

全尾砂胶结充填技术的研究与实践^①

何哲祥 谢开维 周爱民
(长沙矿山研究院, 长沙 410012)

摘 要 张马屯铁矿位于济南市东郊, 地表无处建尾矿库。为了解决这一难题, 作者通过一系列试验提出了全尾砂胶结充填方案, 即利用矿山选厂全尾砂作充填骨料, 利用活化搅拌、泵送和自流输送等工艺, 将高浓度全尾砂胶结充填料浆送入采空区, 形成稳定均质结构的充填体。实践证明, 该方案的实施使矿山实现采矿、选矿和充填综合平衡闭路循环作业和“无废”生产, 成为中国第一座不外排尾矿的矿山。

关键词 尾矿库 全尾砂 胶结充填 活化搅拌 炉渣

中图法分类号 TD853.34

张马屯铁矿始建于1966年, 使用分段空场采矿法开采。由于矿区位于济南市东郊, 为市区主要水源地, 地表系良田、村庄和工厂, 不允许塌陷, 采空区需及时进行充填处理。多年来, 矿山先后使用了水砂充填和干式充填处理空区, 留永久矿柱, 矿石回采率只有60%左右。1992年以后, 矿山已经面临充填材料短缺和因建选矿厂带来的尾矿排放两个技术难题, 因为受地表环境制约, 在距矿区10 km范围内找不到建尾矿库的合适场地。采用全尾砂胶结充填, 既解决尾矿库占地、建造和维护费用问题, 又解决矿山充填料来源。同时, 采用胶结充填后, 提高矿石回采率, 可实现矿山采矿、选矿、充填三者的综合平衡, 形成一个良性循环的闭路生产系统^[1-3]。

1 技术难点与对策

(1) 矿山受环境制约, 无处建尾矿库, 这意味着选厂尾砂必须100%用作充填料, 要达到如此高的尾砂利用率, 国内无经验可借鉴^[4]; 而国外的矿山如格隆德矿, 全尾砂中是包含有重介质选矿尾矿之类的粗颗粒^[5], 也不

能移植采用。

(2) 该矿矿石中的脉石含有绿石、矽卡岩等成分, 在选矿过程中, 这些成分即泥化, 造成尾矿颗粒极细, 尾矿中-200目($< 74 \mu\text{m}$)约占70%, 特别是-400目($< 38 \mu\text{m}$)的颗粒所占比例大, 达40%。如此细的尾矿给尾矿脱水、制备和充填体强度带来困难^[2]。

