超深井混合提升容器安全间隙关键影响因素建模与分析*

杨锦涛[1,2]，李富伟[1,2,3]，王西涛[1,2]，周建[1,2]

（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.湖南大学， 湖南 长沙 410082）

摘要：为分析超深井金属矿山提升容器运行中外流场压力变化对安全间隙的影响，识别超深井混合提升容器安全间隙设计的关键因素，提出了一种融合“多场耦合动力学-规范条款-工程设计”的闭环分析方法，用于研究超深井混合提升容器在不同工况下安全间隙的关键指标。以贵州大坪磷矿混合井工程为依托，采用标准 k-ε 双方程湍流模型，对提升容器在运行中外流场压力变化进行数值模拟，深入探究了容器在稳态运行以及相遇瞬态过程中的压力分布特征。同时，综合考虑提升钢丝绳扭转力矩、科里奥利力、稳态空气动力等影响容器摆动的关键因素，系统分析确定了超深井提升容器的设计安全间隙。结果表明，容器运行方向与井筒主风流方向的相对关系是影响通道负压的关键因素，逆向运行工况下气动负压效应更为剧烈，是安全间隙设计的重点工况；提升容器的总横向位移为 158.8 mm，计算得到安全间隙为 536.4 mm，高于《金属非金属矿山安全规程》的安全间隙（528.9 mm）。研究成果可为超深井井筒的安全设计提供科学、可靠的依据，保障了矿山深部开采中提升系统的稳定与安全运行，并为超深井安全间隙设计中安全裕度的评估标准提供了理论参考。

关键词：超深井混合提升容器；金属矿山；k-ε 湍流模型；外流场压力；安全间隙

中图分类号：TD531；TD535　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)08-0060-07

Modeling and Analysis of Key Influencing Factors on Safety Clearance in Mixed Lifting Container of Ultra-Deep Shafts

Yang Jintao[1,2], *Li Fuwei*[1,2,3], *Wang Xitao*[1,2], *Zhou Jian*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: To analyze the impact of external flow field pressure variations on the safety clearance during the operation of lifting container in ultra-deep metal mines, and to identify the key factors in the safety clearance design of mixed lifting container in ultra-deep shafts, a closed-loop analysis method integrating “multi-field coupled dynamics-regulatory codes-engineering design” was proposed. This method was utilized to investigate the key indicators of safety clearance for mixed lifting container in ultra-deep shafts under different operating conditions. Relying on the Daping Phosphate Mine mixed shaft project in Guizhou, a standard κ-ε two-equation turbulence model was adopted to perform a numerical simulation on the external flow field pressure variations of the lifting container during operation. The pressure distribution characteristics of the container during steady-state operation and the transient passing process were deeply investigated. Simultaneously, by comprehensively considering the key factors affecting the oscillation of the container, such as the torsional moment of the hoisting wire rope, the Coriolis force, and steady-state aerodynamic forces, the design safety clearance for lifting container in ultra-deep shafts was systematically analyzed and determined. The results indicate that the relative relationship between the operating direction of the container and the main airflow direction in the shaft is the key factor influencing the negative pressure in the passage. Under the counter-flow operating condition, the aerodynamic negative pressure effect is more intense, which makes it the critical operating condition for safety clearance design. Furthermore, the total lateral displacement of the lifting container is 158.8 mm, and the calculated safety clearance is 536.4 mm, which is higher than the safety clearance (528.9 mm) specified in the *Safety Regulations for Metal and Nonmetal Mines*. The research findings provide a scientific and reliable basis for the safety design of ultra-deep shafts, ensure the stable and safe operation of lifting systems in deep mining, and offer a theoretical reference for the evaluation criteria of safety margins in the safety clearance design of ultra-deep shafts.

