

Doi:10.3969/j.issn.1671-4172.2020.02.003

精细爆破技术在矿山的研究与应用

母永烨¹,李祥龙^{2,3},冷智高²,张希⁴,陈浩⁴

(1. 昆明理工大学 公共安全与应急管理学院,昆明 650093;

2. 昆明理工大学 国土资源工程学院,昆明 650093;

3. 云南省中-德蓝色矿山与特殊地下空间开发利用重点实验室,昆明 650093;

4. 玉溪矿业有限公司大红山铜矿,云南 玉溪 653405)

摘要:针对传统爆破作业普遍存在凿岩精度低、爆破效果差、事故率高等问题,结合矿山爆破作业特点,将精细爆破的理念引入矿山爆破。本文首先简要介绍了精细爆破的定义及其发展现状,其次分别从精细化设计、精细化施工、精细化管理三个方面进行论述,并结合精细爆破技术在黑岱沟露天矿和山东唐口煤矿的应用情况作了进一步阐述。结果表明,与传统爆破相比,采用精细爆破技术,在施工效率、爆破效果、安全环保等方面具有明显优势。最后对我国未来精细爆破技术的发展进行简单介绍。

关键词:精细爆破;精细化设计;施工;管理;发展

中图分类号:TD235

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2020)02-0013-07

Research and application of 3P (Precise, Punctilious and Perfect) blasting technology in mines

MU Yongye¹, LI Xianglong^{2,3}, LENG Zhigao², ZHANG Xi⁴, CHEN Hao⁴

(1. Faculty of Public Security and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

3. Yunnan Key Laboratory of Sino-German Blue Mining and Utilization of Special Underground Space, Kunming 650093, China;

4. Dahongshan Copper Mine, Yuxi Mining Co., Ltd., Yuxi Yunnan 653405, China)

Abstract: Aiming at the problems of low precision of rock drilling, poor traditional blasting effect and high accident rate for traditional blasting operations, combined with the characteristics of mine blasting operations, the concept of 3P (Precise, Punctilious and Perfect) blasting is introduced into mine blasting. This paper first briefly introduced the definition and development status of 3P blasting, and then discussed it from three aspects: refined design, refined construction, and refined management, followed by the application situation was further elaborated, combined with 3P blasting technology in Heiyugou open pit mine and Shandong Tangkou coal mine. The results indicated that compared with traditional blasting, the use of 3P blasting technology has obvious advantages in construction efficiency, blasting effect, safety and environmental protection. Finally, a brief introduction to the development of China's future 3P fine blasting technology was given.

Key words: 3P blasting; refined design; construction; management; development

随着我国经济的不断腾飞,矿产资源的消耗量也是逐年增加,面对着每年矿产资源的巨大消耗,致使

一些老旧矿山将重新开采低品位的矿石或进一步向深部矿床进行开采。矿山的开采深度和开采力度在不断增加,因此对爆破作业提出了更高的要求。目前,钻爆法在隧道开挖、地下金属矿山巷道施工以及拆除高层建筑物等领域仍为主流的方法^[1]。旧时传统爆破一般主要还是以现有的设计图纸和数据为基

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51564027);北京理工大学开放基金项目(KFJJ15-14M)

作者简介:母永烨(1995—),男,硕士研究生,安全工程专业,主要研究工程爆破与岩石力学。

础,依靠工程技术人员通过半经验半公式以及类比方法对爆破效果进行预测计算^[2]。在传统爆破中,炸药爆炸尽管能实现介质破坏,但存在劳动强度大、爆破效果差、工作环境恶劣等诸多缺点,作业精度和可靠性也不能得到保障,很难达到现在矿山所追求的安全、高效、绿色发展的目标。显然传统爆破已不能适应相应政策及社会发展需求^[3]。为了让工程爆破技术更好地服务社会,2008 年 4 月,中国工程爆破协会组织召开了精细爆破学术研讨会,会上谢先启院士首次提出了“精细爆破”这一新的概念并结合工程实例进行了详细的阐述,获得了在场专家的一致认可。