(3) 由于胶结充填的成本高, 过去仅在有色和黄金矿山应用, 国内铁矿还没有应用胶结充填法的先例, 如何降低充填成本是张马屯铁矿采用全尾砂胶结充填的又一难题。

(4) 充填体自立高度应达到60m, 整体性、稳固性好, 能满足相邻矿柱回采的要求, 实现间柱安全回采。

此项试验采用活化搅拌技术制备充填料浆, 依靠自流辅以泵压输送^[4], 采用细磨高炉水渣代替部分充填用水泥以降低充填成本^[6]。

2 充填材料与强度试验

2.1 全尾砂粒级组成

利用筛分法分析全尾砂的粒级组成, 结果见图1。从图中看出, $< 74 \mu\text{m}$ 颗粒累计百分比

① 收稿日期: 1997-07-05; 修回日期: 1998-05-28 何哲祥, 男, 36岁, 硕士, 高级工程师

约 65%，此值比实际的要低，因为受现场试验条件限制，仅采用筛分法分级，极细的颗粒（如 $< 43\text{ }\mu\text{m}$ ）仅部分能通过筛网。

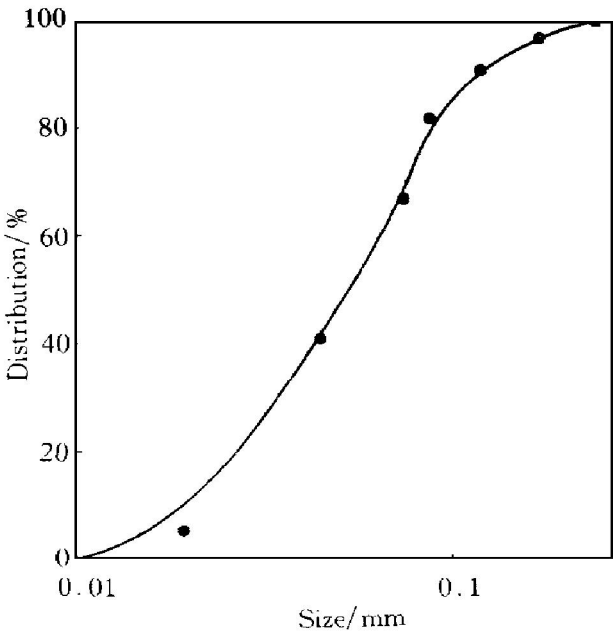


图 1 全尾砂粒级组成

Fig. 1 Cumulative particle size distribution curve for tailings at Zhangmatun

2.2 全尾砂胶结充填材料配比试验

按经验类比法和经验公式法^[7]确定张马屯铁矿的充填体强度为 1~ 2 MPa。为此设计了 1: 4, 1: 5, 1: 6, 和 1: 15 四组灰砂比; 并取料浆浓度为 54%~ 67%，构成 15 组不同材料配比的试验料浆。每组测试 60 d 和 130 d 两个龄期，试块采用 7. 07 cm × 7. 07 cm × 7. 07 cm 的金属试模浇注，试验结果见表 1。试块的单轴抗压强度与料浆浓度以及灰砂比之间的关系曲线分别见图 2 和图 3。

从图 2 和图 3 中可看出：(1) 在灰砂比不变时，随着浓度的增长，其强度增长较为显著；(2) 在浓度相同(60%) 时，随着灰砂比的增大，试块的强度明显增大。当灰砂比 1: 4, 浓度高于 60% 时，充填体强度能满足要求。

3 充填料浆制备系统

3. 1 充填料浆制备工艺

表 1 全尾砂胶结充填材料抗压强度

Table 1 Strength of consolidated total tailings backfill

Ratio of cement to tailings	Density / %	Axial compressive strength/ MPa	
		60 d	130 d
1: 4	54. 0	0. 98	1. 08
1: 4	55. 2	0. 87	1. 05
1: 4	57. 0	0. 97	1. 26
1: 4	60. 0	1. 40	1. 57
1: 4	61. 4	1. 70	1. 86
1: 4	64. 5	1. 80	2. 38
1: 5	54. 5	0. 73	0. 89
1: 5	60. 0	0. 85	0. 96
1: 5	62. 7	1. 32	1. 59
1: 5	64. 3	1. 48	1. 71
1: 6	60. 0	0. 76	0. 85
1: 6	63. 6	1. 10	1. 35
1: 6	65. 3	1. 19	1. 43
1: 15	59. 7	0. 08	0. 14
1: 15	67. 1	0. 24	0. 26

