一种斜井提升容器多体耦合动力学分析与安全设计研究*

周建[1,2],张连军[3],余洪伟[1,2],陈翀[3],黄源[1,2],申勇[1,2],吴金尘[1,2],夏浩宇[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.安标国家矿用产品安全标志中心有限公司, 北京 100013)

摘要:普通斜井提升容器跑车防护主要依赖井筒内的被动安全装置,为避免其加速撞击造成灾难性后果,提出了一种带有机械制动、检修闭锁及弹簧缓冲装置的斜井提升容器结构。通过建立提升容器-斜坡轨道多体耦合冲击动力学模型,揭示了制动冲击下后轮抬升角的形成机理与关键影响因素。结合理论推导、虚拟样机仿真与试验验证,系统分析了缓冲弹簧刚度、斜坡轨道角度、冲击速度及不同工况载荷对提升容器动力学行为的影响。结果表明:系统冲击力、后轮抬升角分别在弹簧刚度约为2 500 N/mm、15 000 N/mm时达到最小值,较无弹簧工况分别降低13.4%、17.4%;斜坡轨道角度与冲击速度、后轮抬升角呈正相关关系,额定载荷工况下后轮抬升角较空载工况降低15%~30%;斜坡轨道角度从10°增至30°时,额定载荷工况下脱轨冲击速度由9.5 m/s降至7.3 m/s,空载工况下脱轨冲击速度由9.0 m/s降至5.2 m/s,载重提升安全裕度最高达28.8%。研究结果为提升容器抗冲击设计及安全制动策略提供了理论依据。

关键词:斜井提升容器;多体耦合动力学;缓冲弹簧刚度;斜坡轨道角度;冲击速度

中图分类号:TD444 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)04-0188-08

Research on Multi-Body Coupled Dynamics Analysis and Safety Design of an Inclined Shaft Hoisting Container

ZHOU Jian[1,2], *ZHANG Lianjun*[3], *YU Hongwei*[1,2], *CHEN Chong*[3],
HUANG Yuan[1,2], *SHEN Yong*[1,2], *WU Jinchen*[1,2], *XIA Haoyu*[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.China Mining Products Safety Approval and Certification Center, Beijing 100013, China)

Abstract: Safety protection for hoist cars in ordinary inclined shafts primarily relies on passive safety devices installed within the shaft. To prevent catastrophic consequences resulting from an accelerated impact, a structure for an inclined shaft hoisting container was proposed, featuring mechanical braking, maintenance interlocks, and spring-loaded shock absorbers. By establishing a multi-body coupled impact dynamics model of the hoisting container-slope track system, the formation mechanism and key influencing factors of the rear wheel lift angle during braking impacts were revealed. Combining theoretical derivations, virtual prototyping simulations, and experimental validation, the effects of buffer spring stiffness, slope track angle, impact velocity, and various operational loads on the dynamic behavior of the hoisting container were systematically analyzed. The results show that the system impact force and rear wheel lift angle reach the minimum values when the spring stiffness is approximately 2 500 N/mm and 15 000 N/mm, respectively, representing reductions of 13.4% and 17.4% compared to the springless condition. The slope track angle is positively correlated with impact velocity and the rear wheel lift angle. The rear wheel lift angle under rated load conditions is 15% to 30% lower than that under no-load conditions. When the slope track angle increases from 10° to 30°, the derailment impact speed under rated load conditions decreases from 9.5 m/s to 7.3 m/s, and under no-load conditions, it decreases from 9.0 m/s to 5.2 m/s, resulting in a maximum safety margin of 28.8% for load-carrying capacity. The research findings provide a theoretical basis for improving container impact-resistant design and

* **收稿日期**:2025-06-05
基金项目:中国五矿全国重点实验室专项项目(WKZB2412BJ0402108);湖南省重点领域研发计划项目(2022SK2092)
作者简介:周建(1985—),男,重庆人,高级工程师,主要从事矿用机电设备及安全性能研究开发等工作。E-mail:7035588@qq.com
通信作者:黄源(1993—),男,湖南衡阳人,硕士,工程师,主要从事机械系统动力学与非线性振动特性等方面的研究工作。E-mail:554945394@qq.com

safe braking strategies.