* **收稿日期**：2025-07-23
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方面的研究工作。E-mail:18900774633@163.com

Key words: Mixed lifting container in ultra-deep shaft, Metal mine, κ-ε turbulence model, External flow field pressure, Safety clearance

0 引言

金属非金属矿山浅部矿产资源日趋枯竭,开采深度持续增加。近年来,国内涌现出一批在建的大型及超大型金属非金属地下矿山,如年产量超千万吨级的陈台沟铁矿、思山岭铁矿等,其开采深度均已超过 1 500 m。当前,深井提升技术正朝着 1 500～2 000 m 深度、年产规模超千万吨的方向迈进[1-3]。深竖井提升系统及摩擦式提升系统在南非、加拿大、澳大利亚等国也得到了广泛应用[4],典型提升高度为 1 000～2 000 m,最大提升速度超过 18 m/s[5-6]。目前应用的多绳摩擦式提升机,滚筒最大规格可达 Φ7 m×6 m,配套提升容器的最大载荷已达 55 t。

钢丝绳罐道因具备结构简单、安装便捷、运行平稳、通风阻力小、投资少、使用寿命长及安全性高等优势,在超深井提升系统中得到了广泛应用[7]。然而,随着井深不断增加,罐道系统的横向刚度随之降低,易引发提升容器的横向偏移问题[8-9]。徐长磊等[8]探讨了罐道绳刚性系数沿井深的分布规律,指出提升钢丝绳的扭转力矩、科里奥利力及稳态空气动力是导致提升容器横向偏移的主要因素,但该研究未涉及容器在稳态运行阶段,特别是相遇瞬态过程中井筒压力波动对安全间隙的影响。李浩宇等[9]借助数值模拟评估了单一容器运行时的安全间隙,但未考虑多容器混合提升系统中,不同运行工况下容器横向摆动所产生的复杂交互作用。

提升容器在井筒运行中的横向偏移是威胁矿山安全生产的关键因素之一。这种偏移会显著增加容器与井壁或井梁发生碰撞的风险,不仅危及提升系统的安全稳定运行,更可能引发重大安全事故,造成人员伤亡与设备严重损毁,对矿山整体生产活动带来不可估量的威胁[10]。

目前,矿山柔性导向提升系统的设计主要遵循国家相关安全规程和设计规范中关于井筒布局安全间隙的统一规定,如 2022 版《煤矿安全规程》中第七十三条、《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423—2020)中第 6.2.3.1 条、《冶金矿山采矿设计规范》(GB 50830—2013)中第 9.1 条及《有色金属采矿设计规范》(GB 50771—2012)中第 13.3 条等。

然而,当前亟待解决的关键问题在于现行标准所设定的安全间隙阈值,均基于浅部矿山数据制定,其计算公式主要来源于浅部矿山的工程实践与数据。而随着开采深度向超深井发展,提升速度与载荷显著提升,导致提升容器的动态行为(如横向摆动幅度、频率等)趋于复杂和剧烈。因此,基于浅部条件制定的现有安全间隙阈值,是否仍能充分保障超深井提升系统在各种复杂工况(尤其是高速、重载、多容器交互)下的绝对安全裕度,已成为研究的核心议题。本文以贵州大坪磷矿超深混合井为研究对象,旨在深入探讨超深井条件下提升容器的动态特性及其对安全间隙的实际需求,以评估现行标准的适用性并提出可能的改进方向。

1 混合井研究对象设计参数

针对超深井筒环境复杂、提升容器高速运行的特点,采用计算流体动力学(CFD)方法,选用标准 k-ε 湍流模型开展三维瞬态流体仿真分析[11-13]。该模型因在工程湍流问题中兼具良好的鲁棒性与计算效率,能够有效捕捉井筒内复杂的空气流动特性[14]。仿真重点分析提升容器在加速、匀速和减速工况下周围流场的动态演化过程,并模拟容器表面压力分布的时空变化规律。

基于高保真流场数据,对提升容器运行过程中的关键气动力特性进行深入量化分析,重点关注直接影响容器横向稳定性的横向气动力。同时,通过实时监测气动载荷作用下容器的瞬时偏移量,精确计算了由此诱发的横向摆动振幅。

