

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.01.019

非常温环境下控制爆破施工技术研究

杜忠龙,汪高龙,李树强

(浙江京安爆破工程有限公司,杭州 310000)

摘要: 针对乌海能源路天煤矿四采区南翼火点治理区存在的高温自燃、高陡边坡及复杂空巷群等极端地质条件,研究基于热-力耦合理论,开展了非常温环境下地质灾害治理的施工管理与技术机理研究。通过现场试验、数值模拟与理论分析,形成了“温度分区-热力耦合分析-差异化设计”的爆破设计方法,采用了“注水降温-凝胶隔热-PVC套管隔离”的组合防护措施与数码电子雷管精准起爆技术,揭示了温度场对岩体力学特性及爆破作用机理的影响规律,建立了考虑温度效应的岩体动态本构模型。研究提出了“温度分区-热力耦合分析-差异化设计-协同控制”的系统治理方法,构建了基于数码电子雷管的多危害效应控制体系。现场应用表明:爆破振动速度控制在 $0.38\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内,飞石最大散落距离 $<50\text{ m}$,高温孔降温治理率达100%,实现了“零伤害、零事故、零污染”目标。研究成果为非常温环境矿山地质灾害治理提供了理论依据和技术支撑。

关键词: 非常温环境; 地质灾害; 热-力耦合; 爆破振动控制; 安全管理

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)01-0171-07

Research on Controlled Blasting Construction Technology in Extreme Temperature Environments

DU ZHONG-long, WANG Gao-long, LI SHU-qiang

(ZheJiang Jing'an Blasting Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: This study addresses the extreme geological conditions, including high-temperature spontaneous combustion, steep, high slopes, and a complex network of abandoned workings in the fire-affected southern wing of Wuhai Energy's Lutian Coal Mine. Focusing on non-ambient temperature environments, the research examines construction management strategies and technical solutions for geological hazard control using thermo-mechanical coupling theory. Field experiments, numerical modeling, and theoretical studies were combined to develop a “temperature-zoning/thermo-mechanical coupling/differential-design” blasting method. The implemented solution features an integrated protection package of “water injection for cooling + gel insulation + PVC-sleeve isolation” together with digital electronic detonator precision initiation. Key findings include the characterization of the effects of temperature on rock mass mechanics and blasting dynamics, along with the development of a temperature-dependent dynamic constitutive model for rock masses. The proposed systematic approach integrates temperature zoning analysis, coupled thermo-mechanical evaluation, customized design, and coordinated control measures, establishing a multi-hazard mitigation system utilizing digital electronic detonators. Practical applications demonstrated exceptional safety performance with blast vibrations controlled below $0.38\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$, flyrock limited to under 50 m , and complete success in high-temper-

收稿日期 (Date of reception): 2025-11-07

网络首发日期 (Published online): 2025-12-11

作者简介: 杜忠龙 (1978-), 男, 吉林人, 本科、高级工程师, 从事爆破施工设计与安全管理方面的研究, (E-mail) 68189634@qq.com。

通信作者: 汪高龙 (1974-), 男, 安庆人, 本科、学士、正高级工程师, 从事采矿工程、爆破工程方面的研究, (E-mail) 578591642@qq.com。

About the author: DU Zhong-long (1978-), male, born in Jilin province, bachelor degree, senior engineer, mainly engaged in blasting construction design and safety management, (E-mail) 68189634@qq.com.

Corresponding author: WANG Gao-long (1974-), male, born in Anqing city, bachelor degree, professor-level senior engineer, mainly engaged in mining engineering and blasting engineering, (E-mail) 578591642@qq.com.

ature hole cooling, achieving the safety objectives of “zero injuries, zero accidents, and zero environmental contamination”. These results offer valuable theoretical foundations and practical methodologies for managing geological risks in mining operations under extreme temperature conditions.