1 精细爆破概述

1.1 “精细爆破”的定义

精细爆破是工程爆破中一种新的爆破方法,不但秉承了传统控制爆破的优点,在此基础上还提出了更高的要求。精细爆破是指通过量化的爆破设计、精心的爆破施工和精细化的管理,对炸药爆炸能量释放与介质破碎、抛掷等过程的精密控制^[4]。其目的是为了既能达到良好的爆破效果,又能使有害效应得以控制,最终实现安全可靠、绿色环保、效益最优的爆破作业。

精细爆破不仅仅是一种简单爆破新技术,还是一种广泛的理念。精细爆破涵盖了设计、施工、管理、安全、环保、经济等多个方面的内容,随着科学技术的发展,也在不断地吸收最新理论和科研成果,融合发展,使其内涵不断丰富。

1.2 精细爆破的发展现状

精细爆破自被提出至今已有十余年时间,精细爆破正逐步被我国工程爆破行业所熟知和推广应用。精细爆破在解决实际工程问题方面的优良性,让精细爆破技术在越来越多的工程领域得以应用,特别是在矿山开采中获得了广泛的应用,一些矿山现已将精细化爆破技术用于实践,如内蒙古白云鄂博铁矿在方案设计时采用了三维激光扫描仪对规划爆区进行扫描,高新技术的引进很大程度上提高了布孔精准度^[5];位于非洲赞比亚北部铜带省的谦比希铜矿为提高凿岩效率和精度,在凿岩过程中应用了精细爆破的理念,将 DD422I 智能凿岩台车用于凿岩钻孔^[6],凿岩效率提高的同时,炮孔利用率也有所提高,据统计炮孔利用率高达 94%,凿岩精度的提升,有效缓解了超欠挖现象,精细化施工为精细爆破提供了便利条件。

随着爆破技术的应用范围不断扩大,爆破对象

与爆破环境也趋于复杂化^[7],对于一些环境复杂,爆破对象特殊的工程项目,首先不仅需要工程技术人员利用计算机辅助设备给出精确量化的爆破设计参数,同时还需要经过专家多次论证、现场多次模拟实验,最后得出精细爆破方案^[8],在后续的施工、管理以及对有害效应监控量测也需要做到精细化^[9]。近年来,国内外的专家为了更好地实现精细化爆破,在爆破数值模拟技术、抛掷大爆破技术、爆破降振技术、有害效应控制技术等内容展开了深入研究也取得了显著的进步。

2 精细爆破

2.1 爆破设计的精细化

2.1.1 量化的爆破设计

爆破设计主要包括爆破方案、爆破参数、炸药类型、爆破器材的选择与确定、起爆网络设计以及安全防护措施等内容^[10]。传统爆破设计仅凭借设计者的实践经验运用经验公式对爆破参数进行量化,其准确性不高,易出现漏项,常导致施工阶段发生较多变更,从而增加资金投入。然而精细爆破设计与传统爆破设计的区别在于精细爆破设计主要运用最新的理论成果和先进的计算机技术,针对不同爆破环境,对各个爆破参数以精确、定量的方式给出,大幅度提高了设计精准性与工作效率。

精细爆破的核心是提高爆破设计精确度,精细爆破设计侧重于使用专门的爆破设计软件与数字矿山设计软件^[11]。以 3s 技术为基础,利用有线和无线网络接入测绘系统、地质勘探单元、融合遥感拍摄等手段,实时监测现场的数据;应用爆破预测模型,对爆破效果、爆堆形态、块度情况进行预测。计算机测量技术和软件分析技术的飞速发展,为数值模拟和预测分析提供了精确可靠的数据支持,使得爆破设计实现精细化成为了可能。

2.1.2 精细微差爆破技术^[12]