提升容器在混合井筒中的总横向摆动位移是多种动态载荷共同作用的结果。因此,在获取气动摆动量的基础上,进一步系统整合了稳态空气动力、科里奥利力及提升钢丝绳扭转力矩的影响[15]。通过系统性分析,获得了容器在井筒全行程中不同位置可能出现的最大总横向摆动位移。

研究对象为具有代表性的混合提升井,该井筒采用四容器运行,一侧为箕斗配罐笼,另一侧为罐笼配平衡锤。为分析提升容器在井巷中受风流影响所产生的摆动行为,对问题做适当简化,提出以下假设:

(1) 井巷阻力系数 λ 为常数;

(2) 井巷内风流为不可压缩流动,忽略风流体间的相互作用力;

(3) 矿井风流速度保持不变;

(4) 井巷壁面为绝热条件,紊流黏性系数作标量处理;

(5) 井巷内风流属于等温稳态紊流,且满足 Boussinesq 假设。

相关提升参数见表 1。

表 1 四容器提升设计参数

Table 1 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
大箕斗配大罐笼	1 589	箕斗:25;大罐笼:29	大箕斗:18;大罐笼:10	11.79	3 000
小罐笼配平衡锤	1 589	罐笼:5;平衡锤:5.5	6	6.62	1 250

2 混合井侧向气动压力模拟

混合井组合罐提升容器由大罐笼、小罐笼、平衡锤和箕斗组成。按照提升容器的运行方式,混合井气动压力模拟分为大罐笼与小罐笼同向运行和异向运行两种主工况。组合罐如图 1 所示,各主工况可进一步分为容器运动方向、井筒主风流方向相同及相反两种子工况。

组合罐道截面压力分布特征如图 2 所示,截面中自下而上依次为箕斗、大罐笼、小罐笼。仿真分析结果表明:(1)当大罐笼与小罐笼同向运行时,二者运行通道间隙区域形成约 -20 Pa 的负压区;(2)当大罐笼、小罐笼运动方向与井筒主风流方向相反时,大罐笼与箕斗之间通道的负压最大可达 -300 Pa,而方向相同时,该处负压峰值约为 -250 Pa。

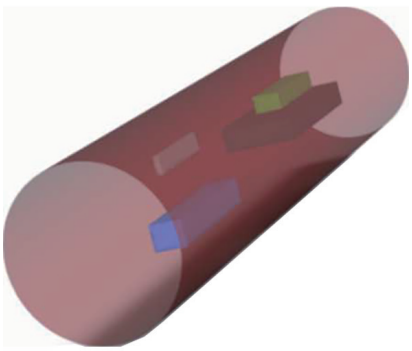


图 1 组合罐示意

Fig.1 Schematic of combination tank

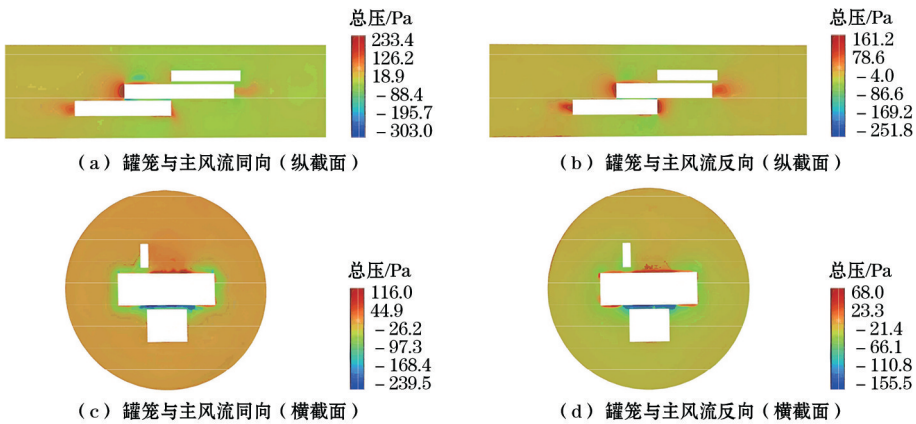


图 2 组合罐道截面压力分布特征

Fig.2 Pressure distribution characteristics in the cross-section of combined tank channels

