超深井充填管道磨损规律及调压减磨技术研究*

王彬[1]，邵宗煌[1]，肖磊[1]，李武[1]，何竹军[1]，李永敢[1]，田锐[2]

（1.云南驰宏锌锗股份有限公司会泽矿业分公司， 云南 曲靖市 654211；
2.昆明冶金研究院有限公司， 云南 昆明 650031）

摘要：针对超深井料浆充填管道高势能引发的流速失控与磨损风险问题，采用ANSYS数值模拟方法，系统揭示了料浆粗骨料类型、质量浓度、流速及管道几何参数对管道磨损的影响机制，创新性地提出了两级调压减磨技术。结果表明：粗骨料类型对管道磨损率影响有限，水淬渣基料浆磨损率最低；料浆质量浓度与管道磨损率呈显著负相关，料浆流速与管道磨损率呈线性正相关；管道几何参数中弯曲角度、倾斜角度对管道磨损影响显著，弯管处的磨损最为严重。对此，在管道中下部增设水平折返环管与电动调压阀，分阶段将料浆流速调控至0.8～3.1 m/s范围内，辅以丁字形缓冲结构优化流态，大幅降低管道磨损与系统压力波动，可使关键90°弯管磨损速率较改造前降低82%，系统压力波动幅度降低约40%，漏浆事故发生率下降30%，系统运行效率提升25%。研究结果可为深部矿产资源开发提供关键技术支撑。

关键词：充填料浆自流输送；管道磨损；阻力损失；调压减磨；数值模拟

中图分类号：TD853.34 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)06-0001-13

Research on Wear Law and Pressure Regulation and Wear Reduction Technology of Filling Pipeline in Ultra-Deep Mines

Wang Bin[1], *Shao Zonghuang*[1], *Xiao Lei*[1], *Li Wu*[1], *He Zhujun*[1], *Li Yonggan*[1], *Tian Rui*[2]

(1.Huize Mining Branch, Yunnan Chihong Zn & Ge Co., Ltd., Qujing, Yunnan 654211, China;
2.Kunming Metallurgical Research Institute Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650031, China)

Abstract: To address the problems of flow velocity runaway and wear risk caused by high potential energy in slurry filling pipelines of ultra-deep mines, the ANSYS numerical simulation method was employed to systematically reveal the influence mechanisms of coarse aggregate type, mass concentration, flow velocity, and pipeline geometric parameters on pipeline wear. An innovative two-stage pressure regulation and wear reduction technology was proposed. The results indicate that the coarse aggregate type has a limited effect on the pipeline wear rate, with the water-quenched slag-based slurry exhibiting the lowest wear rate. The slurry mass concentration is significantly negatively correlated with the pipeline wear rate, whereas the slurry flow velocity is linearly positively correlated with the pipeline wear rate. Among the pipeline geometric parameters, the bending angle and inclination angle exert significant effects on pipeline wear, with the most severe wear occurring at the bend sections. In response, horizontal turn-back loop pipes and electric pressure regulating valves are installed at the middle and lower sections of the pipeline to regulate the slurry flow velocity in stages within the range of 0.8-3.1 m/s. Supplemented by a T-shaped buffer structure to optimize the flow pattern, this technology substantially reduces pipeline wear and system pressure fluctuations. It can reduce the wear rate of critical 90° bends by 82% compared to the pre-modification level, reduce the system pressure fluctuation amplitude by approximately 40%, decrease the incidence of slurry leakage accidents by 30%, and enhance the system operational efficiency by 25%. The research results can provide key technical support for deep mineral resource development.

Key words: Self-flow conveying of filling slurry, Pipeline wear, Resistance loss, Pressure regulation and wear reduction, Numerical simulation

0 引言

经过多年持续开采，我国浅部矿产资源储量正逐年锐减，为满足国民经济发展对矿产资源的需求，深部矿产资源的安全高效开发与利用已成为必然趋势[1]。然而，在我国深部金属矿床开采过程中，岩

* **收稿日期**：2025-07-02
基金项目：云南省基础研究计划项目(202501CF070050，202501CF070049)
作者简介：王彬(1982—)，男，云南会泽人，工程师，主要从事采矿工程方面的研究工作。E-mail:741048012@qq.com
通信作者：田锐(1999—)，男，山东济宁人，硕士，主要从事采矿技术方面的研究工作。E-mail:1621361649@qq.com

爆、大变形、塌方等重大地质灾害频发,严重制约超深井矿产资源的安全高效开发。充填采矿技术可有效防控深井开采应力灾害风险,同时提升矿山资源利用率、减少矿山固废排放、改善井下作业环境,是深井开采的重要核心技术手段[2-3]。

某铅锌矿山井下充填管道布设于钻孔、斜井、采准斜坡道、平巷及充填井内,管线单线最长长度达10 000 m,最大充填倍线已接近8.3,料浆输送过程中阻力大、效率低、管内存料量大,导致充填管道堵塞、爆管事故频发,安全环保风险突出。为此,该矿山结合自身开采条件,优化充填管网布局,采用钻孔-充填井-平巷管道形成多分段倍线调压输送系统,优化后的充填倍线降低至5.7,自流料浆输送浓度显著提升,料浆流速由0.8~1.2 m/s提升至1.5~1.6 m/s。但流速过快增大了管道内的压力,加剧了充填井或钻孔内竖向管道的磨损,一旦管道漏浆引发管道堵塞,将直接导致充填井或钻孔报废,严重影响矿山安全生产[4-6]。因此,为缓解竖向管道管壁磨损,降低管道漏浆风险,延长钻孔与充填井的使用寿命,亟需对充填管道调压减磨技术进行系统研究。

宋红岩[6]通过试验测试、数值模拟及工业监测等手段,明确了管道磨损主要受流速与颗粒特性影响。赵一博等[7]通过自主研发的环管磨损试验装置及自制磨损试块试验,发现降低泵送流速、提高质量浓度可有效缓解充填管道磨损。庞建涛等[8]通过数值模拟发现,将骨料颗粒直径控制在临界值附近、降低料浆流速及增大弯管曲率半径可实现管道的有效减磨。王小林等[9]通过工业统计分析、管网监测及数值模拟相结合的方法,提出优化管网布置可有效降低金属矿高浓度充填管道磨损。陈鑫政等[10]通过理论推导与管道压力监测数据分析,明确充填管道比摩阻主要受流量、质量浓度与管径影响,钻孔满管率受比摩阻和充填倍线共同制约,提出可通过提高料浆浓度、缩小管径、优化管路及增加局部损失等措施提升满管率。张振华等[11]采用DEMATEL-ISM集成分析方法,明确充填管道磨损风险主要受管道内径、充填倍线等根本致因,以及料浆流速、管道粗糙度等多层级因素的综合影响,提出可通过优先管控根本致因、重点控制关键过渡因素及改善直接致因实现磨损风险的系统防控。周海龙[12]通过多物理场仿真结合环管试验验证,明确充填管道阻力损失主要受管径和入口速度影响,弯管冲蚀磨损主要受颗粒粒径和弯曲角度调控,提出可通过管径设计、控制入口速度、采用60°以下弯管角度等措施,将防护范围延伸至弯管水平段,实现协同减阻降磨。

本研究针对超深井充填料浆自流输送过程中,高势能引发的料浆高速流动与不满管流态引发的管道剧烈磨损的核心问题,基于磨损机理的相关研究与试验基础,采用ANSYS数值模拟方法,系统分析料浆质量浓度、流速、骨料类型及管道几何参数对管道阻力损失与磨损的影响规律,揭示多因素耦合作用下管道磨损机制,研发两级调压减磨技术,以解决高势能引发的磨损与漏浆风险。工程应用表明,本研究所提出的竖向管道两级调压减磨技术,可显著提升充填系统安全性与经济性,有效遏制充填管道磨损,大幅降低爆管、漏浆事故发生频率,显著延长管道的使用寿命,保障超深井充填系统的安全稳定运行。研究结果可为深部资源开发提供关键技术支撑,同时为高势能输送场景建立“增阻-控速-缓冲”协同减磨范式。