在传统爆破中,普通导爆管雷管是作为起爆的主要方式,但是普通延期雷管存在着延期误差较大,易窜段等缺点,当炸药被引爆时,普通固定延时的导爆雷管,其延期时间误差相对较大,可能在对炮孔药柱重心位置并不能完全精准把控,导致炮孔内的岩石受力不均,在根底处易产生大块,不能达到预期效果。而精细爆破则要求消除这些弊端,因此,对起爆器材的性能要求更高,高精度的起爆器材是作为排间微差,排内逐孔微差的复杂爆破网络的基础。为提高爆破精度,实现爆破预期效果,在时间和空间上

的精准控制对爆破有着至关重要的作用,特别是在对一些环境特殊的爆破作业,常采用精细微差爆破技术,准确控制延期时间和起爆位置^[13]。精细微差爆破技术与一般的岩土爆破相比而言,爆破施工精细、爆破精准、安全性高,主要适用于一般爆破方式难以解决或处理复杂环境下的爆破施工。精细微差爆破技术主要有以下优点:1)与过去爆破点同时起爆的传统爆破方式相比,对爆区的所有爆破点实施毫秒级顺次延时起爆,能减少对围岩的扰动,有利于围岩稳定;2)利用微差爆破技术创造新的动态自由面可减少岩石夹制作用,有利于提高岩石的破碎程度和均匀性;3)有利于机械作业,可增大孔距,提高每百米的炸落方量,节省炸药用量,提高综合经济效益。

伴随着国家政策支持和精细化爆破不断推广,我国起爆器材的生产也开始向精细化方向发展。大量的现场试验与实际工程均表明,与传统延期雷管起爆相比,使用智能型数码电子雷管起爆更为优越。智能型数码电子雷管性能优良,延期时间可在线校核,可实现逐孔精准延时起爆,不但大大提高了起爆网络可靠性,同时也可扩大爆破规模,一次性成功实现起爆,满足了更高要求的工程爆破需要^[14]。目前,国内外越来越多的大、中型的矿山以及城市拆除爆破中已出现了智能型数码电子雷管的身影。智能型数码电子雷管的快速发展为我国的工程爆破技术迈向数字化、智能化创造了条件^[15]。智能型数码电子雷管性能参数见表 1。

表 1 智能型数码电子雷管性能参数

Table 1 Intelligent digital electronic detonator performance parameters

项目	性能
延期时间范围/ms	1~10 000
最小时间间隔/ms	1
延期精度/%	延期误差小于 0.2
使用温度/℃	-20~+71
储存温度/℃	-40~+71
抗静电能力	脚一脚(20 kv/2 500 pF/0.5 Ω),放电不发火;脚一壳(30 kv/2 500 pF/0.5 Ω),放电不发火
抗冲击性	锤重 2 kg,高 1 200 mm 撞击雷管装药;部分和引火头部分,不应爆炸
抗射频、杂散电流	在 80 MHz-2 GHz,10 V/m 的条件下或通以 250 mA 杂散电流,无意外引爆
耐温性能	100 ℃ 的环境中保持 4 h 不发生爆炸
网络通讯	在线检测与验证,实现双向通讯,确保无故障可靠起爆
组网能力	≤1 600 发使用单台起爆器; >1 600 发使用专用可串联起爆器
起爆方式	起爆器登录密码,起爆授权密码

2.2 爆破施工的精确化

2.2.1 提高凿岩自动化和智能化水平

传统的凿岩主要是依靠现场施工人员手持气腿式风动凿岩机进行凿岩操作,虽然风动凿岩机有很多优点,但随着矿山一次性爆破的规模不断增大,钻孔深度也随之增加,使用风动凿岩机很难满足大规模化凿岩需求。而且在凿岩过程中,也普遍存在实际钻孔位置与设计位置偏差较大,钎杆接头处会损失很大的冲击能量,凿岩效率低,危险性大,作业环境恶劣等缺点^[16]。高度智能化的凿岩台车的出现,很好的解决了这一问题。先进设备在实际工程中的广泛应用,大幅度地提高了钻孔效率,让总体施工进度得到大幅提升,实时监测系统有效控制系统和人为误差,有效地保证了凿岩精度,其自动化与智能化水平得到了充分体现^[17]。