图 3 为大罐笼和小罐笼的压力分布特征,云图截面中自上而下分别为小罐笼与大罐笼。当大罐笼与小罐笼持续运行时,大罐笼上部将与平衡锤发生交会,二者之间的狭缝区域形成负压区。当罐笼运动方向与井筒主风流方向相反时,该区域的负压约为 -80 Pa;方向相同时,负压约为 -60 Pa。

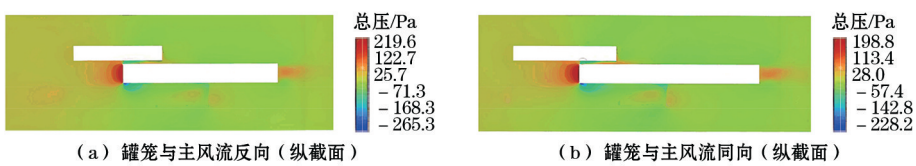
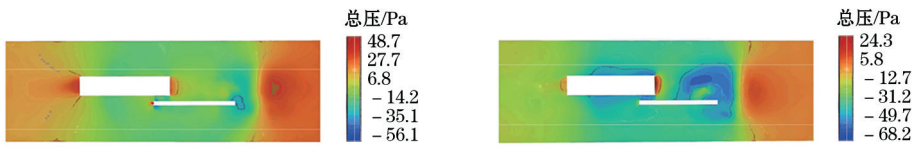


图 3 大罐笼与小罐笼压力分布特征

Fig.3 Pressure distribution characteristics of large cage and small cage

图 4 为组合罐小罐笼与平衡锤的纵截面压力分布特征,云图截面中自上而下分别为平衡锤和小罐笼。当小罐笼运动方向与井筒主风流方向一致时,平衡锤的迎风面会出现局部湍流损耗较大的区域,该处最大压力损失约为－65 Pa。

大罐笼与小罐笼逆向运行时,组合罐如图 5 所示,该工况可分为大罐笼、小罐笼运动方向与井筒主风流方向同向和反向两种工况。



(a) 罐笼与主风流反向(纵截面) (b) 罐笼与主风流同向(纵截面)

图 4 小罐笼与平衡锤压力分布特征

Fig.4 Pressure distribution characteristics of small cage and balance hammer

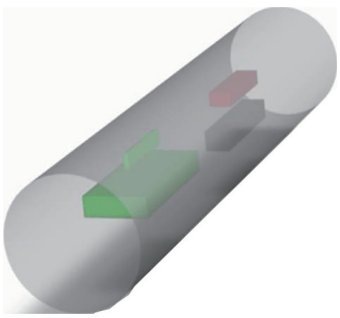
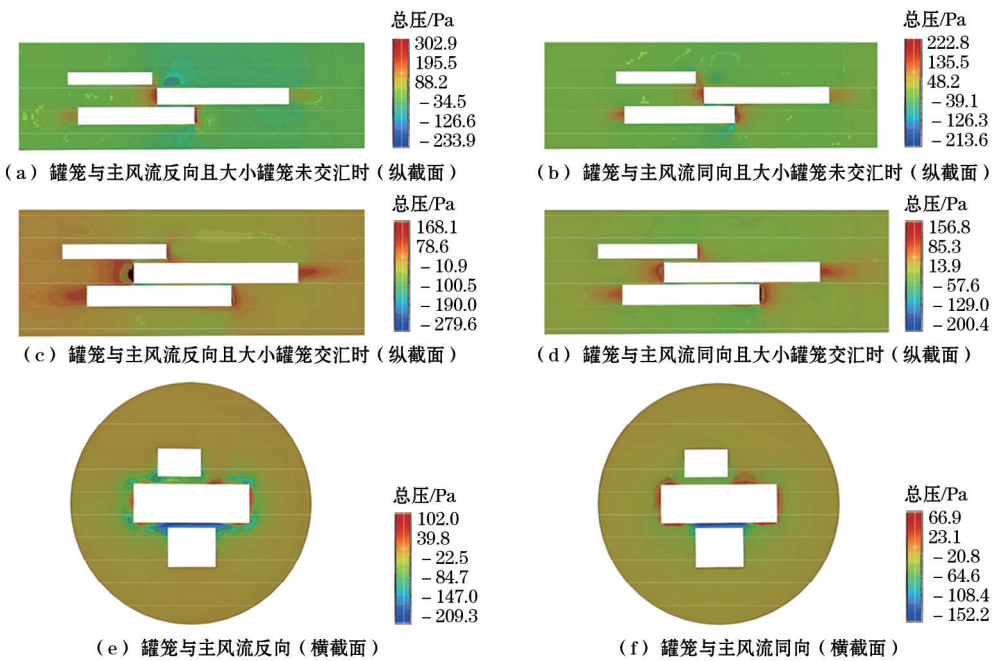