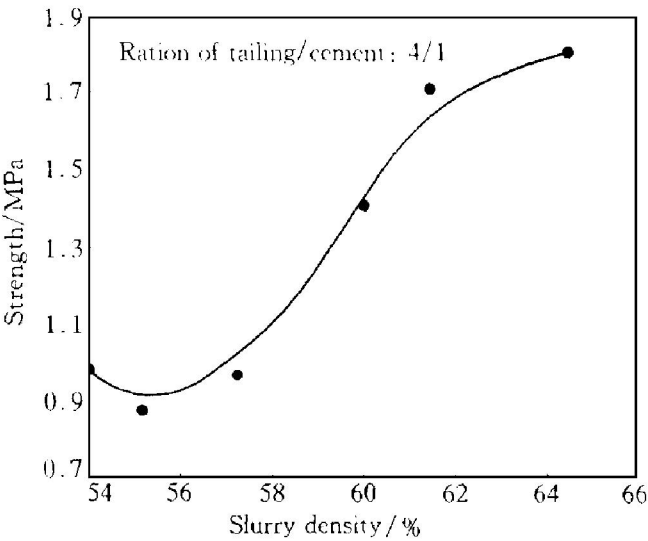


图 2 抗压强度与料浆浓度关系

Fig. 2 Relation between compressive strength and slurry density

充填料浆制备系统有四条生产线：尾砂输送线，水泥输送线，供水线和砂浆制备线。

(1) 尾砂输送线

尾砂用抓斗吊车从尾砂池抓运到尾砂贮料仓，然后由带破拱架的单台板振动放料机均匀地供给皮带输送机，尾砂经微电脑多功能电子皮带秤自动计量后进入双轴搅拌机。

(2) 水泥输送线

通过自备压缩空气的水泥罐车运至砂浆制备站,再自动卸入水泥贮仓,水泥经智能螺旋电子秤自动计量后,输送给螺旋输送机,螺旋输送机把水泥给入双轴搅拌机。

(3) 供水线

考虑到工业管网中水压波动,不利于对充填料浆浓度的严格控制,设计采用水泵房、高位水箱、用水设备的供水方案。水箱中的水通过给水管、涡街流量计自动计量和直行程电子式电动套调节阀自动调节后送到皮带机下料口进入双轴搅拌机。

(4) 砂浆制备线

全尾砂胶结料颗粒极细、浓度高、粘稠性大、搅拌非常困难,为了提高全尾砂胶结充填料的搅拌质量,设计采用双轴搅拌机和活化搅拌机两段搅拌工艺。尾砂、水泥、水经计量达到要求配比后,先经双轴搅拌机进行初步搅拌混合,再经活化搅拌机进行强力活化搅拌^[8]。经过两段搅拌后的充填料,通过充填管自流到井下混凝土泵站,再由混凝土泵输送到各个待充场。对于距离较近的采场,充填料通过充填管自流到井下采空区。

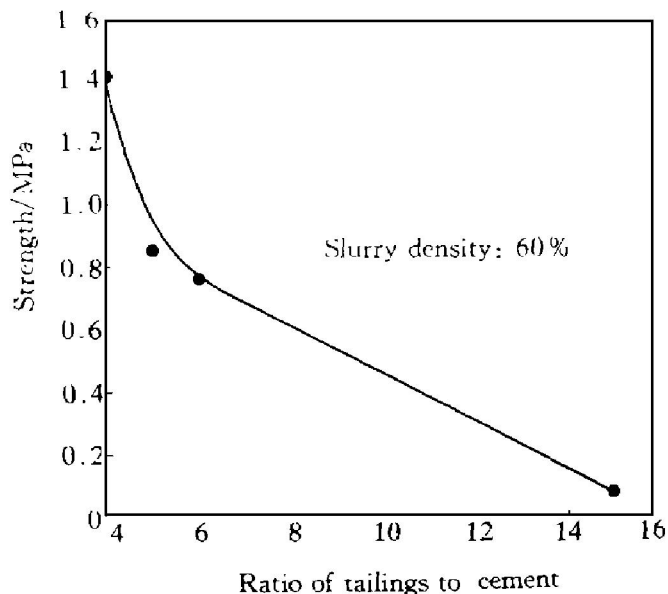


图3 抗压强度与砂灰比关系

Fig. 3 Relation between compressive strength and ratio of tailings to cement

3.2 高炉水渣细磨工艺

在设计该矿高炉水渣细磨站时,遵循下述

原则:(1)高炉水渣细磨采用湿磨方式,以球磨机和分级机为主要设备,并且利用矿方现有的格子型球磨机和高堰式单螺旋分级机,以节省投资;(2)细磨站将高炉水渣湿磨至-200目($< 74 \mu\text{m}$)占60%以上。