Key words: extreme temperature environments; geological disaster; thermal-mechanical coupling; blasting vibration control; safety management

我国西部矿区煤火灾害分布范围广、温度梯度大、地质条件复杂,其治理长期面临技术适应性与理论深度不足的挑战。特别是在黄河流域生态保护与高质量发展战略背景下,发展针对高温、高陡边坡及复杂空巷群等极端地质条件的爆破治理技术,成为矿区地质灾害防控的迫切需求。

目前,国内外关于非常温环境爆破的研究主要集中在爆破器材的热安全性方面。例如,王继仁等系统梳理了煤田火灾治理技术^[1],指出高温环境下爆破安全控制是关键难题;汪旭光、于亚伦等奠定了工程爆破的理论基础,但对温度场与爆破作用机理之间的耦合关系尚未深入揭示。在热-力耦合效应方面,现有研究多侧重于静态或准静态温度作用下岩体力学性质的变化^[2],而在爆破动力荷载与温度场协同作用机制、岩体动态响应的温度效应以及相应的爆破参数设计方法等方面,仍缺乏系统性的理论与技术体系^[3]。

以乌海能源路天煤矿四采区南翼火点治理区为工程背景,聚焦高温自燃、高陡边坡及复杂空巷群共存条件下的爆破施工难题。通过现场试验、数值模拟与理论分析相结合的方法,重点研究温度场对岩体动态力学特性及爆破作用机理的影响规律^[4],建立考虑温度效应的岩体动态本构模型与爆破设计方法,形成“温度分区-热力耦合分析-差异化设计-协同控制”的系统治理技术体系,并构建基于数码电子雷管的多危害效应控制与安全管理机制^[5],以为非常温环境下矿山地质灾害治理提供理论依据与工程实践参考。

1 工程概况

1.1 治理区现状

路天煤矿四采区南翼火点治理区位于内蒙古自治区乌海市海南区公乌素镇,治理区呈不规则矩形分布,南北长约 890 m,东西宽约 364 m,总面积约 44.79 万 m²,治理区域如图 1 所示。

火区源于 2003—2007 年形成的综放工作面采空区,2011—2017 年露天复采揭露后,遗煤在长期持续氧化作用下发生自燃。高温自燃导致上覆岩层在长期烘烤下出现结构变质、软化及粉化现象,岩体

物理力学性质发生显著变化。通过现场取样和实验室测试,发现高温作用后岩体的单轴抗压强度降低 30%~50%,弹性模量下降 40%~60%,泊松比增大 20%~30%。这种力学性能的劣化进一步引发边坡沉降、围岩失稳,治理区顶部形成宽度 0.3~0.6 m 的贯通性裂缝;加之边坡上部堆积大量渣石,进一步加剧边坡失衡变形,最终形成角度 70°~80° 的高陡不稳定边坡,地质灾害风险突出,施工区域周边环境如图 2 所示。

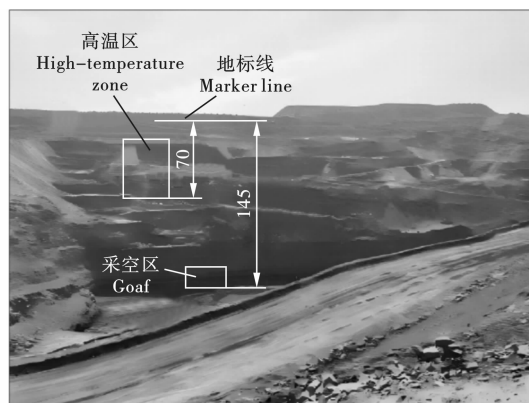


图 1 治理区域现状图(单位:m)

Fig. 1 Current status map of the governance area(unit:m)

1.2 地质与火区特征

治理区位于 F 公逆断层上盘,含 16、17 号两层开采煤层,2011 年后因露天复采揭露引发煤层自燃。现场钻探数据显示:高温异常孔占总钻孔数的 38%,大部分孔内温度介于 60~100℃且温度呈“上低下高”垂直分布特征,最大温升速率达 8.3℃/h;边坡区域发育宽度 0.3~0.6 m 的裂缝,局部出现滑移台阶,边坡整体稳定性极差。通过热红外成像和钻孔测温数据,分析表明,高温区域主要沿采空区分布,最高温度达 680℃,且温度场呈现明显的非均匀特征。这种温度分布的不均匀性导致岩体产生热应力,进一步加剧了边坡的变形和破坏。

