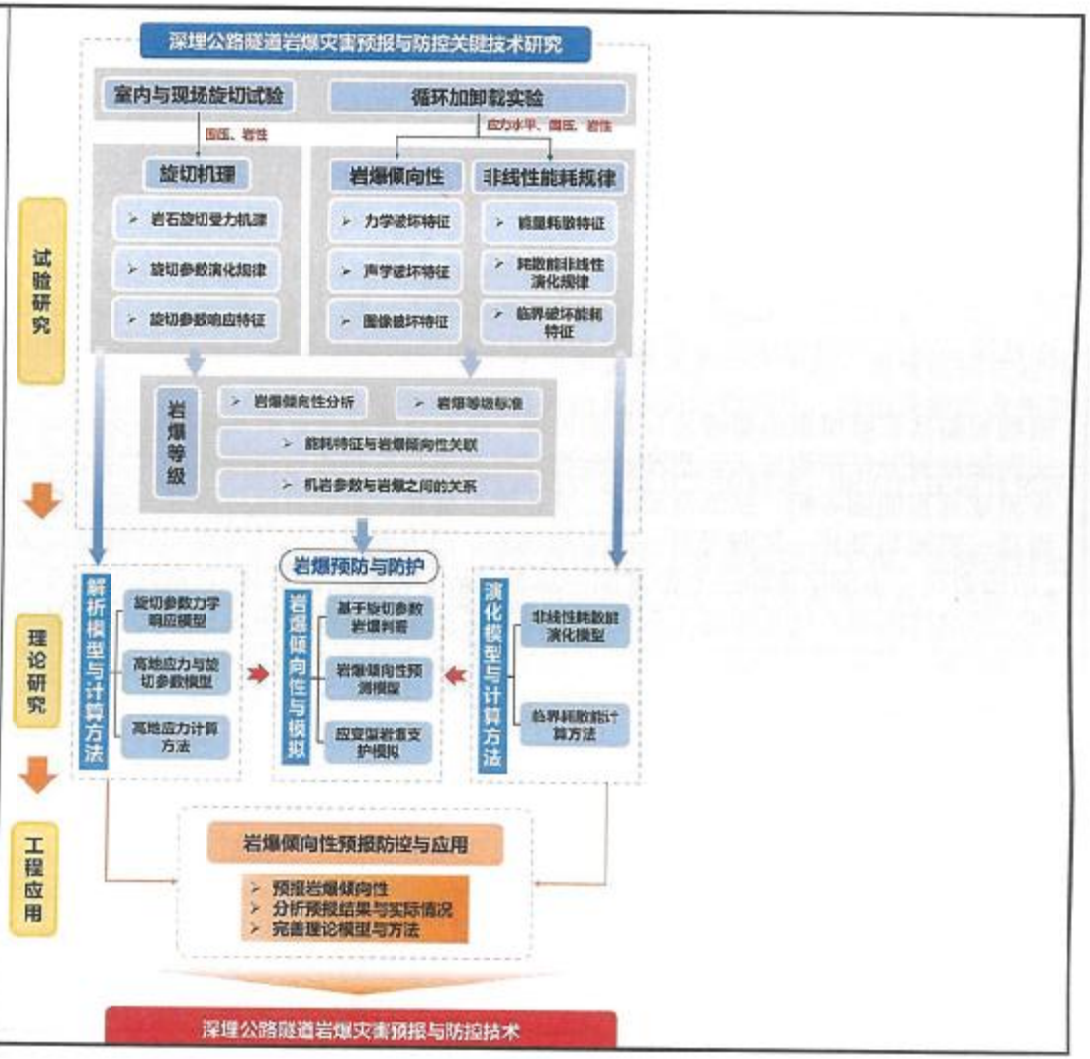
9	卜东平	科研诚信内容未明确，未单独列明科研诚信承诺、数据真实性及成果原创性要求，未体现诚信负面清单及责任追究	结合该建议，已对科研诚信相关内容进行了补充与细化完善。 （3）科研诚信与数据真实性保障机制 为确保项目研究过程规范、数据真实可靠及成果具有原创性，全面落实科研诚信要求，项目在实施过程中将严格遵守国家及陕西省关于科研诚信管理的相关规定，建立全过程科研诚信保障机制。 首先，在科研诚信承诺方面，项目组全体成员在项目启动阶段签署科研诚信承诺书，明确遵守学术规范、杜绝学术不端行为的责任要求，强化科研人员诚信意识，确保研究过程规范开展。其次，在数据真实性与可追溯性方面，建立统一的数据采集、记录与存储管理制度，对试验数据、监测数据及计算结果实行全过程记录与归档管理，确保数据来源清晰、过程可追溯、结果可复核。重要试验数据须保留原始记录，并建立数据备份机制，防止数据丢失或篡改。再次，在成果原创性与学术规范方面，严格执行论文发表、成果申报及技术报告编制的学术规范要求，杜绝抄袭、剽窃、重复发表及不当署名等行为。项目形成的研究成果须通过内部审核后方可对外发布，确保成果真实可靠、具有创新性。同时，在科研诚信负面清单管理方面，明确禁止数据造假、篡改数据、虚构实验结果、重复申报成果、违规使用经费等行为，一旦发现上述问题，将按照相关规定严肃处理。最后，在责任追究机制方面，建立“项目负责人—课题负责人—具体执行人员”三级责任体系，明确各层级科研诚信责任。对违反科研诚信要求的行为，依据国家及相关主管部门规定，追究相关责任人的责任，并视情节轻重采取通报批评、取消成果认定或终止项目等措施。 通过上述措施，构建覆盖项目全过程的科研诚信保障体系，确保项目研究过程规范、数据真实可靠、成果具有良好的科学性与可信度。
10	卜东平	分类管理贴合性差，作为应用技术类项目，未明确专属验收标准、依托工程试验验证方案及成果落地验收指标	结合应用技术类项目管理要求，已对成果验收与工程验证相关内容进行了补充与完善。 （4）应用技术类验收标准与工程验证方案 本项目属于应用技术类科研项目，研究成果需面向工程实际应用并具备明确的工

