超深井大载重高速提升工况空气流场动态变化研究与分析*

杨锦涛[1,2,3]，王西涛[1,2,3]，李广[1,2,3,4]，周建[1,2,3]

（1.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
2.金属矿山安全技术国家重点实验室， 湖南 长沙 410012；
3.国家安全生产长沙矿山机电检测检验中心， 湖南 长沙 410012；
4.中国矿业大学， 江苏 徐州市 221116）

摘要：随着矿山浅表资源逐步枯竭，深井开采成为一种重要的资源获取方式。以国内某在建超深井大载重高速提升金属矿山为研究对象，通过对比不同井筒提升容器布置方式及运行工况的空气流场动态变化，开展提升容器气动压力分布规律的仿真分析。采用流体力学中的标准 k-ε 湍流模型，基于 Fluent 软件对提升容器运行时的井筒气流状态进行数值模拟，分析了容器提升过程中的周围气动压力分布、计算了容器偏移量，进而揭示井筒内提升容器的气动力特性及横向摆动规律。研究结果表明，当两个相向运行的提升容器在井筒中交会时，会产生明显的气动冲击力及冲击力矩，且井筒双容器的横向气动力大于井筒四容器的横向气动力，双容器井筒布置的活塞效应较四容器井筒布置更为明显。从空气动力学角度来分析，超深井提升系统应优先采用四容器布局，其次考虑双容器布局。

关键词：超深井大载重高速提升系统；k-ε 湍流模型；四容器；空气流场动态变化

中图分类号：TD53 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)07-0001-07

Research and Analysis on Dynamic Change of Air Flow Field in Ultra-Deep Well Under Large-Load and High-Speed Lifting Condition

YANG Jintao[1,2,3], *WANG Xitao*[1,2,3], *LI Guang*[1,2,3,4], *ZHOU Jian*[1,2,3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Metal Mine Safety Technology, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Changsha Mine Mechanical and Electrical Testing Center for National Safety Production, Changsha, Hunan 410012, China;
4.China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: With the gradual depletion of shallow resources in mines, deep mining has become an important way to obtain resources. A domestic metal mine under construction with an ultra-deep well under large-load and high-speed lifting system was taken as the research object. Simulation analysis of the aerodynamic pressure distribution laws of lifting containers was carried out by comparing the dynamic changes of air flow fields under different arrangement modes of shaft lifting containers and operating conditions. The standard k-ε turbulence model in fluid mechanics was adopted, and numerical simulations of the air flow behavior in the shaft during the operation of lifting containers were conducted using Fluent software. The aerodynamic pressure distribution around the containers during the lifting process was analyzed, and the container offset was calculated, thereby revealing the aerodynamic characteristics and lateral swinging patterns of the lifting containers in the shaft. The research results show that when two lifting containers running in opposite directions intersect in the shaft, obvious aerodynamic impact force and impact torque will be generated. Moreover, the lateral aerodynamic force of two-container in the shaft is greater than that of four-container, and the piston effect of the two-container shaft layout is more pronounced than that of the four-container shaft layout. From an aerodynamic perspective, the four-container layout should be prioritized for ultra-deep well lifting systems, with the two-container layout considered as a secondary option.

Key words: Ultra-deep well under large-load and high-speed lifting system, k-ε turbulence model, Four-container, Dynamic change of air flow field

---

* **收稿日期**：2024-12-05
基金项目：中国五矿集团有限公司全国重点实验室专项资金项目(2024GZKJ02)
作者简介：杨锦涛(1985—)，男，湖南长沙人，硕士，高级工程师，主要从事矿山机电智能化研究工作。E-mail:18900774633@163.com
通信作者：周建(1985—)，男，重庆人，高级工程师，主要从事矿山机电产品研发。E-mail:7035588@qq.com