1 充填料浆自流管道输送形式及磨损特性

1.1 充填料浆自流输送形式

充填料浆自流输送是指料浆以自身的重力势能为动力,克服管道沿程阻力实现流动的输送方式[13],其势能主要由垂直管段砂浆柱的重力提供,充填料浆自流输送方式具有节约能源、工艺简单、设备少等优点,是深井矿山充填系统的首选方案。浅井充填过程中,常出现浆体重力势能不足以克服系统沿程阻力的情况,导致浆体无法自流输送至采场,甚至在充填管道内发生堵塞,因此,自流输送更适配深井矿山的充填开采。在自流输送充填系统中,可将浆体管输状态分为满管输送和不满管输送两类[14-15],如图1所示。

(1) 满管输送。在自流充填工艺中,满管输送是一种理想的管输模式,该流态下浆体在管道中连续、稳定流动,如图1(a)所示。工程中常通过优化管输流态延长充填管道使用寿命。

(2) 不满管输送。随着矿体开采垂直深度增加,系统高差提供的静压头逐渐增大;当静压头大于系统输送所需要的沿程阻力损失时,系统将产生剩余压头。根据能量守恒定律,剩余能量会促使料浆加速流动以耗散该部分能量,而浆体加速流动会导致管内出现负压,进而形成空气柱,如图1(b)所示。浆体在空气柱内自由下落,流速持续增大,高速下落的浆体不仅会加剧管道内壁的磨蚀,还会在浆体与

空气交界面产生剧烈冲击,加速管道破损失效。

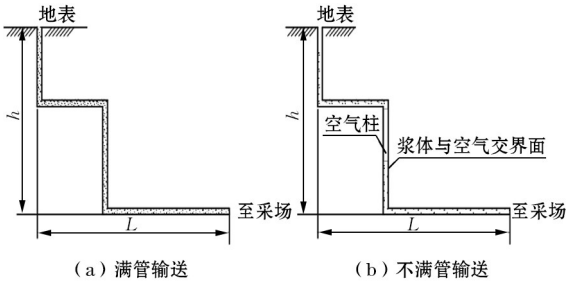


图 1 充填料浆自流输送两种状态

Fig.1 Two states of self-flow conveying of filling slurry

1.2 充填料浆自流输送中管道磨损特点

根据料浆与管壁的作用形式,可将管道磨损分为冲蚀磨损、磨蚀磨损和腐蚀磨损 3 种基本类型,其中冲蚀磨损和磨蚀磨损统称为机械磨损,腐蚀磨损则为化学腐蚀主导的磨损形式[16-18]。

(1) 冲蚀磨损。

冲蚀磨损多发生于料浆紊流条件下,当料浆在管道中流动时,固体颗粒在料浆紊动能量作用下反复发生"撞击管壁-反弹-再次撞击管壁"的运动,长期作用下会在管壁表面留下凹凸不平的磨损疤痕。结合充填料浆自流输送的两种状态可知,在工程应用中,应尽量使管输流态接近满管输送,该状态下充填料浆对管壁的磨损属于料浆与管壁相对运动产生的表面损耗现象。磨损是材料持续损耗或破坏的过程,机械作用与电化学作用均会引发材料磨损。高速料浆携带固体颗粒以法向或斜向角度冲击管壁时,其颗粒动能转化为局部应力引发管壁塑性变形,反复冲击下管壁表层发生疲劳剥落。尤其是在不满管流态下,固体颗粒随料浆自由下落并不断加速,冲击能量急剧增大,同时弯管区域受二次流作用,使颗粒集中冲击外拱面,导致单位面积能量损耗达满管流的 30.95 倍,最终在管壁形成蜂窝状凹坑。管壁磨损深度随流速呈平方增长,且弯管磨损率比是直管的 50 倍。

(2) 磨蚀磨损。

尖锐硬质颗粒(莫氏硬度≥5,如炉渣棱角)在料浆裹挟下沿管壁滑动或滚动时,颗粒凸起部位刺入金属管壁表面,产生微观切削作用;粗骨料在管道底部沉降形成"床载"滑动摩擦层,棱角颗粒划伤深度与颗粒硬度、形貌呈正相关,同时料浆湍流会加剧颗粒翻滚,扩大划伤范围,最终在管壁形成平行沟槽状划痕,划痕密度随颗粒浓度与输送流量的增大而显著升高。当尖锐硬质颗粒在流体带动下发生滑动或碰撞时,会对管道内壁发生切削作用,在管道内壁形成类抓痕的线性痕迹,该类磨损也称为划痕磨损。

(3) 腐蚀磨损。

料浆中化学介质与管壁金属发生电化学反应,破坏管壁表面钝化膜,形成点蚀坑,而后料浆流动的冲刷作用会加速腐蚀产物剥离,使裸露的金属基体持续溶解;同时硬质颗粒对腐蚀区域引发"腐蚀-切削"协同效应(如高锰钢在酸性浆体中因活性溶解加速块状剥落),最终在管壁形成点蚀麻坑与溃烂斑块,因此管壁表面覆盖红棕色氧化物或黑色硫化物。

2 影响深井充填料浆自流输送管道磨损的因素

结合已有研究成果可知,深井充填料浆自流输送过程中,料浆流速、质量浓度、颗粒粒径和硬度、管道形状和布置方式等因素均会对管道磨损产生显著影响[19]。根据流变学理论,高浓度充填料浆的屈服应力越大,其管输沿程阻力越大,充填管道内的沿程阻力损失与磨损率呈强正相关关系,其本质为输送能量转化:一部分流体动能通过颗粒冲击转化为管壁磨损破坏能,另一部分通过摩擦耗散为阻力损失,因此高阻力损失的输送系统往往伴随高磨损风险。本研究针对颗粒性质、料浆特性及管道布置方式三类核心因素开展数值模拟研究,通过分析不同工况下充填管道内的压力分布、沿程阻力损失特征,揭示管道磨损演化规律,当压力分布与阻力损失的分析结果存在差异时,以阻力损失结论为准[20-22]。

数值模拟中,由粗骨料、全尾砂、水泥和水组成充填料浆。对料浆赋予相应的黏度和密度等物理参数。数值模型在入口端采用速度边界,根据不同模拟条件设置初始流速,模型出口设置质量出口边界条件,为自由出流条件。模型使用 k-ε 湍流模型,数值模拟所用材料参数见表 1。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

材料	密度/(kg/m³)	泊松比	黏度/(kg/(m·s))
全尾砂充填料浆	2 020	0.23	0.645

2.1 颗粒性质的影响

颗粒特性主要指充填材料中固体颗粒的形状、尺寸、密度和硬度。相比圆滑颗粒,锋利、不规则的颗粒对管道的磨损更为剧烈。某铅锌矿山充填所用

粗骨料为冶炼水淬炉渣,颗粒呈玻璃质结构,平均粒径为 1.47 mm,曲率系数为 0.96,莫氏硬度为 5～7,会对管道的管壁产生显著的机械磨损。图 2 为充填料浆中水淬颗粒分布云图,由图 2 可知,充填料浆自流输送过程中,大颗粒水淬渣颗粒主要分布于管道底部,其余颗粒被浆体流动时裹挟,对管壁形成持续磨损。

