深井矿山高浓度充填料浆自流输送管道磨损研究

石宏伟[[1]](#footnote-0)、2，黄吉荣1，乔登攀2，滕高礼3，茶强华3，王 彬3

（1.驰宏科技工程股份有限公司 云南曲靖 655000 2.昆明理工大学 云南昆明 650093

3、驰宏锌锗股份有限公司 云南曲靖 655000）

**摘要：为研究深井矿山高浓度充填料浆自流输送管道磨损情况，从速度、动量和能量守恒角度分析了深井矿山自流输送充填料浆运动机理、管道破坏机理和管道磨损机理，得出了充填料浆特性、充填钻孔、管道材质、充填倍线与自流充填管道磨损影响因素之间的关系；通过ANSYS FLUENT三维数值模拟结果和矿山实际管壁监测结果，研究了水平管和弯管的管道易磨损位置，提出了深井矿山自流充填管道降低磨损技术方法，为矿山深井高浓度自流充填系统的持续、安全、稳定和高效运行提供了重要的技术支持。**

**关键词：深井矿山；自流充填；管道输送；管道磨损；数值模拟**

Study on the Abrasion of High Concentration Filling Slurry Self Flowing Pipeline in Deep Mine

Shi Hongwei, Huang Jirong, Qiao dengpan, Teng Gaoli, Cha Qianghua, Wang Bin

(1.Chihong Technology Engineering Co.,Ltd，Qujing Yunna 655000 China；2. Kunming University of technology 650093，Kunming Yunnan China；3. Chihong Zn& Ge Co.,Ltd，Qujing Yunnan 655000 China)

**Abstract:** In order to study the abrasion of the pipeline of gravity transportation of high concentration filling slurry in deep mine,From the point of view of conservation of velocity, momentum and energy, this paper analyzes the motion mechanism, pipeline failure mechanism and pipeline wear mechanism of the filling slurry in gravity transportation in deep mines.The relationship between the characteristics of filling slurry, filling hole, pipe material, filling fold and the factors influencing the wear of gravity filling pipe is obtained;Based on the 3D numerical simulation results of ANSYS fluent and the monitoring results of the actual pipe wall of the mine, this paper studies the position where the horizontal pipe and the bent pipe are easy to wear, and puts forward the technical method to reduce the wear of the gravity filling pipe in the deep mine, which provides important technical support for the continuous, safe, stable and efficient operation of the high concentration gravity filling system in the deep mine.

**Key words:** Deep mine; Artesian filling; Pipeline transportation; Pipeline wear; Numerical simulation

随着国家对安全环保意识的不断加强，在国家“绿水青山就是金山银山”的发展理念和政策导向下，充填采矿法因具有安全系数好、资源回收率高、环境破坏小、尾矿利用率高和能有效控制深部地压等优点[1-4]。近年来，在国内外矿山得到了广泛应用，也是未来采矿发展的主要方向[2]。但随着矿山开采深度不断加深，矿山充填管线不断变长、充填倍线逐步增大、充填管网系统越来越复杂[5]。如何顺利将高浓度充填料浆自流输送至深井矿山井下充填采场[6]，同时保证矿山充填系统具有较高的稳定性、安全性、可靠性和高效性成为目前许多矿山面临的技术瓶颈[6-12]。若在充填料浆管道输送过程中因管道磨损破裂而导致充填料浆跑浆、漏浆或管爆事故，将会给矿山造成重大安全事故和经济损失。

国内外许多专家学者对矿山充填自流充填管道磨损进行了研究。如：美国材料试验学会采用经典米勒试验测定料浆的米勒数，对其磨损性能进行评估[3-10]；威华塔斯兰得金矿[10]采用滚筒机进行了管道磨损试验；张德明[5]、张钦礼[6]、王贤来[7]、王新民[8]等人对深井充填钻孔和管道磨损机理和措施进行了研究。目前，对于矿山充填料浆输送管道磨损的研究主要以流变学理论为指导，对管道磨损因素及机理作定性分析，定量计算时采用经验公式计算[8-10]。但随计算机科学技术发展，计算流体力学软件在研究管道内流体输送特性中逐渐展现其优越性，通过计算机三维数值模拟软件可较直观表示和判断管道磨损部位[11-13]。

