

我国大型贫铁矿充填法开采 关键技术与发展方向

杨志强^{1,2}, 高谦¹, 蔡美峰¹, 吴爱祥¹

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737100)

摘要:我国钢铁工业快速发展对铁矿石需求迅速增长。我国是世界第4大铁矿资源国,但由于矿石品位低,采矿技术条件差,开采难度大,一直没有得到充分的开发利用,导致铁矿石对外依存度高达70%,严重影响我国铁矿工业战略发展和企业的经济效益。开发国内资源是我国在“十二五”铁矿资源开发的战略决策。为了保护矿山生态环境,我国在建的8座千万吨级矿山均采用充填法开采。因此,大型贫铁矿充填采矿研究现状、关键技术以及发展方向成为人们关注的问题。本文首先概述近20年来我国铁矿充填采矿技术的发展水平、应用现状以及研究成果。然后,指出我国大型铁矿品位低和“三下”矿床是我国铁矿资源的特点。由此明确了大型贫铁矿床安全高效和无废开采所面临的关键技术难题,阐明了我国大型铁矿充填法开采初步研究成果。最后,指明了大型贫铁矿充填采矿技术的发展方向,为我国贫矿资源开发研究提供参考。

关键词:大型贫铁矿;充填法开采;关键技术;研究成果;发展方向

中图分类号:TD853.34 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2015)01-0038-08

Key technology and developmental direction of the filling mining for large lean ore deposits in China

YANG Zhiqiang^{1,2}, GAO Qian¹, CAI Meifeng¹, WU Aixiang¹

(1. Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mine, Ministry of Education,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Jinchuan Group Co. Ltd., Jinchuan 737100, China)

Abstract: On account of the rapid development of iron and steel industry, the demand for iron ore grows rapidly in China, which is the world's fourth big iron ore resource country. However, the resource development is limited, because the ore grade is lower and the mining technical conditions are poorer, so that the iron ore external dependence is as high as 70%, which will affect the development of iron and steel industry. The development of domestic resources is the strategic decision of China's "Twelfth Five-Year Plan". In order to protect the mine's ecological environment, eight mines with the production capacity of ten million tons which are under construction have adopted the filling mining method. So it has become the focus for mining designers to research on the status quo, the key technology and the developmental direction. This paper first summarizes the development level, application status and research progress on the filling mining technology of iron mines in recent twenty years. Then it points out the features of the iron deposits in China which ore grade is lower and ore deposits are beneath the water, the roads and the buildings. Based on the mining technology, the key technical problems to safe and high efficient mining for the large lean iron ore deposits are given. Finally it suggests the developmental direction of filling mining technology for large lean ore, which provides the reference for the researches of lean ore resources development in the future.

Key words: large lean ore; filling mining; key technology; research result; developmental direction

收稿日期:2014-04-23

基金项目:国家高技术研究发展计划资助项目(SS2012AA062405)

通信作者:杨志强(1957-),男,山西万荣人,博士,教授级高级工程师,博士生导师,研究方向:充填采矿安全与管理及固体废弃物资源化综合利用等。E-mail: YZQ@jnmcc.com

铁矿石是钢铁工业的重要原料.近10多年来,我国铁矿石产量稳居世界第一.2010年我国铁矿石产量 10.7×10^8 t,2011年产量 13.27×10^8 t,创历史新高.尽管如此,我国自产矿石仍不能满足钢铁工业快速发展的需要,每年不得不大量进口铁矿石.2010年我国进口铁矿石 6.18×10^8 t,2011年增加到 6.86×10^8 t,占世界铁矿石海运贸易量的60%以上.由于我国对矿价没有话语权一直受制于人.2010年进口铁矿石平均到岸价暴涨到128.38美元/t,比2009年多300亿美元;2011年又增加到163.83美元/t,比2010年增加242亿美元^[1].高价进口铁矿石不仅给我国钢铁企业造成重大的经济损失,而且还使钢铁工业发展依赖于国外矿石生产寡头.为了改变我国铁矿石供给的被动局面,减小对国外资源的依赖度,有必要加大我国铁矿资源勘探和开采力度,从而建立我国铁矿资源战略保障系统.

我国铁矿资源丰富,已探明铁矿储量位居世界第3位.在“十一五”期间新查明的铁矿石资源超过 70×10^8 t.到2005年底,我国保有铁矿资源总量达到 727×10^8 t,主要分布在河北冀东和邯邢、辽宁鞍山和本溪、安徽霍邱和马鞍山、山东济宁和莱芜等几大矿区.已查明大于 10×10^8 t的特大型矿床有10处, $1 \times 10^8 \sim 10 \times 10^8$ t的大型矿床有99处.因此,开发利用我国的铁矿资源,走综合利用国内和国外2种铁矿资源之路,是我国钢铁工业发展的战略方针^[2].

