

提升运输

千万吨级主井高速大载重提升技术 研究与应用

Research and Application of High Speed and Large Load Hoisting Technology for Ten Million Tons Main Shaft

李浩宇, 徐长磊, 韩瑞军, 施士虎, 杜贵文, 徐广译

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:以千万吨级“双超”矿山——思山岭铁矿主井提升系统建设为背景,从主井提升系统方案、竖井提升运行安全间隙研究、大型化提升技术装备应用、大型主井井塔布置等方面综合论述了主井提升系统参数确定所开展的研究工作以及设计建设采用的新技术、新装备。思山岭铁矿主井提升系统的建设将对我国类似矿山竖井高速大载重提升系统的建设实施具有较强的标杆示范意义。

关键词:千万吨级; 高速; 大载重; 安全间隙; 主井提升

中图分类号: TD532 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)01-0053-07

Abstract: Based on the construction of main shaft hoisting system in Sishanling Iron Mine, a ten-million-ton “double super” mine, this paper comprehensively discusses the research work carried out in determining the parameters of main shaft hoisting system and the new technology and equipment adopted in design and construction from the aspects of main shaft hoisting system scheme, shaft hoisting operation safety clearance research, large-scale hoisting technical equipment application and large-scale main shaft tower layout. The construction of main shaft hoisting system in Sishanling Iron Mine will have a strong benchmark demonstration significance for the construction and implementation of high speed and heavy load hoisting system in similar mines in China.

Key words: ten million tons; high speed; large load; safety clearance; main shaft hoisting

1 前言

伴随经济高速发展对矿产资源,尤其是铁矿石资源的需求迅猛增长,浅部、易采、易选的矿产资源已大幅减少,开采深地资源向更深部的难开采矿床进军变得迫切和重要。随着矿山开采深度逐渐加深,开采规模不断加大,对竖井高速、大载重提升技术与装备开展研究与应用落地迫在眉睫。

思山岭铁矿作为目前国内探明登记的最大单体铁矿,是亚洲第一深井超大型铁矿,同时也是国家“基石计划”的重要支撑项目和“超大规模、超深井”(双超)课题研究的依托矿山。作为近年来国内最具代表性的第一批“双超”矿山,其主井高速、大载

重提升系统建设实施对行业发展起到引领作用。

2 矿山概况

思山岭铁矿位于辽宁省本溪市东南郊南芬区思山岭乡,交通十分便利。思山岭铁矿床规模大,品位中等,埋藏深,更加适合于地下开采。矿山一期生产规模为1 500万 t/a,二期远景规模达到3 000万 t/a。

矿山采用主副井开拓,一期工程一次规划,分步实施。前期建设1号主井和副井,形成750万 t/a生产规模。前期投产后,后期建设2号主井增加750万 t/a生产规模,最终形成1 500万 t/a的生产规模。目前,1号主井井塔已经安装调试完成,并投

[作者简介] 李浩宇(1979—),男,辽宁北票人,正高级工程师,主要从事矿山工程咨询设计与研究工作。

[引用格式] 李浩宇,徐长磊,韩瑞军,等.千万吨级主井高速大载重提升技术研究与应用[J].中国矿山工程,2024,53(1):53-59.

入了生产使用;2号主井井塔也已经完成建设。矿山也已经全面进入试生产阶段。

3 主井提升系统方案

提升系统是矿井生产系统中的重要环节,是联系地面和井下的“咽喉”,主井提升系统更是保障矿井生产能力的关键所在。对于提升系统的建设方案,思山岭铁矿在可研、初步设计阶段进行了大量、详实的开拓提升方案比选工作,研究了三条主井提升方案、两条主井提升方案、混合竖井提升方案、胶带斜井提升方案等。结合矿山一期工程生产规模以及一期工程分期建设实施思路,并考虑到项目早投产、首采中段开采深度、提升装备技术水平等方面的因素,综合比较确定矿山一期工程建设两条主井提升方案,即每条主井担负750万t/a矿石提升任务。

前期建设1号主井井筒直径6.3m。主井井口标高+228m,井底标高-1277m,井筒深度达到了1505m。主井提升高度为1478m。在井筒内配置30m³双箕斗,采用钢丝绳柔性罐道,6根首绳5根尾绳。主井提升采用塔式布置,地表井塔内设置罐道绳固定装置,井底设置罐道绳重锤拉紧装置。井塔大厅层设置规格为 $\phi 6.75\text{ m} \times 6$ 塔式多绳摩擦提升机,交流同步大功率双电机低速直联驱动,电机功率为6500kW $\times 2$,采用交直交变频调速。