Key words: Inclined shaft hoisting container, Multi-body coupled dynamics, Buffer spring stiffness, Slope track angle, Impact velocity

0 引言

矿山提升容器作为矿井矿石运输的核心装备,在斜井提升系统中占据着举足轻重的地位,其安全性与可靠性直接影响矿山生产效率与人员安全。近十几年来,国内矿井提升系统存在的问题主要集中在跑车、过卷、卡罐、断绳、滑绳和振动等方面[1]。提升容器在出现过卷、断绳或突发载荷等复杂工况时,极易引发跑车事故,给矿山带来不可估量的损失。例如,2017 年涟源市某矿发生斜井跑车事故,引发煤尘爆炸,致使 10 人不幸遇难;2023 年在鸡西市某煤矿发生一起斜井跑车事故,共造成 25 人伤亡。上述安全事故凸显出当前应急防护技术存在短板,制动失效引发的提升容器脱轨事故占比很大[2]。

针对提升容器制动失效脱轨与跑车防护问题,学者们做了许多工作与研究,李汉良[3]举例分析了斜井跑车事故原因,并给出了相应的预防对策。张苏等[4]基于行为安全研究煤矿斜井跑车事故原因,得出煤矿斜井跑车事故的发生需同时满足 3 个条件的结论。凌敏等[5]阐述了 FCX 型斜井防跑车装置的系统结构、工作原理及应用情况,提出了防跑车装置存在的问题,并给出了解决措施。姚炯等[6]提出了一种全新无辅助动力斜井防跑车装置,从根本上解决了钢丝绳张力控制全自动防跑车装置门栏闭合问题。冯海涛等[7]通过对斜巷跑车事故模拟试验台试验过程进行现状调查,设计了一种操控便捷、自锁可靠、制造容易、系统兼容的侧向悬承装置。孙德标等[8]从应力的角度调整和完善设计薄弱点,提出了一种新的防跑车挡车栏,可实现地面起落且适用于复合式巷道。吴兆宏等[9]研制了自带防跑车保护装置的新型斜井箕斗。周建等[10]详细描述了矿用斜井异形轨卡轨车制动性能的测试方法,为其制动性能检测工作提供了依据。陈淼等[11]针对矿山斜井运输系统中提升容器防跑车装置存在的安全性和可靠性问题,设计了一种新型平道闭锁器。王辉[12]鉴于频繁发生的矿井斜巷运输跑车事故,提出了矿井斜巷运输行车安全防护设施系统的设计方案。金雪琪[13]设计了一种矿山斜巷运输跑车主动抓捕系统,以实现跑车及时控制、断绳实时保护等功能。宋国栋[14]建立了煤矿斜井跑车碰撞的数学模型,分析了斜井跑车高能碰撞柔性缓冲器在矿车失控时的受力状态。吕斌等[15]提出初始扭矩可调的摩擦盘式吸能器结构,给出了矿车跑车速度、冲击能量和吸能器制动力矩计算过程。上述研究厘清了斜井发生跑车事故的诱因,提出了斜井提升容器防跑车装置的相应创新结构,分析了提升容器跑车落制动与碰撞的原理。但关于跑车过程中提升容器引发后轮抬升角度超限等方面的研究却鲜有报道。提升容器在重力加速度作用下沿轨道加速下滑,插爪与枕木接触时产生的瞬时冲击载荷(峰值可达静态载荷的 6～8 倍)会引发底盘-车厢系统的剧烈振动,使提升容器后轮抬升角度超限,导致跑车脱轨甚至倾翻,容易造成容器失控,撞击井壁、轨道或其他设备,可能对附近作业人员造成伤亡。现有设计规范(如《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423—2020))[16]对动态冲击下的提升容器相对轨道的抬升角度阈值缺乏定量描述,亟需建立提升容器-斜坡轨道多体耦合冲击动力学模型,分析缓冲弹簧刚度、斜坡轨道角度、冲击速度、载荷大小对提升容器制动冲击的影响,为提升容器的设计与安全制动策略提供理论支撑。

本文设计了一种带有机械制动、检修闭锁及弹簧缓冲装置的斜井提升容器,介绍了其整体结构与工作原理,推导了提升容器-斜坡轨道多体耦合的冲击动力学方程。建立提升容器-斜坡轨道系统的虚拟样机模型,利用试验冲击力来验证虚拟样机模型的准确性,分析提升容器制动冲击产生后轮抬升角现象,探究缓冲弹簧刚度对提升容器系统制动冲击力的影响,揭示斜坡轨道角度、冲击速度、载荷大小与提升容器后轮抬升角之间的关系。研究结果为提升容器抗冲击设计及安全制动策略提供了理论依据。

1 斜井提升容器整体结构和工作原理

1.1 整体结构

带有机械制动、检修闭锁及弹簧缓冲装置的斜井提升容器结构,主要由车厢、底盘总成、制动插爪、缓冲弹簧连杆、缓冲弹簧和连接螺栓等 6 个关键部分组成,具体结构如图 1 所示。

