

基于海底开采的高倍线强阻力充填技术

李夕兵¹, 王丽红¹, 刘大勇²

1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083
2. 长沙迪迈数码科技股份有限公司, 长沙 410083

摘要 三山岛金矿新立矿区西南部矿体属海底开采,海底充填倍线达13,水平输送距离超过2000 m,属于高倍线强阻力输送充填料浆。为了解决充填料浆输送距离长、倍线高、输送阻力大等技术难题,进行了分级尾砂物化性能测试,充填骨料配比试验,管道输送阻力模拟等研究。研究结果表明,分级尾砂颗粒较粗,脱水性好,但是在输送过程中易沉降;添加细颗粒,能改善分级尾砂的流动性;推荐料浆配比为1:6~1:8,料浆输送质量分数为72%。通过充填料浆环管阻力输送试验和理论计算,得出料浆最大输送阻力为9MPa,除去自重水力压头,需加泵压6 MPa。工业应用结果表明,分级尾砂高倍线充填是可行的,为海底矿床安全开采提供了保障,实现了高倍线充填海底矿床。

关键词 海底开采;高倍线;强阻力;分级尾砂充填;环管试验

中图分类号 TD853.34

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.03.005

Tilling Technology with High Filling Times Line and Strong Resistance for the Undersea Mining

LI Xibing¹, WANG Lihong¹, LIU Dayong²

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
2. Changsha Digital Mine Infotech Company, Changsha 410083, China

Abstract The southwest orebody in Xinli district of Sanshandao gold mine is deep-sea metal deposit mining. The undersea backfilling is characterized by high filling times line and strong resistance to transport, because the filling line reaches up to 13 and the horizontal pipe is over 2000 m. The physical-chemical properties of classified tailings, proportion of slurry with classical tailings as aggregate, the resistance of pipeline transportation are studied to solve the technological problems of filling including long filling pipe, high filling timesline, and high resistance. The results indicate that classified tailings, which are good for dehydration as coarse particles and easily settle, are fit for backfilling after adding fine particles. The suggested dosage is 1:6-1:8 (cement to classified tailings) with mass fraction 72%. By the round-pipe test and theoretic calculation, the maximal transport resistance may reach 9 MPa, so a pumping pressure of 6 MPa is required besides the hydraulic pressure. The application in mine shows the feasibility of the technology, which can provide safety for deep sea mining in the future as well as realize high filling times line filling in deep sea mining.

Keywords undersea mining; high filling times line; strong resistance; filling with classified tailings; round-pipe test

由于海底金属矿床赋存条件复杂,多为倾斜或急倾斜厚大矿体,必须多年在同一区域开采,并受上部覆岩及海水影响,在开采过程中岩层沉降与突水机理既不同于海底煤矿开采,也不同于普通陆地开采^[1]。海底硬岩金属矿床不仅开采难度大,而且技术要求高^[2-3]。海底开采矿体与海水间仅靠隔水带隔离,大量、快速、高强度海底采矿与井下大量爆破势必引起海床变形与沉降,导致上覆岩层与顶板的变形相对集

中,在开采区域内出现不均匀沉降与变形,导致隔水层出现裂隙与错层,发生突水安全事故^[4-6]。因此,大规模海底开采存在的安全问题是矿山需要解决的首要问题。

山东黄金集团三山岛金矿新立矿区是中国第一个进行海底开采的硬岩矿山,国内仅进行过海下采煤^[7]。为了有效控制岩层变形、提高资源回收率,确保海下安全开采,矿山选用充填法作为海底开采的采矿方法。在矿山充填中,充填倍

收稿日期:2013-05-06;修回日期:2013-09-12

作者简介:李夕兵,教授,研究方向为岩石破裂与岩石动力学,电子信箱:xbli@mail.csu.edu.cn

引用格式:李夕兵,王丽红,刘大勇,等.基于海底开采的高倍线强阻力充填技术[J].科技导报,2014,32(3):39-43.