精细施工的关键在于钻孔凿岩的精度是否满足设计要求,使用传统凿岩设备凿岩后,炮孔孔底未能

保证在同一水平面上,这样不仅会影响爆破效果,爆破后还会出现严重超欠挖现象,给下次凿岩作业带来困难,不但影响工作效率,还增加了凿岩成本。精细爆破技术的发展和推广,促使着凿岩设备的研究发展,凿岩设备在自动化和智能化方面均有长足的进步,2016 年山特维克推出了 DD422iE 自动化凿岩台车,这是采矿行业首款行走靠蓄电池驱动的凿岩台车,集传统柴油机设备的作业自由度和电动设备的主要环境、健康和安全(EHS)优势于一身。除了新型蓄电池动力系统,山特维克 DD422iE 的创新之处还包括可选装 3D 扫描导航功能和经过改良的新型工作臂。导航功能可缩短每个钻孔周期开始时的设置时间,自动扫描超挖和欠挖,提供宝贵的信息来优化钻孔作业,其中智能工作臂定位和凿岩控制系统可提高精确度,缩短循环时间并降低凿岩成本。它的问世为精细爆破施工提供强有力的技术支撑,DD422iE 智能型凿岩台车见图 1。



图 1 DD422iE 智能凿岩台车

Fig. 1 DD422iE intelligent rock drilling rig

2.2.2 现场混装炸药车的应用

现场混装炸药车是集原料运输、炸药混制、装填于一体的高科技产品,此外它同时还具有本质安全性较高、计量准确误差小、装药效率高、爆破效果好、生产成本低等优点^[18]。随着矿山开采规模的增大,炸药的一次性用量也在不断扩大,为了更好的适应现在矿山的发展需要,在炸药生产中有必要实现连续自动化、无人化操作制药,在制药过程中减少不必要的人为因素干扰。现场混装炸药车的投入使用加快了矿山实现大规模化生产的步伐。现场混装炸药配备的自动监测系统,该系统可对炸药各参数进行动态监测,运用智能跟踪配比手段,针对爆破不同的岩石,动态调整炸药的密度、爆速、爆炸威力等参数,使炸药波阻抗与岩石波阻抗与之匹配,使爆破效果最优^[19]。混装炸药车的智能系统还具有判断炮孔深度的功能。在装药时可精准有效地控制炮孔装药预留、随时调整进退管速度、有效控制返粉率。此外混装炸药车配套的 GPS 定位系统还可对运行轨迹,运行范围进行实时监控,从安全管理的角度来看,定位系统在一定程度上提高了现场混装炸药车的安全性,现场混装乳化炸药车见图 2。



图 2 现场混装乳化炸药车

Fig. 2 On-site mixed emulsion explosive vehicle

2.3 爆破管理的精细化

2.3.1 爆破精细化管理的“四化”

精细化管理是一项复杂的系统工程,管理的实质主要是对工程项目中的人、物、环境的状态进行管理与控制,其目的是保证工作进行顺利,爆破质量获得提高。在具体实施的过程中可将整个爆破过程进行分解,对每一个过程的每一个环节,都要有精细意识,即使是最细微的部分也不忽略,然后根据部门职责、岗位职责,将预期目标进行落实。在爆破作业中运用先进的管理工具和手段,对爆破作业的各项任务进行数字化、规范化、程序化、标准化管理,其次是加强安全、环境、质量方面的管理确保爆破作业能精确、高效、协同和持续运行^[20]。

