

炮孔全生命周期管理系统功能研发与应用

郑明山,王 佳,程志平,黎树林

(江西铜业股份有限公司德兴铜矿)

摘要:针对传统炮孔设计中数据记录不灵活、实时更新缺失及系统集成度低的问题,创新性地开发了一套炮孔全生命周期管理系统,致力于提升矿山爆破的效率与安全性。该系统通过先进的信息技术,实现从设计、钻孔、爆破到填充、回收的全过程监控与管理。该系统采用实时数据采集和智能化分析,显著优化了炮孔设计与施工方案。其通用性和适应性使得系统能够根据不同矿山企业的需求进行定制,满足个性化管理需求;主要贡献包括提升矿山作业效率、增强作业安全性、实现精细化管理,并推动矿山数字化转型。这一研究成果不仅为矿山工程的信息化管理提供了新思路,也为提升资源利用率和施工安全性奠定了坚实基础。

关键词:智能化;炮孔全生命周期;炮孔设计系统;爆破管理;爆破效果;全过程监控;作业效率

中图分类号:TD235

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)05-0012-05

doi:10.11792/hj20250503

引 言

爆破是采矿过程中重要的生产环节,从爆破设计到实施的过程,国内外学者一直高度重视炮孔设计技术的研究。传统炮孔设计主要存在数据记录不灵活、缺乏实时数据更新和系统集成度低等缺点,缺乏对爆破设计、施工监控和后期分析的综合管理^[1-2],导致信息孤岛现象严重,数据共享和协同作业困难。

近年来,随着信息技术和自动化技术的迅速发展,矿山爆破炮孔管理系统逐步实现了从单一功能向综合管理的转变^[3-5]。国外于20世纪80年代初首先开展了智能爆破系统的研究。加拿大Noranda技术中心于1990年开始研发BLASTCAD系统,该系统主要用于地下矿和露天矿的三维爆破设计^[6]。国内也逐渐开展智能爆破研究,王进强等^[7-8]基于AutoCAD平台进行二次开发,实现对爆破块度、形态等爆破效果的预测。一些科研机构也相继开展了凿岩爆破辅助系统的设计^[9-10]。张程娇等^[11]基于三维模型开展了爆破设计的优化研究。

在智能化爆破系统研究上,国内外学者不断突破^[12-13]。岳中等^[14]开展了智能炮孔检测与路径规划系统的研究。宋浩天等^[15]对隧道炮孔的分类进行了计算机辅助设计。余东晓等^[16]利用Visual C++平台研究了多因素爆破效果评价的台阶爆破设计软件。闵忠鹏等^[17]为某金矿进行了爆破参数的优化研究。李泽华等^[18]基于VC++平台自主开发了一套集炮

孔自动布置、起爆网络自动连接、炮孔装药优化及爆破效果预测等功能于一体的露天台阶爆破智能设计系统。杨军等^[19]结合人工智能和台阶爆破设计原理,基于VC++平台优化爆破方案设计系统。张兴长等^[20]基于深度学习进行了炮孔孔位智能识别研究。这些系统虽然考虑了地质勘探、爆破设计、施工监控和数据分析等多项功能,提高了矿山开采的效率和安全性,但是不同模块之间的集成和互操作性不强,使得爆破设计、施工监控、数据分析和报告生成等环节不能够无缝衔接,形成一个完整的闭环管理体系。

本研究旨在设计和开发一套基于先进信息技术的炮孔全生命周期管理系统,实现对炮孔从设计、钻孔、爆破到填充、回收的全过程监控与管理。通过使用该系统,实时采集和记录炮孔的各种参数信息,进行数据集成与分析,优化炮孔设计与施工方案,提高资源利用率和施工安全性。同时,该系统具有较高的通用性和适应性,能够根据不同矿山企业的实际需求进行定制和调整,满足个性化管理需求。研究的主要贡献包括:

- 1)提升矿山作业效率。通过实时数据采集和智能化分析,系统能够动态调整爆破设计,提高矿山作业效率和矿石回收率。
- 2)增强作业安全性。系统提供实时监控和预警功能,及时发现并处理潜在安全隐患,降低爆破作业事故发生率。
- 3)实现精细化管理。通过精准记录和分析矿石

品位等关键数据,系统支持科学决策,优化采矿工艺和资源配置,实现精细化管理。

4)推动矿山数字化转型。本研究有助于推动矿山行业数字化转型,提高行业整体的技术水平和国际竞争力。

本研究设计和开发了一套功能全面、数据集成与分析能力强、适应性高的炮孔全生命周期管理系统,实现对炮孔从设计到回收的全过程监控与管理,提高矿山资源利用率和施工安全性,为矿山工程的信息化管理提供新的思路和方法。

1 矿山概况

江西铜业股份有限公司德兴铜矿(下称“德兴铜矿”)作为亚洲规模最大的露天铜矿之一,其地质结构和开采条件对炮孔全生命周期管理系统的设计与实施提出了独特的要求。德兴铜矿属于特大型斑岩铜矿,历经数十年的开采,已经形成了显著的露天开采边坡,这为炮孔全生命周期管理的精准化、智能化提供了应用场景。

德兴铜矿分为铜厂和富家坞2个采区,铜厂采区和富家坞采区面积分别约为6 km²和4 km²,具有不同的开采标高范围。铜厂采区的作业高度为-310~485 m,目前最低开采标高达到-100 m;而富家坞采区的作业高度为-250~380 m,当前最低开采标高为80 m。这2个区域的边坡大多超过300 m,对炮孔设计、爆破效果及其后期管理提出了更高要求。地层主要由中元古界双桥山群和震旦系志棠组构成,这些地层受区域性深大断裂的影响,形成了复杂的褶皱和断裂。区内的裂隙密集带和破碎岩体,要求炮孔全生命周期管理系统必须具备高度的适应性和灵活性,以应对多变的地质条件。

矿山开采过程中,岩体受到自重应力、地质构造、爆破振动及地下水等因素的综合作用,可能引发边坡的松动和滑塌,这不仅对安全生产构成威胁,也对炮孔的稳定性和爆破效果产生影响。因此,炮孔全生命周期管理系统需要集成实时监测和分析功能,以预测和管理这些风险。

综上所述,德兴铜矿的地质特点和气候条件对炮孔全生命周期管理系统的设计和应用提出了具体挑战,同时也提供了丰富的数据和实际场景,用以测试和完善系统的效能。通过集成先进的监测技术、数据分析和自动化控制,可以提高炮孔管理的精确度和矿山的安全生产水平。

2 研发关键技术与功能设计

通过对矿山情况的了解,所开发的炮孔全生命周

期管理系统紧密结合现阶段德兴铜矿生产特征及其数字化发展需求,以VC++作为开发平台,Unity作为3D图形引擎,采取边界优化与数据库管理等算法,实现炮孔全生命周期管理系统的设计。炮孔全生命周期管理系统模块功能如图1所示。

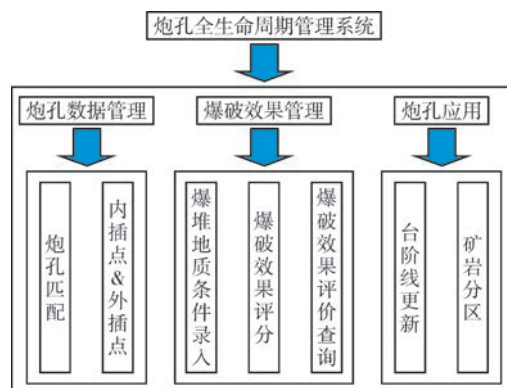


图1 炮孔全生命周期管理系统模块功能

Fig. 1 Functions of full-life-cycle management system modules for blast holes

炮孔全生命周期管理系统模块涵盖3个核心部分:炮孔数据管理、爆破效果管理及炮孔应用。

1)炮孔数据管理模块从数据中心提取关键的炮孔位置和岩粉化验数据。通过巧妙地将这些数据编号关联,构建了一个全面且结构化的炮孔数据库。此外,该功能还负责对现有炮孔数据库进行数据迁移和集中管理,确保数据的一致性和可访问性。