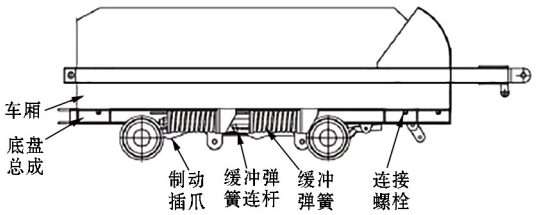


图 1 斜井提升容器结构

Fig.1 Structure of inclined shaft hoisting container

车厢是该提升容器用于承载货物的主体部分,为货物运输提供空间;底盘总成的底端,设置左右两对钢轮支撑部件沿着轨道运行;制动插爪设计为 H 形结构,对比传统制动插爪单铰接方式,其通过双铰接的方式分别与底盘及连杆机构连接,提高制动的可靠性,当提升容器需要制动时,制动插爪受力快速落下插到斜井铺设的枕木中以实现制动;缓冲装置由缓冲弹簧连杆和缓冲弹簧组成,是能量吸收和缓冲的重要部件,利用连接螺栓将缓冲弹簧一端与车厢连接,另一端与底盘连接。当提升容器受到冲击时,缓冲弹簧装置通过弹性变形来吸收能量,车厢与底盘发生一定的相对位移,有效减轻冲击对提升容器和货物的影响。

1.2 提升容器的运行、制动与维护原理

斜井提升容器主要涉及正常牵引、制动触发及检修闭锁等状态,其运行与制动原理如图 2 所示。

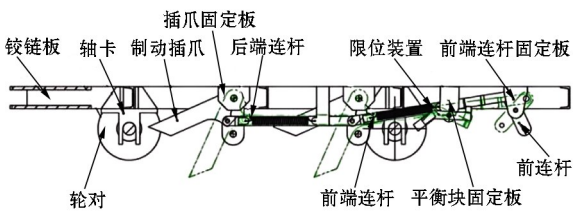


图 2 斜井提升容器运行与制动原理

Fig.2 Principle of operating and braking of inclined shaft hoisting container

在斜井中,当提升容器被牵引正常运行时,牵引容器的钢丝绳处于拉紧状态。此时,限位装置依靠配重块保持平衡转动,与容器主体形成一定的夹角,使得限位装置前端的卡槽与提升容器上的前端连接杆装置处于分离状态。在这种状态下,主牵引绳连接着前连杆,使制动插爪向上抬起。此时,提升容器正常提运。

一旦牵引主绳发生断裂或者松绳情况,前连杆会因失去张紧力而下垂,底盘中部的弹簧依靠自身的弹力收缩张紧臂,进而带动制动插爪快速下落插到斜井轨道铺设的枕木中,实现提升容器跑车自动制动的功能。

当提升容器处于检修状态时,限位装置前端的卡槽会卡住前端连接杆装置。在这种情况下,防跑车装置因限位被卡住而无法触发,其余的动作机构也不会触发,从而避免了在检修过程中制动装置意外启动,实现了检修状态下的闭锁功能,保障了检修人员的安全。

2 提升容器-斜坡轨道多体耦合冲击动力学模型建立

提升容器-斜坡轨道冲击系统发生跑车的主要原因是受斜坡角度、提升容器运行速度及提升容器本身结构影响,根据上述提升容器结构,将系统分为车厢和底盘两部分,在冲击时插爪与枕木接触冲击,缓冲弹簧连接的车厢和底盘会相对滑动,车厢与底盘绕前轮发生旋转,导致后轮相对轨道抬起一定夹角(后轮抬升角 θ)。提升容器发生跑车后冲击轨道枕木的示意图如图 3 所示。

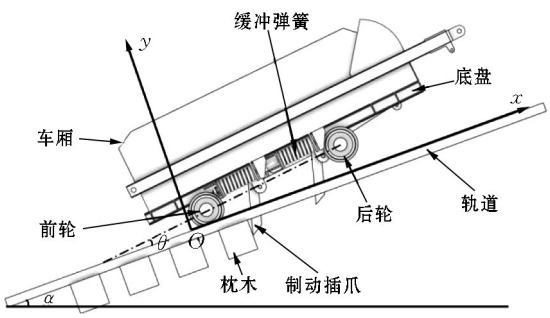


图 3 提升容器-斜坡轨道冲击示意

Fig.3 Impact schematic of hoisting container-slope track

建立轨道坐标系,x 轴沿轨道方向,y 轴垂直轨道方向,前轮与轨道接触点为原点 O,其中轨道与地面夹角为 α,车厢的质量为 m_1,底盘的质量为 m_2(含前后车轮),车厢通过两侧各 2 个缓冲弹簧与底盘连接;车厢质心坐标为(L_1,h_1),L_1 为前轮的水平距,h_1 为垂直高度,同理,底盘质心坐标为(L_2,h_2)。根据提升容器-斜坡轨道冲击系统的运动与受力分析可知,系统受到重力、缓冲弹簧力、冲击力、轨道法向反力的作用。

其中,重力分量 F_g 为:

$$\begin{cases} F_{g,x}=(m_1+m_2)g\sin\alpha \\ F_{g,y}=-(m_1+m_2)g\cos\alpha \end{cases} \tag{1}$$

缓冲弹簧力 F_k(沿轨道方向)为:

$$\begin{cases}F_k=k\Delta x+c\Delta\dot{x}\\ \Delta x=x_1-x_2\end{cases} \tag{2}$$