0 引言

金属矿山竖井提升运输系统承担着矿山提升矿石、升降人员、运输材料和设备的重要任务,它是连接井上和井下的关键通道。随着浅部资源的日益枯竭,国内外已陆续开展深部资源开采。据统计,未来10年我国将有1/3的地下金属矿山开采深度达到或超过1 000 m,最大开采深度可达2 000～3 000 m。深部开采已成为我国矿业发展面临的重要问题,也是保障金属矿产品供给的主要途径[1]。近年来,国内在建的超大型金属地下矿山数量显著增加,包括陈台沟铁矿、思山岭铁矿等年产量超过1 000万t/a的矿山,其开采深度均超过1 500 m。这表明我国地下金属矿山正从当前的1 000 m开采深度向1 500～2 000 m深度迈进,同时生产规模也向1 000万t/a以上发展[2]。随着矿山开采深度的增加和生产规模的扩大,竖井深度和提升能力均有大幅提高,提升速度和终端荷载增大,导致提升容器摆动幅度加剧。此外,井筒断面的动态变化会引发持续变化的活塞风流和瞬态井筒压力,进而使通风系统的风压和风流频繁波动,造成风流脉动,并增强提升容器的活塞效应[3]。增强的活塞效应可能导致容器发生偏移。由于容器在井筒内需保持一定的安全间隙,偏移会减小该安全间隙,进而可能会引发安全事故。在超深井、大载重、高速提升情况下,活塞效应更强,对容器的安全间隙影响更加突出。因此,开展相关的模拟仿真研究具有极其重要的意义。

提升容器在井筒中的运动与活塞在气缸中的运动具有相似性。当提升容器运动时,气流受挤压而向前流动,但由于提升容器并未完全占据井筒空间,前方气流并非全部向前运动,部分气流则通过容器周围的环状空间向后流动。井筒内的空气流动可类比于管道流动进行分析,属于高雷诺数湍流问题。提升容器的运行速度和运行方式不同,所诱导的流场特性也会相应变化[4]。

目前超深井主要采用箕斗和罐笼作为提升容器,其布置方式因矿山需求而异。主要布置方案包括双容器系统和四容器系统。主井通常采用双箕斗或者双罐笼配置。副井则多采用四容器布置,典型组合为大罐笼配箕斗与小罐笼配平衡锤。不同布置方式会导致提升容器所受气动力有差异,进而影响容器的横向摆动特性。

本文以国内某在建的超深井大载重高速提升金属矿山为工程背景,针对单井筒双容器布置与单井筒四容器布置两种方案,基于k-ε湍流模型方程,结合实际矿山设计工况对提升容器开展流体仿真分析。通过仿真研究超深井特殊工况下提升容器运行过程中的空气流场动态演变规律、气动力特性及横向摆动特性变化,进而揭示其安全间隙的变化规律,最终对安全设施设计提供理论支撑。

1 活塞空气流场效应主控制方程

提升容器在井巷内运行时受到风流变化影响会产生摆动,其过程较为复杂。为简化模型,提出如下假设:

(1) 井巷沿程阻力系数恒定;

(2) 井巷内风流运动视为不可压缩流动,忽略流体间相互作用力;

(3) 矿井风流速度恒定;

(4) 井巷壁面绝热,流体的紊流黏性为各向同性,紊流黏性系数按标量处理;

(5) 井巷内风流流动为等温稳态紊流,满足Boussinesq假设。

由于模型假设为不可压缩流体流动,而标准k-ε模型适用于井巷活塞效应引起的高雷诺数非稳态气流,采用标准k-ε双方程模型模拟[3]。为了便于分析,采用非稳态流体通用控制方程进行求解,其表达式为:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i\Phi)=\frac{\partial}{\partial x}(\Gamma\frac{\partial\Phi}{\partial x_i})+s$$

式中:ρ为流体密度,kg/m^3;Φ为湍动能,m^2/s^2;t为时间,s;u_i为速度变量,m/s;x_i为空间坐标,m;Γ为广义扩散系数;s为源项。公式各项从左向右依次为瞬态项、对流项、扩散项、源项。