2)爆破效果管理模块专注于记录和管理爆破地质地形条件、设计参数及效果参数。通过比对历史爆破效果评价方案中的地质条件,筛选出表现优异的历史爆破记录。这些记录中的爆破设计参数被用作参考,以指导和优化未来的爆破设计,从而提升爆破效果。

3)炮孔应用模块利用炮孔位置和品位信息,实现台阶线的动态更新和矿岩界线的精确划分。这一功能不仅提高了矿区管理效率,而且增强了资源开发的精确度。整体而言,该模块通过整合和优化数据管理流程,为矿山爆破提供了一个高效、可靠的技术支持平台。

基于上述设计思路和模块,炮孔全生命周期管理系统流程如图2所示。该系统的工作流程呈多线程模式,首先进行布孔设计,之后将孔网参数导入爆破效果管理系统和钻机布孔系统,主要分成2个线程分别进行。

爆破效果管理系统利用采区爆堆爆破信息(作业台阶、爆堆编号、爆破编号、爆破总量和设计炸药量等)数据,结合爆破地质条件进行爆破效果打分,详细评分情况如图3所示。

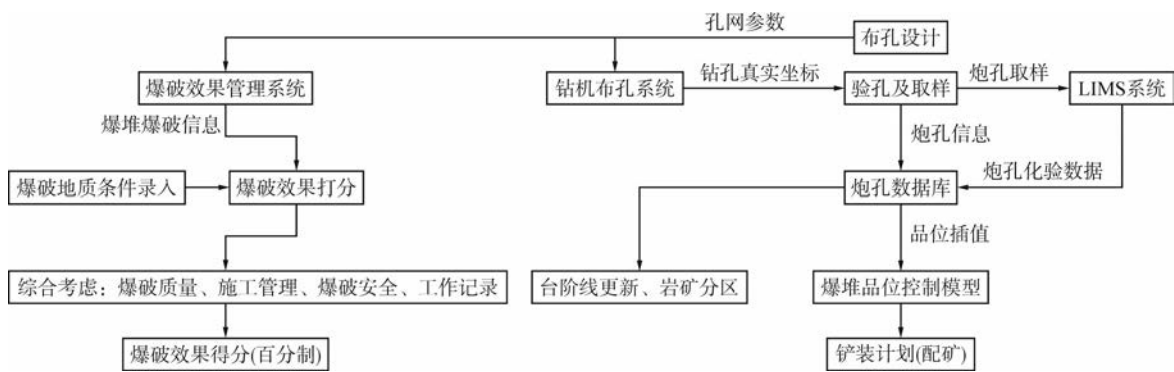


图2 炮孔全生命周期管理系统流程

Fig. 2 Flowchart of the full-life-cycle management system for blast holes

项目	满分	目标	得分依据		扣分依据		得分
爆破质量	大块率/% 20分	采矿大块率≤0.34%(10分)	0.32~0.34(0.310)	8	采矿大块率每超过目标值的0.01%扣2分;难爆区大块率每超过目标值的0.02%扣2分		18
		难爆区大块率≤0.65%(10分)	0.32以下(不含0.32)	10			
	根底数 20分	杜绝大面积根底和底板抬高现象	当月爆破无根底,台阶高度控制在(15±0.5)m或符合现场标准得满分		根底面积≥200m ² 不得分,100~200m ² 每处扣10分(超过100m ² 按相关制度进行考核),50~90m ² 每处扣3分,<50m ² 每处扣2分,扣完为止;影响电铲作业推进一次扣5分		14
	电铲台效/[t·(台·h) ⁻¹] 10分	电铲累计台效攻关值≥2290 保证值≥2250	电铲台效(2747)	得分	电铲台效	扣分	10
			2251~2275	6	2201~2225	6	
			2276~2300	7	2176~2200	7	
			2301~2325	8	2151~2175	8	
			2326~2350	9	2126~2150	9	
			2350以上	10	2150以下	10	