爆破行业是一项危险性极高的行业,在执行爆破任务过程中,在考虑整个爆破质量的同时,还需要密切专注每项工序细节^[21]。从爆前的炮孔钻凿准备,爆区清理与测量,到吹哨蹲地起爆以及到爆后的各项检查都需做到精细化。按照时间顺序可构成爆破施工基本工艺流程,工艺流程图的建立有利于爆破作业流程化建设^[22],更加有利于实现爆破设计数字化、凿岩施工规范化、炸药炮泥装填程序化、质量安全检查标准化,确保爆破任务顺利进行。精细爆破施工工艺流程如图 3 所示。

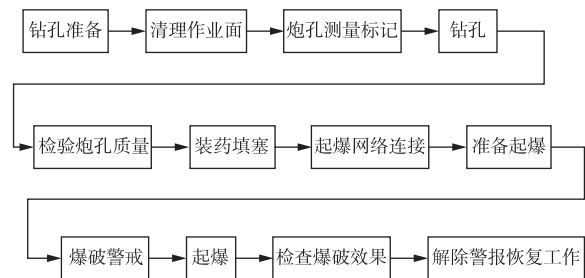


图 3 精细爆破施工工艺流程图

Fig. 3 3P blasting construction process flow chart

2.3.2 质量、安全、环境的管理

与传统爆破相比,精细化爆破加强了对爆破工程的质量、安全、环境的控制,在进行爆破作业前期,作业人员需深入实地考察项目具体情况。在此基础上,重点对爆破施工工艺流程的各个环节进行严格的监管,除了制定相应的安全程序外,还应针对各环节中存在的潜在风险制定相应的应急预案,有效的保障爆破作业顺利进行。精细化爆破主要对以下三个方面的有害效应进行控制:一是对爆破地震的控制,采用合理的炮孔网度、微差爆破以及空气间隔装药等途径,使爆破振动峰值控制在安全允许的范围

内,降低爆破地震对周边建筑物的影响^[23];二是对爆破粉尘的抑制,采用预湿降尘水封爆破、“环保型”降尘、爆炸水雾除尘等技术对爆破粉尘量进行控制;三是对爆破飞石的预防,在严格遵守爆破设计的前提下,提高炮孔堵塞质量、合理确定起爆顺序和间隔时间等措施防止飞石造成事故^[24]。

3 精细爆破技术在矿山的实践运用

近年来,工程爆破技术虽然在矿山工程的建设中取得了一定的成就,但爆破器材发展滞后在一定程度上也阻碍了爆破技术发展^[25]。国内爆破器材性能参差不齐制约了爆破技术的发展,为了更好地实现精细爆破,山西壶化集团研制出智能型数码电子雷管填补了我国智能型民爆产品的空白,标志我国爆破行业进入新的发展阶段。2013年,壶化集团应用智能数码电子雷管在我国最大露天煤矿黑岱沟露天矿成功实施抛掷爆破。此次爆破作业面长670 m、宽85 m、孔深28~43 m,装药893孔,装药总量1 500 t,使用智能数码电子雷管1 500余发,抛掷岩土近200万方,爆破台阶45 m高,是国内使用智能数码电子雷管最多、爆破方量最大、爆破台阶最高的一次抛掷爆破。爆破过程中还经受了强降雨等恶劣条件考验,爆破的规模和难度,在我国同类爆破中尚属首次。智能型数码电子雷管的应用为实现精细化爆破创造了条件。唐口煤矿首次将精细爆破的理念引入煤矿井下爆破中,针对传统爆破方式存在工作效率低,对围岩破坏性大等问题,运用精细爆破理论,分别从设计、施工、管理三个方面对现有爆破存在的不足进行改进。与前期传统爆破相比,采用精细爆破技术后,巷道断面成形良好,基本无超欠挖现象,爆破震动危害也得到了有效的措施;经后期检测,与传统爆破相比,对巷道围岩损伤较小^[26]。众多的工程实践表明,精细爆破相比于传统爆破更有利于矿山开采(图4、图5)。