2 活塞风动力效应数值模拟模型

研究对象为金属矿山主井,采用双箕斗提升系统,属于双容器布置方式;副井采用混合布置,一侧为大箕斗配大罐笼,另一侧为小罐笼配平衡锤,形成四容器布置方式。本研究通过对比不同容器布置方式,分析井筒内活塞风动力效应对容器运行间隙的影响。根据金属矿山实际设计参数(见表1和表2),研究对象主井和副井均为超深井、大载重高速提升系统。运用Fluent处理软件建立符合尺寸的几何模型,并进行网格划分。考虑到容器运动导致的空气压缩效应,本研究采用弱可压缩理想气体模型。假设巷道回风速度为2 m/s。回风口的边界条件为速度入口,湍流强度为5%,湍流黏度为10%。

表 1 双容器提升设计参数

Table 1 Design parameters for double container lift

提升方式	提升高度/m	箕斗自重/t	有效提升量/t	提升速度/(m/s)	电机功率/kW
双箕斗	1 470	50	40.8	16.3	9 000

表 2 四容器提升设计参数

Table 2 Design parameters of four container lifting

提升方式	提升高度/m	自重/t		有效提升量/t	提升速度/(m/s)	电机功率/kW
		罐笼	平衡锤			
大罐笼配平衡锤	1 504	65	80	30	10.89	3 000
小罐笼配平衡锤	1 503	18	23	10	10.01	1 250

3 活塞风动力效应数值模拟结果及分析

3.1 井筒双容器布置气动压力模拟

双容器运行时,由于流体微团在湍流中的不规则运动,较大尺度的流体微团会逐渐分解成较小尺度的流体微团。在黏性耗散等因素作用下,这些较小尺度的流体微团会将部分流体动能和流体压力能不可逆地转化为热能而耗散。湍流耗散主要集中在流体湍流运动剧烈的固体壁面区域,该处因湍流耗散显著,导致流体微团的压力能和动能损失较大,这也是井筒内气流产生压力损失的重要原因。以巷道间距为 500 mm 进行仿真分析,图 1、图 2 分别为上下巷道间距为 500 mm 时的湍流耗散率云图和速度矢量图。

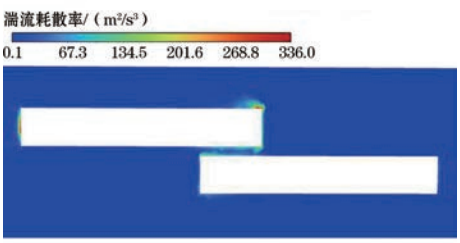


图 1 巷道湍流耗散率云图

Fig.1 Cloud diagram of turbulence dissipation rate in roadway

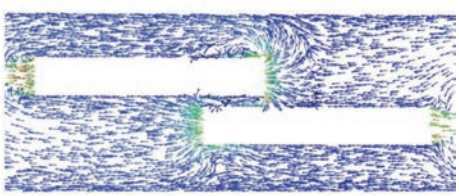


图 2 箕斗速度矢量图

Fig.2 Skip speed vector diagram

如图 1 和图 2 所示,上部箕斗运动方向与巷道的回风方向相对,此时箕斗迎风侧带动的气流与巷道回风方向的气流运动方向相反。在箕斗上表面靠近迎风侧的区域会出现回流区并伴随着较高的湍流耗散率。当气流的运动方向发生偏转时,将会伴随着一定的压力能损失,这是后续出现压力损失的重要原因之一。

如图 3 所示,当两个箕斗运动至存在相对重合区域的位置时,上方箕斗和下方箕斗迎风侧带动的气流会朝着两个箕斗中间区域进行补风。但由于此处的流体微团在补风过程中运动方向发生较大偏转,此处压力能损失较大。