式中:x_1 为车厢的绝对位移,mm;x_2 为底盘的绝对位移,mm;Δx 为车厢与底盘相对位移,mm;k 为弹簧刚度,N/mm;c 为阻尼系数,(N·s)/m。

冲击力 F_{imp}(瞬时冲量模型)为:

$$F_{imp}=m_2v_0\delta(t) \tag{3}$$

式中:v_0 为冲击速度,m/s;$\delta(t)$为狄克拉 δ 函数。

轨道法向反力 N 为:

$$N=(m_1+m_2)g\cos\alpha \tag{4}$$

提升容器的运动方程见式(5)和式(6):

沿轨道方向(x 轴):

$$(m_1+m_2)\ddot{x}=F_{g,x}-F_k+F_{imp} \tag{5}$$

垂直轨道方向(y 轴,无垂直加速度):

$$(m_1+m_2)\ddot{y}=F_{g,y}+N=0 \tag{6}$$

当提升容器冲击轨道枕木时,底盘后轮会绕着前轮发生转动,提升容器的后轮出现抬升角 θ,系统总转动惯量与力矩平衡方程见式(7)和式(8)。

总转动惯量方程:

$$I_{total}=m_1(L_1^2+h_1^2)+m_2(L_2^2+h_2^2) \tag{7}$$

力矩平衡方程:

$$I_{total}\ddot{\theta}=T_{imp}+T_g+T_k \tag{8}$$

其中,冲击力矩 T_{imp}为:

$$T_{imp}=F_{imp}h_2=m_2v_0h_2\delta(t) \tag{9}$$

重力力矩 T_g:

$$T_g=g\sin\alpha(m_1L_1+m_2L_2) \tag{10}$$

弹簧力矩 T_k:

$$T_k=-h_2(k\Delta x+c\Delta\dot{x}) \tag{11}$$

初始条件为:

$$\begin{cases}\theta(0)=0\\ \dot{\theta}(t)=v_0d^{-1}\end{cases} \tag{12}$$

式中,d 为前后轮的轮距。

联立上述方程可得:

$$\ddot{\theta}=\frac{1}{I_{total}}[m_2v_0h_2\delta(t)+g\sin\alpha(m_1L_1+m_2L_2)-h_2(k\Delta x+c\Delta\dot{x})] \tag{13}$$

两次积分后得:

$$\theta(t)=\frac{v_0}{d}t+\frac{1}{2I_{total}}[g\sin\alpha(m_1L_1+m_2L_2)-h_2(k\Delta x+c\Delta\dot{x})]t^2 \tag{14}$$

忽略瞬态振荡,弹簧力与阻尼力平衡冲击能量:

$$\theta=\frac{v_0^2}{2gd\cos\alpha}\cdot\frac{m_2h_2}{m_1L_1+m_2L_2}\cdot\left(1+\frac{kh_2^2}{m_1L_1+m_2L_2}\right)^{-1} \tag{15}$$

由上述理论分析推导可知,后轮绕前轮旋转的角度(即后轮相对轨道的抬升角)主要受冲击的速度、斜坡轨道角度、车厢与底盘的结构(质心位置)、缓冲弹簧刚度影响。其中,冲击速度、斜坡轨道角度与抬升角呈正相关,提升容器质心位置、缓冲弹簧刚度也会改变抬升角的大小。

3 提升容器-斜坡轨道系统动力学冲击分析

3.1 提升容器-斜坡轨道系统虚拟样机冲击模型的建立与验证

根据图 3 所示结构,将模型导入到虚拟样机多体动力学软件中,对其添加固定副、转动副、移动副等约束条件,提升容器的车厢、底盘总成采用结构钢,枕木的弹性模量为 10 GPa,泊松比为 0.33,同时设置缓冲弹簧的刚度与阻尼系数等参数,其中弹簧刚度为 10 000 N/mm,阻尼系数为 1 (N·s)/mm,提升容器-斜坡轨道系统虚拟样机模型如图 4 所示。

搭建提升容器-斜坡轨道系统试验平台,通过举升油缸将轨道与地面保持一定角度,牵引绳拉住提升容器。触发脱钩器释放提升容器的瞬间,插爪快速下落开始制动,完成提升容器-斜坡轨道虚拟样机冲击模型模拟试验,并与试验数据对比(见图 5),验证系统虚拟模型的准确性。试验工况为:轨道相对于地面的角度为 20°,插爪与枕木碰撞接触的速度约为 3 m/s。由图 5 可知,试验与仿真数据曲线基本一致,冲击力最大值误差约为 7.8%,误差主要来源于枕木物性参数的偏差。研究结果表明,建立的多体动力学模型具有较高的准确性,能够较为真实地反映提升容器在斜坡轨道上的运动状态和受力情况。