图4 黑岱沟露天矿抛掷爆破

Fig. 4 Heidaigou open pit mine throwing blasting



图5 唐口煤矿井下巷道爆破

Fig. 5 Blasting of underground tunnel in Tangkou Coal Industry

4 爆破技术的发展方向

我国工程爆破技术已经取得了较大的发展,但还不能完全适应日趋复杂的爆破环境,与理想的精细爆破理念相比,存在精细设计程序、计算机技术、软件技术还需优化;施工设备品种规格数量不足;器材可靠性一般等问题。为更好适应我国矿业发展需要,建议从以下几个方面进行精细爆破技术的研究工作。

1)重视对现有的岩土力学、爆炸力学、冲击动力学等学科的基础理论研究,为控制炸药爆炸所释放的能量与定量化的设计提供理论支撑。构建各种介质在爆炸载荷作用下的本构关系,逐步探索出与介质相匹配的炸药类型、装药结构、起爆方式等实用技术,以期提高炸药利用率,减少炸药在转化过程中的损失。

2)提高施工设备质量。随着越来越多的矿山进入深部开采,对凿岩要求在不断提高。同时在隧道施工中也需应用凿岩设备,而我国在施工设备研发方面还存在一些不足。主要表现为产品种类较少,智能化程度低,工作可靠性及精度不高等方面,这还需要我们不断吸收国外先进设备的发展经验,以期提升我国凿岩设备的竞争力^[27]。

3)加快爆破技术,智能化技术研究。让现代智能技术与爆破技术融合发展,为精细化爆破技术开辟新思路^[28]。基于云计算技术,构建多层次、多维度的爆破行业数据库,实现信息共享,为智能化爆破研究提供支持。利用云计算的大量、多样、精确、高速的优势对所选参数和方案进行高效比对、筛选,深入探索数据之间的规律,及时发现设计漏洞,对爆破方案进行优化。智能化的模拟软件与云计算的完美结合,实验成本、人为误差会大幅度降低,安全性

与爆破质量得到提高,这将大大提升精细爆破的经济效益和社会效益。

5 结语

随着学科之间交叉理论研究的不断深入和智能化时代的到来,爆破作业必将朝着精细化的方向发展,精细爆破的提出不仅得到了学术界的一致认可,在爆破行业界也得到了推广与应用。精细爆破技术在采矿行业中已经得到了广泛的应用,同时在大型水电建设、建筑物拆除、城市隧道开挖、围堰拆除等大型项目中也存在着巨大的发展前景。这为精细爆破技术发展提供了契机。在未来,精细爆破技术的应用与发展前景必将更加广阔。