图 3 速度矢量局部放大

Fig.3 Local amplification velocity vector

图 4 所示为巷道中两个箕斗间距为 500 mm 时的压力云图。从下到上依次为下箕斗和上箕斗。当下箕斗与上箕斗之间的距离减小时,箕斗之间的气体流速增大,静压将会明显降低进而导致总压下降。此时,上下箕斗间的总压较低,约为−140 Pa。在两个箕斗中间区域,由于总压较低且流体微团运动方向发生较大偏转,从箕斗迎风侧进入该区域的流体微团压力损失较大。由于截面位置靠近下箕斗的迎风侧,下箕斗其余 3 个面的动压相对较高,使得此处的总压较大。

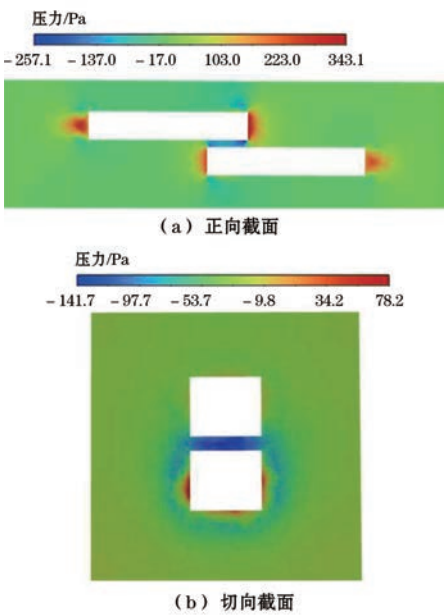


图 4 两箕斗间距为 500 mm 时巷道压力云图

Fig.4 Roadway pressure cloud diagrams under the condition of two skips spacing of 500 mm

通过上述分析可知,当主井箕斗间距为 500 mm 时,横向静压差为 130.4 Pa,横向压差力为 4 564 N,空载工况偏移量为 8.2 mm,满载工况偏移量为 4.5 mm。

3.2 井筒四容器布置气动压力模拟

3.2.1 大罐笼和小罐笼逆运行

针对井筒四容器布置的气动压力模拟分析,建立四容器布置模型,如图 5 所示。根据大罐笼和小罐笼逆向运动时的情况,研究分为两种运动工况:大罐笼运动方向与巷道回风方向相反、大罐笼运动方向与巷道回风方向相同。

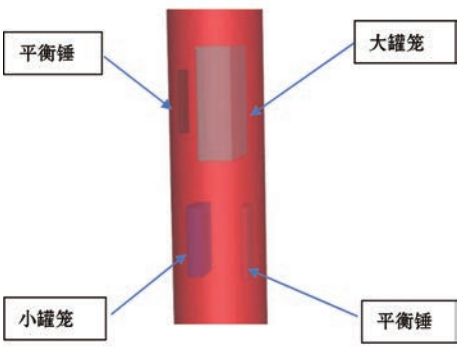
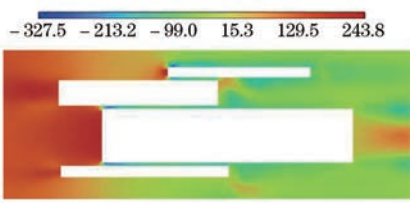


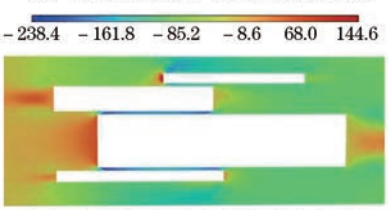
图 5 大罐笼和小罐笼逆向运行时巷道四容器布置模型

Fig.5 Four-container layout model of roadway during reverse operation of large cage and small cage

四容器运动方向与巷道回风方向相反或相同时的巷道压力云图如图 6 所示,图 6(a)为大罐笼的运动与逆着巷道回风方向相反的压力云图,图 6(b)为大罐笼的运动方向与巷道回风方向相同时的压力云图。