			程验证与验收标准。为提高项目成果的工程适用性与可落地性，结合深埋公路隧道工程特点，制定如下验收标准与工程验证方案。 首先，在项目验收标准方面，围绕“技术可用性、工程适应性及应用效果”三个维度，明确项目成果验收指标：一是形成完整的深埋公路隧道岩爆灾害预测与防控技术体系，包括岩体力学参数获取方法、岩爆倾向性预测模型及支护防控技术方案；二是建立基于数字钻探参数的岩爆预测方法，其预测结果与现场监测或工程实际情况具有良好一致性，预测准确率达到工程应用要求；三是形成相关技术报告、模型方法、软件工具及工程应用指南等成果，具备工程推广应用条件；四是完成规定数量的学术论文及技术成果，满足项目考核要求。 在依托工程验证方案方面，本项目将依托典型深埋公路隧道工程（如引汉济渭工程、陕西省在建深埋隧道或类似工程项目），开展现场试验与工程验证工作。通过在工程现场布设数字钻探测试、声发射或微震监测等手段，获取围岩力学参数及岩爆响应特征数据，将所建立的预测模型应用于实际工程条件下进行验证，对比分析预测结果与实际岩爆发生情况的一致性，评估模型的工程适用性。同时，结合工程施工过程，对提出的支护与防控技术进行现场应用与效果评价，形成工程应用反馈机制。 在成果落地与应用评价指标方面，以“可应用、可推广、可评价”为原则，明确成果落地指标：一是技术方法在实际工程中可直接应用，能够实现围岩力学参数快速获取及岩爆风险预判；二是预测结果能够为施工决策提供有效支撑，提升隧道施工安全性；三是支护与防控技术能够在工程中实施并取得良好效果；四是形成可推广的技术体系或应用模式，在类似工程中具备复制推广条件。 通过明确验收标准、依托工程验证及成果应用评价指标，确保项目研究成果真正服务于工程实践，实现由理论研究向工程应用的有效转化。