复杂难采贫铁矿床是我国铁矿资源开发的主要特点.开采贫铁矿床不仅排放出大量的废石、废渣、废水和废气等废弃物,而崩落采矿必将导致地表沉陷,植被破坏,河流断流,农田破坏,给矿山生态环境带来巨大的负面影响.同时矿山开采还诱发山体滑坡、空区塌陷和泥石流等地质灾害,严重威胁人民财产和生命安全.据统计,我国矿业建设与生产用地达到 1.35×10^4 km²,采矿占用和破坏土地达到33 000 km²,地表塌陷面积达到4 300 km²,排放固体废弃物达到 353.3×10^8 t,仅2006~2008年采矿诱发的矿山地质灾害达到5 000多次,造成直接经济损失超过70亿元人民币.为了保护环境 and 实现矿业可持续发展,中国矿业联合会与矿山企业共同发起了《绿色矿山公约》,提出了创建绿色矿山,推进绿色矿业发展,确定到2020年基本建成绿色矿山的总体目标.目前已有220家企业已经建成了国家级绿色矿山^[3].由于充填法采矿可将固体废弃物充填于地下,实现矿山无废或少废开采.由此可见,铁矿全尾砂充填法采矿是未来资源开发的主要途径.

1 铁矿充填法采矿技术研究现状

我国铁矿床贫矿多,富矿少,且铁矿床地质条件复杂,加之铁矿价值低,因此传统的铁矿资源开发主要采用生产规模大和采矿成本低的崩落法或空场法开采.1992年崩落法采出铁矿石量约占地下开采铁矿石的95%,其中分段崩落法约占49.8%,阶段矿房法占17%,浅孔留矿法占9.3%,房柱法占6.9%,全面法占3%,其他方法约占3%.随着我国资源开发对环境保护日趋重视以及面临众多的“三下”矿床,从20世纪末,我国已经开展了铁矿充填采矿技术与经济可行性的研究与探索^[4-6].1998年张马屯铁矿在我国首次采用充填法开采,并利用高炉水淬渣替代水泥,实现了全尾砂胶结充填,建成了我国第一个无废绿色开采矿山^[7,8].近10年来,尤其在“十二五”期间,随着我国对环境保护越加重视和严格管理,采矿界加大铁矿充填采矿技术研究力度^[9-13],先后建成一批铁矿充填法采矿的矿山.并针对不同铁矿山采矿技术条件,开展了以下几个方面的技术攻关和工程实践研究.

1.1 充填采矿方法与回采工艺

提高采矿生产规模和降低充填采矿成本是提高大型贫铁矿床充填法采矿经济效益的主要途径,因此,采用具有超大生产能力的采矿方法和回采工艺,是贫铁矿充填法设计的策略.因此,具有大规模生产能力的嗣后充填采矿方法为大多数铁矿山所应用.针对特定矿床的矿体产状、矿岩稳定性、矿体厚度以及埋藏深度,嗣后充填又通常分为分段嗣后和阶段嗣后充填2种采矿方法.我国的新桥硫铁矿和李楼铁矿采用分段凿岩和嗣后充填^[14,15],而宝山铁矿等则采用阶段凿岩和嗣后充填^[16-18].考虑到采掘设备和回采工艺,良山铁矿采用了机械化房柱阶段充填,而马庄铁矿则选择留矿的嗣后充填^[19,20].

1.2 采矿结构与胶结充填体强度优化设计

嗣后充填采矿通常将矿体划分矿房和矿柱两次回采.先采矿房,采用胶结充填;再采矿柱采用非胶结充填.因此,矿房矿柱参数以及胶结充填体强度直接影响充填采矿成本和采矿经济效益.为此开展了贫铁矿充填法采矿采场结构参数和充填体强度优化设计研究.王新民、杜国庆、李庆倩和陈赞成等人分别开展了矿房、矿柱等参数优化研究^[21-24],由此获得了满足采场稳定性要求的最优采场结构参数.一步矿房

胶结充填体设计强度取决于充填体自稳性以及充填采场的整体稳定性. 对于嗣后充填法采矿, 要求 28 d 的充填体强度大于 2.0 MPa, 但由于矿体采矿技术条件存在差异性, 因此不同矿山的采场稳定性对胶结充填体强度要求也不尽相同. 卢央泽等人针对李楼铁矿开展了充填体设计强度以及充填材料的优化配比研究, 由此确定了不小于 2.15 MPa 的一步矿房胶结充填体强度, 可以满足充填采场整体稳定性要求^[25].