线反映了输送系统客观上所具有的输送能力,充填倍线值小,表示综合阻力小,料浆输送能力大;充填倍线值大,表示综合阻力大,料浆输送能力小^[8]。适宜自流输送的充填倍线值为4~6。新立矿区西南部矿床充填法开采过程中,充填倍线达13,井下水水平输送距离超过2000 m,属于高倍线强阻力输送充填料浆。

目前国内尚无此类矿山充填经验。本文针对新立矿区充填料浆输送距离长、充填倍线高、输送阻力大等特征展开研究,进行分级尾砂物理化学性能分析、充填配比试验、管道输送阻力测试等,研究海底开采的合理充填配比和料浆输送浓度,得出料浆最大输送阻力,实现高倍线充填海底矿床。

1 充填料物化性能评价

选用分级尾砂作为充填骨料,选厂产出的全尾砂经水力旋流器分级脱泥,粗尾砂储存在砂仓中,细粒级颗粒排至尾矿库。在充填试验之前需对分级尾砂的物化性能进行测试。

选厂尾砂分级的目的主要是解决采场充填时的脱水问题^[9]。根据国内外尾砂充填经验,一般要求尾砂的渗透系数不小于100 mm/h,尾砂分级界限一般为0.037 mm,个别矿山为0.027 mm^[10]。本次试验尾砂的比重为2.68 g/cm³,容重为1.36 t/m³,孔隙率为49.25%,20℃条件下尾砂的渗透系数为14.04 cm/h。分级尾砂的粒径组成和化学成分(化学成分主要为影响充填体强度的阳离子)列于表1和表2。

表1 分级尾砂粒径组成

Table 1 Granularity composition of classified tailings

充填料	各组粒径质量分数/%						$d(0.1)/\text{mm}$	$d(0.5)/\text{mm}$	$d(0.9)/\text{mm}$	不均匀系数
	>0.5 mm	0.50~0.30 mm	0.30~0.10 mm	0.10~0.05 mm	0.05~0.01 mm	<0.01 mm				
尾砂	9.29	24.92	44.88	9.92	4.55	5.37	0.0417	0.209	0.49	5.3

表2 分级尾砂主要化学成份(质量分数)测定结果

Table 2 Main chemical compositions of classified tailings

充填料	Al	Fe	K	Ca	Na	Mn	Pt	Zn	Ba	Cu
尾砂	3.787	1.211	1.944	0.576	0.181	0.075	0.038	0.037	0.027	0.025

2 分级尾砂胶结充填参数优化

对尾砂胶结充填体强度进行试验,在常温下制浆,试验模具采用标准三联式模具,规格为7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm,每一配比标制定9个试块,待试块初凝后进行刮模、脱模,进入养护箱养护,养护条件与井下温度和湿度一致。到规定龄期后采用微机控制全自动压力试验机进行试块的单轴抗压强度试验,试验结果见表3。

在试验结果分析的基础上,对充填参数进行了优化。

1) 随水泥含量减少,胶结体抗压强度显著降低。如质量分数为73%、配比1:6的充填试块内部结构比较致密,其14 d抗压强度能够达到4.01 MPa,而质量分数为73%、配比1:16的充填试块14 d抗压强度仅0.66 MPa。

2) 试块单轴抗压强度随养护时间的增加而增大。如各不同质量分数的14 d强度与7 d强度相比有较大幅度增长,而且质量分数越高,增长幅度越大。

3) 充填试块应力应变特性表现为弹塑性,达到强度极限破坏后,仍可维持相对较高的残余强度,如图1所示,这一特性对嗣后充填非常有利。

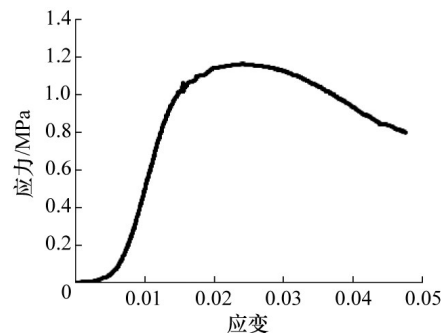


图1 试块应力应变曲线(No.D-3,7d)