11	李宗华	明确该技术路线如何有效的结合依托工程开展测试研究的途径和方法；	针对技术路线如何有效结合工程的要求，已在技术路线部分部分进行了补充： 本项目技术路线以依托工程为核心载体，构建“已建工程数据支撑—室内试验机理分析—在建工程现场验证”的一体化研究与应用路径。首先，依托宝坪高速公路秦岭天台山隧道施工阶段获取的数字钻测试数据、地应力测试成果及围岩响应监测资料，系统分析深埋高地应力条件下钻进参数与围岩力学性质及岩爆响应之间的关系，建立基础数据体系与初步参数模型；其次，针对现场观测结果，通过室内单轴、三轴及循环加载试验以及室内数字钻试验，在可控应力条件下对围岩强度特性、能量演化规律及钻进响应机制进行机理验证，实现现场数据与试验结果的相互印证与参数标定；在此基础上，依托川藏铁路雅安至林芝段在建工程开展现场测试研究，选择具有高地应力及岩爆风险的典型隧道区段布设数字钻试验断面，获取不同地质与应力环境下的原位响应数据，并与天台山隧道既有成果进行对比分析，对相关模型进行工程验证与修正。通过上述“数据获取—机理验证—工程验证”的递进式研究方法，将理论分析、试验研究与工程实践紧密结合，形成可在不同工程条件下推广应用的技术路线与实施方法，确保研究成果的可靠性、适用性及工程可落地性。
12	李宗华	完善研究成果与理论体系如何有效应用工程实际及应用评价效果分析等内容。	针对研究成果如何在工程应用及如何评价应用效果，在技术路线 3.5 节中进行了相关内容的补充： 结合隧道开挖过程中围岩应力由前方集中向掌子面及其后方转移的特点，提出基于纵向分区的岩爆施工控制机制，将掌子面前后一定范围划分为外围区、邻近区和核心区。其中，外围区主要位于掌子面前方约 20～50 m 及后方 10～30 m 范围内，为应力集中逐渐形成但围岩尚未显著破裂的区域；邻近区位于掌子面前方约 5～20 m 及后方 5～10 m 范围内，为应力集中显著、微裂隙快速发育的敏感区域；核心区则为掌子面前方 0～5 m 及开挖暴露区，为应力集中与瞬时卸荷叠加作用下岩爆最易发生的关键区域。基于上述分区特征，构建差异化的岩爆防控措施体系：在外围区以超前预防为主，通过超前地质预报、数字钻测试及卸压孔或预裂爆破等措施实现应力调控与风险预判；在邻近区以过程控制为主，采用短进尺开