1.3 非常温环境特征

依据《煤矿安全规程》(2022 版)及《爆破安全规程》(GB 6722—2014)要求,结合现场实测温度数据,将治理区划分为以下三类区域,明确各区域作业管控要求:

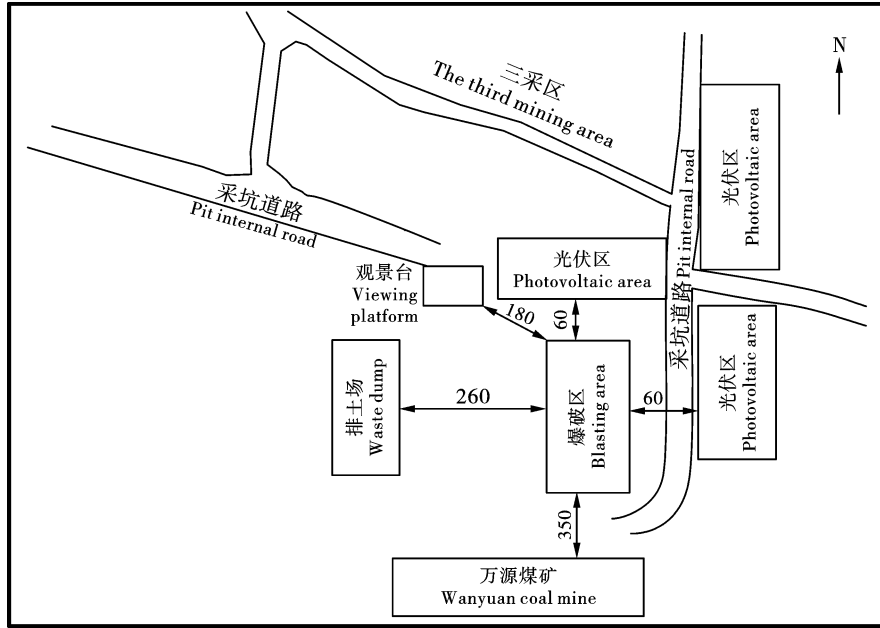


图 2 周围环境图(单位:m)

Fig. 2 Surrounding environment(unit:m)

(1) 常温区 ($T < 40^{\circ}\text{C}$): 岩体热损伤较小, 力学性能相对稳定, 满足常规爆破安全条件; 可按正常流程实施爆破作业。

(2) 异温区 ($40^{\circ}\text{C} \leq T < 100^{\circ}\text{C}$): 岩体出现明显热损伤, 力学性能劣化, 需采取特殊防护措施。

当 $40^{\circ}\text{C} \leq T < 60^{\circ}\text{C}$ 时, 允许爆破但需采取隔热防护、减少装药量、缩短装药时间等针对性措施。

当 $60^{\circ}\text{C} \leq T < 100^{\circ}\text{C}$ 时, 需采用“注水降温 + 隔热凝胶注入 + PVC 套管隔离”组合措施, 将孔内温度降至 60°C 以下后方可开展爆破施工。

(3) 高温禁爆区 ($T \geq 100^{\circ}\text{C}$): 岩体热损伤严重, 力学性能显著降低, 禁止爆破作业, 采用机械开挖方式处理。

通过热-力耦合分析发现, 温度对岩体爆破效果的影响主要体现在三个方面: 首先, 高温改变岩体的动态力学参数, 影响应力波传播特性; 其次, 温度梯度产生的热应力会改变岩体的初始应力状态; 第三, 高温影响爆破器材的性能和安全性。

2 非常温环境爆破关键技术

2.1 高温环境下岩体特性变化规律

通过实验室试验和数值模拟, 研究了温度对岩

体力学性能的影响规律^[6]。结果表明: 随着温度升高, 岩体的动态抗压强度、弹性模量逐渐降低, 而动态抗拉强度的变化则呈现先增后降的趋势。在 $40 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 范围内, 岩体的动态抗压强度下降约 $30\% \sim 50\%$, 弹性模量降低 $40\% \sim 60\%$ 。这种力学性能的变化直接影响爆破能量的传递和岩石的破碎效果。