1.3 铁矿全尾砂胶结充填采矿技术

由于尾砂粒度细, 含泥量高, 因此全尾砂胶结充填一直是充填采矿技术难题. 为此, 针对铁矿全尾砂胶结充填, 目前已经开展了广泛而深入研究. 康建华针对张马屯铁矿, 开展了全尾砂浆脱水浓密技术, 全尾砂浆制备工艺以及管道输送等关键技术研究^[26]. 王凤波介绍了马庄铁矿全尾砂胶结充填技术和工艺, 首次采用了胶固粉替代水泥胶凝材料的胶结充填法采矿, 从而降低了充填采矿成本, 提高了采矿效益, 每年节约充填成本达到 200 万元^[27]. 姜峰介绍了李楼大型铁矿全尾砂和分级尾砂 2 种充填技术的优缺点和技术经济效益的对比分析. 研究表明, 全尾砂胶结充填具有显著优势^[28]. 以水泥作为胶凝材料在东安铁矿和李楼铁矿中的应用结果表明, 全尾砂胶结充填体低, 需要采用较高的灰砂比才能达到充填体设计强度^[29,30]. 近年来, 针对铁矿全尾砂充填料, 北京科技大学与河北钢铁矿业公司合作, 开展了全尾砂新型充填胶凝材料的开发和应用研究, 已经取得显著成效. 开发的全尾砂新型充填胶凝材料与 32.5 水泥相比, 在相同条件下充填体强度提高到 1.5~2.0 倍, 由此显著降低了充填采矿成本, 已经在东凯矿业公司和河钢集团石人沟铁矿中推广应用^[31-47].

2 我国铁矿充填法采矿特点与关键技术

未来 10 年, 国内矿山将通过新建扩建、兼并重组等途径, 加快打造世界级矿山企业, 提高产业集中度. 在东北、华北、西北和华南等地区, 组建 6~8 个矿石产量规模达到 3000 万 t 以上的大型矿业集团; 以最具资源优势的鞍钢矿山为龙头, 形成 2×10^8 t 以上规模的特大型铁矿企业集团, 发挥龙头带动作用, 使国产矿比例达到 50% 以上, 结束原料供给高度依赖进口的历史. 根据发展规划, 我国在“十二五”期间新建 $1\ 000 \times 10^4$ t 级以上铁矿山有 8 座; 500×10^4 t 级以上铁矿山有 15 座; 200×10^4 t 级以上铁矿山有 20 座; 建成后我国国产铁矿石年产将达到 16×10^8 t.

2.1 我国铁矿资源与充填采矿特点

2.1.1 新开采铁矿品位低, 大多属“三下”矿床

我国铁矿资源主要特点矿石品位低, 平均品位仅为 30%, 低于世界铁矿石平均品位 11 个百分点. 大于 55% 的富铁矿仅占 2.5%. 同时大多为“三下”(建筑物下、水下和道路下)的难采矿床. 我国冀东、邯邢和霍邱等大型矿体均赋存于第四系含水层下. 含水层厚度从几十米到几百米不等, 且含水丰富.

2.1.2 新开采铁矿床储量丰富, 生产能力大

“十二五”期间已经投产的李楼铁矿充填采矿的生产能力达到 750×10^4 t/a. 正在建设和即将投产的河钢铁集团矿业公司田兴铁矿 $2\ 000 \times 10^4$ t/a, 常峪铁矿达到 450×10^4 t/a, 大贾庄铁矿 600×10^4 t/a. 开工建设的马城铁矿设计采矿生产能力达到 $2\ 500 \times 10^4$ t/a (已转交给首钢集团矿业公司, 修改为 $2\ 200 \times 10^4$ t/a). 周油坊铁矿 450×10^4 t/a, 张庄铁矿 500×10^4 t/a, 草楼铁矿 300×10^4 t/a. 正在规划设计建设中的西鞍山铁矿将达到 $3\ 000 \times 10^4$ t/a. 这些铁矿山均设计采用充填法开采.

2.1.3 新开采矿床对资源回收要求提高

随着我国铁矿资源开发日趋减少, 资源保有量越来越紧张, 大部分资源实现有偿使用, 因此充分回收矿产资源也是我国铁矿资源开发的发展趋势. 由于新开采矿床的铁矿品位较低, 降低矿石贫化率, 实现节能减排, 也是未来铁矿开采的必由之路.

2.2 铁矿充填法采矿中的关键技术

实现大型贫铁矿床安全、高效和充填法开采, 需要解决以下关键技术难题.

2.2.1 超大采场稳定性研究与优化设计与控制技术

提高大型矿床生产能力的关键在于提高矿山机械化采矿水平, 而超大采场空间是适应大型机械化设备应用的前提. 因此千万吨级大型充填矿山, 均采用超大采场进行采矿生产. 例如田兴铁矿一步矿房跨度 25 m, 长 50 m 和阶段高 100 m, 采场空区体积达到 12.5×10^4 m³, 而采场顶板暴露面积达到 1 250 m². 由此可见, 超大采场的稳定性与优化控制技术, 是实现阶段嗣后充填和二步矿柱回采的关键. 超大采场稳定性

不仅依赖于矿岩稳固条件、矿体埋深和原岩应力,还与采场布置、回采工艺以及采场支护技术密切相关。因此,超大采场的稳定性研究需要开展矿山工程地质和水文地质研究,揭示矿区采矿技术条件,评价矿岩质量和影响因素,在此基础上开展采矿优化设计。同时,采用物理模型和数值仿真技术,进一步开展矿体掘进、回采、充填等生产过程的仿真分析和稳定性预测,探索两步回采过程中围岩变形机理和失稳模式,提出合理的回采顺序和与之相匹配的充填体强度,从而确保超大采场的稳定性。