高炉水渣细磨工艺流程如下:炉渣用自卸汽车运至炉渣料仓,然后经振动给料机均匀卸入胶带输送机,经微电脑多功能电子皮带秤自动计量后,给入球磨机加水(水量由涡街流量计计量)进行磨细,经过细磨的水渣自流到螺旋分级机进行分级,粗颗粒由螺旋分级机返回到球磨机再磨,分级机溢流用渣浆泵送至双轴搅拌机,与尾砂及水泥混合。

4 工业试验

4.1 泵送充填工艺试验

试验采场定在该矿F306[#]采场。泵房位于井下-240m水平,泵实际承担的输送距离约为360m。试验期间,泵送充填空区4809m³,泵送平均充填能力29m³/h,显然此值偏低。原因之一是混凝土泵的受料斗容积太小,仅有0.6m³。为此,在混凝土泵受料斗前增设了一个4m³的缓冲槽。然而,此缓冲槽的容积仍不够,经常出现溢料现象。因此,在试验后期,只得降低充填站制备能力,保证充填站制备能力低于泵送能力。由于制浆能力有一定的波动范围,因而扼制了泵送充填能力。建议在推广应用,增大受料斗容积,并研究受料斗容积大带来的相关问题。

4.2 全尾砂胶结充填自流输送工艺试验

考虑到该矿部分采场离回填料制备站较近,依靠自流输送即可满足要求。选择-300m水平F309[#]矿房进行自流输送工艺试验。

(1) 充填挡墙

采用分段空场嗣后充填法的矿山,通往采空区的通道较多,该矿F309[#]采场就有34个通道需要构筑挡墙。因此,挡墙的构筑必须简单、可靠,而且成本低。在对各种挡墙综合分析比较后,设计了木挡墙及炉渣挡墙和红砖挡

墙等多种。根据试验结果,红砖挡墙封堵和泄水效果较好,在该矿得到了推广使用。

(2) 采场脱水

全尾砂胶结充填特征之一是其体积浓度高,因而,采场脱水量相对较少,但仍有一部分多余的水和部分洗管水及引路水进入采场,需要进行采场脱水。在考虑该矿脱水方式时,主要有三种:①波纹管脱水法;②充填挡墙脱水,该矿采用的分段空场法,需要构筑大量充填挡墙,因此,可充分利用这些挡墙设置的滤水窗脱水;③裂隙脱水,利用矿石和围岩的自然裂隙,可脱去部分充填水。由于 F309[#] 采场的特殊条件,安装波纹管极其困难,在充填期间,放弃了波纹管的应用。该采场的脱水主要依靠后两种方式脱水。

F309[#] 采场充填历时 8 个月,累计充填量近 3 万 m³。主要充填指标和充填成本分别见表 2 和表 3。

表 2 主要充填指标

Table 2 Main backfilling indexes		
Items	Unit	Indexes
Average fill capability	m ³ /h	51
Average cement consumption	kg/m ³	190.5
Average tailings consumption	kg/m ³	900
Average ratio of cement to tailings	—	1: 472
Average slurry density	%	59.6
Average strength after 180 days	MPa	1.42
Dry density of fill body	t/m ³	1.10

表 3 充填成本

Table 3 Backfill operation costs				
Items	Unit	Price / Yuan	Consumption	Cost / (Yuan·m ⁻³)
Cement	t	240	0.190	45.72
Electricity	kwh	0.50	5.59	2.80
Bulkhead	piece	933.1	0.00136	1.27
Auxiliary materials				8.32
Salary and addition				9.41
Shop cost				10.13
Total				77.65