图 5 大罐笼与小罐笼逆向运行时的组合罐

Fig.5 Combination tank of large cage and small cage in reverse operation

组合罐道箕斗与大罐笼压力分布特征如图 6 所示,截面中自上而下依次为箕斗、大罐笼、小罐笼。仿真结果表明,大罐笼运行至与箕斗交汇时,二者之间的通道形成负压区。当大罐笼运动方向与井筒主风流方向相反时,二者间的负压约为－234 Pa;当方向相同时,二者间负压约为－190 Pa。当大罐笼和小罐笼继续运动至二者上下表面交汇时,二者间的通道同样会产生负压。当大罐笼运动方向与井筒主风流方向相反时,二者间的负压约为－90 Pa;当方向相同时,二者间的负压约为－70 Pa。



(a) 罐笼与主风流反向且大小罐笼未交汇时(纵截面) (b) 罐笼与主风流同向且大小罐笼未交汇时(纵截面)

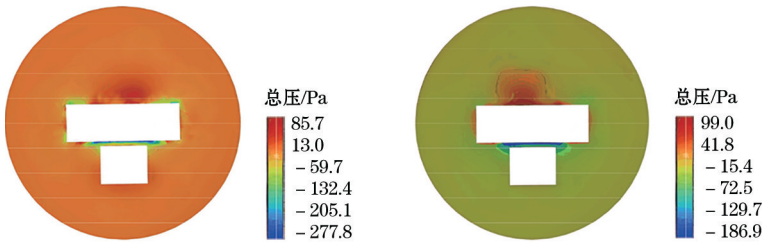
(c) 罐笼与主风流反向且大小罐笼交汇时(纵截面) (d) 罐笼与主风流同向且大小罐笼交汇时(纵截面)

(e) 罐笼与主风流反向(横截面) (f) 罐笼与主风流同向(横截面)

图 6 组合罐道压力分布特征

Fig.6 Pressure distribution characteristics of combination tank

图 7 为组合罐道箕斗与大罐笼截面压力分布特征,云图截面中自下而上依次为箕斗、大罐笼。当大罐笼与箕斗交汇时,二者之间的通道形成负压区。当大罐笼运动方向与井筒主风流方向相反时,二者间的负压约为－230 Pa;当方向相同时,二者间的负压约为－187 Pa。



（a）罐笼与主风流反向（横截面） （b）罐笼与主风流同向（横截面）

图 7 组合罐道箕斗与大罐笼压力分布特征

Fig.7 Pressure distribution characteristics of combination tank channel skip and large cage

基于上述模拟分析，不同工况下各提升容器的横向气动力及偏移量计算结果如下。

（1）当大罐笼运动方向与井筒主风流方向相同时，箕斗、大罐笼的横向静压差分别为 68.3 Pa、24.6 Pa，对应的横向压差偏转力分别为 1 382.8 N、1 381.5 N，由此产生的偏移量分别为 6.9 mm、5.9 mm；考虑满载情况，偏移量分别修正为 4.0 mm、4.4 mm。当大罐笼运动方向与风流方向相反时，箕斗、大罐笼的横向静压差分别为 88.2 Pa、31.8 Pa，横向压差偏转力分别为 1 785.2 N、1 785.9 N，偏移量分别为 7.9 mm、7.7 mm；考虑满载情况，偏移量分别修正为 4.6 mm、5.7 mm。