基于该铅锌矿山的实际充填工况,研究不同粗骨料的添加对料浆输送性能的影响,得到 L 形弯管中充填膏体的压力分布云图,如图 3 所示。

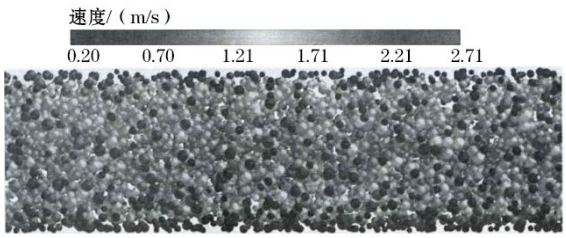


图 2 充填料浆中水淬渣颗粒分布

Fig.2 Distribution of water-quenched slag particles in filling slurry

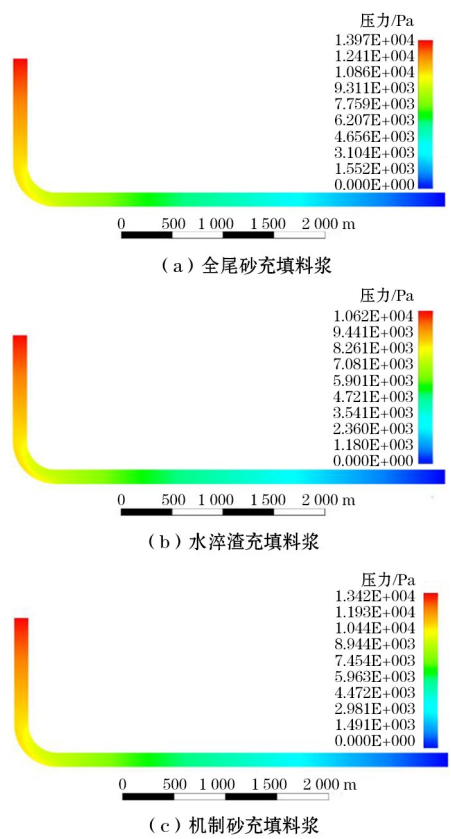


图 3 不同粗骨料料浆在管道内的压力分布状态

Fig.3 Pressure distribution state of different coarse aggregate slurry in the pipeline

由图 3 可知,3 种工况下管道内的压力分布规律基本一致,表面粗骨料类型对管道内整体压力分布的影响较小;在弯管段,弯管外壁压力显著大于内壁压力,外壁压力达 1.11 kPa,远高于内壁的 0.82 kPa。现有研究表明,弯管外壁为管道磨损最剧烈的区域,工程中应对弯管外壁进行加厚处理;而弯管内壁易发生淤积,进而造成堵管、爆管等问题。

不同粗骨料类型下,充填料浆的沿程管道阻力损失如图 4 所示。由图 4 可知,添加水淬渣条件下,料浆的沿程阻力损失最小,为 1 300 Pa/m,显著低于在全尾砂及机制砂添加条件下的阻力损失,前者较后两者分别降低 25.7%和 23.5%。综上所述,不同粗骨料添加条件下,管道内压力分布规律基本一致,但弯管段外壁压力显著高于内壁压力,在实际生产中应对管道外壁进行加厚耐磨处理;充填管道磨损程度受到颗粒性质的显著影响,不同粗骨料会改变管道沿程阻力损失,进而影响管道磨损率,其中水淬渣对管道磨损的影响程度最低。

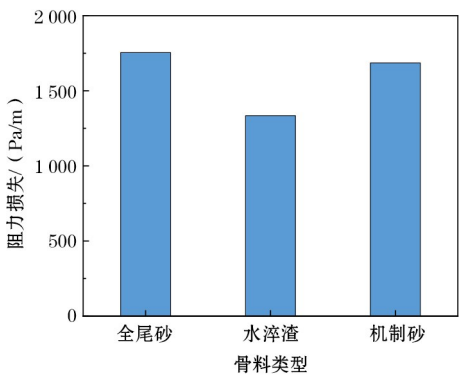


图 4 粗骨料对阻力损失的影响

Fig.4 Effect of coarse aggregate on resistance loss

2.2 料浆特性对输送性能的影响

2.2.1 质量浓度对输送性能的影响

通过模拟相同管道布置条件下不同质量浓度料浆的管内压力分布及阻力损失,分析质量浓度对管道磨损率的影响。不同质量浓度料浆的管道内压力分布云图如图 5 所示。

质量浓度是影响管道系统压力分布的关键因素,不同质量浓度下的管内压力分布数据存在明显差异。由图 5 可知,当质量浓度为 74%时,弯管段管道外壁压力达到 6.61 kPa,而质量浓度为 80%时,该处压力降至 3.97 kPa。经计算,74%质量浓度下的弯管外壁压力较 80%质量浓度时高出 66%。因此,随着料浆质量浓度降低,管道内压力呈显著增大的变化趋势。

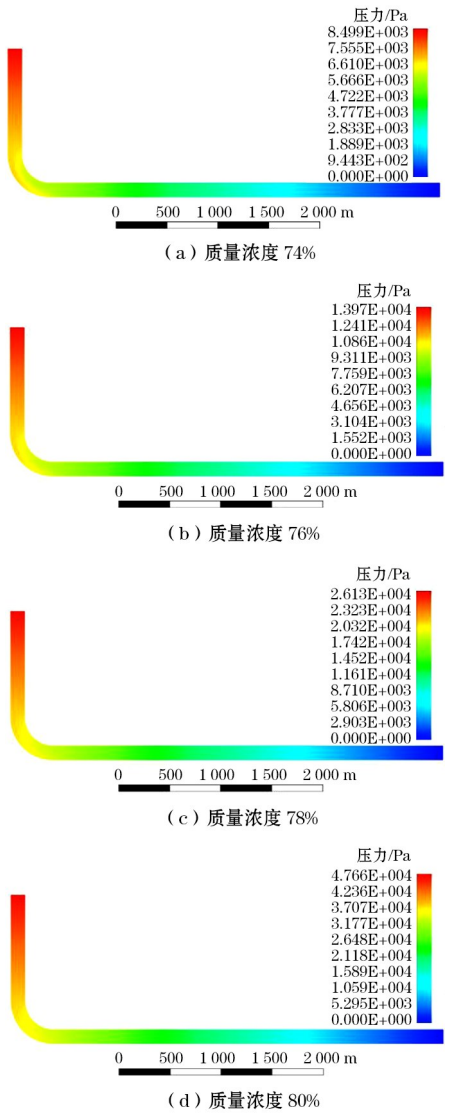


图 5 不同质量浓度料浆在管道内的压力分布状态

Fig.5 Pressure distribution state of slurry in the pipeline at different mass concentrations

现有研究表明,管内压力水平与管壁磨损率呈正相关关系,压力升高会直接导致磨损加剧,结合本文数值模拟结果,充填管道的磨损率与质量浓度呈负相关关系。因此,为有效降低管道系统的磨损风险、延长其使用寿命,在实际矿山充填作业中,应在充填工艺允许范围内尽量提高输送料浆的质量浓度。

2.2.2 流速对输送性能的影响

图 6 为不同料浆流速条件下,L 形弯管内的压力分布云图,流速对阻力损失的影响如图 7 所示。由图 6 可知,料浆输送压力主要集中于弯管外侧壁面区域,随着料浆流速增大,该区域的壁面磨损压力呈显著升高趋势,最低流速下弯管外侧最大压力为 11.6 kPa,最高流速下则增至 29.8 kPa,增幅达 18.2 kPa。这表明流速提升会直接加剧弯管关键部位的磨损风险。图 7 的分析结果进一步表明,不同流速工况下的管道沿程阻力损失差异显著,流速与阻力损失之间存在强线性正相关关系,即随着流速升高,阻力损失由最低的 1 754.67 Pa/m 线性上升至 3 744.65 Pa/m。

综合以上分析可得,充填管道磨损率与料浆流速密切相关,流速升高不仅会显著增大弯管外侧局部压力,还会导致系统整体的沿程阻力损失线性升高。因此,在实际矿山充填工程中,为有效调控系统压力并降低管道磨损,核心策略为优化充填运行参数,将料浆的输送流速控制在合理区间内。