1号主井提升系统选型参数见表1。

思山岭铁矿作为目前国内最具代表性的深井大规模矿山,主井提升系统设计、建设在很多方面已然达到了国际领先水平,具有以下几大特点。

(1)竖井深。主井井筒深度达到1505m,提升高度达到1478m。

(2)规模大。年提升任务750万t/a,日提升任务22728t/d。

(3)高速度。最大提升速度超过18m/s。

(4)大载重。箕斗有效载重可达55t。

(5)大型化提升机。塔式多绳摩擦提升机规格 $\phi 6.75\text{ m} \times 6$ 。

(6)大功率双电机。交流同步双电机低速直联传动,功率6500kW $\times 2$ 。

4 提升安全间隙研究

4.1 提升容器侧向气动压力模拟

侧向空气动力是引起钢丝绳罐道提升容器摆动的主要因素之一。为研究计算井筒内提升容器的侧

表1 主井提升系统参数表

内容	单位	数值	
矿石提升任务	t/d	22 728	
井口标高	m	228	
装矿胶带道标高	m	-1 202	
最大提升高度	m	1478	
矿石松散密度	t/m ³	2.357	
提升方式		双箕斗提升	
箕斗容积	m ³	30	
箕斗质量	kg	55 000	
箕斗载量	kg	55 000	
型式		多层股抗旋转	
数量	根	6	
首绳	直径	mm	$\phi 56$
	每米质量	kg/m	15.26
	抗拉强度	N/mm ²	1 960
型式		多层股抗旋转	
数量	根	5	
尾绳	直径	mm	66
	每米质量	kg/m	18.32
	抗拉强度	N/mm ²	1 570
提升系统最大静张力	kN	2 482	
提升系统最大静张力差	kN	540	
型号		6.75 m \times 6 m	
提升机	卷筒直径	mm	6 750
	导向轮直径	mm	6 000
型式		交流同步	
电动机	功率	kW	6 500 \times 2
	电压	V	3 150
最大提升速度	m/s	18.025	

向气动压力,需要考虑井筒中提升容器的活塞效应。竖井井筒是一有限空间,在提升容器运动过程中,提升容器前方的空气被推动向前,产生活塞作用效应;提升容器后方由于提升容器运行的诱导作用,产生诱导风流跟随向前;井筒中提升容器周围的空气被推动和诱导而随提升容器前进方向相对流动,这种气流的动力学现象可称之为井筒提升容器的活塞效应。

提升容器升降运动产生的活塞效应,会造成井筒内气流和气压的动态变化,气流和气压的变化在提升容器不同侧面产生动态变化的压力。在各侧面气动压力的作用下,提升设备会朝向压力较小的一

侧摆动。采用流体分析软件模拟提升容器沿钢丝绳罐道在井筒中的运行过程,模拟井筒内空气流场变化,并对侧向气动压力进行监控和分析。

计算选取有限范围井筒 200 m 段作为计算模型如图 1 所示,箕斗 1 上行,箕斗 2 下行,井筒内回风速度 2 m/s,风流方向从井筒底部至井筒顶部。对计算模型进行解算分析如图 2 所示。

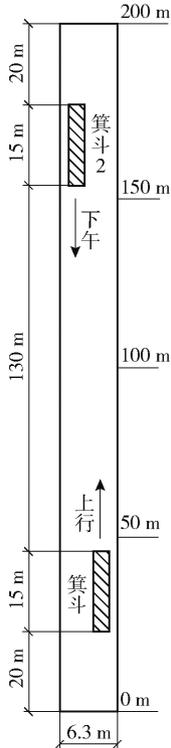


图 1 计算模型

对 2 s 时井筒内的流场变化进行分析,此时两箕斗相距离 94 m。箕斗相会前,井筒内箕斗 1 的顶端区域压强为正值,箕斗 1 的侧面区域和底端区域压强均为负值;箕斗 2 的底端区域压强为正值,箕斗 2 的侧面区域和顶端区域压强均为负值;且井筒内压强分布是关于 y 轴大致是对称的。4 s 时井筒内的流场变化进行分析,此时两箕斗已相会。箕斗相会时,箕斗 1 和 2 不同截面上压强变化较大,且井筒内压强分布是关于 y 轴大致是对称的。以上对压强云图分析表明: X 方向的压强分布近似对称分布, Y 方向的压强分布随着箕斗运行而剧烈变化。