基于试验数据, 建立了考虑温度影响的岩体动态本构模型

$$\sigma_d = f(\varepsilon, \varepsilon^*, T) = [1 - \alpha(T - T_0)] \sigma_{d0}(\varepsilon, \varepsilon^*)$$

式中: σ_d 为动态应力; ε 为应变 ε^* 为应变率; T 为温度; T_0 为参考温度; α 为温度影响系数; σ_{d0} 为基准应力。

2.2 差异化爆破参数设计原理

根据岩体热-力耦合分析结果, 建立了考虑温度影响的爆破参数设计方法^[7]:

(1) 常温区: 基于传统爆破理论, 采用相对较大的参数。台阶高度为 15 m , 孔径 90 mm , 孔距 $4.2 \text{ m} \times$ 排距 3.3 m , 单耗 0.30 kg/m^3 , 数码电子雷管逐孔起爆, 最大单响药量 62 kg , 常温下爆破参数如表 1 所示。

表 1 常温下爆破参数表

Table 1 Blasting parameters table at room temperature

孔径 ϕ Hole diameter ϕ/mm	孔距 a Hole spacing a/m	排距 b Row spacing b/m	孔深 L Hole depth L/m	单耗 Powder factor/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	堵塞长度 Stemming Length/ m	单孔药量 Q Charge per hole Q/kg	备注 Remarks
90	4.2	3.3	16	0.30	3.5	62	

(2) 异温区:考虑岩体热损伤导致的力学性能劣化,优化爆破参数,台阶高度降至 5 m,孔径增大至 120 mm,孔距 3.5 m × 排距 3.0 m,单耗降至 0.28 kg/m³ 台阶高度为 5 m,钻孔深度 6 m,孔径 120 mm,孔距 3.5 m × 排距 3 m,单耗降至 0.28 kg/m³,采用导爆索+数码雷管排间延期,最大单响控制在 16 kg;装药前孔口覆盖隔热毡,装药至

起爆时间 ≤ 30 min。

通过试验对比,在高温区域,由于岩体波阻抗降低,应力波衰减加快,需要适当增加装药量或减小孔网参数以保证爆破效果^[8]。同时,高温区域的岩体更容易过度破碎,需要控制单孔装药量,异温下爆破参数如表 2 所示。

表 2 异温下爆破参数表

Table 2 Blasting parameters table at non-ambient temperatures

孔径 ϕ Hole diameter ϕ/mm	孔距 a Hole spacing a/m	排距 b Row spacing b/m	孔深 L Hole depth L/m	单耗 Powder factor/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	堵塞长度 Stemming Length/m	单孔药量 Q Charge per hole Q/kg	备注 Remarks
120	3.5	3.0	6.0	0.28	3.0	16	

(3) 高温爆区:采用“三阶降温法”:①缓慢注水降温;②隔热凝胶注入(采用胶体灭火材料和水:1:100 比例搅拌后,5 min 后形成隔热凝胶);③PVC 套管隔热。

2.3 异温孔测温与标识

(1) 异温孔测温与热力学分析

建立了基于热力学理论的温度监测与分析方法。通过现场实测和数值模拟,研究了炮孔温度场的时空分布规律。发现炮孔温度在钻孔后存在明显的回升现象,其变化规律可用以下经验公式描述

$$T(t) = T_a + (T_0 - T_a) \exp(-\beta t)$$

式中: $T(t)$ 为时刻的温度; T_a 为环境温度; T_0 为初始温度; β 为温度回升系数。

基于这一规律,制定了“三阶段”平行验收测温制度,确保测温数据的准确性和可靠性。通过热力学分析,确定了各温度区域的临界值,为差异化爆破设计提供了理论依据。

(2) 高温是火区爆破的核心危险源,为精准管控温度风险,建立“三阶段”平行验收测温制度,具体流程如下:测温设备:选用 UT320A 单通道热电偶测量仪(精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$) 与红外测温枪(量程 $-50 \sim 600^\circ\text{C}$) 作为主要测温设备,确保数据可靠性。