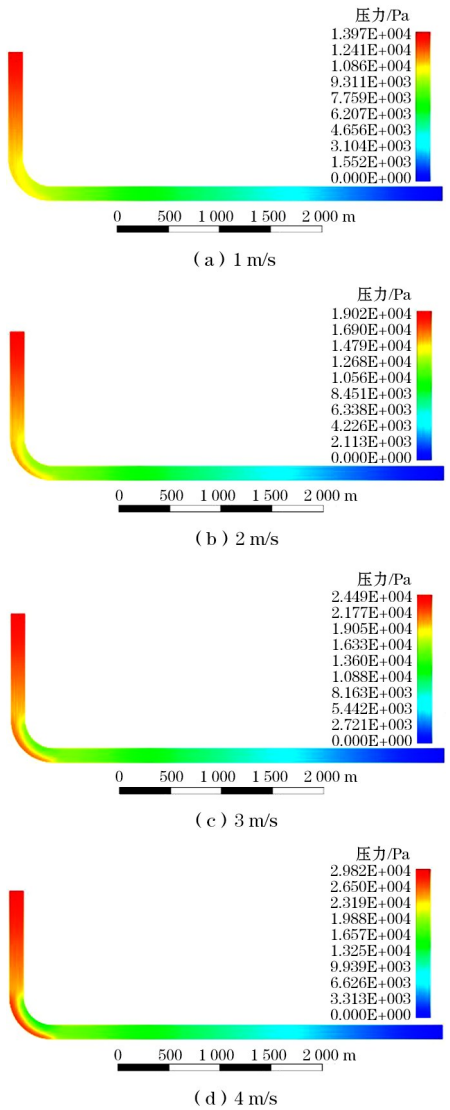


图 6 不同流速下料浆在管道内的压力分布状态

Fig.6 Pressure distribution state of slurry in the pipeline at different flow velocities

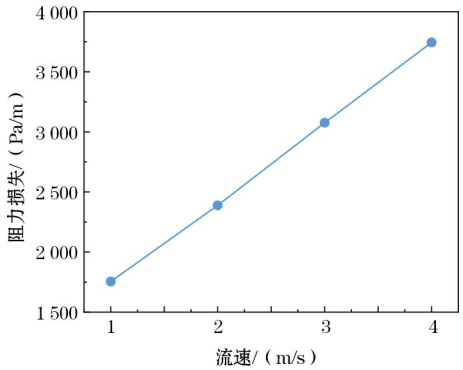


图 7 流速对阻力损失的影响

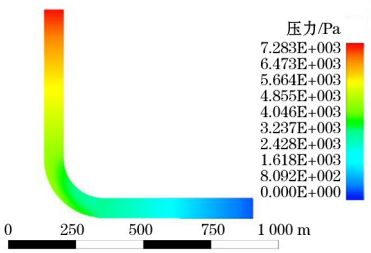
Fig.7 Effect of flow velocity on resistance loss

2.3 充填管道布置形式对料浆输送性能的影响

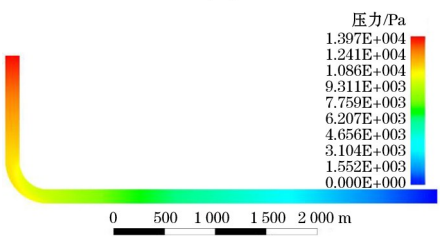
管道布置形式直接决定了充填料浆在管道内的流动状态、流速分布、颗粒运动轨迹及固液间的相互作用特性,进而对管道局部和整体的磨损速率、磨损形态产生决定性影响[23-24]。

2.3.1 充填倍线对料浆输送性能的影响

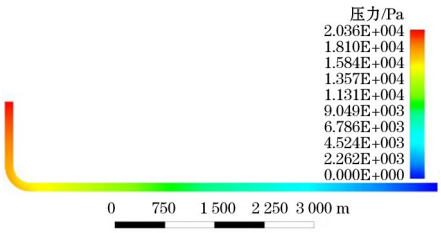
充填倍线 N 是表征系统充填阻力特性的核心参数,其数值大小直接决定系统工作压力与料浆平均流速,进而影响管道整体磨损的剧烈程度。因此,本研究通过数值模拟分析不同倍线条件下料浆充填压力及阻力损失变化(见图 8 和图 9),明确充填倍线对料浆输送性能的影响。



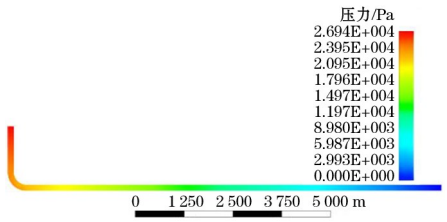
(a) N=2



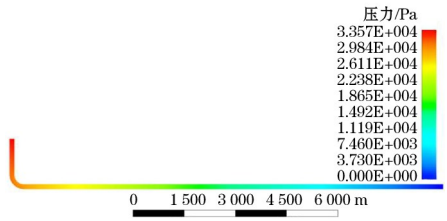
(b) N=4



(c) N=6



(d) N=8



(e) N=10

图 8 不同充填倍线下管道内的压力分布状态

Fig.8 Pressure distribution state in the pipeline at different filling times line

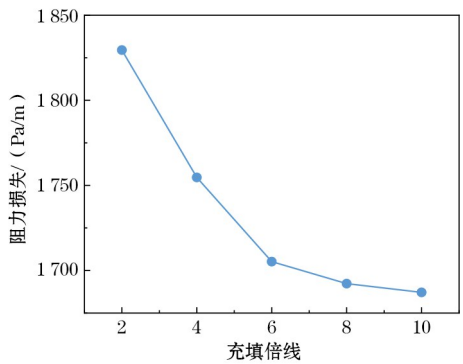


图 9 充填倍线对阻力损失的影响

Fig.9 Effect of filling times line on resistance loss

由图 8 和图 9 可知,充填倍线对管内压力分布及阻力损失具有显著影响。管道沿程阻力损失随充填倍线的增大而减小,且该衰减趋势呈现明显的阶段性特征,当充填倍线小于 6 时,阻力损失随倍线增大急剧下降;当充填倍线超过 6 后,阻力损失趋于平缓。综上可知,增大充填倍线可有效降低料浆输送阻力,进而显著降低充填管道的磨损率。但当充填倍线增大至临界值后,其对管道磨损率的削弱效果趋于稳定。因此,在实际工程应用中,应在可行范围内尽量提高充填倍线至临界值($N=6$),以最大化降低管道磨损率;而过度增大充填倍线(如充填倍线超过 6)对减磨的增益十分有限。

2.3.2 同倍线下管道长度对料浆输送性能的影响

在系统阻力特性(充填倍线)恒定的条件下,探讨管道长度对磨损累积效应的影响,得到不同管道长度下的管道内压力分布状态,如图 10 所示,同充填倍

线下不同管道长度对阻力损失的影响如图 11 所示。

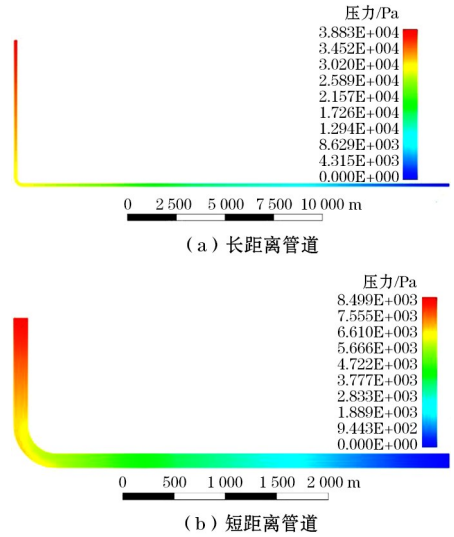


图 10 不同管道长度下管道内的压力分布状态

Fig.10 Pressure distribution state in the pipeline at different pipeline lengths

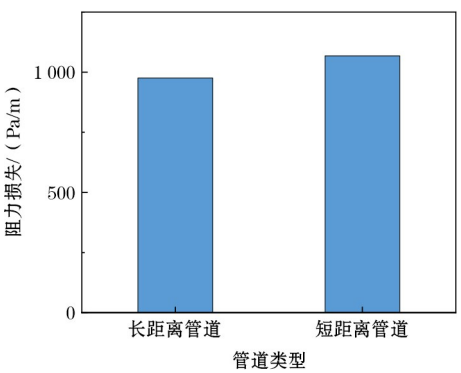


图 11 同充填倍线下不同管道长度对阻力损失的影响

Fig.11 Effect of different pipeline lengths on resistance loss under the same filling times line