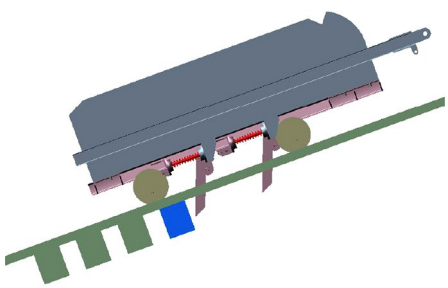


图 4 提升容器-斜坡轨道系统虚拟样机模型

Fig.4 Virtual prototype model of the hoisting container-slope track system

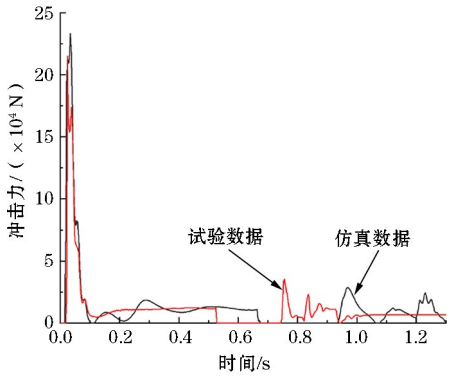


图 5 提升容器-斜坡轨道系统冲击力的仿真与试验结果对比

Fig.5 Comparison of simulation and experimental results of impact force in the hoisting container-slope track system

3.2 缓冲弹簧刚度对提升容器-斜坡轨道系统后轮抬升角的影响

缓冲弹簧两端分别跟车厢与底盘连接,当插爪与枕木发生碰撞产生冲击时,车厢与底盘会产生相对位移来吸收冲击能,而缓冲弹簧刚度则是重要的影响因素。若弹簧刚度太大,吸收冲击能的效果不理想;若弹簧刚度太小,车厢与底盘产生的相对位移会过大,可能导致跑车脱轨甚至倾翻。在斜坡轨道角度为 20°、冲击速度为 7 m/s、额定载荷为 5 000 kg 的工况下,分析弹簧刚度对系统冲击力与后轮抬升角的影响,结果如图 6 所示。

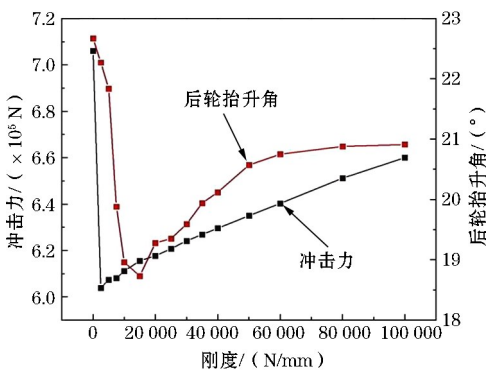


图 6 弹簧刚度对系统冲击力与后轮抬升角的影响

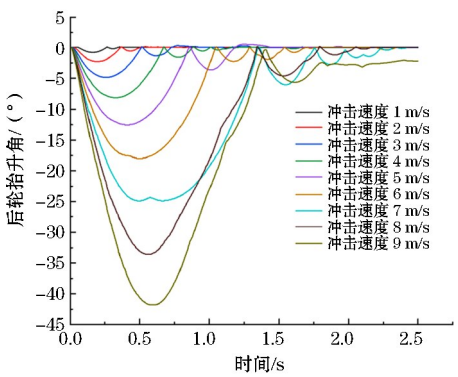
Fig.6 Effect of spring stiffness on system impact force and rear wheel lifting angle

从图 6 可以看出,当弹簧刚度为 0 时(无缓冲弹簧作用),系统冲击力、后轮抬升角最大,随着弹簧刚度逐渐增大,系统冲击力先减小后增大,对比无缓冲弹簧作用,当弹簧刚度约为 2 500 N/mm 时,冲击力下降 13.4%,且存在最小值;后轮抬升角随弹簧刚度的增大呈现出先减小后增大再趋近于平稳的变化趋势,对比无缓冲弹簧作用,当弹簧刚度在 15 000 N/mm左右时,后轮抬升角下降约 17.4%,且存在最小值。系统冲击力与后轮抬升角最小值对应的弹簧刚度存在一定差异,这是因为车厢与底盘的重心不重合,且弹簧刚度大小影响车厢与底盘的相对位移,导致车厢重心与底盘重心的相对位置存在偏差,进而对提升容器的后轮抬升角造成影响。上述分析表明,该型号提升容器的缓冲弹簧刚度在 2 500~15 000 N/mm 之间较好,能在有效降低系统冲击力的同时减小提升容器的后轮抬升角。

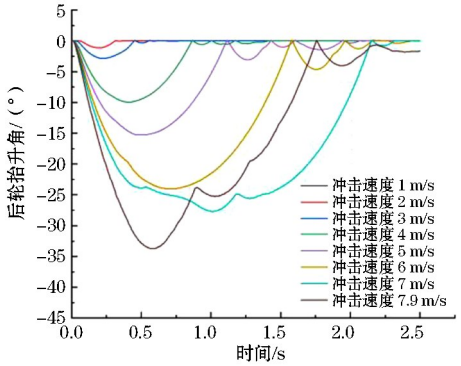
3.3 不同载荷工况下斜坡轨道角度与冲击速度对提升容器-斜坡轨道系统后轮抬升角的影响