因此，本文以云南某矿山深井高浓度自流充填实践为基础，从充填料浆自流管道输送管爆机理、动量和能量守恒角度分析，采用ANSYS FLUENT软件进行三维数值模拟，结合矿山充填管道管壁实际监测结果对深井矿山自流充填管道磨损研究，分析充填管道磨损影响因素及其关系，提出有效降低管道磨损方法及措施，为矿山充填管道输送系统持续、稳定、安全、高效运行提供技术保障。

# 1． 矿山充填系统概况

云南某矿山充填系统自2006年开始使用，现矿山主要采用高浓度自流输送充填，年充填能力约18万m³。井下充填管网系统主要分为QL厂和KS厂两部分，现使用的充填钻孔有副3#钻孔、4#钻孔、5#钻孔。井下充填管线主要由钻孔、充填井和沿采准斜坡道布设的充填管组成，最长充填管线达到12000m左右，充填倍线在3～6。因此，矿山井下充填管网系统具有：管网系统复杂、充填管线长、部分管道高差大、不同采场的充填倍线变化较大等特点。矿山目前充填管材质主要采用碳素钢管、地泵锰钢管和聚乙烯管。

# 2． 深井矿山自流充填管道磨损机理

## 2.1 深井矿山自流充填料浆在管道输送的运动机理

在采用自流充填管道输送矿山，充填浆体进入竖直管路或钻孔后会自由落体运动，直至空气-砂浆交界面。根据文献[10]可建立高浓度充填料浆自由下落区浆体宏观运动状态区域如图1，自流输送料浆冲击磨损物理模型如图2，其中H为管口到砂浆-空气交界面高度；为充填料浆初始速度，为空气-砂浆交界面速度。

|  |  |
| --- | --- |
| 图1 充填料浆自由下落区Fig.1 Free falling area of filling slurry | 图2 自流输送料浆冲击磨损物理模型Fig2 Physical model of slurry impact wear in gravity conveying |

通过模型研究分析可发现：高浓度充填料浆在钻孔或管道内会有自由下落区主要做匀加速运动。当充填浆体流速达到某一值后充填钻孔（或竖直管道）内的充填料浆会收缩，甚至脱离充填钻孔孔壁（或竖直充填管道管壁）形成收缩流区；当充填料浆流速继续加大超过某一值时，充填料浆运动状态再次发生变化，会形成散射流区域，若充填骨料中含有机制砂、水淬渣或戈壁砂，其散射区的滚动或不连续跳跃运动现象越明显。

## 2.2 深井矿山自流输送充填管道破坏机理

根据深井矿山充填料浆管道输送过程中充填料浆流动特点，由于充填料浆流动不稳定性，在局部管道瞬时淤塞会引起上游充填管道内浆体产生压力波水击；或钻孔、斜井脚、斜坡道脚与水平充填管道连接处因速度变化形成余压后，可能易产生真空弥合水击现象，易产生气蚀，从而导致管道破坏。根据水击现象可建立水击波波速计算公式[10]：

 (1)

式中：为浆体体积压缩弹性模量Pa；浆体密度g/m³，为浆体体积浓度%；骨料弹性模量Pa；为管壁弹性模量Pa；管壁厚度mm；D为管道内径mm；管路纵向变形系数，泊松比。


## 2.3 深井矿山自流输送充填管道磨损机理

根据深井矿山充填料浆自流输送充填钻孔或管道磨损位置主要在空气-砂浆交界面，从动量与能量角度分析研究其磨损机理。

（1）深井矿山自流充填料浆空气-砂浆交界面料浆流速：

 （2）

（2）深井矿山自流充填料浆在空气-料浆交界面[8]动量有：

 （3）

（3）深井矿山自流充填料浆能量守恒方程推导出[10]：

 （4）

 （5）

1. 空气-料浆交界面高度[9]：

 （6）

式中：为充填管道横截面积m2；为修正系数；自流输送充填料浆流速m/s；Q自流输送料浆流量$m^{3}/s$，管壁单位面积耗能量J；充填料浆与钻孔（充填管）管壁有效接触面积的修正参数(0<a≤1)；充填料浆水力坡度；L水平管长度m。