2.2.2 高强度低成本新型胶凝材料开发与应用技术

胶凝材料是充填采矿成本的重要组成部分,通常以水泥作为胶凝材料的全尾砂充填,不仅胶结充填体强度低,而且充填料浆粘度大,输送浓度低。因此要达到充填体设计强度,不得不增加水泥用量,从而提高了充填采矿成本,使得贫铁矿充填法采矿面临严峻的经济效益问题。针对大型贫铁矿床全尾砂充填料的物化特性,开发替代水泥的高强度和低成本新型充填胶凝材料,对于大型贫铁矿床充填法开采不仅至关重要,而且势在必行。

2.2.3 大型铁矿充填法开采充填优化控制技术

大型贫铁矿充填开采优化控制技术是实现三强(“强掘、强采和强充”)开采的关键技术,由此涉及高浓度料浆优化制备、充填系统精确控制和大流量料浆管道高效输送。

1)高浓度充填料浆优化配比技术研究。实现高浓度料浆充填,是提高充填体质量和降低采矿成本的主要途径。众所周知,充填体强度和料浆流变特性与胶凝材料、充填骨料以及胶砂比与料浆浓度密切相关。因此,高浓度料浆配比需要综合充填体强度和料浆输送特性进行综合分析与设计。针对新型充填胶凝材料和全尾砂充填骨料以及特定矿山的充填体设计强度,开展高浓度充填料浆配比优化设计,制备低成本和高强度的高浓度充填料浆。

2)高浓度充填料浆流变特性与流变参数研究。充填料浆的安全、可靠和大量流量管道输送,是实现大型贫铁矿床大规模生产的重要保证,高浓度料浆流变特性测试与减阻技术是确保管道输送的基础。针对大型贫铁矿床全尾砂充填材料和新型充填胶凝材料,研究不同胶砂比和不同浓度条件下的流变特性,揭示影响流变特性因素以及与充填倍线和输送量之间的关系,从而大流量管道输送阻力技术和减阻输送奠定基础。

3)全尾砂充填系统设计与优化控制技术。全尾砂浓缩和造浆是全尾砂充填又一关键技术。目前,广泛应用立式砂仓和风水联合造浆工艺。针对不同选矿尾砂的浓度、物化特性,进行超细全尾砂浆的快速浓缩、连续造浆和浓度控制技术,是高浓度全尾砂充填技术的关键。解决全尾砂浆的连续、稳定、安全和可靠的造浆,是实现铁矿全尾砂胶结充填的关键技术之一。

4)超大生产能力的制浆设备开发技术。对于大型贫铁矿床充填法开采,提高充填料浆的生产能力不仅是减少充填站数量,解决地表充填系统占地问题,而且也是减小充填倍线,提高高浓度输送的重要举措。

目前,国内充填料浆的制备能力一般在 $80 \sim 120 \text{ m}^3/\text{h}$,正在研究和开发 $180 \text{ m}^3/\text{h}$ 的制浆设备,而 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上的充填料浆生产能力设备还不多见。因此,研究和开发更大生产能力的制浆设备,对于大型贫铁矿的充填法开采也是亟待解决的关键技术难题之一。

2.2.4 采场安全监测与灾变风险预测预报技术

大型贫铁矿矿床安全、高效和无废环保开采,是贫铁资源开发利用的前提。要实现这一目标,不仅需要进行合理设计和回采工艺优化,而且更重要的需要对采矿过程的安全监测和风险控制。显然,采矿生产过程的安全监测和灾变风险预测预报与控制技术,也是确保大型贫铁矿床充填法安全开采的关键技术,包括采场生产过程中的安全监测和灾变失稳预测和整个采场的稳定性监测与地表岩移预测。

1)采矿生产过程的安全监测技术。对于阶段嗣后充填法采矿,整个采矿过程分为4个步骤:即回采矿房、胶结充填矿房、回采矿柱、非胶结充填矿柱。在回采过程中,不仅矿房和矿柱在回采过程中存在灾变失稳风险,而且在回采矿柱过程中,胶结充填体暴露面积随开采过程逐渐增大,因此也存在充填体的片冒和整体失稳风险。因此,有必要采用监测手段进行安全监测,确保采矿安全。

2)采场整体稳定性分析与地表预测技术。采场整体稳定性是实现地表岩移控制的必要条件,并非是充分条件。换句话说,即使整个采场的稳定,也不一定能够控制地表岩移在允许的范围内。这主要是由于超大充填体存在滞后充填、充填不接顶以及充填体本身的收缩变形,使得地表岩层移动超过地表建筑物允许范围,从而导致岩移破坏地表建筑。开展采场充填体和地表沉降观测,并根据监测到的信息,建立岩移预测