空气动力对井筒内提升容器的作用根据方向的不同可分为竖向力和侧向力;竖向力与提升钢丝绳的拉力相比差距巨大,且不影响容器的水平偏移,可不考虑。空气动力对容器的侧向力按作用状态分为容器正常运行时的稳态空气动力和空气冲击动力。

在箕斗运行过程中,箕斗相会前和相会后箕斗运行时所受的侧向空气动力即属于稳态空气动力,箕斗相会过程中所受的空气动力即属于空气冲击动力。空气冲击动力较稳态空气动力大,但由于其作用时间很短,两容器相会过程中,还会出现空气冲击动力的反向作用,根据模拟分析对容器偏移影响较小,有研究资料表明此偏移量仅为 2 ~ 5 mm。^[1]

4.2 提升容器水平偏移安全间隙

钢丝绳柔性罐道在矿山竖井提升中应用广泛,具有高速运行平稳、可靠、通风阻力小等优点。但对于深井提升,较长的钢丝绳罐道系统的横向刚度较弱,使得提升容器易发生横向偏移。如果提升容器与井壁、井梁及容器之间的间隙过小,就会增加提升容器与之相撞的风险,危及提升安全。

但随着提升规模及井筒深度的增加,提升终端荷载及提升速度都较过去有较大提高,钢丝绳罐道提升容器的摆动幅度增大,钢丝绳罐道安全间隙的规定用于超深竖井提升时应进行调整。《有色金属矿山井巷工程设计规范》(GB 50915—2013)中 4.2.4 内容如下:“竖井深度、提升终端荷载、提升速度大的井筒,采用钢丝绳罐道的安全间隙应适当加大”。但是,目前定量确定超深井钢丝绳罐道提升容器摆动和确定安全间隙缺乏必要的理论支撑和工程实践依据。

为确定思山岭铁矿主井提升钢丝绳罐道提升容器安全间隙,结合中国恩菲在超深井提升领域相关研究结论和国内外研究成果,双箕斗提升运行过程中对于提升容器水平偏移影响因素主要包括稳态空气动力引起的容器横向位移、科氏力引起的容器横向位移、提升钢丝绳扭转力矩引起的容器横向位移。计算影响提升容器摆动的主要因素水平摆动位移,各影响因素对提升容器水平偏移影响见表 2。

容器偏向井壁的横向总计算位移见式(1)。

$$D_p = D_A + D_C + D_Y + \text{其他位移} = 46 + 92 + 208 = 346 \text{ mm} \quad (1)$$

容器之间的横向总计算位移见式(2)。

$$D_p = \text{容器 1} [D_A + D_C + D_Y + \text{其他位移}] - \text{容器 2} [D_A + D_C + D_Y + \text{其他位移}] \quad (2)$$

容器之间的横向总计算位移考虑容器运行最不利情况时的位移组合,由于容器 A、B 空气动力引起横向位移均偏向井壁,计算位移时只取两容器由科氏力和钢丝绳扭转引起的位移计算见式(3)。