			挖、动态支护及局部卸压等手段，抑制围岩能量积聚与快速释放；在核心区以抗冲击支护与应急防护为主，强化高延性锚杆、钢拱架及钢纤维喷射混凝土等组合支护，同时结合防护设施及施工组织控制降低岩爆危害。通过将支护结构优化与施工方法调控、应力释放措施及监测预警手段相结合，形成“分区控制—分级防护—动态调整”的岩爆综合防控技术体系，实现从岩爆孕育到发生全过程的有效控制，并为深埋高地应力隧道岩爆灾害的工程防治提供技术支撑。
13	许崇帮	深埋公路隧道围岩力学性能原位测试技术研发内容中提出“构建了软岩旋切过程的力学响应模型”，需要核查确认，软岩是否发生岩爆。	针对评审意见中提出的“软岩旋切过程的力学响应模型”表述问题，我们已对相关内容进行了核查与修订。原文中“软岩”的表述确有不当之处，容易引起对研究对象及适用范围的误解。岩爆灾害通常发生于高地应力条件下的完整或较完整硬脆性岩体（如花岗岩、石英岩等），而软岩由于其塑性变形能力较强，难以发生典型岩爆现象。因此，本研究所涉及的工程背景及试验对象均为高地应力硬岩围岩，相关力学响应特征及数字钻测试方法亦针对硬岩条件建立。 基于上述认识，已将文中“软岩旋切过程的力学响应模型”统一修改为“硬岩旋切过程的力学响应模型”，并对相应段落进行了同步校核，以确保研究对象、工程背景及模型适用范围保持一致。
14	许崇帮	深埋公路隧道围岩力学性能原位测试技术研发中对岩体材料力学参数的研究应从三轴力学状态给予考虑，直接分析三轴状态下的力学参数。	针对评审意见中提出“围岩力学参数应从三轴应力状态进行分析”的问题，我们已对相关内容进行了修改，本研究已明确将围岩力学参数的获取与分析统一建立在三轴应力状态基础上。具体而言，通过开展不同围压条件下的三轴压缩试验，获取峰值强度、残余强度、弹性模量及体积变形等关键参数，分析围压对岩体强度与变形特性的影响规律，并据此建立三轴应力条件下的强度判据与参数体系。同时，将三轴试验结果与现场数字钻测试参数进行对比标定，构建反映实际应力环境的参数映射关系。
15	许崇帮	深埋公路隧道岩爆支护结构体系与防控技术研发内容，建议研究隧道纵向岩爆施工控制分区机制，可划分外围	针对评审意见中提出“建议开展隧道纵向岩爆施工控制分区机制研究，并明确分区距离及工程措施”的问题，我们已对“岩爆支护结构体系与防控技术研发”相关内容进行了补充与完善： 结合隧道开挖过程中围岩应力由前方集中向掌子面及其后方转移的特点，提出基

		区、邻近区和核心区，给出划分距离及工程岩爆控制措施，同时工程措施不宜仅限于支护结构参数。	于纵向分区的岩爆施工控制机制，将掌子面前后一定范围划分为外围区、邻近区和核心区。其中，外围区主要位于掌子面前方约 20～50 m 及后方 10～30 m 范围内，为应力集中逐渐形成但围岩尚未显著破裂的区域；邻近区位于掌子面前方约 5～20 m 及后方 5～10 m 范围内，为应力集中显著、微裂隙快速发育的敏感区域；核心区则为掌子面前方 0～5 m 及开挖暴露区，为应力集中与瞬时卸荷叠加作用下岩爆最易发生的关键区域。基于上述分区特征，构建差异化的岩爆防控措施体系：在外围区以超前预防为主，通过超前地质预报、数字钻测试及卸压孔或预裂爆破等措施实现应力调控与风险预判；在邻近区以过程控制为主，采用短进尺开挖、动态支护及局部卸压等手段，抑制围岩能量积聚与快速释放；在核心区以抗冲击支护与应急防护为主，强化高延性锚杆、钢拱架及钢纤维喷射混凝土等组合支护，同时结合防护设施及施工组织控制降低岩爆危害。通过将支护结构优化与施工方法调控、应力释放措施及监测预警手段相结合，形成“分区控制—分级防护—动态调整”的岩爆综合防控技术体系，实现从岩爆孕育到发生全过程的有效控制，并为深埋高地应力隧道岩爆灾害的工程防治提供技术支撑。