由图 10 与图 11 可知,长距离管道和短距离管道下的阻力损失分别为 975.71 Pa/m 和 1 067.77 Pa/m,相对差异仅为 9.01%;同时,两条管道的沿程压力分布规律高度吻合。这表明管道总长度变化对系统阻力特性及管壁磨损的影响相对较小,核心原因在于管道磨损主要由局部流速、湍流强度及固体颗粒冲击频率决定,而上述参数受管道总长度变化的影响微弱。因此,在满足输送距离需求的前提下,无需过度关注管道长度微调对磨损的直接影响。

2.3.3 管径对料浆输送性能的影响

管径是控制平均磨损率的关键几何参数,其变化会显著改变料浆流速、雷诺数、浓度分布,以及颗粒与管壁的碰撞频率、碰撞角度。不同管径下管道内的压力分布状态如图 12 所示,管径对阻力损失的影响如图 13 所示。

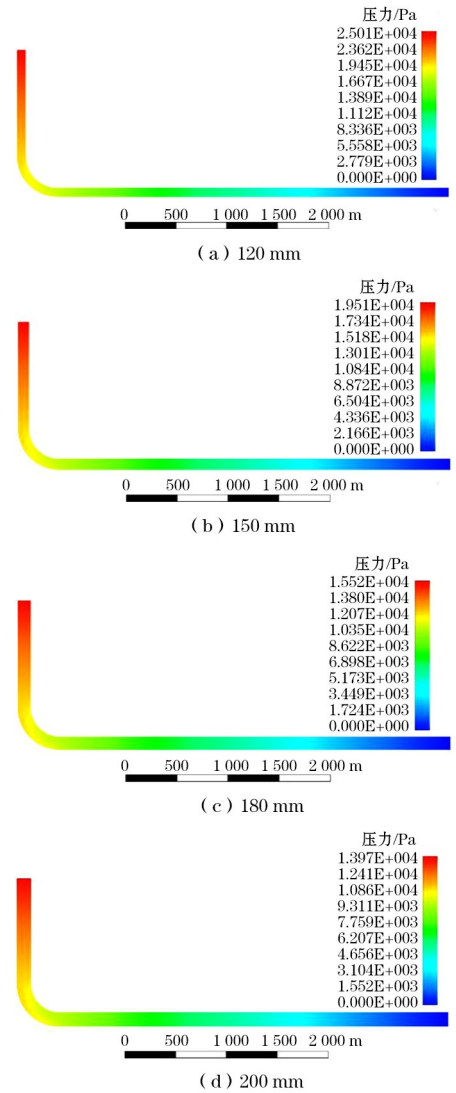


图 12 不同管径下管道内的压力分布状态

Fig.12 Pressure distribution state in the pipeline at different pipe diameters

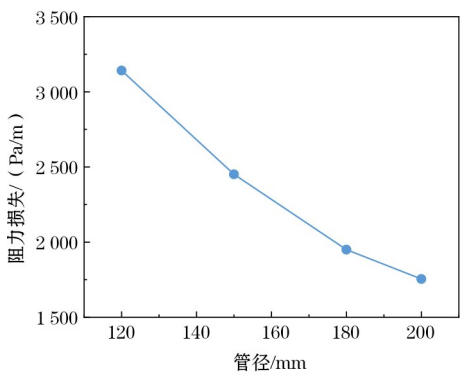


图 13 管径对阻力损失的影响

Fig.13 Effect of pipe diameters on resistance loss

由图 12 可知,不同管径条件下,管内压力沿管道长度变化规律基本一致,但管径大小会显著影响料浆输送的沿程阻力损失。由图 13 可知,随着管径增大,料浆的沿程阻力损失显著降低,管径与阻力损失几乎呈线性反比关系。分析认为,当输送量固定时,管径越小,料浆流速越快,流动稳定性越差,更高的流速和更强的湍流会加剧料浆中固体颗粒对管道内壁的冲刷和碰撞,进而显著提升管道的磨损速度。因此,在实际工程应用中,为有效降低管道磨损、延长管道使用寿命,应在保证不沉积和成本允许的前提下,尽可能选用较大的管径。

2.3.4 倾斜布置对料浆输送性能的影响

管道倾斜角度(上向或下向)的改变会使重力分量参与作用,以此改变颗粒的悬浮状态、沉降趋势及颗粒与管壁的接触压力,因此,倾斜管段是管道磨损的敏感区域,其磨损规律与水平管存在本质差异。

由于某铅锌矿充填系统中倾斜管道占比大,本研究系统分析了不同倾斜角度下管道的压力分布与阻力损失规律(见图 14、图 15、图 16)。料浆输送沿程阻力损失随管道倾斜角度的增大呈现显著增加趋势。基于该阻力损失规律,结合固液两相流特性可推断:管道磨损率同样随倾斜角度的增大而加剧,并在达到临界倾角后趋于稳定。分析认为,倾角增大改变了管道内料浆流速分布,使颗粒相动能更多地转化为对管壁的法向冲击能,进而加速管壁磨损。进一步可推断,弯管外壁处的颗粒受垂直管段重力作用,具有较高的势能;颗粒进入弯管后,其冲击方向与管道轴向相交,因此该区域的管道磨损率预计将达到最高水平。

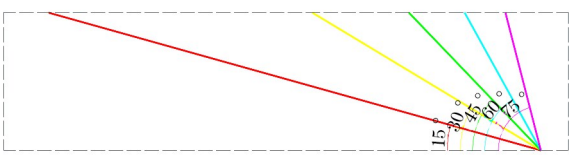
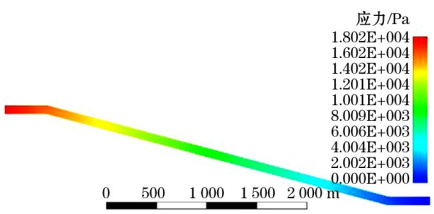
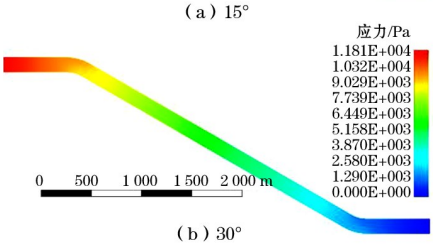


图 14 倾斜管道布置形式

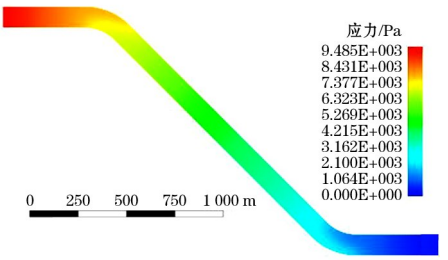
Fig.14 Layout form of inclined pipe



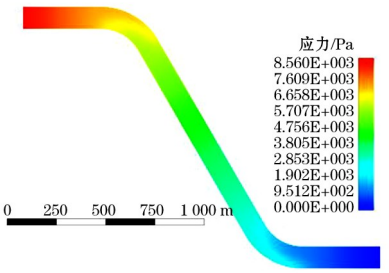
(a) 15°



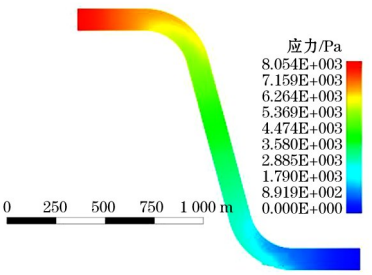
(b) 30°



(c) 45°



(d) 60°



(e) 75°

图 15 不同倾斜角度下管道内的压力分布状态

Fig.15 Pressure distribution state in the pipeline at different inclination angles

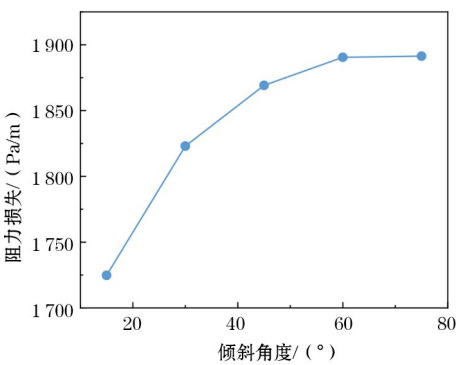


图 16 倾斜角度对阻力损失的影响

Fig.16 Effect of inclination angle on resistance loss

2.3.5 弯管布置对料浆输送性能的影响

弯头是管道系统中的典型局部构件,充填料浆流经弯管时会发生强烈的二次流、速度场重分布与颗粒惯性冲击,导致弯管外侧成为整个系统中磨损最为剧烈的部位,其磨损形貌与磨损程度受弯曲角