(a) 大罐笼运动方向与巷道回风方向相反



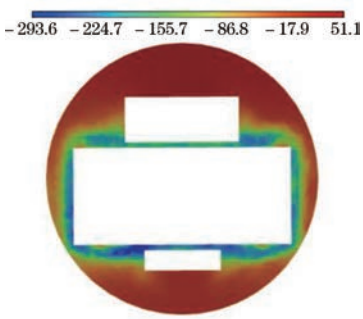
(b) 大罐笼运动方向与巷道回风方向相同

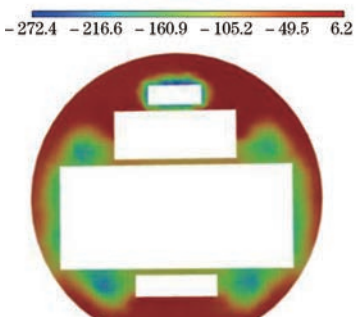
图 6 大罐笼和小罐笼逆向运行工况下巷道压力云图(单位:Pa)

Fig.6 Roadway pressure cloud diagrams under reverse operation condition of large cage and small cage (unit: Pa)

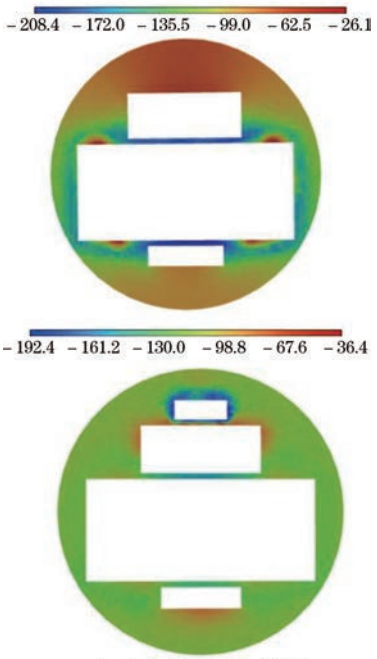
由图 6 分析可知,当大小罐笼的运动方向相反,且大罐笼的运动方向与巷道回风方向相反时,会有更多的流体微团进入到大罐笼的上侧面通道和下侧面通道,导致该区域空气流速显著增加。由于通道内单位时间空气流量增大,流体受到的黏性阻力及其他阻力相应增加,需要更大的压差力推动流体微团以克服阻力。通过仿真研究表明,当大罐笼的运动方向与巷道回风方向相反时,上下两侧通道内的最大负压约为-305 Pa;当大罐笼的运动方向与巷道回风方向时相同,上下两侧通道内的最大负压约为-240 Pa。

进一步研究压力云图截面图(见图 7)。当大罐笼和小罐笼交会时,大罐笼的上下两侧与小罐笼和箕斗交汇处的通道会产生负压。当大罐笼的运动方向与巷道的回风方向相反时,由于大罐笼上下两侧通道的空气流量增大,其产生的压差阻力显著升高,系统总压损失进一步增加。在巷道截面区域,大罐笼逆着巷道回风方向运动时,远离罐笼区域的空气流向角度偏转较小,因此该区域呈现出正压状态。当小罐笼持续运动至与平衡锤交汇时,两者之间会产生局部负压区。当平衡锤的运动方向与巷道的回风方向相反时,小罐笼和平衡锤之间的进气流量增大,压力损失加剧,此时两者之间的压力约为-210 Pa。当平衡锤的运动方向与巷道的回风方向相同时,小罐笼与平衡锤之间的负压约为-175 Pa。





(a) 与巷道回风方向相反



(b) 与巷道回风方向相同

图 7 压力云图截面图(单位:Pa)

Fig.7 Cross sections of pressure cloud diagrams (unit:Pa)

3.2.2 大罐笼和小罐笼同向运行

当大罐笼和小罐笼同向运行时,四容器的分布形式如图 8 所示。依据大罐笼和小罐笼的运动方向与巷道回风方向相反、大罐笼和小罐笼的运动方向与巷道回风方向相同两种工况进行分析。