通过方程及文献研究表明料浆的密度、流量、流速、料浆下落高度、与充填钻孔（充填管道）壁面有效接触面积与管道磨损程度成正比；与充填自理输送管径成反比。因此，在矿山实际充填设计中根据空气-料浆交界面高度合理设计充填钻孔长度和水平管道长度。即合理控制充填倍线，从而实现合理控制充填钻孔或竖直充填管道的目的。

# 3. 深井矿山自流充填管道磨损影响因素分析

## 3.1 充填料浆特性与自流充填管道磨损关系

根据云南某矿山十多年来的实际充填生产经验，充填料浆特性是影响自流输送充填管道磨损主要影响因素之一，对充填管道磨损速率起着至关重要作用。其主要表现为：

（1）深井矿山自流充填料浆浓度越大，充填管道磨损速率越大。

（2）充填骨料颗粒形状对管道磨损有较大影响，随骨料刚度、粒度和颗粒形状的增大，自流充填管道磨损速率呈增大趋势。近年矿山在充填骨料中添加机制砂代替水淬渣后，由于机制砂的颗粒形状、大小和刚度均大于水淬渣，虽提高了矿山充填体强度，但由于机制砂棱角尖锐、不规则颗粒较多对矿山充填管道磨损较严重。

（3）充填料浆的腐蚀性对自流充填管道磨蚀性也有较大影响，强酸或强碱充填料浆均会造成充填管道磨蚀。因此，在矿山实际充填中要全面掌握充填料浆的化学性能，优化充填配比，合理控制料浆PH值，充填料浆制备过程中要有效降低料浆中氧含量[9]，从而降低对自流充填管道腐蚀。

## 3.2 充填钻孔与自流充填管道磨损关系

根据云南某矿山1#、2#、副3#、4#和5#充填钻孔自流输送相关数据统计和分析研究可得出以下规律：

1. 充填钻孔布置方式、材质、偏斜率等对钻孔磨损有极大关系，钻孔偏斜率越大，钻孔磨损越严重。充填钻孔磨损主要集中在钻孔入口处、空气-料浆交界面和钻孔脚三处，尤其钻孔中下部空气-料浆交界面磨损最为严重，其余位置对钻孔磨损较小。
2. 矿山充填量对钻孔磨损呈线性相关，充填量越多对充填钻孔磨损越大。根据云南某矿山充填钻孔自流充填输送量达80万m³后，钻孔管道磨损破坏较为严重，钻孔基本无法正常投入使用。
3. 在采用自流充填管道输送矿山，满管输送对充填钻孔磨损要远小于不满管输送。自流输送时充填钻孔很难实现满管输送，只能采用变径管、合理控制钻孔长度和水平管距离实现接近满管流输送状态。
4. 随自流充填管道输送管道直径增大，自流充填管道磨损率减小。结合云南某矿山实际和国内外研究成果，垂直钻孔直径最优顺序排序[9]为：300mm、245mm、219mm、200mm、179mm、152mm。

## 3.3 充填管道材质参数与自流充填管道磨损关系

通过统计云南某矿山四种管道材质——高质量加厚无缝钢管（壁厚22mm）、塑钢耐磨管、地泵锰钢管、聚乙烯管，结合国内外充填管道材质研究结果表明：

1. 耐磨管抗耐磨性比普通管强，聚乙烯管安装比较轻便，但其抗压性和耐磨性较差，只适合在采场进路内及口部短期使用。同种材质充填管道壁厚越厚，其耐磨性越好，管道寿命也越长。
2. 深井矿山自流输送充填中流量相同时管径越大，充填管道磨损率越小。
3. 深井矿山自流输送充填管道弯管角度越大，充填管道磨损率就越大。相同条件下直管磨损率最小，15°弯管次之，90°弯管最大；

## 3.4 充填倍线与自流充填管道磨损关系

充填倍线对深井矿山自流充填管道磨损有较大影响。在深井自流充填管道总倍线或分段倍线太小，均容易导充填钻孔（或竖直充填管）管段中自由落体区域高度变大，从而导致自流充填料浆到达空气-料浆交界面时速度、散射流区域、弹状流区域过大，充填料浆中机制砂（水淬渣）会在散射区滚动或不连续跳跃运动，对充填钻孔或竖直充填管道管壁冲击力和管道输送压力越大、磨损越严重，减少充填管道寿命，甚至可能造成在充填钻孔（或管道）破坏。而充填倍线过大则会造成管道阻力过大，难以实现自流输送。