的数值模拟,进行不同开采水平的岩移预测,以便提前采取安全措施,对地表岩移进行有效控制,避免村庄不搬迁和农田不破坏,从而既实现资源开发,又保护了矿山环境的目标。

3 大型贫铁矿充填采矿技术研究成果

针对正在开发建设中的司家营田兴大型贫铁矿床,河北钢铁集团矿业有限公司,联合北京科技大学、中南大学、东北大学和马鞍山矿山研究院等科研院所,开展了大型贫铁矿床充填法开采的关键技术研究,由此获得了丰富的研究成果。限于篇幅所限,本文仅介绍采场结构参数优化和新型胶凝材料开发的研究成果。

3.1 采场结构参数优化研究成果

采矿优化设计是实现大型贫铁矿充填法开采的基础。为此,针对该矿的采矿技术条件和现有的地质信息,首先建立了矿床的三维地质模型,研究和评价了设计院提出的采矿设计方案和采场结构参数;然后,采用物理模型和数值仿真技术,以采矿效益为优化目标,以地表岩移作为约束条件,进行了采场结构参数的优化决策,从而获得了满足采矿要求的最优结构参数。最后,对所获得的采场优化设计方案,进行分析和研究,评价优化设计方案的可行性和可靠性,并进行阶段嗣后充填法开采过程中的安全预测和风险评价。综合上述研究,本研究所获得的主要成果有以下3个方面。

1) 揭示了田兴矿体品位分布规律以及采矿技术条件。通过建立的工程地质和水文地质模型以及矿床模型,研究揭示矿体品位的分布规律以及存在条件;揭示了矿床第四系地层透和隔水层位置与透水特性;通过地质钻孔建立的矿区工程地质模型,揭示了矿区矿岩地层特征与赋存条件,并根据钻孔的 RQD 信息,进行了矿区矿岩体的围岩分类,从而实现了整个矿床工程岩体的分类与稳定性评价。在此基础上,借助于强人经验和地质分类,确定了矿区的地应力分布特征。

2) 获得了2种回采方案的采场结构参数。针对设计院分别提出的对角回采方案和间隔回采方案,采用正交数值试验方法,建立了采场结构参数与地表岩移和矿石回收率之间的函数关系,并以盘区采矿经济效益为优化目标,以地表岩移和回采率为约束条件,建立了2种回采方案的优化模型。通过求解优化模型,由此获得了采场结构参数和胶结充填体强度指标。

3) 提出了适用于不同采矿技术条件的点柱回采方案。上述2种回采方案适用于厚度和矿岩稳固的采矿技术条件。考虑到上部矿体的矿岩稳固条件逐步变差,提出了盘区间留条形点柱的回采方案。并以盘区采矿经济效益为目标和地表岩移和采矿回收率为约束条件,进行采场结构参数和充填体强度优化决策,从而获得了适用于上部矿体开采的安全可靠的回采方案。

4) 优化设计方案的整体稳定性分析与风险预测。为了控制地表岩移,充填采场整体稳定性为必要条件。为此根据采场拟框架结构型式,进行了充填采场的稳定性分析和岩移可靠度,由此预测地表岩移风险,并针对预测结果,提出岩移控制措施,为矿山的采矿设计和风险控制提供理论依据。

3.2 新型胶凝材料开发研究成果

分别采用司家营和石人沟2个铁矿的全尾砂充填料,进行了119组胶砂试验,分别获得2种新型胶凝材料的最优配方,即1[#]和2[#]配方。采用1[#]材料配方进行了中试和现场试验,由此获得以下几点结论。

1) 无论是7,28还是90 d龄期,新型充填胶凝材料全尾砂试块强度与32.5水泥相比,全尾砂胶结试块强度之比均大于1,新型充填胶凝材料特性明显优于32.5水泥。

2) 胶砂比为1:5~1:20、浓度为66%~72%时,7 d龄期的2种胶凝材料强度之比最小值为1.07,最大值为3.93;28 d龄期最小值1.53,最大值为3.54;90 d龄期最小值为1.74,最大值为4.52。

3) 7 d龄期的2种胶凝材料强度最大值对应的胶砂比是1:10,砂浆浓度为66%;28 d龄期最大值对应的胶砂比为1:15,砂浆浓度为72%;90 d龄期最大值对应的胶砂比为1:20,砂浆浓度为68%。

4) 根据不同龄期的2种材料充填体强度最大值所对应的胶砂比和砂浆浓度可见,新型充填胶凝材料在低胶砂比的条件下(<1:10)性能更好。

5) 在低胶砂比(<1:10)的条件下,2种胶凝材料的强度之比的最大值随着龄期增加而提高。可见,新型充填胶凝材料的后期强度增长速率明显高于32.5水泥的增加速率。

6) 3种龄期的2种胶凝材料强度之比平均最大值为4.0,可见,新型充填胶凝材料比32.5水泥材料具有很高的优越性。

7)3 种龄期的 2 种胶凝材料强度之比平均最小值为 1.5. 可见,新型充填胶凝材料比 32.5 水泥材料相比,最不利的胶砂比也是水泥强度的 1.5 倍左右.