$$D_p = (92 + 46) - (-92 - 46) = 276 \text{ mm} \quad (3)$$

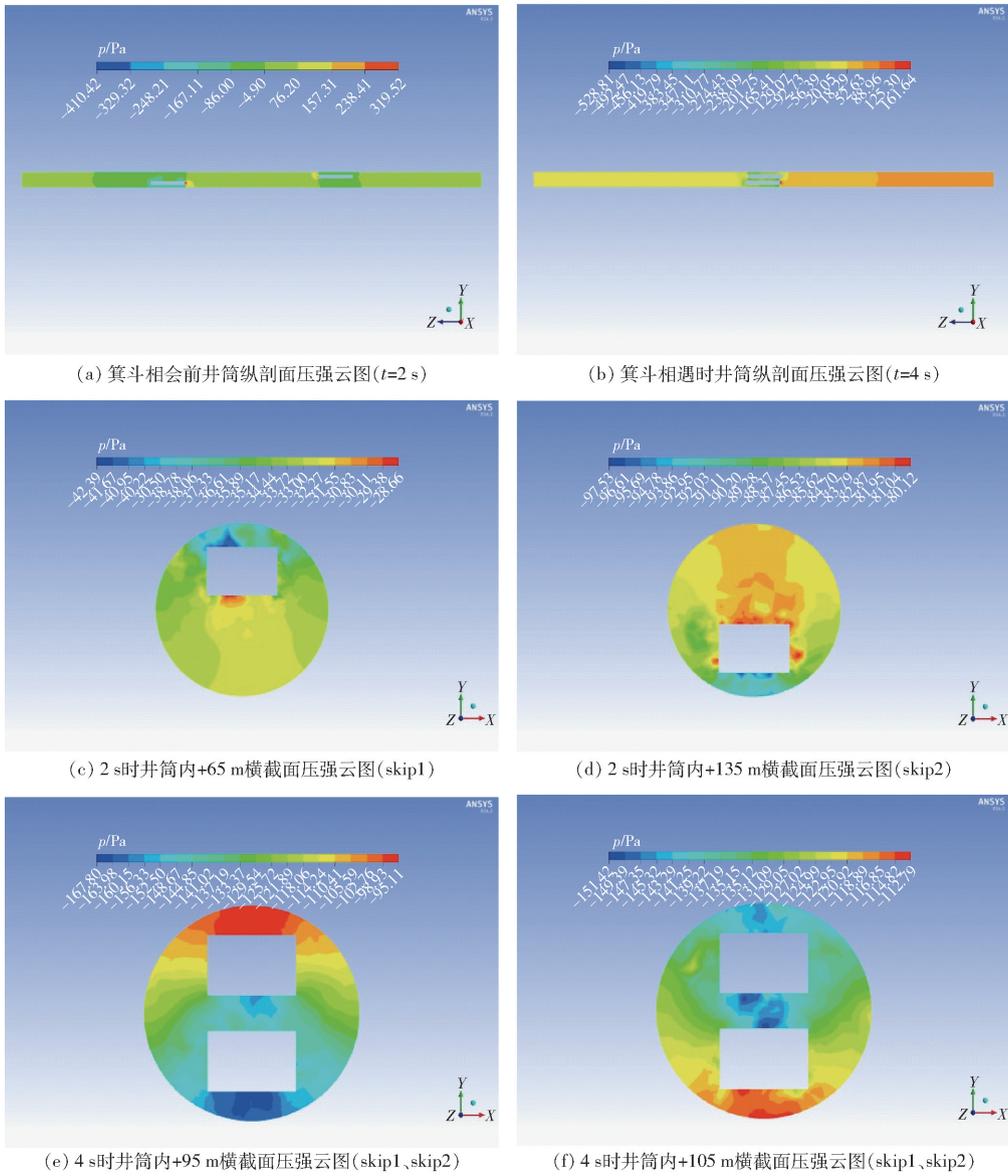


图2 井筒中2 s(未相遇)和4 s(相遇)横截面压强解算云图

表2 提升容器水平偏移

影响因素	空气动力 D_A	科氏力 D_C	钢丝绳扭转 D_Y
位移/mm	208	±92	46(1.7°)

设计提升容器安全间隙见式(4)。

$$D_N = D_P \gamma_R + D_X \quad (4)$$

式中： γ_R 为安全间隙系数，箕斗提升正向碰撞取2.0，侧向碰撞取1.5； D_X 为安全间隙允许误差，取50 mm。

故提升容器与井壁设计安全距离计算见式(5)，提升容器与容器之间的设计安全距离计算见式(6)。

$$D_N = D_P \gamma_R + D_X = 1.5 \times 346 + 50 = 569 \text{ mm} \quad (5)$$

$$D_N = D_P \gamma_R + D_X = 2.0 \times 276 + 50 = 602 \text{ mm} \quad (6)$$

提升容器实设计安全间隙取值和井筒断面如图3所示。设计井筒断面时，除了考虑以上计算得出的容器与井壁设计安全距离以及容器与容器之间的设计安全距离外，还需考虑提升设备合理布置、尾绳环弯曲的需要等。综合考虑以上因素，井筒实际断面中容器与井壁的安全距离为583 mm，容器与容器突出部分之间的距离为850 mm^[2]。