因此，在矿山实际充填要控制合理充填倍线，根据云南某矿山实际生产经验和国内外研究结果表明：自流充填合理充填倍线在4左右为最优。

# 4. ANSYS FLUENT三维数值模拟和实际管壁壁厚监测

云南某矿山目前主要采用自流充填输送，为较好研究矿山自流输送充填管道磨损情况，结合矿山充填实际充填管路，选择矿山QL厂1451m中段采场为模型构建。充填管线：地表充填制备站→副3#钻孔→2053m中段平巷道→4#钻孔→1751m中段平巷→2#斜井（29°）→1571m中段平巷→1571m中段至1451m中段斜坡道（9°）→1451m中段平巷→1451m中段（如图3），充填管线长度为4295m，充填倍线为3.95。用ANSYS FLUENT软件中前处理程序Gambit生成计算区域几何体，再进行有限元划分。本次主要采用配比为3.5:0.5:1.35（尾砂：机制砂：水泥）、浓度78%、料浆密度为2040kg/m³、料浆流速为1.0m/s和1.5m/s。最后输出计算，经过迭代883次后模型收敛。由于篇幅关系现主要附如下图4-图7。



图3 管道几何模型

Fig.3 Geometric model of pipeline

|  |  |
| --- | --- |
| 图4 4#钻孔口管道动压云图Fig.4 Contours of dynamic pressure at 4# drilling hole | 图5 4#钻孔脚处管道动压云图Fig.5 Contours of dynamic pressure at 4# drilling foot |
| 图6 1751m中段水平管动压云图Fig.6 Contours of dynamic pressure at 1751m middle horizontal pipe | 图7 4#钻孔脚处管道动压监测面Fig.7 Contours of dynamic pressure surface at 4# drilling foot |

表1 云南某矿山管道壁厚监测结果

Table.1 Wall thickness monitoring results of a mine pipeline in Yunnan

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **管道位置** | **管道** | **类型** | **型号** | **长度（m）** | **检测值（mm）** |
| **（管号）** | **日期** | **2018.2.12** | **2018.5.20** | **2019.3.30** | **2019.8.25** |
| 2053m中段 | 副3#钻孔（005） | 米管 | 150\*10 | 2.01 | 上 | 16.95 | 16.45 | 16.35 | 15.95 |
| 下 | 17.95 | 18.45 | 18.05 | 17.55 |
| 左 | 15.15 | 13.45 | 13.15 | 12.75 |
| 右 | 14.85 | 14.25 | 13.85 | 13.55 |
| 1751m中段 | 5#钻孔脚(002) | 弯管15° | 150\*10 | 0.35 | 上 | 20.95 | 20.35 | 20.55 | 20.05 |
| 下 | 20.31 | 19.75 | 18.25 | 17.85 |
| 左 | 21.55 | 19.95 | 18.95 | 18.75 |
| 右 | 21.45 | 20.25 | 20.35 | 17.25 |
| 1751m中段 | 5# 钻孔脚弯管(003) | 直管90° | 150\*13 | 6.98 | 上 | 21.95 | 21.95 | 21.85 | 19.92 |
| 下 | 21.95 | 17.15 | 18.35 | 20.15 |
| 左 | 21.55 | 21.65 | 20.95 | 19.74 |
| 右 | 21.15 | 19.95 | 19.75 | 20.95 |
| 1751m中段 | 水平管（004） | 直管 | 150\*10 | 3.98 | 上 | 20.85 | 19.65 | 19.45 | 19.05 |
| 下 | 21.25 | 20.95 | 20.85 | 19.85 |
| 左 | 21.55 | 21.25 | 21.15 | 20.75 |
| 右 | 20.95 | 19.95 | 19.75 | 19.45 |