Fig. 1 Stress and stain curve of sample (No.D-3,7d)

4) 充填体强度与浓度有关,料浆浓度越高,充填体强度越大。试验结果显示:将浆体质量分数由65%提高至73%,14 d单轴抗压强度可提高2~3倍,75%的充填试块强度与73%的充填试块的强度相似甚至低于其强度。但浓度过高料浆输送困难,根据充填体强度演化分析,充填料浆质量分数不宜超过73%。

5) 试验结果表明,当灰砂比为 1:16 时,不同质量分数的 14 d 强度均不能达到 1 MPa,因此当灰砂比为 1:16 时,不能作为充填胶面层。

6) 综合考虑试验结果与充填要求,推荐充填配比为 1:6~1:10,充填料浆质量分数为 70%~73%。

表 3 分级尾砂胶结充填单轴抗压强度试验结果

Table 3 Results of uniaxial compressive test of classified tailings backfilling

料浆质量分数/%	序号	配比	抗压强度/MPa		
			3 d	7 d	14 d
65	A-1	1:6	1.65	1.76	2.12
	A-2	1:8	0.49	0.79	1.84
	A-3	1:10	0.12	0.43	0.65
	A-4	1:12	0.11	0.27	0.80
	A-5	1:16	0.04	0.068	0.26
68	B-1	1:6	1.47	2.45	3.51
	B-2	1:8	0.35	0.71	1.42
	B-3	1:10	0.23	0.45	1.12
	B-4	1:12	0.11	0.21	0.81
	B-5	1:16	0.05	0.15	0.55
70	C-1	1:6	1.64	2.17	3.47
	C-2	1:8	0.89	1.46	2.68
	C-3	1:10	0.41	0.72	1.44
	C-4	1:12	0.16	0.19	0.48
	C-5	1:16	0.05	0.10	0.53
73	D-1	1:6	1.34	3.27	4.01
	D-2	1:8	0.67	1.91	2.37
	D-3	1:10	0.32	1.15	1.56
	D-4	1:12	0.14	1.08	1.40
	D-5	1:16	0.02	0.33	0.66
75	E-1	1:6	1.65	3.15	3.82
	E-2	1:8	0.69	2.05	2.40
	E-3	1:10	0.21	1.25	1.46
	E-4	1:12	0.14	0.84	1.29
	E-5	1:16	0.03	0.38	0.65

3 管道输送阻力试验

高倍线充填表示料浆输送综合阻力大,料浆输送能力小。所以在充填倍线很大的情况下,需要通过对管道输送阻力进行研究,以提高输送的综合能力。

3.1 管道阻力计算

3.1.1 经验公式计算

管道输送阻力包括料浆管道输送水平直管段沿程阻力和局部阻力。分级尾砂胶结充填料浆属于两相流,关于两相流的研究,国内外尚无成熟理论,对于固料水力输送沿程阻力计算多属经验公式或半经验公式,如金川公式、新汶公式、杜兰德公式等^[10,12]。本文根据矿山尾砂性质,依据金川公式