第一阶段测温:钻孔完成后 2 h 内开展孔内温度测量,按温度区间进行标识:

- ① $T < 40^\circ\text{C}$ (常温区):孔口插蓝色小三角旗;
- ② $40^\circ\text{C} \leq T < 100^\circ\text{C}$ (异温区):孔口插黄色小三角旗;
- ③ $T \geq 100^\circ\text{C}$ (高温禁爆区):孔口插红色小三角旗;

第二阶段测温:钻孔完成后 12 h 内复测温,对温度变化的炮孔重新标识,动态更新区域分类。

第三阶段测温:装药前 8 ~ 10 min 进行最终复核测温,需满足两项要求:

- ① 两组仪器的测温误差 $\leq 5^\circ\text{C}$;
- ② 异温孔温度回升不超过 60°C (即复核温度 $\leq 60^\circ\text{C}$);

隔热降温后孔内温度 $T \geq 60^\circ\text{C}$ 的炮孔禁止进行装药作业,且测温过程需双人操作、双表复核,并全程记录测温数据。

2.4 降温隔热机理与技术

研究了注水降温过程中的热传递机理。通过计算流体动力学(CFD)模拟,优化了注水参数^[9]。结果表明:缓慢注水可以实现较好的降温效果,同时避免急冷导致的岩体损伤。

隔热凝胶的作用机理包括:①填充裂隙,阻断热对流;②低导热系数,减少热传导;③水分蒸发吸热。通过实验确定了最优配比(胶体灭火材料:水 = 1:100)和注入量(孔深 1/3)。

针对异温区高温风险,采用“三阶降温 + 双重隔热”技术方案,具体降温隔热关键措施步骤如下:

(1) 注水降温:对异温区炮孔缓慢注水(流速控制在 5 ~ 8 L/min),避免急冷导致岩体开裂或高温蒸汽伤人,初步将孔内温度降至 60°C 以下。

(2) 隔热凝胶注入:按孔深 1/3 高度(孔深 6 m 时注入高度约 2 m)向孔内灌入隔热凝胶(胶体灭火材料与水按 1:100 比例搅拌,5 ~ 8 min 后固化成型),填充孔壁间隙。

(3) PVC 套管隔离:将直径 100 mm 的 PVC 管(下端用管盖封堵)压入孔内,使隔热凝胶紧贴孔壁,形成第一道隔热屏障。

(4) 装药与补水:在 PVC 管内装入直径 90 mm 的 2# 岩石乳化炸药,装药完成后向孔内及 PVC 管内

补充清水,进一步强化隔热效果与炸药稳定性。胶体防火材料实物如图3所示。

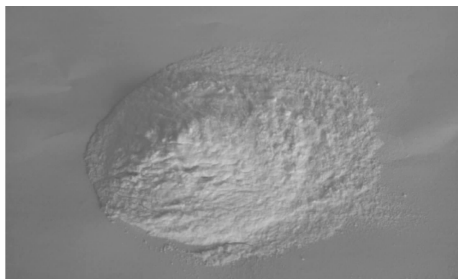


图3 胶体防火材料实物图

Fig. 3 Physical image of colloidal fireproof material

2.5 异温区爆破器材选用与装药结构

(1) 器材选用原则

①炸药:严禁使用热稳定性差的铵油炸药,均选用熔点 $\geq 120^{\circ}\text{C}$ 、热安定性更优的2#岩石乳化炸药。

②起爆网路:孔外采用数码电子雷管起爆导爆索网络,孔内禁止使用雷管直接加工起爆药包,避免高温环境下雷管意外发火。

(2)装药结构设计:采用“PVC套管+乳化炸药+清水填充”结构,具体自上而下、从内到外依次为:充填物(黄土)→导爆索→乳化炸药柱→PVC套管→隔热凝胶→孔壁,确保炸药与高温岩体完全隔离。装药结构如图4所示。