图 1 给出了新型充填胶凝材料和 32.5 水泥 2 种胶凝材料 90 d 的充填体强度随胶砂比的变化曲线. 图 2 显示了平均砂浆浓度为 69% 的 2 种胶凝材料全尾砂充填体强度随胶砂比的变化规律. 由此可以见:

- 1) 无论何种砂浆浓度,90 d 的全尾砂新型充填胶凝材料充填体强度远大于 32.5 水泥;
- 2) 新型充填胶凝材料全尾砂胶结充填体强度在低胶砂比 (<1:10) 条件下,其强度增长速率大于高胶砂比 (>1:10) 的增长速率;而 32.5 水泥胶凝材料则反之.
- 3) 90 d 的全尾砂新型充填胶凝材料充填体强度远高于 28 d 的全尾砂胶凝材料充填体强度. 由此表明,新型充填胶凝材料的后期强度仍在增加;
- 4) 新型充填胶凝材料全尾砂充填体强度在低胶砂比 (<1:10) 条件下,其强度的增加速率大于高胶砂比的增加速率;32.5 水泥胶凝材料则反之.
- 5) 在 (1:15 ~ 1:5) 的胶砂比范围内,新型充填胶凝材料的 7 d 强度大于或等于 32.5 水泥 90 d 的充填体强度.

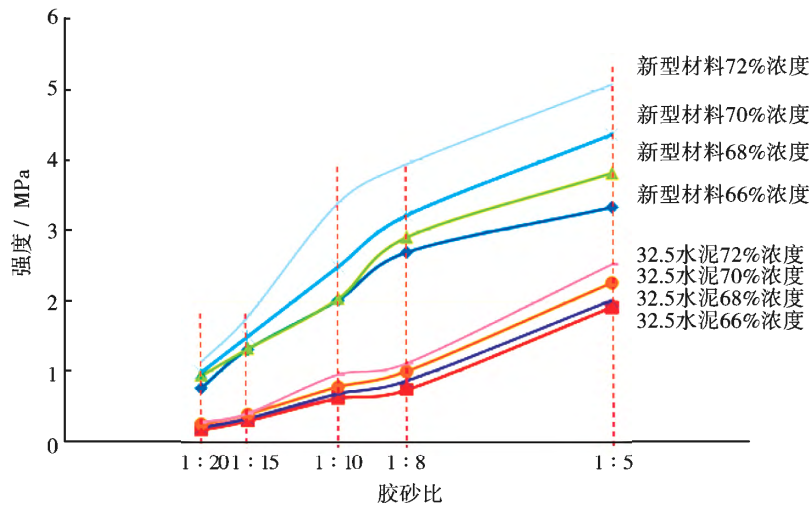


图 1 新型胶凝材料和水泥 2 种材料 90 d 全尾砂充填体强度随胶砂比变化规律

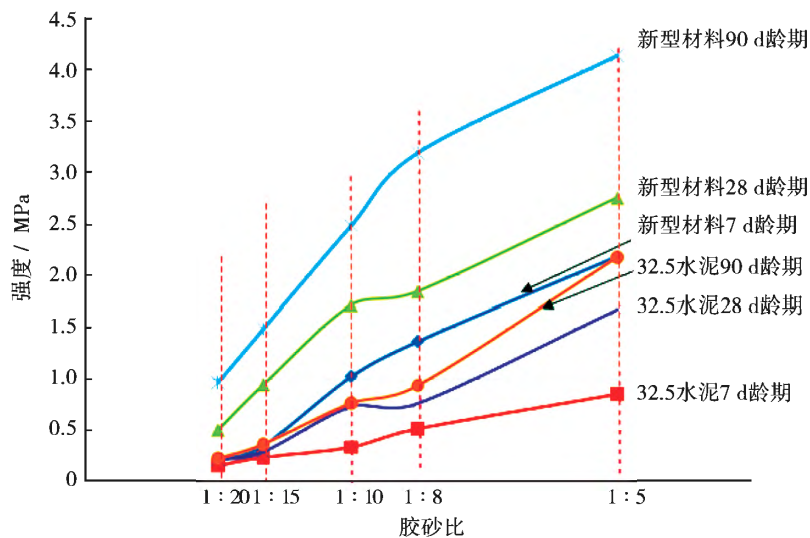


图 2 浓度为 69% 的新型胶凝材料和水泥 2 种胶凝材料全尾砂充填体强度随胶砂比的变化规律

4 大型贫铁矿充填法采矿发展方向

4.1 无轨机械化、回采连续化开采

充填采矿技术逐步向大规模和高效率的采矿技术发展. 大型贫铁矿床的生产能力决定采矿效益. 以规模求效益是充填法采矿提高经济效益的重要途径. 因此,高阶阶段嗣后充填采矿方法和无轨机械化连续作业