斜坡轨道角度、冲击速度是影响提升容器-斜坡轨道系统抬升角的两个主要因素,冲击速度决定提升容器发生撞击产生的动能,而斜坡轨道角度限制提升容器运行速度,若斜坡轨道角度大、冲击速度高,则提升容器跑车制动后发生脱轨侧翻及倾覆的风险高。对此,需研究在空载与额定载荷工况下,斜坡轨道角度与冲击速度对提升容器-斜坡轨道系统后轮抬升角的影响,如图 7 和图 8 所示。

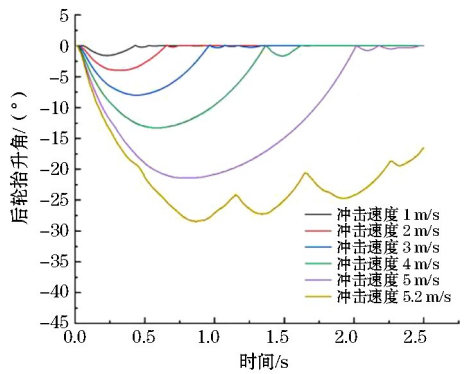
在发生制动冲击后,随着时间增加,后轮抬升角先增大再减小,最后趋近于 0,表明提升容器受到制动冲击后能够复原,不会发生脱轨现象;若后轨抬升角不趋近于 0,表明在制动冲击后提升容器会发生脱轨现象。由图 7 和图 8 可知,在相同斜坡轨道角度下,冲击速度越大,后轮抬升角越大;相同速度下,斜坡轨道角度越大,后轮抬升角越大,其原因在于轨道角度增大,会加剧底盘绕前轮的旋转趋势,且重力垂直分量约束作用减弱,后轮更易抬升。此外,在相同冲击速度与斜坡角度下,与空载工况相比,额定载荷工况下的后轮抬升角要降低 15%~30%,其原因在于后轮抬升角度由冲击力矩、重力力矩、弹簧力矩平衡决定,载荷大小影响重力力矩,该力矩方向与抬升方向相反(重力试图将提升容器拉回轨道),从而抵抗后轮抬升。同时,受载重影响,系统的转动惯量增大,角加速度降低,延缓后轮抬升过程。



(a) 斜坡轨道角度 10°



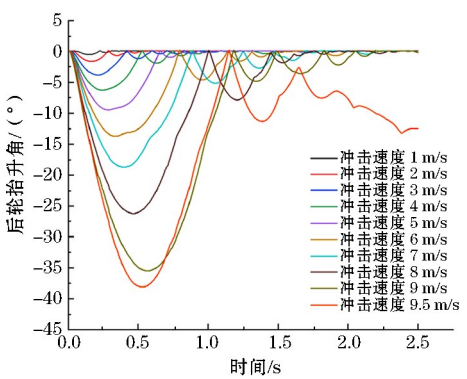
(b) 斜坡轨道角度 20°



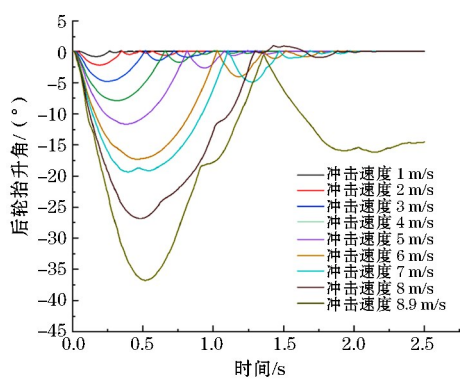
(c) 斜坡轨道角度 30°

图 7 空载工况下不同斜坡轨道角度与冲击速度对后轮抬升角的影响

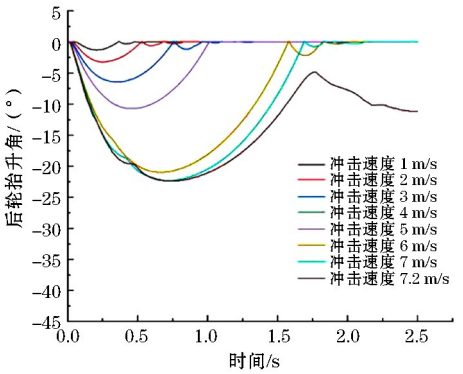
Fig.7 Influence of slope track angle and impact velocity on rear wheel lifting angle under no-load conditions