施工管理	20分	现场施工管理严格按标准作业	爆破现场对照《爆破作业全过程监管与检查清单》中21条检查项目或其他,没有违反或没有出现现场管理不妥现象造成的安全隐患或质量事故(包括盲炮、拒爆、器材遗留炮堆等现象)得满分		现场对照《爆破作业全过程监管与检查清单》中21条检查项目或其他,其中违反1条扣1分,扣完为止。若出现盲炮、拒爆、器材遗留炮堆等现象,直接全扣		18
爆破安全	20分	避免事故的发生	没有出现因爆破技术问题(主要是起爆方式选取不当、地表网络设计不合理、清渣炮孔装药量偏大等)引起事故(主要是爆破伤人、爆堆埋路、飞石损坏电缆、重要工房设备等)得满分		若出现因爆破技术问题造成的事故每次扣2分,扣完为止;若出现重大爆破伤人、毁坏重要设备等事故,直接全扣		18
工作记录	10分	爆破前有孔位图和地表网络设计,爆破后有记录分析	布孔和现场施工原始记录齐全,爆后分析清楚、透彻得满分		每缺少一次爆破记录或布孔记录扣2分,记录不完善扣1分,扣完为止		10

注:爆破质量评价标准,优秀为90分以上(含90分);良好为80~90分(含80分);一般为70~80分(含70分);不合格为70分以下(不含70分)。

图3 爆破效果评分详情窗口界面

Fig. 3 Window interface of the blasting effectiveness scoring details

钻机布孔系统需要根据现场钻孔真实坐标信息,将对应的炮孔取样样品进行LIMS系统炮孔化验,化验结果及炮孔信息数据导入炮孔数据库,实现台阶段更新和矿岩分区工作,工作结果如图4所示。同时,通过品位插值方法,模拟爆堆品位控制模型,为后续铲装计划作业中的配矿工作提供支撑。

3 关键应用技术

在矿山爆破生产过程中,炮孔全生命周期管理系统的应用符合实际,为评价爆破效果、分析爆破状态产生的影响因素和预测爆破台阶段更新提供了依据。以德兴铜矿采场某次爆破设计到实施应用为例,该工作面主要分为2个,采区工作面和道路的平整度整体一般,个别区域比较差,在采区高程控制上有部分区

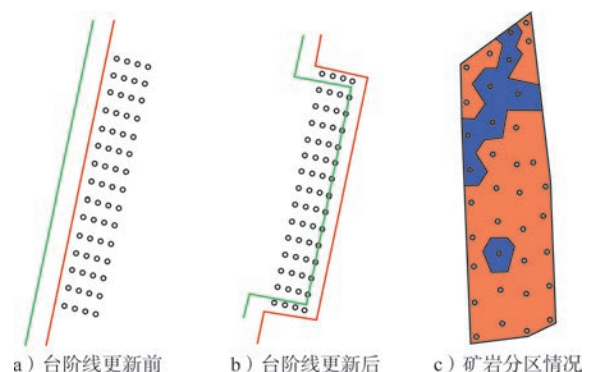


图4 台阶段更新和矿岩分区效果

Fig. 4 Results of bench lines updating and ore rock zoning

域与计划的偏差比较大。例如:铜厂采区基本控制在计划高程正常范围内。富家坞采区:320 m水平15#铲作业区域,高程欠计划0.6 m,电铲未能按计划

执行到位;305 m 水平 19[#] 铲作业区域,高程欠计划 0.9 m,老平台偏高导致电铲未能控制到位;110 m 水平 14[#] 铲作业区域,高程欠计划 0.7 m,电铲未按计划控制到位。研究内容包括炮孔岩粉取样、样品化验、数据管理、地质分析、二次圈定和边部矿体探测,详细情况如下:

1)炮孔岩粉取样:完成采场钻孔作业后采用十字对称挖槽的方式,从每个炮孔中取出 4 勺岩粉,总计约 2 kg 样品。炮孔的孔网间距通常为 6 m×8 m 或 7 m×9 m,每个炮孔的样品代表了其所属 15 m 台阶的品位。

2)样品化验:每天收集的样品被送往检化中心,进行铜品位化验分析。对于当天需要爆破区域的样品,优先进行化验,以便及时确定矿岩分界线并进行现场处理。

3)数据管理:炮孔岩粉数据按照采区、年份、台阶和爆堆号等层级进行管理。例如:编号“铜厂 2024-20-100”代表铜厂采区 2024 年 20 台阶的第 100 次爆破。爆堆编号从每年 1 月 1 日开始,按顺序编号,直至年底结束,次年重新编号。每批次爆堆的图表将被打印并存档,按照采区和年份进行装订。

4)地质分析:爆破完成后,在 CAD 地质系统中将爆堆中的炮孔划分为多个区域,每个区域包含 10~12 个钻孔品位,形成组合样数据。从每个组合样中取出部分岩粉,组成一个综合样本,然后送至检化中心进行元素(如铜、金、银、钼、硫、砷、锑、铋、氧化铜)品位化验分析。

5)二次圈定:在矿体二次圈定过程中,对于低于入选品位的岩粉孔,需综合考虑其当量品位(将铜品位与伴生元素金或钼的品位按当量系数加权)。因此,需单独化验这些岩粉孔的金、钼品位,以实现资源回收利用最大化。

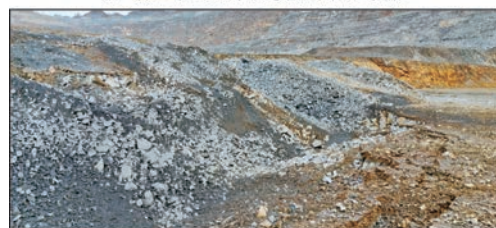
6)边部矿体探测:在矿体边部进行取样和探测盲矿体时,为了预测下部矿体走势,一般会考虑采用孔底取样的方法。通过分析本台阶底部岩粉样品,了解下一个台阶矿体的变化情况,从而为进一步勘探提供参考。

采用炮孔全生命周期管理系统进行采区爆破效果评价与台阶线设计,现场爆破效果如图 5 所示。铜厂采区老卡调楼区域 80 m 水平 29[#] 钻作业区域爆堆隆起高度较高,表面块度均匀,爆破效果较好,如图 5-a)所示。铜厂采区底部 19[#] 钻作业区域,爆堆块度均匀,隆起高度正常,后裂清晰,爆破效果优良,如图 5-b)所示。富家坞采区中部 140 m 水平 25[#] 钻作业区域,爆堆形态较好,表面破碎,后沟拉得较大,整体爆破效果良好,如图 5-c)所示。现场爆破边坡出露效

果如图 6 所示。由图 6 可知:老卡调楼边坡 80 m 台阶坡面爆破后半孔率 50 % 左右,壁面残留的炮孔孔壁痕迹大多为炮孔长度的 1/3 左右,壁面上残留较多未爆岩体、悬岩等,相邻炮孔间壁面的平整度一般,坡面整体平整度较差,预裂效果较差。黄坑边坡 215 m 台阶坡面爆破后半孔率 85 % 左右,壁面残留的炮孔孔壁痕迹大多超过炮孔长度的 2/3,壁面上悬岩等残留较少,相邻炮孔间壁面的平整度较好,坡面整体平整度较好,预裂效果较好。西源岭和黄坑交界处边坡 215 m 台阶坡面爆破后半孔率达 95 % 以上,壁面残留的炮孔孔壁痕迹大多超过炮孔长度的 2/3,壁面上悬岩等残留较少,相邻炮孔间壁面有一定起伏,坡面整体平整度一般,预裂效果较好。



a) 铜厂采区老卡调楼爆堆隆起高度



b) 铜厂采区底部爆堆块度



c) 富家坞采区中部整体效果

图 5 现场爆破效果图
Fig. 5 Field blasting results

炮孔全生命周期管理系统在德兴铜矿的成功应用,有效解决了采区矿石贫化率高、爆破块度大等问题,具体应用效果如下:

1)爆破效果实时评价。铜厂采区和富家坞采区计划爆破总量为 1 150 万 t,截至确定日期完成计划情况为 99.9 %;采区钻孔 99 568 m,完成计划 116.8 %,超计划完成 16.8 %;炸药总量设计 3 641 t,实际炸药



a) 老卡调楼边坡80 m台阶坡面



b) 黄坑边坡215 m台阶坡面



c) 西源岭和黄坑交界处边坡215 m台阶坡面

图6 现场爆破边坡出露效果

Fig. 6 Slope exposure results after field blasting

消耗量超计划14.2%。爆破经济指标主要考虑采矿大块率、难爆区大块率、炮孔合格率等,将采区实际爆破矿岩分析结果及地质情况等录入爆破效果管理系统。例如:采区大块率0.332%,难爆区大块率0.64%,电铲台效2 827 t/(台·h)等。系统分析爆破效果较好,难爆区大块率偏高,主要原因是铜厂采区西源中部13[#]爆破区域上台阶遗留大块较多,且底部6[#]铲作业区域岩性变得较为难爆,产生大块较多。

2)爆破设计智能化。实现了爆破效果的实时更新,实时录入炮孔数据库,及时更新下阶段爆破台阶线,使得爆破设计实现了智能化。

3)爆破设计更准确科学。结合上阶段数据和矿山实际地质情况,参考历史爆破记录情况分析,筛选符合目标设计区域爆破效果良好的历史参数,优化爆破设计。

4 结 论

1)炮孔全生命周期管理系统根据矿山生产的数据流转情况,从数据中心提取炮孔位置信息和岩粉化验数据;由技术人员对提取的炮孔位置信息和岩粉化验数据进行关联,形成完整的炮孔数据库;并且对原炮孔数据库的数据进行迁移和统一管理。利用炮孔数据库,后续可以在数字采矿软件中实现模型更新和编制配矿计划等工作。

2)实现爆破地质地形条件、爆破设计参数、爆破

效果参数的记录与管理。通过匹配历史爆破效果评价方案的地质地形条件,筛选出爆破效果较好的历史爆破记录,参考其中的爆破设计参数来指导优化爆破设计。

[参 考 文 献]

- [1] 王正英,翟利军,石绍飞,等.会宝岭铁矿爆破振动危害控制研究[J].黄金,2024,45(3):5-8.
- [2] 凌申怀,许梦国,程勃,等.某金属矿山采场爆破系统的模糊FMECA评价[J].黄金,2011,32(1):33-37.
- [3] 姚茨.智能化矿山爆破技术的发展与应用探讨[J].世界有色金属,2024(6):40-42.
- [4] 朱长江,王永星.间隔装药的殉爆起爆技术在露天矿山爆破中的应用[J].露天采矿技术,2024,39(2):42-45.
- [5] 夏真荣.隧道掘进爆破设计的数据库应用系统开发[D].成都:西南交通大学,2005.
- [6] FAVREAU P, ANDRIEUX P. Blastcad-Noranda 3-dimensional computer-aided underground blast design system [J]. CIM Bulletin, 1993, 86(967):62-68.
- [7] 王进强,璩世杰,许文耀,等.计算机辅助露天矿爆破设计软件开发与应用[J].金属世界,2009(增刊1):56-60.
- [8] 璩世杰,庞永军,尚峰华,等.水厂铁矿地质地形数据库及其在爆破设计中的应用[J].金属矿山,2001(2):12-15,22.
- [9] 刘志祥.大中孔凿岩爆破计算机辅助设计软件开发与研究[J].矿业研究与开发,1998,18(6):34-36.
- [10] 左静.炮孔布置的计算机辅助设计系统开发[J].煤矿爆破,2008,26(1):8-10.
- [11] 张程娇,鲁力,李宏兵,等.基于三维模型的爆破设计优化及工程应用[J].露天采矿技术,2024,39(3):62-65.
- [12] 陆璐.隧道掘进爆破方案自动化分区设计系统研究[J].铁道建筑技术,2024(9):10-13,36.
- [13] 杨林,梁晓腾,杨钊,等.隧道爆破设计辅助系统开发与应用[J].建筑机械,2024(1):24-27,34.
- [14] 岳中,金庆雨,潘杉,等.基于深度学习的轻量化炮孔智能检测方法[J].煤炭学报,2024,49(5):2 247-2 256.
- [15] 宋浩天,张万志,司晓丽,等.钻爆法隧道炮孔分布计算机辅助设计及应用[J].爆破,2024,41(14):122-127,144.
- [16] 余东晓,颜钦武,张正文,等.逐孔台阶爆破设计与优化软件开发[J].爆破,2010,27(1):37-40.
- [17] 闵忠鹏,王柏平,张永亮,等.金山金矿掘进爆破参数优化及应用[J].黄金,2024,45(6):16-22.
- [18] 李泽华,李顺波,杨军,等.露天爆破智能设计系统开发及应用[J].现代矿业,2020,36(11):179-181,194.
- [19] 杨军,李立杰,刘红岩.露天台阶爆破智能设计系统研发及应用[J].金属矿山,2025(1):160-167.
- [20] 张兴长,张奇,孙子正.基于深度学习的钻爆法隧道炮孔孔位智能识别研究[J].山东交通科技,2023(5):92-96.