度、曲率半径等几何参数显著影响。

弯管布置形式如图 17 所示,不同弯曲角度下管道内的压力分布状态如图 18 所示,弯曲角度对阻力损失的影响如图 19 所示。由图 18 和图 19 可知,充填管道弯头处的局部高压范围随弯曲半径的减小而显著扩大,弯管局部阻力损失与弯曲角度之间存在显著的正相关关系,即随着弯曲角度增大,充填料浆流经弯头时产生的局部阻力损失相应升高。物理机制为:弯曲角度增大加剧了充填料浆的离心效应与二次流强度,导致能量耗散加剧,这一特征不仅在压力云图上表现为高压范围扩大,也直接体现为局部阻力损失的升高。综合管道磨损机制来看,增大弯曲角度可使管内压力分布更均匀、局部峰值流速降低,有助于分散料浆对管壁的冲刷能量,在特定工况与管材条件下,可有效降低弯管关键区域的冲蚀磨损速率。因此,在满足系统压降要求的前提下,可适当增大充填管道弯头的弯曲角度,实现管道磨损的有效防控。

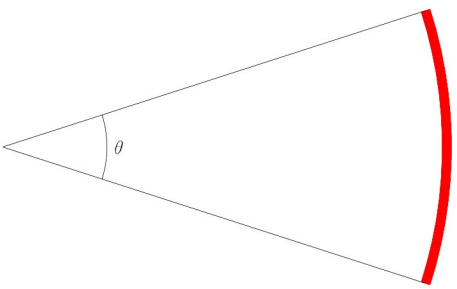
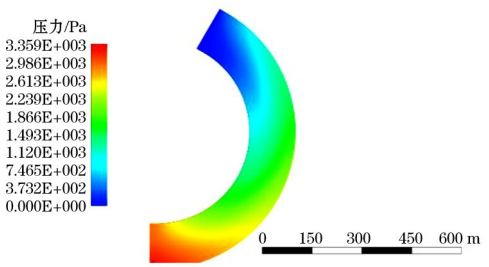
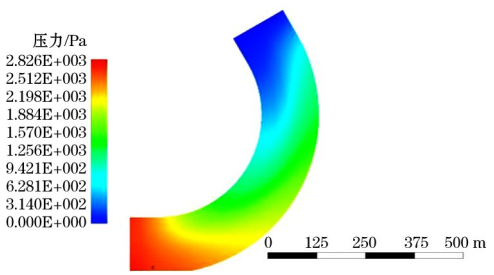


图 17 弯管布置形式

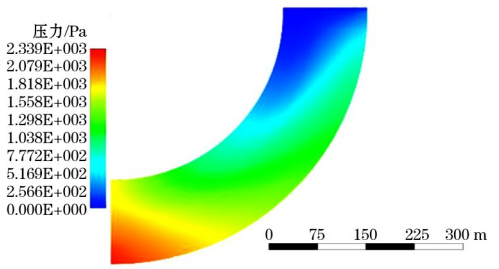
Fig.17 Layout form of bend pipe



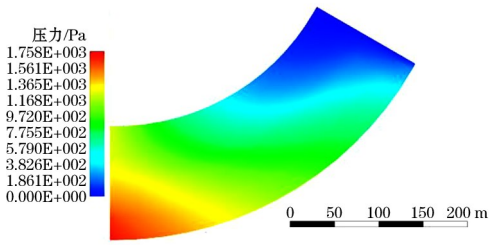
(a) 30°



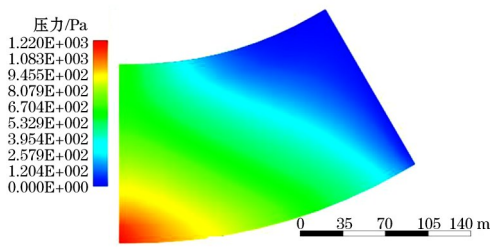
(b) 60°



(c) 90°



(d) 120°



(e) 150°

图 18 不同弯曲角度下管道内的压力分布状态

Fig.18 Pressure distribution state in the pipeline at different bend angles

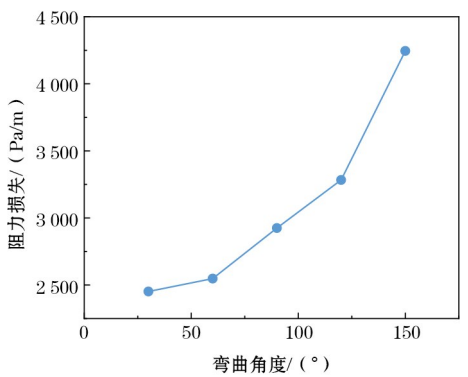


图 19 弯曲角度对阻力损失的影响

Fig.19 Effect of bend angle on resistance loss

3 基于井下充填增阻减磨理论的研究竖向管道两级调压减磨技术

通过对深井充填料浆自流输送管道磨损影响因素的系统分析可知,深井充填管道的磨损防控可从提高充填料浆自流输送质量浓度、降低流速、优化管道几何形状与布局形式等方面入手。基于数值模拟

对深井充填料浆输送管道磨损规律的解析表明:竖向管道的高势能易引发料浆高速流动与不满管流态(空气柱现象),可加剧颗粒对管壁的冲击磨损,使得弯管与倾斜段成为磨损敏感区;料浆质量浓度、流速及管道几何布局(如充填倍线、曲率半径)的耦合作用,对管道磨损强度具有显著影响。针对这一"高势能-低阻力"的失衡本质,本文提出基于增阻减磨理论的竖向管道两级调压减磨控制技术,通过在管道中下部节点设置水平折返环管与电动调压阀,分阶段增加局部阻力,将料浆流速精准控制在 0.8～3.1 m/s 的安全范围内,优化满管流态,同时辅以丁字形缓冲结构以缓释关键节点压力,进而系统性降低管道磨损风险。

3.1 井下充填增阻减磨理论

对于深井矿山,由于充填倍线较小,垂直管段料浆产生的势能大于沿程阻力损失,进而产生剩余压头,造成系统无法实现满管输送,加剧充填管壁磨损,使管道输送处于不稳定状态。增阻减磨理论基于水力学理论推导建立,从动量守恒角度揭示管道磨损机理及其影响规律[25]。

根据能量守恒定律,充填料浆不满管输送工况下满足式(1),即垂直管道中充填料浆所提供的剩余压头与系统总能量损失 W 相互平衡,W 包括沿程损失 f 与局部损失 j 两部分,且满足 $j=af$,a 为局部阻力系数,一般取 0.1～0.3,则有:

$$\gamma \cdot h = W = f + j = (1+a)f \tag{1}$$

式中:γ 为料浆容重,N/m^3;h 为料浆在垂直管道中的高度,m。

水力坡度分别为 L_1(垂直管道)、L_2(水平管道),当垂直管道与水平管道直径相同时,L_1 与 L_2 相等,则:

$$\gamma \cdot h = (1+a)L_1(L+h) \tag{2}$$

式中,L 为水平管道长度,m。

即:

$$h = \frac{L \cdot (1+a)L_1}{\gamma - (1+a)L_1} \tag{3}$$

由式(3)可知,在料浆容重 γ、水平管道长度 L 固定的条件下,管道的水力坡度直接决定料浆在垂直管道中的高度 h 的大小。当水力坡度增大至临界值时,h 等于系统高差 h_1,系统即可实现满管输送。因此,可通过增大管道水力坡度优化系统满管状态,进而减轻管道磨损。针对系统满管状态,可通过料浆在垂直管道中的高度 h 与系统高差 h_1 的比值 φ 来定量描述,即:

$$\varphi = h / h_1 \tag{4}$$

3.2 竖向管道两级调压减磨控制技术

基于深井充填料浆自流输送特性、管道磨损因素分析和深井充填增阻减磨理论,本文利用充填井、钻孔平巷联道区域,在竖向充填管道两个不同出口位置的平面巷道内,设计并布设水平折返式环形管道与原竖向管道连通,同时安装电动调压阀,以增加管道内料浆阻力、减缓料浆流速。在管道交叉处预留 30 cm 长度设置管道转角结构,并在垂直管道入口和出口处安装压力监测仪表,实时监测管道压力变化。监测数据通过光纤传输至交换机,最终把数据信号上传至地表中控室的控制主机(见图 20),实现监测数据实时传输与电动调压阀远程调控,以完成充填料浆流速的精准控制[26]。