5 高速大载重提升技术装备

5.1 大载重提升容器

双箕斗提升是目前国内外大规模深井矿山主提升系统普遍采用的提升方式。大规模提升需要大载

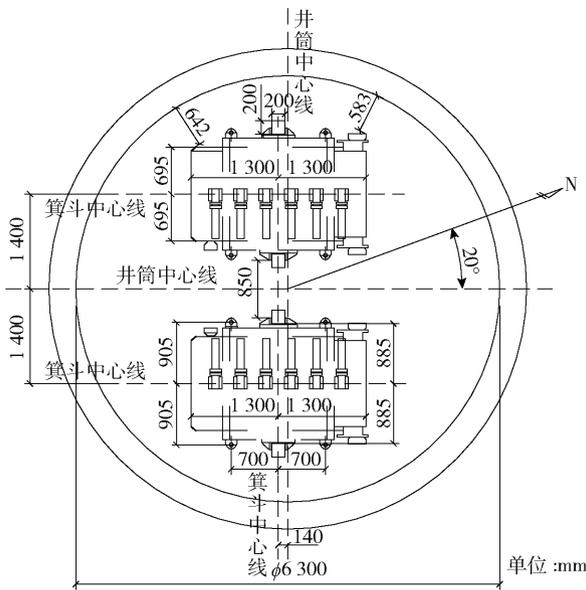


图 3 主井井筒断面图

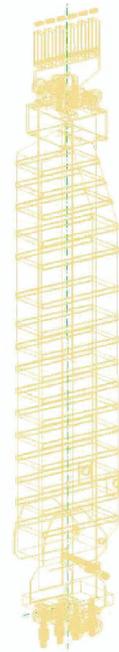


图 4 箕斗外形图

重的箕斗,而提升容器箱体是装载矿石的箱型结构,箱体一般安装在框架之内,分为固定安装与转轴安装两种形式。固定安装箱体多为大型煤矿采用,转轴安装箱体多用于冶金矿山。

思山岭铁矿提升物料为铁矿石,松散密度为 2.357 t/m^3 ,破碎后物料块度小于 300 mm ,铁矿石平均硬度约为 145 MPa 。为适应矿山物料比重大,硬度高,且具有相当磨蚀性等方面的特性,采用了冶金矿山常规使用转轴安装箱体形式,液压驱动直轨外动力底侧卸式卸载方式。主井箕斗技术参数见表 3,箕斗外形图和断面图如图 4 所示。

表 3 箕斗技术数表

项目	数值	单位
箕斗断面	$2\ 600 \times 1\ 810$	$\text{mm} \times \text{mm}$
框架高度	15.86	m
总容积	30	m^3
自重	55	t
有效载重	55	t
卸载方式	外动力直轨卸载	
首绳悬挂	YXZ4500	
尾绳悬挂	WY-30	

无论是在提升箕斗总容积还是矿石提升载重方面,思山岭铁矿所采用的提升箕斗均是非煤矿山领域特大型箕斗,其载重 55 t 为目前已知国际上千米深井最大载重量之一,大载重提升箕斗的应用将为矿山达到生产规模的矿石提升能力提供基本保障。

5.2 提升机和电机

多绳摩擦提升系统由电机驱动提升机的摩擦滚筒转动,带动提升钢丝绳牵引箕斗完成矿石提升作业。提升机和电机是提升动力的源泉,是矿山生产最重要的咽喉设备。现代矿井提升机提升载量大,速度快,安全性高,已发展成为高度集成自动化控制的机电液大型矿山设备。

思山岭铁矿主井提升机采用塔式多绳摩擦提升机,规格为 $\phi 6.75 \text{ m} \times 6 \text{ m}$,摩擦滚筒名义直径为 $6\ 750 \text{ mm}$,摩擦盘外直径达到了 $7\ 600 \text{ mm}$,是已知国际上规格最大多绳摩擦提升机之一。提升机配套交流同步双电机低速直联传动,电机功率为 $6\ 500 \text{ kW} \times 2$,双电机双端悬挂联结,这也是世界上装机总功率最大竖井提升机。电动机采用技术先进、成熟可靠的交一直一交变频控制系统,配置了 SM150 变频器,具有谐波低,无需滤波装置等优势,控制上更为精准。

提升机闸控系统采用恒减速制动,闸控系统由 2 台独立的液压站构成,一台工作一台备用。闸控的制动单元由 12 对 BE250 型闸头组成。思山岭铁矿主井提升机配置型式如图 5 所示。