由三维数值模拟研究结果和深井矿山自流充填管道管壁监测实际数据可得出：

1. 深井矿山自流充填管道输送中存在“边界效应”，在管壁处动压、总压和流速为零或接近零。水平管道在管道中心稍偏下区域存在“流核区”，该区域动压、总压和流速最大；沿着该区域向充填管道壁呈梯度减小趋势对称分布。结合充填管道壁厚监测数据表明：水平管道磨损位置主要在充填管道下部、左右两侧管壁，上部充填管道基本无磨损。因此，为延长充填管道寿命，可定期对充填管道进行翻转使用。
2. 深井矿山自流充填管道90°弯管和15°弯管中，自流充填料浆最大动压、总压和最大流速主要分布在弯管处靠近弯管圆心向外方向。因此，在该部分磨损最严重，且充填弯管角度越大，其磨损越严重；而充填弯管圆心向内方向自流磨损较小。表明深井矿山自流充填管弯管曲率半径越小，充填料浆流向越易发生急剧改变，深井自流充填料浆对管壁法向冲击力越大[10]，也较容易发生管壁穿孔现象。
3. 在深井矿山自流充填中随自流充填料浆质量浓度和流速增大，充填钻孔和管道管道磨损越大。

# 5 深井矿山自流充填降低管道磨损技术措施

深井矿山自流充填生产中如何合理有效降低自流充填管道磨损技术措施，一直是许多矿山面临的技术难题。根据国内外研究成果和云南某矿山长期实践经验，可采取以下措施达到降低深井矿山自流充填管道磨损目的。

（1）在深井矿山自流充填中尽可能实现自流满管流输送，可有效降低自流充填料浆对管道磨损。

（2）对于深井矿山自流输送充填倍线过小或压力过大的矿山，可采用降压输送系统或增阻输送系统，降低充填料浆对管壁的压力。同时，在充填管网系统设计时要合理控制充填倍线，将充填倍线控制在4左右为优。

（3）深井矿山自流充填水平管段管道的磨损底部管壁和左右管道管壁磨损为主，上部充填管道管壁基本无磨损，为延长充填管水平管道使用寿命，可定期对管道进行翻转使用。或可采取特制加厚耐磨材料、加大弯管曲率半径、采用丁字管或缓冲盒弯头等方式来减小管道磨损。

（4）对于深井矿山自流充填钻孔或竖直充填管道提高管道安装，有效提高充填钻孔或充填管道的非同心度，确保充填垂直度、同心度偏差在±0.5%。

（5）深井矿山在选择充填管道材质时，根据矿山自流充填实际情况合理选择充填管道材质，确保矿山安全输送又能低成本。

# 6. 结语

（1）根据云南某矿山深井自流充填实际情况，对深井矿山自流充填料浆在管道输送的运动机理、破坏机理和磨损机理进行了研究。通过高浓度自流充填料浆的速度、动量和能量守恒角度对管道磨损机理进行分析，得出深井矿山充填钻孔或竖直管道的最大磨损位置在空气-砂浆交界面。

（2）分析了深井矿山自流充填矿山的充填料浆特性、充填钻孔、充填管道材质参数、充填倍线与自流充填管道磨损关系，得出充填料浆骨料组成、化学性质、浓度和流速，充填钻孔和管道的安装质量、材质，自流充填倍线对充填管道磨损的关系。

（3）基于ANSYS FLUENT的深井矿山自流充填管道磨损研究和充填管壁实际监测值，研究了得出水平管道的管道磨损位置主要在下部，管壁左右管壁次之，上部最小；弯管的主要磨损位置在圆心向外侧。

（4）提出了有效降低深井矿山高浓度充填料浆自流充填管道磨损技术及方法。采用满管流输送、降压输送、合理控制充填倍线、提高充填钻孔及管道安装质量等方面，可有效实现降低充填管道磨损。

# 参考文献

[1]石宏伟,乔登攀,程纬华.基于FLUENT的全尾砂充填管道输送模拟试验与分析[J],黄金, 2015,36(5):32-35.

Shi Hongwei,Qiao dengpan,Cheng Weihua.Simulation test and analysis of full tailings filling pipeline transportation based on fluent [J],Gold, 2015,36 (5): 32-35

[2]乔登攀,程伟华,张磊等.现代采矿理念与充填采矿[J].有色金属科学与工程,2011,2(2):7−14.

Qiao dengpan, Cheng Weihua, Zhang Lei et al. Modern mining concept and filling mining [J]. Nonferrous Metals Science and engineering,2011,2(2):7−14

[3]石宏伟,黄吉荣,滕高礼等.高浓度分级尾砂充填料浆管输阻力影响因素研究与分析[J],有色金属(矿山部分),2019,71(6):104-109.