的回采工艺,是充填法采矿的发展方向.国内矿山已有53种型号800多台铲运机在运行,柴油驱动占70%,电力驱动占30%.拥有铲运机的矿山有56座.白银小铁山矿引进地下无轨采掘及辅助设备12台(套),实现了采掘无轨机械化.金川二矿区装备有JCCY2A铲运机4台,每年可采出矿石 30×10^4 t,生产能力达到800~1 200 t/d.安庆铜矿采用120 m以上高阶大孔径崩矿嗣后一次充填采矿法,采用瑞典Simba-251潜孔钻机钻岩直径为165 mm垂直下向深孔,美国ST-SC铲运机出矿及大规模连续振动出矿,采场综合生产能力达到750~800 t/d.充填矿山的无轨机械化、连续回采工艺应用,大大地提高了矿山的生产能力.

4.2 低成本高强度新型充填材料应用

充填采矿法充填材料占采矿成本的20%以上,而胶凝材料占15%,因此开发应用新型胶凝材料是降低采矿成本和提高采矿效益的重要途径,是充填法采矿发展趋势.目前适用于矿山充填特点的专用水泥还不多见.高水速凝材料是一种典型的专用充填胶结剂,但在应用过程中存在高水速凝固化材料来源少、成本高等因素在铁矿山应用存在很大困难.基于矿渣材料开发的新型尾砂胶凝材料的成功研制,为铁矿充填法开采创造了条件,是贫铁矿推广应用充填采矿技术的发展方向.

4.3 高浓度充填料浆管道自流输送

高浓度料浆管道自流输送是充填技术发展方向.由于膏体充填技术存在超细尾砂浓缩、膏体制备以及精确控制等技术困难,并且管道输送阻力大,膏体泵送系统需要一次性投入资金大,使得膏体充填技术的推广应用受到很大限制.因此,高浓度料浆自流(或低压)输送充填技术是目前充填法采矿追求的实用技术.中国矿业大学基于全砂土固结材料,开发了一种高浓度的似膏体充填理论与技术,已经在理论研究、材料开发和室内试验等方面开展了前期研究工作.泡沫砂浆充填技术在矿山中的研究也取得了初步成果.在金川三矿区的室内外试验研究结果显示,泡沫可以起到滚珠效应,从而有效地减小高浓度料浆管道输送中的阻力,提高了料浆的输送浓度.

4.4 生态化、无公害化充填模式

资源开发诱发的环境破坏和废弃物排放对环境污染已成为全球性问题.因此,充填矿山实现零排放已经成为充填法采矿追求的目标和发展方向.充填矿山零排放需要全尾砂充填和碎石不出坑,同时充分利用矿渣废水,将向建立矿山废料资源被重新利用的充填模式方向发展.

4.5 现场连续监测、预报与安全监控

为了研究充填作用机理和灾害预警预报,采场和充填体应力和变形监测也向三维综合信息的连续监测和动态预报方向发展.尤其将监测信息和数值模型相结合,开展采场安全评价和灾害防控的综合研究,也是未来充填法采矿的发展趋势.自2000年起金川公司采用了全球定位系统(GPS)开展了地表变形监测,建立了复杂大型矿山地表岩移监测系统,进行了长达9年的地表沉降观测;2007~2009年金川公司开展了光纤光栅传感智能监测技术,建立了金川矿区采场围岩与充填体变形监测和灾变预报系统.

5 结束语

随着矿产资源逐步开发,采矿技术条件好的高品位资源日趋枯竭.人们面临越来越多的地质条件复杂多变的低品位矿床开发.低品位铁矿床的充填法开采,是实现全尾砂充填和固体废弃物的综合利用的重要途径,成本和高强度的新型胶凝材料开发是全尾砂充填的核心技术,高浓度大流量管道减阻输送是实现安全采矿的重要基础.强掘、强采和强充的“三强”开采是提高矿山生产能力和采矿经济效益的必由之路.因此,与“三强”开采相匹配的超大采场稳定性控制、超大制浆能力的充填设备以及大规模采矿过程中的安全监测和风险控制,是贫铁矿矿床开采中的关键技术.由于大型铁矿床充填法开采只是近几年得以重视和逐步应用,因此,在今后的大型贫铁矿建成投产,在采矿生产中必将面临诸多技术难题,有待于在今后的长期生产实践中开展研究,逐步解决.

参考文献:

- [1] 雷平喜,焦玉书,姜圣才.自主创新,跨越发展,引领矿业未来—中国铁矿资源战略保障体系的建立与发展[C]//焦玉书.世界铁矿资源开发与实践.北京:冶金工业出版社,2013:3-61.