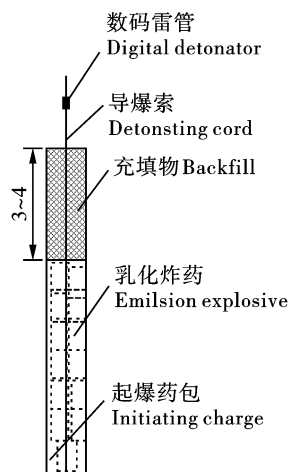


图4 装药结构图(单位:m)

Fig. 4 Charge configuration diagram(unit:m)

2.6 异温区爆破安全管理

(1)成立专门的火区爆破作业班组,经火区作业专项训练并考核合格后才能进入火区实施爆破作业。

(2)安全培训:强化作业与管理人员安全意识,做好培训教育,特别是针对火区爆破作业的专项培

训,确保作业人员掌握高温爆破的安全技术知识和应急处理能力。

(3)制定严格的异温区作业限制:作业时间控制,严格控制火区一次起爆装药作业时长,一次装药爆破炮孔数量不宜过多,一般爆破孔数30孔)、孔深不超过6 m,孔深(≤ 6 m)。从开始装药到起爆整个作业过程时间不能超过30 min。

(4)挑选爆破作业经验丰富、体能较好的年轻爆破员,一般情况下每孔作业人员不超过2人,总人数不超过9人,所有作业人员配备必要的防高温劳动保护用品。

2.7 爆破-挖运-监测协同作业

为降低多工序交叉作业风险,建立“爆破作业窗口期”制度,实现各环节协同管控:

(1)时间协同:每日6:00~18:00为爆破作业窗口期,同步协调光伏区停电配合,避免爆破干扰供电安全。

(2)空间协同:挖运设备在爆破警戒范围外20 m处待命,严禁提前进入危险区域。

(3)监测协同:爆破后5 min内启动GNSS边坡监测,若位移量 < 1 mm判定为边坡稳定,方可允许挖运设备进场;采用无人机红外巡检+三维激光扫描技术,在爆后2 h内完成危石识别与清除,避免二次灾害。

2.8 多危害效应协同控制

(1)爆破振动控制:基于萨道夫斯基公式回归分析,得到场地系数 $K = 180$ 、衰减指数 $\alpha = 1.65$,通过数码电子雷管逐孔起爆技术^[10],将单响药量降至62 kg,振动速度预测值 0.42 kg/m^3 ,现场实测值 0.38 kg/m^3 ,满足光伏区允许振速 0.5 kg/m^3 的允许振速要求。

(2)飞石控制:基于德汤尼克公式 $R_{f\max} = K_{\phi} D$ ($R_{f\max}$ 为飞石飞散距离; K_{ϕ} 为安全系数;取值范围15~16; D 为钻孔直径,cm),优化堵塞长度,确保堵塞长度 ≥ 3.0 m,靠近光伏发电阵列100 m采用“沙袋+炮被”联合覆盖炮孔,飞石最大散落距离由180 m降至50 m。

(3)热扰动控制:异温区爆破前30 min内完成装药,缩短炸药高温暴露时间,采用高熔点($\geq 120^{\circ}\text{C}$)二号岩石乳化炸药,雷管脚线包裹石棉绳(厚度 ≥ 3 mm),避免高温灼蚀引发起爆故障。

3 安全管理机制

3.1 组织架构设计

设立“非常温环境爆破安全领导小组”,实行

“双首长”负责制,具体架构如下:

(1)组长:项目经理与矿方安全总监(共同担任),统筹协调安全管理工作。

(2)下设专业组:技术组(负责参数设计与技术交底)、安全组(负责现场安全监督)、应急组(负责突发事件处置)、保卫组(负责警戒与人员管控)。

(3)验收机制:实行“三级确认”制度,即班组自检→项目部复检→矿方终检,所有环节验收合格后方可进入下一道工序。

3.2 风险预控与清单管理

构建“风险辨识-评估-管控”全流程清单,覆盖8个关键作业环节、97项风险源:

(1)风险辨识:针对钻孔、高温降温、装药、运输、警戒等环节,全面识别高温灼烫、爆炸、滑坡等风险。

(2)风险评估:采用LSR法(Likelihood-Severity-Risk)动态评估风险等级,划分高、中、低三级风险。

(3)风险管控:高风险作业前24h发布预警短信,明确管控责任人与应急措施;中、低风险作业实行“作业票”制度,全程记录管控过程。

3.3 应急体系

(1)预案体系:编制“1+9”应急预案体系,即1项综合应急预案+火灾、爆炸、盲炮、高温中暑、边坡滑坡等9项专项应急预案。

(2)应急队伍:组建30人的兼职应急救援队伍,配备正压式空气呼吸器(20套)、防爆无人机(1台)、红外热像仪(1台)等装备。

(3)应急演练:每季度开展1次高温盲炮、边坡滑坡等典型场景应急演练,确保应急响应时间 ≤ 10 min,提升处置能力。

4 应用效果

通过现场监测和数据分析,对爆破效果进行了系统评价。在异温区爆破中,大块率控制在5%以下,爆破块度分布均匀,满足挖运要求。与传统方法相比,爆破效率提高25%,成本降低15%,爆破效果如图5所示。



图5 爆破效果照片

Fig. 5 Blasting effect photo

截至2025年10月,路天煤矿四采区南翼火点治理工程累计完成爆破方量 360 万 m^3 ,其中异温区爆破方量 120 万 m^3 ,高温孔降温治理率达100%,各项指标均优于设计要求。

①安全指标:未发生轻伤及以上安全事故,实现“零伤害、零事故、零污染”目标。

②环境指标:爆破振动速度 ≤ 0.38 cm \cdot s $^{-1}$,飞石最大散落距离 ≤ 115 m,噪声 ≤ 85 dB(A),均满足周边环境要求。

③效益指标:光伏发电区实现零中断运行,治理区生态恢复面积达 38 万 m^2 ,取得显著的经济、社会与生态效益。

5 结论与展望

5.1 主要结论

①通过热-力耦合数值模拟和实验研究^[11],揭示了高温环境下岩体动态力学响应规律,建立了考虑温度影响的爆破参数设计理论。

②提出了“测温分区-分级降温-多重隔热-差异化爆破”的系统技术体系,解决了高温火区爆破的安全性和有效性难题。

③建立了基于多源信息融合的智能监测预警系统,实现了风险的早期识别和预警。

④形成的安全管理体系为同类工程提供了可复制、可推广的范例。

5.2 未来展望

下一步将重点开展三方面研究:

①深研高温环境下岩体损伤演化机理,完善热-力耦合理论模型^[12]。

②开发新型智能降温材料和高效降温装备,提升降温效率。

③构建基于数字孪生的智能决策支持系统,实现治理过程的智能化管理^[13]。

④开展非常温环境下爆破环境影响评价研究,推动绿色爆破技术的发展^[14]。

参考文献(References)

- [1] 王继仁,王雪峰.煤田火灾治理技术研究进展[J].工程爆破,2020,26(5):1-9.
- [1] WANG Ji-ren, WANG Xue-feng. Progress in research on coal field fire control technology [J]. Engineering Blasting, 2020, 26(5): 1-9. (in Chinese)
- [2] 刘旭,张强,吴震,等.高温处理后砂岩在动态加载下的热力学性质实验研究[J].国际岩石力学与采矿科学杂志,2024,176:105703.