(下转第27页)

- 能源与环保, 2017, 39(6): 18–22.
- [12] 卓先德, 崔伟. 基于 FLAC^{3D} 的巷道围岩高强预紧力支护数值模拟[J]. 煤矿安全, 2016, 47(9): 210–212, 216.
- [13] 牛双建, 靖洪文, 杨大方, 等. 深部巷道破裂围岩强度衰减模型及其在 FLAC^{3D} 中的实现[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(4): 601–606.

Analysis of the support effectiveness for roofs of varying classes based on numerical simulation

Yang Zhifang

(Inner Mongolia Jintao Co., Ltd.)

Abstract: During underground rock excavation at the Jintao Gold Mine, ground pressure issues have led to occurrences of roof caving and sidewall spalling at the tunnel face and formed roadways, particularly in fractured zones where roof caving and sidewall spalling are more frequent. This study evaluates the support effectiveness for roofs of varying classes using numerical simulation and field application. Results indicate that although the underground rock mass quality at the Jintao Gold Mine is generally good, stress concentration tends to occur at the arch shoulder during roadway excavation. By reinforcing the arch shoulder and adopting appropriate support methods and parameters for roofs of varying classes, favorable outcomes have been achieved in the production process.

Keywords: roadway excavation; roof classifications; ground pressure management; roof support; graded support; numerical simulation; support parameters

.....

(上接第 16 页)

Development and application of a full-life-cycle management system for blast holes

Zheng Mingshan, Wang Jia, Cheng Zhiping, Li Shulin

(Dexing Copper Mine, Jiangxi Copper Corporation Limited)

Abstract: To address issues in traditional blast hole design such as inflexible data recording, lack of real-time updates, and low system integration, an innovative full-life-cycle management system for blast holes has been developed to enhance the efficiency and safety of mine blasting operations. Utilizing advanced information technologies, the system enables monitoring and management throughout the entire process—from design, drilling, and blasting to filling and recovery. By incorporating real-time data acquisition and intelligent analysis, the system significantly optimizes blast hole design and construction schemes. Its versatility and adaptability allow for customization to meet the personalized management needs of different mining enterprises. Major contributions of this system include improving operation efficiency, enhancing operation safety, enabling refined management, and promoting the digital transformation of the mining industry. This research offers a novel approach to information-based management in mines and lays a solid foundation for improving resource utilization rate and construction safety.

Keywords: intelligentization; full-life-cycle of blast holes; blast hole design system; blasting management; blasting effectiveness; whole-process monitoring; operation efficiency