16	许崇帮	补充技术路线图	

17	王明年	进一步完善现场试验方案？	针对现场试验方案不够详细的问题，在技术路线中进行了补充： 天台山隧道现场试验选取隧道埋深大于 800 m 的典型区段作为主试验段，并在同一隧道内选取埋深 500～800 m 区段作为对比段，以分析不同应力水平下钻进响应差异。在每个试验断面掌子面布设不少于 3 个数字钻测试孔，孔深控制在 2.0 m 左右，以保证钻进过程中始终处于围岩原始应力影响范围内。测试孔布置于掌子面中心及两侧拱腰位置（距边墙约 1.0～1.5 m），以反映不同应力分布区域的响应差异。钻进测试采用不同规格钻头（8 mm、12 mm、16 mm）进行对比试验，系统采集钻进过程中的给进力、扭矩、转速、钻速及单位进尺能量等参数，并记录钻进过程中卡钻、振动突变及岩粉粒径变化等异常响应特征。针对该隧道高强花岗岩特性，重点分析钻进参数突变与围岩脆性破裂及岩爆前兆之间的关系。同时，结合依托工程已有地质编录、地应力测试数据及施工监测资料（如围岩收敛、初支受力及岩爆显现记录），建立“钻进参数—围岩强度—地应力水平—岩爆响应”多参数耦合数据库。现场试验按照“试验段选取—设备标定—多孔位测试—数据同步采集—开挖后对比验证—参数反演分析”的流程实施，每个断面重复测试不少于 3 次，确保数据稳定性与可重复性。最终形成适用于高地应力花岗岩隧道的数字钻原位测试方法及参数解释模型，实现围岩力学参数快速识别及岩爆风险现场判定。 川藏铁路雅安至林芝段现场试验选取沿线深埋隧道中具有高地应力特征的典型区段作为主试验段，并在同一工程中选取相对较浅埋深区段作为对比段，以分析不同应力水平及不同构造环境下钻进响应差异。其中，在埋深约 2000 m 处实测最小水平主应力约 38 MPa、最大水平主应力约 53 MPa，表明该区段处于极高地应力环境，可作为重点试验区段。在每个试验断面掌子面布设不少于 3 个数字钻测试孔，孔深控制在 2.0 m 左右，以保证钻进过程中始终处于围岩原始应力影响范围内。测试孔布置于掌子面中心及两侧拱腰位置（距边墙约 1.0～1.5 m），必要时根据围岩结构特征及局部应力集中情况在拱顶或边墙区域补充布孔，以反映不同应力分布及构造影响下的响应差异。钻进测试采用不同规格钻头（8 mm、12

			mm、16 mm）进行对比试验，系统采集钻进过程中的给进力、扭矩、转速、钻速及单位进尺能量等参数，并记录钻进过程中卡钻、振动突变及岩粉粒径变化等异常响应特征。针对川藏铁路沿线高地应力、强构造活动及复杂岩性条件，重点分析钻进参数突变与围岩破裂、结构面控制破坏及岩爆前兆之间的关系。同时，结合依托工程已有地质编录、超前地质预报成果及施工监测资料（如围岩变形、支护受力及岩爆显现记录），建立“钻进参数—围岩条件—地应力水平—岩爆响应”多参数耦合数据库，并分析不同工程环境下参数响应的差异性及规律性。现场试验按照“试验段选取—设备标定—多孔位测试—数据同步采集—开挖后对比验证—参数修正分析”的流程实施，每个断面重复测试不少于3次，确保数据稳定性与可重复性。通过与秦岭天台山隧道既有研究成果进行对比，对相关参数及模型进行验证与修正。
18	王明年	细化依托工程选择？	针对评审意见中提出“依托工程选择需进一步细化”的问题，我们已在项目依托工程中进行了补充： 本项目以宝坪高速公路秦岭天台山超长隧道作为主要数据依托工程。该隧道目前已建成通车，但在施工阶段已开展了数字钻测试及相关现场观测工作，获取了不同埋深及不同地应力条件下的原位测试数据，为本项目提供了可靠的数据基础。在此基础上，针对该工程获取的数据，已通过室内力学试验及室内数字钻试验对相关规律进行了系统分析与验证，实现了现场数据与试验结果之间的相互印证。同时，结合本部分所述川藏铁路雅安至林芝段在建工程，进一步开展现场验证研究，通过在建工程中开展数字钻测试及围岩响应观测，对基于秦岭天台山隧道建立的方法和模型进行验证与修正，从而形成“已建工程数据分析—室内试验验证—在建工程验证”的完整研究体系。

大纲评审委员会专家（签字）：

项目负责人（签字）：