针对矿山充填管道输送过程中,因流速过高引发的弯管剧烈冲击磨损、漏浆风险与流速过低引发的堵管问题,创新性地提出了基于中下部节点设置水平折返环管并结合电动调压阀的联合调控技术。该技术的核心在于分阶段实施增阻调控:通过精确控制电动调压阀的开度,在充填作业的不同阶段主动增加系统局部阻力,将关键管段的浆体流速精准调控至 0.8～3.1 m/s 的安全运行范围内;同时,在易发生水锤效应、流态紊乱的弯管上游加装特制的丁字形缓冲结构,该结构通过优化流场分布,有效促进了满管流的形成与稳定,显著削弱了浆体对管壁(尤其是弯头部位)的冲击能量。

以某大型铁矿充填工程为例,现场应用效果如下。

(1) 弯管冲击磨损显著降低。对关键 90°弯管的定期壁厚测量结果表明,弯管平均磨损速率较改造前降低了 82%,其中高磨损点的月均磨损厚度从 1.5 mm 降至 0.27 mm,显著延长了弯管使用寿命。

(2) 管道漏浆风险有效控制。系统压力波动幅度减少约 40%,因压力剧变、局部冲刷引发的管道接头渗漏、焊缝开裂等漏浆事故发生率同比下降 30%,由改造前的年均 12 次降至 8.4 次,显著提升了作业环境安全性和环保水平。

(3) 系统运行效率与资源利用率提升。随着流速的稳定控制和堵管风险的降低,钻孔与地表充填井因维修、清堵导致的停用时间大幅减少。统计数据显示,二者的有效利用率提升了 25%,钻孔月均可用时间从 20 d 提升至 25 d,同等规模充填设施可支撑更高的充填能力,减少了新钻孔、充填井的建设投入。

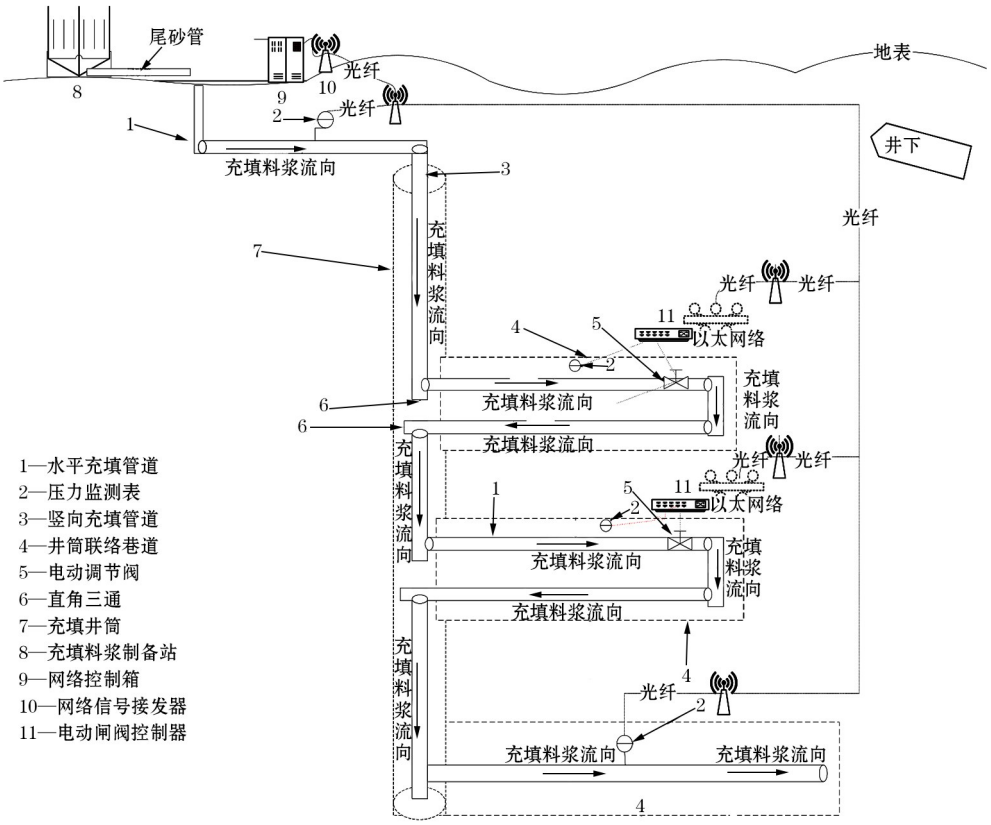


图 20 竖向管道两级调压减磨控制技术应用示意

Fig.20 Application of two-stage pressure regulation and wear reduction control technology for vertical pipeline

综上,通过“水平折返环管+电动调压阀”的分段精准增阻控速,辅以丁字形缓冲结构对满管流态的优化,有效解决了高流速冲击磨损与低流速堵管风险并存的核心矛盾。研究结果为矿山安全、高效、经济的长距离管道充填提供了可靠的技术保障。

4 结论

结合深井充填料浆自流输送特性、管道磨损机理及增阻减磨理论,本文研发了竖向管道两级调压减磨控制技术,并成功应用于工业实践,得到的主要结论如下。

(1) 粗骨料类型对管道磨损率的影响相对有限。不同粗骨料添加条件下,水淬渣基料浆对应的管道磨损率最低。管道磨损率与料浆质量浓度呈显著负相关关系,即随着料浆质量浓度增加,管道磨损率降低;料浆流速与管道磨损率呈线性正相关关系,随着流速由 1 m/s 增加至 4 m/s,管道阻力损失由 1 754.67 Pa/m 上升至 3 744.65 Pa/m。

(2) 当充填倍线>6 时,沿程阻力损失增长趋缓,磨损风险相应降低;管道弯曲角度减小(如采用 90°弯管)加剧了颗粒惯性冲击效应,导致其磨损率显著高于直管段;随着管径增大,管道沿程阻力几乎呈线性减小,磨损速率随之降低。管道磨损率随管道倾斜角度的增大而升高,弯管处的磨损最为严重;管道长度对管道磨损率的影响相对较小。

(3) 通过在管道中下部节点设置水平折返环管与电动调压阀,分阶段增阻调控,将流速控制在 0.8~3.1 m/s 的安全范围内,结合丁字形缓冲结构优化满管流态,可使关键 90°弯管的平均磨损速率较改造前降低 82%,系统压力波动幅度降低约 40%,因压力剧变或局部冲刷引发的管道接头渗漏、焊缝开裂等漏浆事故发生率同比下降 30%,充填系统运行效率与资源利用率提升 25%。

(4) 该技术为超深井料浆输送提供了可推广的“增阻-控速-缓冲”协同减磨范式,后续可深入研究非满管流态下料浆结构演化与细观磨损机制,进一步完善超深井充填料浆输送动态预测模型。

参考文献(References):

[1] 吴爱祥,王勇,张敏哲,等.金属矿山地下开采关键技术新进展与展望[J].金属矿山,2021(1):1-13.
Wu Aixiang, Wang Yong, Zhang Minzhe, et al. New development and prospect of key technology in underground mining of metal mines[J]. Metal Mine,2021(1):1-13.

[2] 吴爱祥,王勇,王洪江.膏体充填技术现状及趋势[J].金属矿山,2016(7):1-9.
Wu Aixiang, Wang Yong, Wang Hongjiang. Status and prospects of the paste backfill technology[J]. Metal Mine, 2016(7):1-9.