(a) 斜坡轨道角度 10°



(b) 斜坡轨道角度 20°

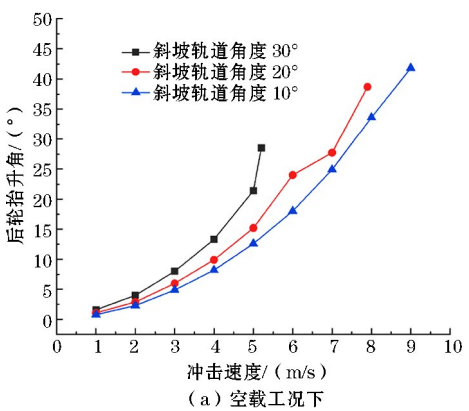


(c) 斜坡轨道角度 30°

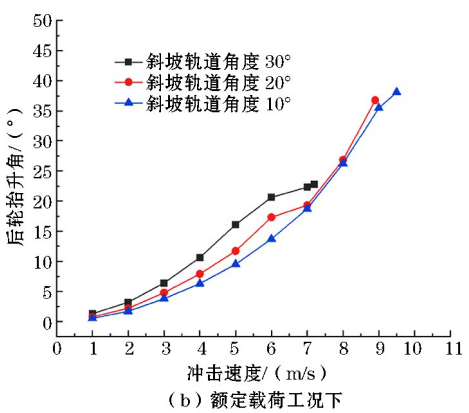
图 8 额定载荷工况下不同斜坡轨道角度与冲击速度对后轮抬升角的影响

Fig.8 Influence of slope track angle and impact velocity on rear wheel lifting angle under rated load conditions

不同载荷工况下斜坡轨道角度与冲击速度对后轮最大抬升角的影响如图 9 所示(含脱轨冲击速度)。由图 9 可知,在载荷与轨道斜坡角度相同的工况下,冲击速度与后轮最大抬升角呈抛物线变化趋势,即后轮最大抬升角与冲击速度的平方存在局部波动偏差,整体呈线性趋势。



(a) 空载工况下



(b) 额定载荷工况下

图 9 不同载荷工况下斜坡轨道角度与冲击速度对后轮最大抬升角的影响

Fig.9 Influence of slope track angle and impact velocity on maximum rear wheel lifting angle under different load conditions

额定载荷与空载工况下,不同轨道斜坡角度对应的脱轨冲击速度见表1。由表1可知,斜坡轨道角度与脱轨冲击速度呈负相关关系,随着轨道斜坡角度增大(从10°增至30°),脱轨冲击速度降低,额定载荷下,脱轨冲击速度从9.5 m/s降至7.3 m/s,降幅达23.2%;空载状态下,脱轨速度从9.0 m/s降至5.2 m/s,降幅达42.2%,这表明斜坡轨道角度越大,提升容器维持稳定运行的临界速度越低。同一斜坡轨道角度下,额定载荷下的脱轨冲击速度高于空载,这一差异表明载重增加了提升容器的抗脱轨能力。研究结果可为该提升容器在矿山斜井中的应用提供数据支撑,同时也可为带制动装置与缓冲弹簧装置的提升容器的设计与制造提供理论指导。

表1 不同斜坡轨道角度下的脱轨冲击速度

Table 1 Derailment impact velocity under different slope track angles

载荷工况	脱轨冲击速度/(m/s)		
	斜坡轨道角度10°	斜坡轨道角度20°	斜坡轨道角度30°
额定载荷	9.5	8.9	7.3
空载	9.0	7.9	5.2
安全裕度提升/%	5.3	11.2	28.8

4 结论

(1) 本文提出一种斜井提升容器结构,带有机械制动、检修闭锁及弹簧缓冲装置,实现了冲击能量吸收与安全制动;建立了提升容器-斜坡轨道多体耦合冲击动力学模型,推导出提升容器后轮抬升角动态变化的解析式。通过冲击力试验验证了虚拟样机模型的准确性,并系统分析了缓冲弹簧刚度、斜坡轨道角度、冲击速度及载荷对提升容器制动冲击的动力学行为影响。

(2) 弹簧刚度影响提升容器制动冲击动态响应,系统冲击力、后轮抬升角分别在弹簧刚度约为2 500 N/mm、15 000 N/mm时达到最小值,较无弹簧工况分别下降13.4%、17.4%;斜坡轨道角度与冲击速度、后轮抬升角呈正相关关系,额定载荷工况下后轮抬升角较空载工况降低15%~30%;斜坡轨道角度从10°增至30°时,额定载荷脱轨速度由9.5 m/s降至7.3 m/s,空载脱轨速度由9.0 m/s降至5.2 m/s,载重提升安全裕度最高达28.8%。脱轨风险随斜坡轨道角度与冲击速度急剧上升,增加载重可提升脱轨速度的安全裕度。

(3) 由于提升容器-斜坡轨道系统的复杂性,实际运行过程中缓冲弹簧的疲劳老化、腐蚀蠕变等退化机制,材料高应变率下的黏塑性行为等因素都会对提升容器的安全性产生影响。因此,为确保斜井提升容器的长期稳定运行,未来研究应进一步关注这些影响因素的量化分析与综合评估,推动矿山运输系统安全升级。

参考文献(References):

[1] 李玉瑾.矿井提升系统存在的安全问题及对策措施[J].煤炭工程,2024,56(10):64-70.
LI Yujin. Safety issues and the countermeasures of mine hoisting system[J].Coal Engineering,2024,56(10):64-70.