5.3 提升钢丝绳

提升钢丝绳是联接两个互为平衡提升容器之间的纽带,钢丝绳通过与提升机滚筒绳槽衬垫的接触产生摩擦力从而带动提升容器上下运行。思山岭铁

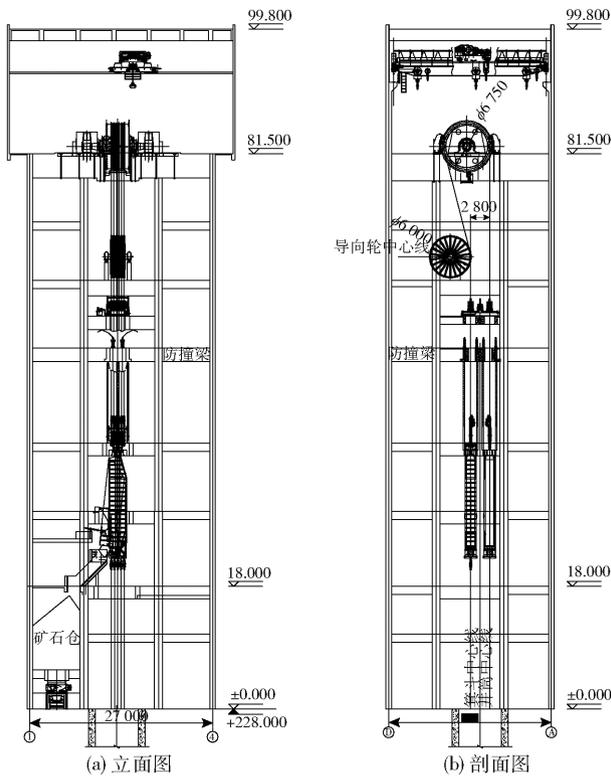


图7 主井井塔立面布置图

7 结论

思山岭铁矿主井提升系统作为千万吨级高速大

载重提升技术研究与应用代表,从方案确定之初就本着创新性、先进性、可靠性、安全性的原则,以成熟工艺、大型设备、安全保护为支撑,将提升安全间隙研究作为确定井筒断面和提升安全运行基础,在此基础上将55 t大载重箕斗、 $\phi 6.75 \text{ m} \times 6$ 大型塔式多绳摩擦提升机、6 500 kW $\times 2$ 交流同步电机、大直径高强度注塑提升钢丝绳等一系列先进技术、装备应用到主井提升项目设计与建设中。

[参考文献]

- [1] 徐长磊. 钢丝绳罐道提升容器侧向气动压力模拟计算[J]. 现代矿业, 2019, 35(01): 138-142.
- [2] 徐长磊, 杜贵文, 孙杨, 等. 深井钢丝绳罐道提升容器水平偏移和安全间隙计算[J]. 建井技术, 2018, 39(1): 35-39.
- [3] 李浩宇, 施士虎. 深井多绳摩擦提升系统探讨[J]. 中国矿山工程, 2016, 45(1): 71-74.
- [4] 仲松. 红庆河煤矿主立井提升系统创新设计与实践[J]. 煤炭工程, 2019, 51(6): 39-42.
- [5] 刘显旺, 郭智杰, 王程. 葫芦素矿主井井塔建筑设计[J]. 煤炭工程, 2016, 48(5): 31-33, 36.

(上接第35页)

- [3] 刘杰, 黄克磊. 基于数码电子雷管的非煤矿山爆破技术推广[J]. 矿业工程, 2023, 21(5): 29-32.
- [4] 刘翔宇. 电子雷管起爆体系下城市隧道爆破参数确定方法研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [5] 马连成, 陆占国, 杨光月, 等. 基于有限元的MEMS惯性传感器保护装置研究[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(6): 24-29.
- [6] 吴礼军, 王鑫尧. 城区基坑开挖爆破振动预测及控制研究[J]. 爆破, 2023, 40(3): 206-211+235.
- [7] 丁伟捷, 刘殿书. 露天矿数码电子雷管逐孔起爆条件下质点峰值振速预测[J]. 地球科学, 2023, 48(5):

2000-2010.

- [8] Pak T U, Jo G R, Han U C. Prediction of characteristic blast-induced vibration frequency during underground excavation by using wavelet transform[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2022: 1-11.
- [9] Wang Y, Zheng G, Li Y, et al. Full waveform prediction of blasting vibration using deep learning[J]. Sustainability, 2022, 14(13): 8200.
- [10] Wang P, Ma Y, Zhu Y, et al. Experimental study of blast-induced vibration characteristics based on the delay-time errors of detonator[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 1-9.