与长沙矿冶研究院公式得到管道水平输送沿程最大阻力计算管道的总阻力,计算式为

$$H=1.08a-b$$

式中, a 为充填料浆输送的水平直管段总阻力,MPa; b 为垂直高程差节省的压力势头,MPa。

充填配比 1:6 不同浓度充填料浆的管道输送阻力计算结果如图 2 所示。

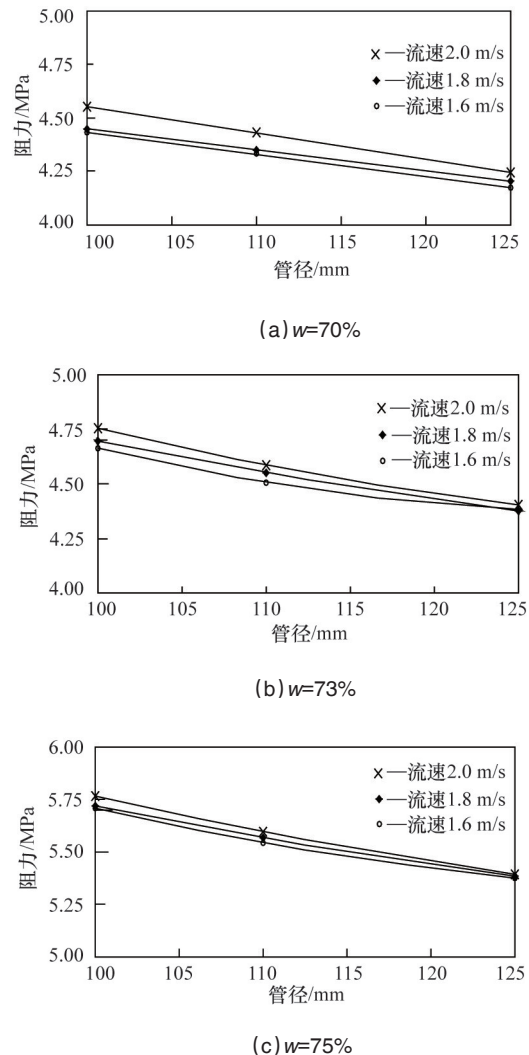


图 2 输送不同质量分数料浆管道阻力计算结果
Fig. 2 Resistance of pipeline transportation with different concentrations

计算结果表明,管道输送阻力与料浆的浓度、输送速度、管径相关,管道输送阻力与料浆浓度、流速成正比关系,与管道直径成反比关系。在输送过程中可适当降低料浆浓度、增加管道直径、降低流速(大于临界流速),以此减少管道阻力。通过经验公式计算,配比 1:6 的充填料浆最大输送阻力为 5.8 MPa。

3.1.2 充填倍线计算

以上结果为按经验公式计算所得,为了保证结算结果的

可靠性,对管道输送阻力再以按充填倍线进行计算。根据国内外矿山充填倍线可知,矿山采用自流输送时,合理的充填倍线为4~6^[13]。三山岛金矿采用自流输送,165 m的高程可以输送水平距离800~1000 m,因此,根据充填倍线为4来估算输送阻力。由流体力学计算可知,165 m高程的充填料浆约为3 MPa,输送2000 m,共需要9.09 MPa的输送压力。因此需外加泵压6.09 MPa。

最大输送阻力根据经验公式计算和充填倍线计算值相近,在6 MPa左右,表明这两种算法都可以为矿山充填料浆阻力输送提供参考依据。

3.2 环管试验

在以上理论计算的基础上,选用配比1:4,质量分数为78%和72%两组料浆进行环管试验。环管总长150 m(包括水平管、垂直管、弯管组成一个环路),选用内径为125 mm、管壁厚度为8 mm的普通无缝钢管。配套1台搅拌机与1台混凝土泵。混凝土泵最大理论输送量为90 m³/h,最大泵送压力为18 MPa。采用平面压力变送器测量管道不同位置点的压力,试验结果见表4。

表4 环管100 m压力损失

Table. 4 pressure loss of 100m

料浆质量分数/%	平均压差/MPa				
	输送时间/min			停泵后重新启动时间/min	
1%	14次	16次	18次	15	30
78	0.139	0.150	0.151	0.641	1.251
72	0.120	0.112	0.110	0.404	0.686

试验结果表明:

1) 在充填料浆质量分数为78%时,随着流速的增加,每100 m压力损失有所增加,但增加的幅度很小,折算2000 m后的压力损失约为4 MPa;

2) 充填料浆质量分数降低至72%后,每100 m的压力损失降低很大,且输送速度越快,压力损失越小,折算2000 m后的压力仅损失2 MPa;