[2] 史雅娜,卫琛浩,冯锋,等.井下巷道纳米吸能安全防撞装置的设计与试验研究[J].煤矿机械,2024,45(3):25-27.
SHI Ya'na, WEI Chenhao, FENG Feng, et al. Design and experimental research of nano energy absorbing safety anti-collision device for underground roadway[J]. Coal Mine Machinery,2024,45(3):25-27.

[3] 李汉良.浅谈矿山斜井跑车事故的预防对策[J].湖南安全与防灾,2021(9):60-62.
LI Hanliang. Technical prevention measures against runaway accidents in mine inclined shafts[J].Hunan Safety and Disaster Prevention,2021(9):60-62.

[4] 张苏,王若瑄,李蓉蓉,等.基于行为安全的煤矿斜井跑车事故原因研究[J].煤矿安全,2018,49(11):245-248.
ZHANG Su, WANG Ruoxuan, LI Rongrong, et al. Causes of derailing accidents of inclined shaft trip lifting in coal mine based on behavioral safety[J]. Safety in Coal Mines,2018,49(11):245-248.

[5] 凌敏,朱超,许正辉.FCX型常闭式斜井跑车防护装置研究与运用[J].云南冶金,2020,49(1):6-9.
LING Min, ZHU Chao, XU Zhenghui. Research and application on FCX anti-running protective devices for normally closed type inclined shaft[J].Yunnan Metallurgy,2020,49(1):6-9.

[6] 姚炯,李典雨.斜井防跑车装置的研发与应用[J].采矿技术,2023,23(4):111-114.
YAO Jiong, LI Dianyu. Development and application inclined shaft anti-running device[J]. Mining Technology,2023,23(4):111-114.

[7] 冯海涛,陈淼,胡长虹.斜巷跑车事故模拟试验台悬承改进与优化[J].采矿技术,2023,23(2):85-88.
FENG Haitao, CHEN Miao, HU Changhong. Improvement and optimization of suspension bearing of inclined lane car accident simulation test benches[J]. Mining Technology,2023,23(2):85-88.

[8] 孙德标,郑毅,杨爱兰,等.煤矿井下新型防跑车挡车栏的设计[J].煤矿安全,2020,51(9):140-143.

SUN Debiao, ZHENG Yi, YANG Ailan, et al. Design of a new anti-car-running barrier in underground coal mine[J]. Safety in Coal Mines,2020,51(9):140-143.

[9] 吴兆宏,陈淼,贺添一,等.防跑车斜井箕斗的研究与应用[J].矿山机械,2024,52(9):28-32.
WU Zhaohong, CHEN Miao, HE Tianyi, et al. Research and application of anti-runaway inclined shaft skip[J]. Mining & Processing Equipment,2024,52(9):28-32.

[10] 周建,贺雪琼.矿用斜井异形轨卡轨车制动性能测试方法的研究[J].世界有色金属,2020(11):277-278.
ZHOU Jian, HE Xueqiong. Research on braking function measurement method of rail vehicle in slope mine[J]. World Nonferrous Metals,2020(11):277-278.

[11] 陈淼,周建,周昱勋,等.基于斜井提升容器防跑车装置的平道闭锁器的研究与分析[J].矿业研究与开发,2024,44(8):214-221.
CHEN Miao, ZHOU Jian, ZHOU Yuxun, et al. Research and analysis of flat lock device based on anti-sliding device for inclined shaft hoisting container[J]. Mining Research and Development,2024,44(8):214-221.

[12] 王辉.矿井斜巷防跑车缓冲吸能装置的设计研究[J].石化技术,2025,32(3):385-386.
WANG Hui. Design study of energy-absorbing buffer devices for mine runaway prevention in inclined roadways[J]. Petrochemical Industry Technology,2025,32(3):385-386.

[13] 金雪琪.矿山斜巷运输跑车主动抓捕系统设计研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
JIN Xueqi. Research of active arrest system of car in mining inclined shaft rail[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2022.

[14] 宋国栋.面向煤矿斜井跑车防护的柔性缓冲动力学仿真分析与实践[J].能源与环保,2021,43(7):220-224.
SONG Guodong. Dynamic simulation analysis and practice of flexible cushioning for anti-slipping car protection in inclined shaft of coal mine[J]. China Energy and Environmental Protection,2021,43(7):220-224.

[15] 吕斌,关天民.一种防跑车吸能器的设计与分析[J].大连交通大学学报,2017,38(3):55-58.
LYU Bin, GUAN Tianmin. Design and analysis of tramcar anti-falling energy absorber[J]. Journal of Dalian Jiaotong University,2017,38(3):55-58.

[16] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.金属非金属矿山安全规程:GB 16423—2020[S].北京:应急管理出版社,2020.