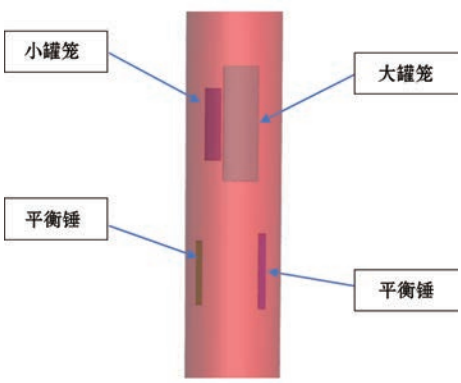
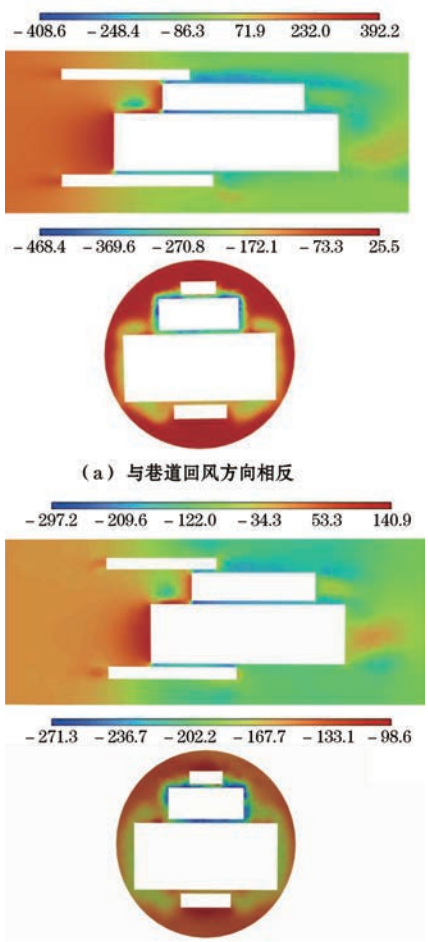


图 8 大罐笼和小罐笼同向运行时巷道四容器布置模型

Fig.8 Four-container layout model of roadway under the same direction operation condition of large cage and small cage

如图 9 所示,从下到上分别为平衡锤、大罐笼、小罐笼、平衡锤。图 9(a)为大罐笼和小罐笼的运动方向与巷道回风方向相反时的压力云图,图 9(b)为大罐笼和小罐笼的运动方向与巷道回风方向相同时的压力云图。当大罐笼与小罐笼的运动方向和巷道回风方向相反时,大罐笼和小罐笼的上下侧通道空气流量均会增大,从而需要更大的压差推动力维持空气流量流通。因此,此时的压力损失值最大,大罐笼与平衡锤之间、大罐笼与小罐笼之间、小罐笼与平衡锤之间的负压分别约为 -300 Pa、-400 Pa、-380 Pa。当大罐笼和小罐笼的运动方向与巷道回风方向相同时,大罐笼与平衡锤之间、大罐笼与小罐笼之间、小罐笼与平衡锤之间的负压分别约为-250 Pa、-295 Pa、-270 Pa。



(a) 与巷道回风方向相反

(b) 与巷道回风方向相同

图 9 大罐笼和小罐笼同向运行工况下巷道压力云图(单位:Pa)

Fig.9 Roadway pressure cloud diagrams under the same direction operation condition of large cage and small cage (unit: Pa)

对其进行进一步分析,得到局部速度矢量放大图(见图 10)。当大罐笼和小罐笼运动方向与巷道回风方向相同时,大罐笼上方靠近迎风面的区域出现较大的涡流区域。由于流体微团在涡流区域造成能量损失,该区域的压力较旁边区域低。当大罐笼和小罐笼的运动方向与巷道回风方向相反时,进入

上下侧通道的空气流量增大,导致单位时间内流体受到的黏性阻力及其他阻力相应增加。随着阻力的增大,需要更大的压差力推动空气流以克服流动阻力。此外,由于流入到小罐笼上下侧通道的空气在进入前经过了涡流区,其初始压力损失较大。