（2）当小罐笼运动方向与井筒主风流方向相反时，平衡锤、小罐笼的横向静压差分别为 38.5 Pa、34.2 Pa，横向压差力分别为 304.9 N、303.7 N，产生的偏移量分别为 10.0 mm、9.1 mm。当小罐笼运动方向与风流方向相同时，平衡锤、小罐笼的横向静压差分别为 30.1 Pa、26.7 Pa，横向压差力分别为 238.4 N、235 N，偏移量分别为 7.8 mm、7.0 mm。

3 提升容器水平偏移安全间隙

提升容器在井筒运行过程中的水平偏移主要受到稳态空气动力、科里奥利力和提升钢丝绳扭转力矩三类因素的综合影响。为定量评估上述因素的影响，对各因素作用机理进行计算与分析，并在此基础上提出水平偏移安全间隙的确定方法。

3.1 提升主钢丝绳扭矩及容器扭转角度分析

在容器运行过程中，钢丝绳的扭转刚度和抗弯性能是影响其水平偏移的首要因素。若钢丝绳刚度不足，容易导致容器发生摆动和偏移，因此，首先需要确定钢丝绳的最小刚度系数，为后续偏移计算提供基础依据。

钢丝绳罐道深度 l 为 1 589 m，钢丝绳重锤张紧力 G 为 110 kN，罐道钢丝绳长度质量 $q=9.81$ kg/m。罐道钢丝绳刚性系数最小值 $K_{\min}$[16] 为：

$$K_{\min}=\frac{4qg}{\ln\left(1+\frac{qgl}{G}\right)} \tag{1}$$

式中，g 为重力加速度。

6 根罐道绳组合后，抗扭转刚性系数 K_θ 最小值取单根最小值的 4 倍：

$$K_\theta=4K_{\min} \tag{2}$$

钢丝绳在承载过程中不仅受到轴向拉力，还会在提升过程中形成附加的绷绳角和扭转角度。这种结构效应会直接导致容器在井筒内产生偏移，因此需进一步计算钢丝绳扭角及其引起的最大位移。

提升机选用 6 根 Φ46 mm 抗旋转注塑钢丝绳，钢丝绳扭转系数取 0.8%，钢丝绳中单根拉力约为 100 kN，扭转力矩 Q 为：

$$Q=0.15n_{\mathrm{H}}C_{\mathrm{Q}}DT \tag{3}$$

式中：n_{H} 为钢丝绳根数；C_{Q} 为提升钢丝绳的扭转系数；D 为钢丝绳直径，mm；T 为钢丝绳的拉力，N。计算得到扭转力矩 Q 为 33.12 N·m。此时提升容器最大扭转角 $\theta_{\max}$ 为：

$$\theta_{\max}=\frac{Q}{K_\theta} \tag{4}$$

由此可得容器四角处最大位移 D_{Y} 为：

$$D_{\mathrm{Y}}=\frac{Q}{K_\theta}R_{\max} \tag{5}$$

式中，$R_{\max}$ 为提升容器中心轴线最大长度，取 1 210 mm。计算可得容器四角处最大位移 D_{Y} 为 23 mm。

3.2 科里奥利力引起的提升容器横向位移分析计算

除了钢丝绳自身的结构效应外，容器在高速上升或下降时还会受到地球自转引起的科里奥利力作用。该力与容器运行速度相关，方向垂直于运动方

向,是一种典型的动力学扰动,需要单独分析其对横向偏移的影响。

科里奥利力最大值 $F_{C_{max}}$ 为:

$$F_{C_{max}}=2m\omega_r \cdot v_{max}\sin\alpha \tag{6}$$

式中:v_{max} 为容器最大运行速度,$v_{max}=\pm 11.79$ m/s;ω_r 为地球自转角速度,取 2.314×10^{-5} πrad/s;α 为矿区纬度,$\alpha\approx26°$;m 为箕斗自质量加载质量,取 4.3×10^4 kg。科里奥利力引起的提升容器横向位移最大值 D_C 为:

$$D_C=\gamma\frac{F_{C_{max}}}{n_H K_{min}} \tag{7}$$

式中,γ 为动态系数,取 1.2。将相关参数代入式(6)和式(7),计算得到科里奥利力偏移量 D_C 约为 ±15 mm。

3.3 稳态空气动力及其引起的容器横向位移计算

在高速运行条件下,井筒气流和容器外形相互作用,产生稳态空气动力。该力作用于容器侧向,形成附加偏移力,其影响通常在速度较快的工况下显著,需结合气动模型进行量化评估,并与前述偏移因素进行对比。