- [2] LIU Xu, ZHANG Qiang, WU Zheng, et al. Experimental study on the thermal-mechanical properties of sandstone after high-temperature treatment under dynamic loading [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2024, 176:105703. (in Chinese)
- [3] 张智宇,刘洋,颜事龙. 高温岩体爆破破碎机理与参数设计研究进展[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(3): 031301.
- [3] ZHANG Zhi-yu, LIU Yang, YAN Shi-long. Research progress on blasting fragmentation mechanism and parameter design of high-temperature rock mass[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(3):031301. (in Chinese)
- [4] 王鹏,徐俊,方柯,等. 冲击载荷下高温大理岩的动态响应与损伤特性:实验与模拟研究[J]. *岩石力学与岩石工程*, 2023, 56(5):3781-3798.
- [4] WANG Peng, XU Jun, FANG Ke, et al. Dynamic response and damage characteristics of high-temperature marble subjected to impact loading: experiment and modeling [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2023, 56(5):3781-3798. (in Chinese)
- [5] 孟海利,薛里,杨年华. 数码电子雷管在复杂环境精细爆破中的应用与发展[J]. *爆破*, 2024, 41(1):1-8.
- [5] MENG Hai-li, XUE Li, YANG Nian-hua. Application and development of digital electronic detonators in fine blasting under complex environments [J]. *Blasting*, 2024, 41(1):1-8. (in Chinese)
- [6] 杨仁树,许鹏,陈程. 热冲击作用下花岗岩动态拉伸力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(S2):3789-3798.
- [6] YANG Ren-shu, XU Peng, CHEN Cheng. Experimental study on dynamic tensile mechanical properties of granite under thermal shock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(S2):3789-3798. (in Chinese)
- [7] 宋浦,李俊,王晓峰. 基于热-力耦合的异温矿区台阶爆破参数优化研究[J]. *工程爆破*, 2023, 29(4):45-52.
- [7] SONG Pu, LI Jun, WANG Xiao-feng. Study on optimization of bench blasting parameters in non-ambient temperature mining area based on thermal-mechanical coupling [J]. *Engineering Blasting*, 2023, 29(4):45-52. (in Chinese)
- [8] 吴春平,周传波,罗学东. 高温致裂对岩石波阻抗及爆破能量传递效率的影响[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(5): 2150-2160.
- [8] WU Chun-ping, ZHOU Chuan-bo, LUO Xue-dong. Influence of high-temperature cracking on rock wave impedance and blasting energy transfer efficiency[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(5):2150-2160. (in Chinese)
- [9] 赵坤,陈寿根,唐海. 流体-热-固耦合作用下高温炮孔注水降温数值模拟[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(8):10-16.
- [9] ZHAO Kun, CHEN Shou-gen, TANG Hai. Numerical simulation of water injection cooling in high-temperature blast holes under fluid-thermal-solid coupling [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(8):10-16. (in Chinese)
- [10] 佟强,汪海波,宗琦. 基于高精度数码电子雷管的爆破振动精准调控试验研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(15):265-272.
- [10] TONG Qiang, WANG Hai-bo, ZONG Qi. Experimental study on precise control of blasting vibration based on high-precision digital electronic detonators [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(15):265-272. (in Chinese)
- [11] 张刚,李华,高明,等. 煤矿采空区火区爆破安全评估的热-水-力-化学全耦合模型研究[J]. *隧道与地下空间技术*, 2024, 148:105742.
- [11] ZHANG Gang, LI Hua, GAO Ming, et al. A fully coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical model for evaluation of fire zone blasting safety in coal mine goafs [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 148:105742. (in Chinese)
- [12] 李地元,朱建波,郭奇峰. 高温后岩石热损伤与动态断裂韧度关联模型研究[J]. *岩土力学*, 2025, 46(1): 1-10.
- [12] LI Di-yuan, ZHU Jian-bo, GUO Qi-feng. Study on correlation model between thermal damage and dynamic fracture toughness of rock after high temperature [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2025, 46(1):1-10. (in Chinese)
- [13] 黄永辉,马芹永,张经双. 面向矿山爆破全流程的数字孪生系统构建与应用展望[J]. *金属矿山*, 2024(6): 1-9.
- [13] HUANG Yong-hui, MA Qin-yong, ZHANG Jing-shuang. Construction and application prospect of digital twin system for the whole process of mine blasting [J]. *Metal Mine*, 2024(6):1-9. (in Chinese)
- [14] 易克,程兵,高文学. 绿色爆破内涵、技术体系与发展路径探讨[J]. *爆破*, 2023, 40(3):149-156.
- [14] YI Ke, CHENG Bing, GAO Wen-xue. Discussion on the connotation, technical system and development path of green blasting [J]. *Blasting*, 2023, 40(3):149-156. (in Chinese)