3) 充填料浆质量浓度越高,停泵一段时间后重新启动,启动时的压差越大,这说明浓度越高,料浆的黏性越大,充填料浆在管道内发生了沉降,导致启动时的压力增大。

根据经验公式和充填倍线计算可得,充填料浆质量分数为70%~75%时输送2000 m,不考虑自重水头,需最大压力9 MPa。根据环管试验和计算可得,在外加泵为6 MPa时,输送管道压力分布见图3。

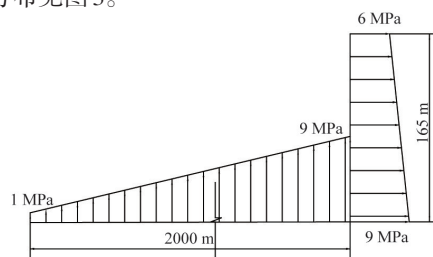


图3 管道压力分布

Fig. 3 Distribution of pipeline pressure

4 充填系统与工艺

4.1 充填系统

尾砂胶结充填系统的制备站设立在新立矿区海边。制备站主要包括尾砂供料线、水泥供料线、供水线、充填料浆制备及其输送线(图4)。

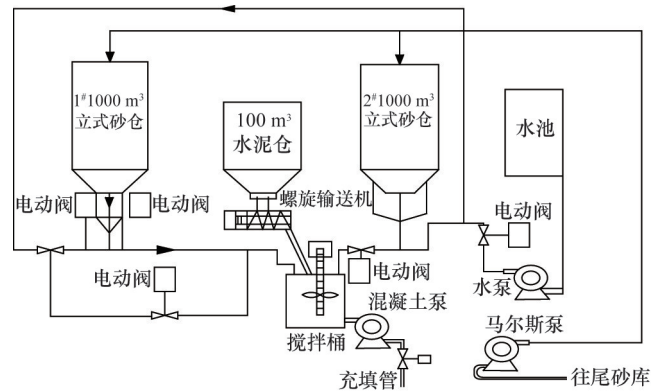


图4 分级尾砂充填系统流程示意

Fig. 4 classified tailings cemented backfill system and craftwork flow

充填系统由2个1000 m³立式砂仓、1个100 m³水泥仓和φ2000 mm×2100 mm立式搅拌桶构成。砂仓总高27.5 m,锥体部分高5 m,圆柱部分高18 m,采用自重放砂、风水联动造浆系统。选厂尾砂进行离心分级处理,通过1台油隔离泵经φ200钢管向砂仓供砂。搅拌桶采用单轴双叶轮搅拌,电机功率50 kW,转速980 r/min。水泥仓位于充填搅拌桶上方,水泥由矿山25 t水泥罐车直接从生产厂家运至充填站,用气压注入水泥仓。在搅拌桶上方安装有布袋式除尘器,对尾砂中黄药味气体和水泥粉进行净化处理。充填用水选用附近海水,Cl⁻的质量浓度为10 g/L,CO₃²⁻、SO₄²⁻钾钠等阳离子含量较高,且含有部分有机物质。

尾砂、水泥、海水通过搅拌桶充分搅拌,制备成流动性好的均质料浆。合格的充填料浆经泵送装置由充填钻孔泵送至井下采场。

4.2 采场充填工艺

结合矿山使用的进路充填法,对采场进行分级尾砂胶结充填。充填前,先架设管道、砌筑挡墙。充填料浆经上中段平巷、盘区斜坡道进入分段平巷、联络道,充入采空区。

5 结论

1) 分级尾砂颗粒较粗,渗透系数大,在采场能快速脱水,且充填体强度较高,是理想的充填骨料;但在泵送过程中,易于沉降,易发生堵管。工业应用中采用泵送配比为1:6~1:8、质量分数为72%的料浆,并添加细粒粉煤灰增加充填料浆中细颗粒部分,使分级尾砂粗颗粒能悬浮在料浆中,以此解决尾砂沉降的问题。