空气动力作用力 F_A 为:

$$F_A=\frac{1}{2}C_L\rho V_R^2 A_C \tag{8}$$

式中:C_L 为空气动力系数,取 0.045;ρ 为当前空气的密度,取 1.23 kg/m^3;V_R 为提升容器与井筒中气流的相对速度,取 20 m/s;A_C 为提升容器箕斗的受力侧面积,取 22.5 m^2。

空气动力引起的容器横向位移 D_A 为:

$$D_A=\gamma\frac{F_A}{n_H K_{min}}+D_{Ap} \tag{9}$$

式中,D_{Ap} 为箕斗的最大偏移量,由上述研究可知为 7.9 mm。则空气动力引起的容器横向位移的最大值 D_A 约为 120.8 mm。

3.4 提升容器横向总位移计算

上述 3 种因素在实际运行中往往叠加作用,因此需要进行综合分析,计算容器的总横向位移。将总横向位移与允许安全间隙进行对比,得到水平偏移的安全裕度,为工程设计和运行控制提供依据。

提升容器偏向井道壁的横向位移 D_P 由空气动力偏移 D_A、科里奥利力偏移 D_C 和钢丝绳扭转偏移 D_Y 叠加构成,计算如下:

$$D_P=D_A+D_C+D_Y \tag{10}$$

各因素对提升容器的偏移影响结果见表 2。

表 2 各因素对提升容器的偏移影响结果

Table 2 Results of the impact of various factors on the offset of lifting containers

影响因素	位移/mm
空气动力偏移	120.8
科里奥利力偏移	±15
钢丝绳扭转偏移	23
总横向位移	158.8

容器安全间隙 D_N 计算如下:

$$D_N=D_P\gamma_R+D_X \tag{11}$$

式中:γ_R 为系数,箕斗和罐笼混合井取 3.0;D_X 为允许误差,取 60 mm。计算得到容器与井壁之间的安全间隙为 536.4 mm。

根据《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423—2020)中第 6.2.3.1 条规定,井深为 1 589 m 时,计算得出容器与井壁之间的安全间隙为 528.9 mm。

上述对比分析表明,在进行超深井提升容器安全间隙设计时,不能完全参照标准规程要求,还应结合工程实际进行专项分析。建议将规程规定值与实际计算值中的较大值,作为提升容器布置间隙的设计依据。

4 结论

本文以贵州大坪磷矿超深混合井为工程背景,采用计算流体动力学(CFD)数值模拟与理论分析相结合的方法,系统研究了超深井提升容器在复杂工况下的横向偏移特性及安全间隙的确定方法,得出以下主要结论。

(1) 仿真结果表明,容器运行方向与井筒主风流方向的相对关系是影响通道负压的关键因素。当大罐笼运动方向与风流方向相反时,箕斗与大罐笼之间通道的负压峰值可达 −300 Pa;大罐笼与小罐笼逆向运行时,大罐笼与箕斗交汇处负压约为 −234 Pa。大罐笼与平衡锤交汇处、小罐笼与平衡锤交汇处亦呈现相似的规律,表明逆向运行工况下气动负压效应更为剧烈,是安全间隙设计时应重点考虑的恶劣工况。

(2) 理论分析结果表明,在 3 种主要偏移力中,稳态空气动力引起的横向位移达 120.8 mm,科里奥利力引起的偏移为 ±15 mm,钢丝绳扭转偏移为 23 mm,提升容器的总横向位移达 158.8 mm。

(3) 按《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423—2020)第 6.2.3.1 条计算所得容器与井壁之

间安全间隙为528.9 mm,而本文综合考虑3种偏移因素后计算所得安全间隙为536.4 mm,较规程值高出7.5 mm。因此,建议超深井提升容器安全间隙设计应结合具体工况开展专项分析,以规程规定值与计算值中的较大值作为最终布置间隙的设计依据。

参考文献(References):

[1] 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-sale hoisting of deep wells in metal mines[J]. Mining Research and Development,2024,44(9):1-8.