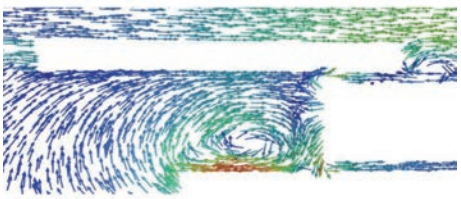


图 10 速度矢量局部放大图

Fig.10 Local amplification of velocity vector

根据上述研究分析可知,对于副井的大罐笼侧平衡锤而言,当平衡锤与大罐笼交汇时,大罐笼和平衡锤的中间通道产生负压,平衡锤朝着大罐笼一侧发生偏转。当大罐笼的运动方向与巷道的回风方向相同时,平衡锤的横向静压差为 66.9 Pa,横向压差力为 1 461.1 N,偏移量为 2.6 mm;大罐笼的横向静压差为 15.6 Pa,横向压差力为 1 460.2 N,空载时的偏移量为 3.2 mm,满载时的偏移量为 2.2 mm。当大罐笼的运动方向与巷道的回风方向相反时,平衡锤的横向静压差为 88.9 Pa,横向压差力为 1 941.6 N,偏移量为 3.4 mm;大罐笼的横向静压差为 20.7 Pa,横向压差力为 1 937.5 N,空载时的偏移量为 4.2 mm,满载时的偏移量为 2.9 mm。对于副井的小罐笼侧平衡锤,当小罐笼的运动方向与巷道的回风方向相反时,平衡锤的横向静压差为 75.6 Pa,横向压差力为 923.8 N,偏移量为 2.8 mm;小罐笼的横向平均静压差为 29.7 Pa,横向压差力为 923.7 N,空载时的偏移量为 3.5 mm,满载时的偏移量为 2.3 mm。当小罐笼的运动方向与巷道的回风方向相同时,平衡锤的横向静压差为 58.3 Pa,横向压差力为 712.4 N,偏移量为 2.1 mm;小罐笼的横向静压差为 22.9 Pa,横向压差力为 712.2 N,空载时的偏移量为 2.7 mm,满载时的偏移量为 1.7 mm。

4 结论及分析

本研究采用流体力学标准 k-ε 湍流模型,对超深井大载重高速提升双容器和四容器两种典型井筒布局开展空气流场动态变化特性分析。通过数值模拟计算获得了提升容器在运行过程中气动压力分布和容器偏移量。研究结果表明,当两个相向运行的提升容器在井筒中交会时会产生显著的气动冲击力及冲击力矩,作用在双容器和四容器上的横向气动力依次减小。单容器布局工况下,空载时的偏移量(6.2～8.2 mm)大于重载时的偏移量(3.4～4.5 mm)。双容器布局工况下,大罐笼偏移量大于小罐笼偏移量,空载时最大偏移量为 3.5～4.2 mm,重载时偏移量为 2.2～2.9 mm。双容器布局的活塞效应最为显著,而四容器布局的活塞效应相对较弱。基于空气动力学分析,超深井提升系统推荐优先采用四容器布局,其次考虑双容器布局。上述分析为研究超深井大载重高速提升系统的安全运行及容器安全间隙设计提供了参考。

参考文献(References):

[1] 蔡美峰,谭文辉,吴星辉.金属矿山深部智能开采现状及其发展策略[J].中国有色金属学报,2021,31(11):3409-3421.
CAI Meifeng, TAN Wenhui, WU Xinghui. Current situation and development strategy of deep intelligent mining in metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(11):3409-3421.

[2] 李广,史志远,余洪伟.金属矿山深井大规模提升关键技术装备进展与发展趋势[J].矿业研究与开发,2024,44(9):1-8.
LI Guang, SHI Zhiyuan, YU Hongwei. Progress and development trend of key technology and equipment for large-scale hoisting of deep well metal mines[J]. Mining Research and Development,2024,44(9):1-8.