从试验情况看,充填系统运行可靠,充填操作参数符合设计要求,平均充填能力为 51m³/h;充填料浆浓度高于和达到了防止胶结

充填料离析,使输送浆体呈均质流的最小输送浓度,即充填料浆属高浓度浆体。试验时观察到,充填料浆均匀、稳定性和流动性好,当浓度为 58%~64% 时,充填料浆呈现出宾汉流体特性。浓度高于 64% 后,充填料浆流动性变差,并呈现出一定的塑性,趋于膏体。因此,采用自流输送时,该矿结充填料浆的浓度应控制在 60% 左右,最高不得超过 64%。

4.3 高炉水渣细磨代替水泥试验

(1) 磨细炉渣粒度

根据室内试验结果^[9],细磨站磨细炉渣-200 目(<74 μm) 应占 60% 以上,因此,在工业试验时,着重考核-200 目(<74 μm) 含量,测试结果见表 4。

表 4 细磨炉渣粒度测试结果

Table 4 Results of test of ground slag (<74 μm)

No.	Percentage of ground slag			Density of overflow / %
	Sample 1	Sample 2	Average	
1	59	57	58	30
2	89	88	88.5	23
3	56	55	55.5	29
4	64	64.5	64.25	27
5	60		60	26
6	79	79.5	79.25	28
7	79	77	78.0	24

从表 4 看出,除-200 目(<74 μm) 接近 60% 的两个样品外,其余样品-200 目(<74 μm) 均超过 60%。在-200 目(<74 μm) 含量低于 60% 的两批样中,细磨站分级机溢流浓度较高,因此,在生产中控制细磨加水量,保证分级机溢流浓度在 25% 左右。

(2) 高炉水渣代替水泥比例

试验时,一种方法是直接从细磨站取样,在实验室将取回的炉渣浆分别按水渣代替 50%、60% 和 70% 的水泥比例与水泥、尾砂配制充填料浆,再浇灌 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm 标准试模;另一种方法是取炉渣浆与尾砂和水泥混合后的料浆,然后浇模。两种方法配制的充填料试块抗压强度测试结果见表 5。从表 5 看出,按浓度 61%,水渣代替水泥 50%、

60% 和 70% 配制的充填料 28 d 龄期抗压强度分别为 1.51, 1.11 和 0.84 MPa。即抗压强度随着炉渣用量的增加而降低, 最高强度是在炉渣代替水泥 50% 时出现, 此结果比室内试验结果略低。

表 5 炉渣充填料试块抗压强度

Table 5 Strength of backfill added slag					
Ratio of fill by cement, slag and tailings			Density / %	Strength after 28 d/ MPa	Proportion of slag/ %
0.5	0.5	3.75	61	1.51	50
0.4	0.6	3.75	61	1.11	60
0.3	0.7	3.75	61	0.84	70
0.49	0.51	4.69	56.1	0.68	51
0.67	0.33	4.41	56.5	0.63	33
0.62	0.38	3.96	59.1	1.57	38
0.53	0.47	4.41	57.7	0.71	47
0.64	0.36	4.57	57.9	0.48	36

另一种取样方法的试块强度、料浆浓度和水渣代替水泥比例均变化较大(见表 5 中 48# 试块), 但平均 28 d 龄期抗压强度达 0.625 MPa(删除 6# 试块的 1.57 MPa), 高于 F309# 采场 28 d 龄期抗压强度平均值。根据此试验结果, 建议生产中用高炉水渣代替水泥 40% ~ 50%。

5 充填体稳定性检验及其评价

F309# 采场西侧的 10# 矿柱采完后, 采场充填体暴露面积达 1 200 m² 以上, 充填体暴露高度超过 55 m。通过肉眼观察到: ①充填体自立性和稳定性良好, 在矿柱回采过程中, 尽管受爆破振动的影响, 但充填体依然保持完整, 部分暴露面呈光滑的平面。②在矿柱回采过程中, 仅仅发现矿石中有少量充填料, 充填体未发生垮塌现象。充填平均单位水泥耗量为 190.5 kg/m³, 在此水泥耗量条件下, 能够获得均质结构、整体性好的充填体, 满足矿柱安全有效的回采要求、对于降低水泥耗量、节省生产成本, 具有重要意义, 可为其他类似矿山借鉴。同时, 在低水泥耗量和低强度条件下, 充填体能够满足生产要求, 保证矿柱安全有效地