Shi Hongwei, Huang Jirong,Teng Gaoli, et al.Study and Analysis on the influencing factors of pipeline resistance of high concentration graded tailings filling slurry [J],Nonferro metals (mining Section),2019,71(6):104-109

[4]石宏伟,黄吉荣，乔登攀等.基于ANSYS FLUENT的超深井长距离膏体充填管道输送模拟研究[J].有色金属(矿山部分),2020,73(2):11-19.

Shi Hongwei,Huang Jirong,Qiao dengpan, et al.Simulation study of long-distance paste filling pipeline transportation in ultra deep wells based on ANSYS fluent[J]. Nonferro metals (mining Section),2020,73(2):11-19.

[5]张德明,王新民,郑晶晶等.深井充填钻孔内管道磨损机理及成因分析[J].武汉理工大学学报,2010,32(13):100−105.

Zhang Deming,Wang Xinmin,Zheng Jingjing, et al.Analysis of wear mechanism and cause of formation of pipeline in deep well filling borehole [J].Journal of Wuhan University of technology, 2010,32 (13): 100 − 105

[6]张钦礼,郑晶晶,王新民等.充填管道磨损形式及机理分析研究[J].金属矿山,2009,395(5):115-118.

Zhang Qinli, Zheng Jingjing, Wang Xinmin, et al. Analysis and Research on wear form and mechanism of filling pipeline[J].Metal mine, 2009395 (5): 115-118

[7]王新民,高 翔,荣 帅.深井充填管道磨损风险评估模型研究[J].有色金属工程,2019,9(6):84-90.

Wang Xinmin, Gao Xiang, Rong Shuai. Study on wear risk assessment model of deep well filling pipeline[J].Nonferrous metal engineering,2019,9 (6): 84-90

[8]王贤来,郑晶晶,张钦礼.充填钻孔内管道磨损的影响因素及保护措施[J].矿冶工程,2009,29(5):9-12．

Wang Xianlai,Zheng Jingjing,Zhang Qinli.Influencing factors and protective measures of pipe wear in filling borehole[J].Mining and Metallurgy Engineering,2009,29(5):9-12

[9]薛希龙,王新民,张钦礼.充填管道磨损风险评估的组合权重与可变模糊耦合模型[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(11):3752-3758.

Xue Xilong,Wang Xinmin,Zhang Qinli.Combined weight and variable fuzzy coupling model for wear risk assessment of filling pipeline [J].Journal of Central South University (NATURAL SCIENCE EDITION),2016,47 (11):3752-3758.

[10]张修香,乔登攀,孙宏生.废石−尾砂高浓度料浆管道输送特性模拟[J].中国有色金属学报. 2019.29(5):1092-1101.

Zhang Xiuxiang,Qiao dengpan, sun Hongsheng.Simulation of pipeline transportation characteristics of waste rock tailing high concentration slurry [J]. Chinese Journal of non ferrous metals. 2019.29(5):1092-1101.

[11]王新民.基于深井开采的充填材料与管输系统的研究[D].长沙：中南大学.2005,12.

Wang Xinmin.Research on filling material and pipeline transportation system based on deep well mining [D].Changsha:Central South University.2005,12.

[12]YU G B,YANG P,CHEN Z C,MEN R Y.Study on pipeline self-flowing transportation of cemented tailing fill slurry based on FLUENT software[J].Advanced Materials Research,2013,734/737:833−837.

[13]石宏伟,黄吉荣,沐兴旺等.毛坪矿下向水平分层胶结充填矩形进路顶板破坏失稳研究[J].矿业研究与开发,2019,39(12):16-21.

Shi Hongwei,Huang Jirong,Mu Xingwang, et al.Study on the failure and instability of the roof of Maoping coal mine with downward horizontal layer cemented filling rectangular approach[J].Mining research and development,2019,39(12):16-21.

1. 国家自然科学基金（No.51164016）；甘肃省科技重大专项计划项目（No.1203GKDC003）

作者简介：石宏伟（1989-），男，云南弥勒人，工程师，硕士研究生，主要从事金属矿山充填采矿法及工艺技术研究，836437681@qq.com。 [↑](#footnote-ref-0)