[3] 徐长磊,杜贵文,孙扬,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):35-39.
XU Changlei, DU Guiwen, SUN Yang, et al. Calculation of horizontal offset and safety clearance of mine hoisting container with steel rope guide in deep mine shaft[J]. Well Construction Technology,2018(39):35-39.

[4] 吴仁愿.柔性导轨矿井提升容器横向摆动行为研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
WU Renyuan. Study on the lateral oscillation behaviour of rope guided conveyances in mine hoist[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2015.

[5] 王文才,魏丁一,王振涛,等.基于 Fluent 的矿井活塞风动力效应研究[J].工业安全与环保,2017(43):29-31.
WANG Wencai, WEI Dingyi, WANG Zhentao, et al. Research on mine wind power piston effect based on Fluent [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2017 (43):29-31.

[6] 梁鹏飞,冷奎,翟守忠,等.深井提升复合联接技术的研究[J].矿业研究与开发,2018,38(5):80-83.
LIANG Pengfei, LENG Kui, ZHAI Shouzhong, et al. Research on the composite connection technology in deep shaft hoisting[J]. Mining Research and Development,2018, 38(5):80-83.

[7] 梁敏.摩擦提升系统提升钢丝绳的振动分析与试验研究[D].太原:太原理工大学,2015.
LIANG Min. Analysis and test research on vibration of hoisting rope for friction hoisting system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2015.

[8] 吴娟,寇子明,梁敏,等.多绳摩擦提升系统钢丝绳横向振动分析与试验[J].华中科技大学学报(自然科学版),2015,43(6):12-16.
WU Juan, KOU Ziming, LIANG Min, et al. Analysis and experiment of rope transverse vibration for multi-rope friction hoisting system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2015,43(6):12-16.

[9] 马衍颂.扰动工况下深部矿井提升主绳多向耦合振动失稳机理及抑制策略研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
MA Yansong. Instability mechanism and suppress strategy of multi-direction coupled vibration of hoisting main rope under disturbance conditions in deep mine shaft[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2019.

[10] 陈锡章.钢丝绳罐道提升容器的摆动[J].煤炭科学技术,1985,13(2):23-26.
CHEN Xizhang. Swing of hoisting conveyanco using steel rope guides[J]. Coal Science and Technology,1985,13(2):23-26.

[11] 王海桥,田峰,施式亮,等.矿井井筒提升容器活塞风效应分析及计算[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2007(3):1-4.
WANG Haiqiao, TIAN Feng, SHI Shiliang, et al. Analysis and calculation of the effect piston-wind by hoisting conveyance in vertical shaft[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition),2007(3):1-4.

[12] 田峰,王海桥,黄俊歆.矿井立井提升设备活塞作用理论分析[J].黑龙江科技学院学报,2006(3):163-166.
TIAN Feng, WANG Haiqiao, HUANG Junxin. Theoretical research on piston-effect of hoest in vertical shaft[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology,2006(3):163-166.

[13] 李田,张继业,张卫华.高速列车流固耦合的平衡状态方法[J].机械工程学报,2013(2):95-101.
LI Tian, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. Co-simulation of high-speed train fluid-structure interaction based on the equilibrium state[J]. Journal of Mechanical Engineering,2013(2):95-101.

[14] 李田,张继业,张卫华.横风下高速列车系统动力学的平衡状态法[J].动力学与控制学报,2013(3):264-269.
LI Tian, ZHANG Jiye, ZHANG Weihua. An equilibrium state method of high-speed train system dynamics in crosswind[J]. Journal of Dynamics and Control,2013(3):264-269.

[15] 王海桥,田峰,黄俊歆,等.矿井井筒提升设备绕流的数值模拟[J].中国安全科学学报,2006(9):29-33.
WANG Haiqiao, TIAN Feng, HUANG Junxin, et al. Numerical simulation of airflow around hoisting equipment in mine shaft[J]. China Safety Science Journal,2006(9):29-33.