回采, 对于充填体力学的理论研究与发展具有重要的价值。

6 结论

全尾砂胶结充填技术研究, 利用张马屯铁矿选厂全尾砂作充填骨料, 利用细磨高炉水渣代替部分水泥, 采用强力活化搅拌技术制备充填料浆, 以管道自流输送和泵送工艺将高浓度全尾砂胶结充填料浆送入采空区, 形成稳定均质结构的充填体, 支护岩层, 实现了安全有效的回采矿柱。选厂尾砂利用率 100%, 矿山实现了采、选、充闭路循环作业和“无废”生产, 也解决了困扰矿山 20 多年的选厂建设问题。该项技术的试验成功, 使张马屯铁矿成为国内第一座不建尾矿库、不外排尾矿的矿山, 为我国矿山环境规划和治理提供了宝贵经验。同时, 利用细磨高炉水渣在充填中代替部分水泥, 大幅度降低水泥耗量, 填补了国内空白, 并开创了我国铁矿山合理使用胶结充填采矿法的先例。该充填工艺已在张马屯铁矿推广应用, 年经济效益超过 1 300 万元。

REFERENCES

1 He Zhexiang(何哲祥). In: Proceedings of Symposium on Technique & Equipment of Mining with Backfill(充填采矿法工艺设备学术会论文专辑). Beijing: China Nonferrous Metal society, 1994: 59–61.

2 Yang Genxiang(杨根祥). China Mining Magazine(中国矿业), 1995, 3: 40–44.

3 Seppanen Pantti. Transactions of the Institution of Mining & Metallurgy, Section A: Mining Industry, 1995, 104(9/12): A178–183.

4 Yin Weinong(尹尉农) and Liu Nengguo(刘能国). Quarterly of Changsha Institute of Mining Research(长沙矿山研究院季刊), 1992, 2: 1–7.

5 Ma Yongbin(马永彬) and Huang Pinchao(黄品超). Nonferrous Metallurgy Design & Research(有色冶金设计与研究), 1991, 2: 65–71.

- 6 Chen Zhongxuan(陈仲宣). Nonferrous Mine(有色矿山), 1991, 6: 15– 22.
- 7 Cai Sijing(蔡嗣经). Basic Mechanics on Mine Backfill(矿山充填力学基础). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994: 201– 213.
- 8 Yin Weinong(尹尉农) and He Zhexiang(何哲祥). Quarterly of Changsha Institute of Mining Research(长沙矿山研究院季刊), 1994, 4: 29– 33.
- 9 He Zhexiang(何哲祥) and Xie Kaiwei(谢开维). Mining R&D(矿业研究与开发), 1995, 4: 15– 1.

RESEARCH AND PRACTICE OF TOTAL TAILINGS BACKFILLING

He Zhexiang, Xie Kaiwei and Zhou Aimin

Changsha Institute of Mining Research, Changsha 410012, P. R. China

ABSTRACT Zhangmatun Iron Mine is situated in the suburbs of Jinan municipality, Shandong. Because of surface environment constraints, no suitable site can be found to build tailings dams; however the utilization of consolidated tailings backfilling would solve not only the disposal of mineral processing waste, but also the resource of backfilling materials as well as the maximization of ore recovery for the mine. Therefore total tailings backfilling technology, which used blast furnace slag as cement and activating mixing and pump delivery techniques as well, have been developed and reported in the paper. Besides, their application at Zhangmatun Mine was also described.

Key words tailings dam total tailings consolidated backfill activating mixing slag

(编辑 何学锋)