参 考 文 献

- [1] 李延龙, 胡国斌, 蒋先尧, 等. 凿岩台车钻孔定位技术及应用[J]. 黄金, 2017, 38(10): 44-47.
LI Yanlong, HU Guobin, JIANG Xian Yao, et al. Borehole-locating technique with drill jumbo and its application[J]. Gold, 2017, 38(10): 44-47.
- [2] 谢先启, 卢文波. 精细爆破[J]. 工程爆破, 2008(3): 1-7.
XIE Xianqi, LU Wenbo. 3P (Precise, punctilious and perfect) blasting[J]. Engineering Blasting, 2008(3): 1-7.
- [3] 高荫桐, 刘殿中. 试论中国工程爆破行业的发展趋势[J]. 工程爆破, 2010, 16(4): 1-4.
GAO Yintong, LIU Dianzhong. Discussion on developing trend of china engineering blasting trade[J]. Engineering Blasting, 2010, 16(4): 1-4.
- [4] 谢先启. 精细爆破发展现状及展望[J]. 中国工程科学, 2014, 16(11): 14-19.
XIE Xianqi. Precision blasting, current status and its prospective[J]. Strategic Study of CAE, 2014, 16(11): 14-19.
- [5] 潘泽军, 刘丽霞, 郭一娜, 等. 露天矿深孔爆破技术的发展趋势[J]. 矿业工程, 2012, 10(3): 29-31.
PAN Zejun, LIU Lixia, GUO Yina, et al. Development trend of deep-hole blasting technology in open pit mine[J]. Mining Engineering, 2012, 10(3): 29-31.
- [6] 蒋先尧, 胡国斌, 李延龙, 等. 智能凿岩台车在谦比希铜矿的应用[J]. 黄金, 2018, 39(2): 43-48.
JIANG Xian Yao, HU Guobin, LI Yanlong, et al. Application of smart drill jumbo in Chambishi Copper Mine[J]. Gold, 2018, 39(2): 43-48.
- [7] ROY M P, SINGH P K, SARIM M, et al. Blast design and vibration control at an underground metal mine for the safety of surface structures [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 83: 107-115.
- [8] 李建华, 曾庆国, 樊保龙, 等. 城市高层楼房拆除爆破危害防控技术[J]. 现代矿业, 2018, 34(10): 259-262.
LI Jianhua, ZENG Qingguo, FAN Baolong, et al. Damage prevention and control technology for demolition blasting of high-rise buildings in cities[J]. Modern Mining, 2018, 34(10): 259-262.
- [9] AHN J, PARK D. Prediction of near-field wave attenuation due to a spherical blast source [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(11): 3085-3099.
- [10] 丁小华. 露天矿安全高效爆破智能化动态设计系统的研究与应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
DING Xiaohua. Research and Application of intelligent dynamic design for surface mine safety and efficient blasting [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [11] 王李管, 陈 鑫. 数字矿山技术进展[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(8): 1693-1710.
WANG Liguang, CHEN Xin. Advancing technologies for digital mine[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(8): 1693-1710.
- [12] 史晓鹏, 解联库, 吴春平, 等. 毫秒延时爆破合理间隔时间研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2015, 67(5): 85-88.
SHI Xiaopeng, XIE Lianku, WU Chunping, et al. Study on the reasonable intervals of millisecond delay blasting [J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2015, 67(5): 85-88.
- [13] PAL ROY P, SAWMLIANA C, SINGH R K. Safety concerns of ancient temple due to blasting in adjacent mines [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2016, 34(3): 901-909.
- [14] 马晓明, 王振宇, 陈银鲁, 等. 精确微差爆破震动能量分布特征分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2012, 13(4): 449-454.
MA Xiaoming, WANG Zhenyu, CHEN Yinlu, et al. Analysis of energy distribution of accurate millisecond blasting vibration[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2012, 13(4): 449-454.
- [15] 颜景龙. 中国电子雷管技术与应用[J]. 中国工程科学, 2015, 17(1): 36-41.
YAN Jinglong. Technology and application of Chinese electronic detonator[J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(1): 36-41.
- [16] 郑朝保, 张 龙, 冯中兴, 等. 我国隧道凿岩设备的应用与发展[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(4): 9-13.
ZHENG Zhaobao, ZHANG Long, FENG Zhongxing, et al. Development and application of rock-drilling equipment in China[J]. Modern Tunneling Technology, 2018, 55(4): 9-13.
- [17] 高 波, 郑苏录, 陈时平. 液压凿岩设备发展动态[J]. 凿岩机械气动工具, 2017(1): 1-9.
GAO Bo, ZHENG Sulu, CHEN Shiping. Developmental trends of hydraulic rock drilling machines[J]. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools, 2017(1): 1-9.
- [18] 孙伟博, 邢 军, 邱景平, 等. 我国装药车的现状与发展[C]. 西安: 中国冶金矿山企业协会, 2005: 111-113.
SUN Weibo, XING Jun, QIU Jingping, et al. Present Status and Development of Explosive Car in China[C]. Xi'an: Metallurgical Mines' Association of China, MMAC, 2005: 111-113.