[2] 蔡美峰,谭文辉,吴星辉,等.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, et al. Current situation and development strategy of deep intelligent mining in metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(11):3409-3421.

[3] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华.金属矿深部开采现状与发展战略[J].工程科学学报,2019,41(4):417-426.
Cai Meifeng, Xue Dinglong, Ren Fenhua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering,2019,41(4):417-426.

[4] 王麒,赵辉军,马俊生,等.适用于深井大载重提升的双驱多绳摩擦提升系统的研究[J].矿山机械,2024,52(10):22-27.
Wang Qi, Zhao Huijun, Ma Junsheng, et al. Research on dual-drive multi-rope friction hoisting system for deep well hoisting with heavy load[J]. Mining & Processing Equipment,2024,52(10):22-27.

[5] 刘劲军.超深井用多绳缠绕式提升机选型研究[J].矿山机械,2023,51(8):26-32.
Liu Jinjun. Research on selection of multi-rope winding hoist for ultra-deep shaft[J]. Mining & Processing Equipment, 2023,51(8):26-32.

[6] 王悦.超深副井多绳提升系统设备选型[J].有色矿冶,2020,36(1):34-37.
Wang Yue. Equipment selection of multi rope hoisting system for extra deep auxiliary shaft[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy,2020,36(1):34-37.

[7] 宋春阳.立井刚性罐道故障对钢丝绳横向振动的影响研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
Song Chunyang. Research on the influence of rigid guide failure in vertical shaft on lateral vibration of wire rope[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2020.

[8] 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 on horizontal offset and safety clearance of mine hoisting container with steel rope guide in deep mine shaft[J]. Mine Construction Technology,2018(39):35-39.

[9] 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.
Li Haoyu, Xu Changlei, Han Ruijun, et al. Research and application of high speed and large load hoisting technology for ten million tons main shaft[J]. China Mining Engineering,2024,53(1):53-59.

[10] 杨锦涛,王西涛,李广,等.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[J].矿业研究与开发,2025,45(7):1-7.
Yang Jintao, Wang Xitao, Li Guang, et al. Research and analysis on dynamic change of air flow field in ultra-deep well under large-load and high-speed lifting condition[J]. Mining Research and Development,2025,45(7):1-7.

[11] 田峰.井筒提升容器运行效应及其空气动力特性研究[D].湘潭:湖南科技大学,2007.
Tian Feng. Study on the moving-effect and its aerodynamic characteristics generated by hoisting container in vertical shaft[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology,2007.

[12] 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.

[13] 黄腾龙,曾凯,石勇,等.锥阀式充填泵阀隙流场的冲蚀磨损特性研究[J].矿业研究与开发,2025,45(8):226-235.
Huang Tenglong, Zeng Kai, Shi Yong, et al. Study on erosion wear characteristics of valve gap flow field in taper valve filling pump[J]. Mining Research and Development, 2025,45(8):226-235.

[14] 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 ofthe effect of piston-wind by hoisting conveyance in vertical shaft[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition),2007(3):1-4.

[15] Darling Peter. SME mining engineering handbook[M]. 3th ed. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration,2011.

[16] 肖慧儒,何方金,高宝录,等.矿井提升机钢丝绳罐道刚性系数分析与应用[J].矿山机械,2020,48(4):28-33.
Xiao Huiru, He Fangjin, Gao Baolu, et al. Analysis on rigid coefficient of cage guide for wire rope of mine hoist and application[J]. Mining & Processing Equipment,2020,48(4):28-33.