2) 充填料浆管道输送阻力研究表明,充填料浆管道输送

阻力与料浆流速、管径和料浆浓度相关。因此在工业应用中采用低流速(大于临界流速的10%)、大管径(稍大于标准管径)、高浓度(大于临界流态浓度)降低管道阻力。

3) 海底开采用分级尾砂胶结充填采空区,不仅解决了尾砂堆积表面占用土地,控制了环境污染,实现了海底矿床安全开采,而且提高了资源回收率,提高了矿山经济效益。

4) 基于海底开采的高倍线强阻力输送技术应用于三山岛金矿,成功回收了新立矿区西南部矿体,保证了海底矿床安全开采,为类似矿山高倍线充填提供了有益的借鉴。

参考文献(References)

- [1] 陈玉民,修国林. 海底大型金属矿床高效开采与安全保障技术研究[J]. 中国矿业, 2012(S1): 15-19.
Chen Yumin, Xiu Guolin. Research on technology of efficient mining and security in large- undersea metal deposit[J]. China Mining Magazine, 2012(S1): 15-19.
- [2] 赵国彦, 卢俊华, 刘志祥. 房柱交替上升式采矿工艺时空变换力学分析[J]. 矿冶工程, 2012(1): 1-4, 8.
Zhao Guoyan, Lu Junhua, Liu Zhixiang. Mechanical analysis of space-time transformation for alternate room-and-pillar mining with ascending backfill[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2012(1): 1-4, 8.
- [3] 李夕兵, 刘志祥, 彭康, 等. 金属矿滨海基岩开采岩石力学理论与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2010(10): 1945-1953.
Li Xibing, Liu Zhixiang, Peng Kang, et al. Theory and practice of rock mechanics related to exploitation of undersea metal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010(10): 1945-1953.
- [4] 马春德, 徐纪成, 陈枫. 大红山铁矿三维地应力场的测量及分布规律研究[J]. 金属矿山, 2007(8): 42-46.
Ma Chunde, Xu Jicheng, Chen Feng. Research on in- situ stress measurement and its distribution law in Dahongshan iron mine[J]. Metal Mine, 2007(8): 42-46.
- [5] Peng K, Li X, Wan C, et al. Safe mining technology of undersea metal mine[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012(3): 740-746.
- [6] 黎鸿. 基于时空效应的海下开采安全隔离层厚度研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
Li Hong. Study on the safety isolation layer thickness of under seabed mining based on the space-time effect theory[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [7] 彭康, 李夕兵, 彭述权, 等. 海底下框架式分层充填法开采中矿岩稳定性分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011(11): 3452-3458.
Peng Kang, Li Xibing, Peng Shuquan, et al. Ore-rock stability of frame stope hierarchical level filling mining method in seabed mining[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011(11): 3452-3458.
- [8] 周旭, 王佩勋. 大倍线管道自流输送胶结充填技术[J]. 金属矿山, 2011(8): 25-28.
Zhou Xu, Wang Peixun. Research on the gravity-flowed convey cemented filling technology with great times line pipeline[J]. Metal Mine, 2011(8): 25-28.
- [9] 孙恒虎, 黄玉诚, 杨宝贵. 当代胶结充填技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
Sun Henghu, Huang Yucheng, Yang Baogui. Modern cemen and filling technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.
- [10] Benzaazoua M, Ouellet J, Servant S. Cementitious backfill with high sulfur content physical, chemical, and mineralogical characterization[J]. Cement and Concrete Research, 1999(5): 719-725.
- [11] 王新民, 古德生, 张钦礼. 深井矿山充填理论与管道输送技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010.
Wang Xinmin, Gu Desheng, Zhang Qinli. Theory of backfilling activity and pipeline transportation technology of backfill in deep mines[M]. Changsha: Central South University press, 2010.
- [12] 杨超. 金属矿山尾矿高浓度管道输送技术研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2011.
Yang Chao. Technical research in high concentrations of tailings pipeline for metal mines[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2011.
- [13] 刘同友. 充填采矿技术与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
Liu Tongyou. Backfilling mining technology and application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.

(责任编辑 赵业玲)



《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映中国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域中国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。