[3] 程海勇,吴爱祥,吴顺川,等.金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J].工程科学学报,2022,44(1):11-25.
Cheng Haiyong, Wu Aixiang, Wu Shunchuan, et al. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022,44(1):11-25.

[4] 刘哲明.金属矿深井充填管道系统失效模式及维护策略研究[D].西安:西安建筑科技大学,2022.
Liu Zheming. Study on failure mode and maintenance strategy of filling pipeline system in deep well of metal mine [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2022.

[5] 孙永茂,张海明,黄明杰,等.张庄矿充填钻孔磨损分析及应对措施[J].现代矿业,2021,37(10):247-248+274.
Sun Yongmao, Zhang Haiming, Huang Mingjie, et al. Wear analysis and countermeasures of filling borehole in Zhangzhuang mine[J]. Modern Mining,2021,37(10):247-248+274.

[6] 宋红岩.充填管道直角弯头磨损特性及减磨措施研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2023.
Song Hongyan. Study on wear characteristics and wear reduction measures of filling pipe right angle elbow[D]. Fuxin:Liaoning Technical University,2023.

[7] 赵一博,刘伟涛,胡秀瀚,等.基于环管试验的膏体充填管道磨损规律研究[J].有色金属(矿山部分),2025,77(3):119-124.
Zhao Yibo, Liu Weitao, Hu Xiuhan, et al. Research on pipeline wear patterns in cemented paste backfill based on looped pipeline test [J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2025,77(3):119-124.

[8] 庞建涛,李树建,石勇,等.粗骨料充填输送管道阻力特性与冲蚀磨损研究[J].矿业研究与开发,2024,44(12):53-59.
Pang Jiantao, Li Shujian, Shi Yong, et al. Research on resistance characteristics and erosion wear of coarse aggregate filling transportation pipeline[J]. Mining Research and Development,2024,44(12):53-59.

[9] 王小林,张润,邱征,等.金属矿山高浓度充填管道磨损规律与防控技术[J].金属矿山,2024(6):181-190.
Wang Xiaolin, Zhang Run, Qiu Zheng, et al. Wear law and prevention and control technology of high concentration filling pipeline in metal mine[J]. Metal Mine, 2024(6): 181-190.

[10] 陈鑫政,蒋合国,杨小聪,等.复合骨料膏体充填料浆管道输送阻力及其压力监测研究[J].中国矿业,2025,34(4):107-115.
Chen Xinzheng, Jiang Heguo, Yang Xiaocong, et al. Research on flowing resistance and pressure monitoring in conveying pipeline of paste filling slurry with composite aggregate[J]. China Mining Magazine,2025,34(4):107-115.

[11] 张振华,杜兆文,陈学华.基于 DEMATEL-ISM 的深部矿山充填管道磨损风险影响因素分析[J].矿业研究与开发,2025,45(2):9-16.
Zhang Zhenhua, Du Zhaowen, Chen Xuehua. Analysis on influencing factors of filling pipelines wearing in deep mine based on DEMATEL-ISM [J]. Mining Research and Development,2025,45(2):9-16.

[12] 周海龙.多因素综合作用的充填料浆管输阻力与冲蚀磨损规律研究[D].长沙:中南大学,2023.
Zhou Hailong. Study on the pattern of resistance loss and erosion wear in slurry pipeline transport caused by the combined effects of multiple factors[D]. Changsha:Central South University,2023.

[13] 王小林.掺粗骨料高浓度充填自流输送平直管道磨损规律[D].北京:北京科技大学,2023.
Wang Xiaolin. Wear law of horizontal straight pipe for the transport of high concentration backfill containing coarse aggregate by gravity[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing,2023.

[14] 王小林,郭进平,吴爱祥,等.基于骨料运移的高浓度充填管道磨损机制[J].中国有色金属学报,2024,34(6):2099-2111.
Wang Xiaolin, Guo Jinping, Wu Aixiang, et al. Wear mechanism of high-concentration filling pipeline based on aggregate migration[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2024,34(6):2099-2111.

[15] 甘德清,孙海宽,刘志义,等.金属矿山充填料浆管道输送理论研究 20 a 进展与展望[J].金属矿山,2025(1):9-26.
Gan Deqing, Sun Haikuan, Liu Zhiyi, et al. Research progress and prospects of cemented tailings backfill slurry pipeline transport theory in meta mine for 20 years[J]. Metal Mine,2025(1):9-26.

[16] 常英杰,吴爱祥,阮竹恩,等.含粗骨料膏体输送管道磨损机理及参数优化[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(1):307-316.
Chang Yingjie, Wu Aixiang, Ruan Zhuen, et al. Wear mechanism and parameters optimization of coarse aggregate-containing paste transport pipes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2024,55(1):307-316.

[17] 陈阳.充填管道冲蚀磨损数值模拟与风险评估研究[D].大连:大连交通大学,2022.
Chen Yang. Numerical simulation and risk assessment of erosion wear of filling pipes[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University,2022.

[18] 刘云迪.深海采矿弯曲非金属柔性管内衬层磨损特性研究[D].北京:中国石油大学(北京),2023.
Liu Yundi. Research on lining wear characteristics of curved non-metallic flexible pipeline in deep-sea mining [D]. Beijing:China University of Petroleum, Beijing,2023.

[19] 肖琦琨,马军,郭凯,等.基于 DDPM-RSM 的浆体管道冲蚀磨损数值模拟研究[C]//第 35 届中国过程控制会议论文集.北京:中国自动化学会过程控制专业委员会,2024:1401-1402.

Xiao Qikun, Ma Jun, Guo Kai, et al. Numerical simulation of slurry pipeline erosion wear based on DDPM-RSM[C]// Proceedings of the 35th China Process Control Conference. Beijing: Process Control Professional Committee of China Automation Society, 2024: 1401-1402.

[20] 江科.基于RSM-BBD的充填管道磨损影响因素研究[J].采矿技术,2023,23(3):130-134.
Jiang Ke. Study on the influence factors of filling pipeline wear based on RSM-BBD[J]. Mining Technology, 2023, 23(3): 130-134.

[21] 曹俊锋,曹瑞锋.基于综合指数法的深井垂直充填管道磨损风险评价[J].采矿技术,2025,25(1):222-225.
Cao Junfeng, Cao Ruifeng. Wear risk assessment of vertical filling pipeline in deep mine based on comprehensive index method[J]. Mining Technology, 2025, 25(1): 222-225.

[22] 杨凯,黎梦圆.基于CFD-DEM耦合方法的矸石-粉煤灰充填料浆在竖直弯管中的磨损研究[J].煤矿安全,2023,54(12):116-122.
Yang Kai, Li Mengyuan. Research on wear of gangue-fly ash filling slurry in vertical bending pipe based on CFD-DEM coupling method[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(12): 116-122.

[23] 向韫.基于DEMATEL法的充填管道磨损风险评估可拓云模型[J].矿业研究与开发,2024,44(6):172-180.
Xiang Yun. Extension cloud model for risk assessment of filling pipeline wear based on DEMATEL method[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(6): 172-180.

[24] 沈家华.深井矿山膏体充填系统增阻减磨试验研究[J].黄金,2013,34(2):31-34.
Shen Jiahua. Experimental study on increasing resistance and reducing wear of paste filling system in deep mine[J]. Gold, 2013, 34(2): 31-34.

[25] 赵明.重介选煤厂管道的抗磨损技术应用分析[J].工程技术研究,2025,10(2):104-106.
Zhao Ming. Analysis on the application of anti-wear technology for pipelines in heavy medium coal preparation plant[J]. Engineering Technology Research, 2025, 10(2): 104-106.

[26] 耿立锋,郑伯坤,石勇.线性非线性测度函数的充填管道设备磨损等级评价[J].采矿技术,2023,23(5):194-199.
Geng Lifeng, Zheng Bokun, Shi Yong. Evaluation of wear grade of filling pipeline equipment based on linear nonlinear measure function[J]. Mining Technology, 2023, 23(5): 194-199.