- [2] 焦玉书. “走出去”境外投资开矿风险评估与管控模式研究[C]//焦玉书. 世界铁矿资源开发与实践. 北京:冶金工业出版社,2013:613-630.
- [3] 刘玉强. 建设绿色矿山,发展绿色矿业是中国矿业发展的必由之路[C]//焦玉书. 世界铁矿资源开发与实践. 北京:冶金工业出版社,2013:731-741.
- [4] 张宝中. 我国铁矿山不宜采用充填法采矿[J]. 采矿技术,1989(2):14-15.
- [5] 亓俊峰. 胶结充填取代崩落法回采铁矿石的可行性初探[J]. 中国矿业,1997,6(5):81-83.
- [6] 陈云鹤. 我国铁矿应用充填法开采提出的问题[J]. 金属矿山,2000(9):5-6.
- [7] 谢长江,何哲祥,谢续文,等. 高炉水渣在张马屯铁矿充填中的应用[J]. 中国矿业,1998,7(2):31-35.
- [8] 江英海,潘锦平. 采空区充填工艺技术在张马屯铁矿的应用和发展[J]. 矿业快报,2004(12):41-42.
- [9] 付毅,王勍. 铁矿充填采矿中的关键技术研究[J]. 有色金属(矿山部分),2009,61(4):1-4.
- [10] 张传信. 空场嗣后充填采矿方法在黑色金属矿山的应用前景[J]. 金属矿山,2009(s):257-260.
- [11] 韩冰,李飞,苑雪超. 充填采矿法在铁矿山的应用及展望[J]. 云南冶金,2010,39(1):23-25.
- [12] 邓代强,姚中亮,王志勇,等. 大倍线自流充填技术在低品位铁矿应用[J]. 矿业研究与开发,2012,32(5):30-33.
- [13] 姜洪波. 废石不出坑充填系统工程改造实践[J]. 化工矿物与加工,2012(7):28-30.
- [14] 吴法春,邓水源. 分段空场嗣后一次充填采矿法在新桥硫铁矿的应用[J]. 矿业快报,2002(1):4-5.
- [15] 田举博,蔡蓓. 分段矿房嗣后充填法在李楼铁矿的应用[J]. 金属矿山,2012(6):19-21.
- [16] 朱靖,王永春,任宏伟. 阶段充填采矿方法在宝山铁矿的应用[J]. 采矿技术,2007,7(3):8-14.
- [17] 姜峰. 草楼铁矿首采区采矿方法选择及评价[J]. 黄金,2007,28(12):27-29.
- [18] 张立新. 李楼铁矿采矿方法和充填工艺探讨[J]. 矿业研究与开发,2012,32(1):1-3.
- [19] 朱为民,胡凯. 机械化房柱嗣后充填采矿法在良山铁矿的应用研究[J]. 中国矿山工程,2013,42(6):32-37.
- [20] 马继业,朱恒水,韩英武. 阶段留矿嗣后充填法在马庄铁矿的应用[J]. 金属矿山,2003(7):60-61.
- [21] 王新民,曹刚,张传恕,等. 新桥硫铁矿机械化采场结构参数优化研究[J]. 工业安全与环保,2008,34(4):57-59.
- [22] 杜国庆,吕广忠. 充填房柱采矿中永久矿柱合理参数的确定[J]. 矿业快报,2008(3):16-17.
- [23] 李庆倩,郭景柱. 高阳铁矿采矿方法优化研究[J]. 采矿技术,2008,8(2):7-8.
- [24] 陈赞成,余斌,解联库,等. 黄屯硫铁矿充填开采三维数值模拟分析[J]. 矿业研究与开发,2013,33(3):4-6.
- [25] 卢央泽,郭章,姜仁义. 浅议李楼铁矿胶结充填体的选择[J]. 矿冶,2009,18(4):20-24.
- [26] 康建华. 张马屯铁矿全尾砂胶结充填试验[J]. 山东冶金,2001,23(2):39-41.
- [27] 王凤波. 全尾砂胶结充填工艺在马庄铁矿的应用[J]. 中国矿山工程,2008,37(5):23-24.
- [28] 姜峰. 草楼铁矿全尾砂充填方案论证[J]. 矿业工程,2008,6(1):28-30.
- [29] 卢伟国,孟令刚,耿芳明. 尾砂胶结充填采矿法在唐山亨达东安铁矿的应用[J]. 现代矿业,2009(10):91-92.
- [30] 张立新. 全尾砂胶结充填技术在李楼铁矿的应用[J]. 有色金属(矿山部分),2012,64(2):17-20.
- [31] 董璐,高谦,南世卿. 粉煤灰对矿渣胶结充填材料性能的影响[J]. 金属矿山,2012(10):162-164.
- [32] 邹正勤. 充填采矿用全尾砂胶结材料流变特性研究[J]. 金属矿山,2012(12):132-135.
- [33] 李茂辉,高谦,南世卿. 泡沫剂对充填胶结材料强度和流变特性的影响[J]. 金属矿山,2012(9):43-47.
- [34] 何环莎,高谦,魏微,等. 全尾砂新型充填胶结材料性能试验和改进[J]. 矿业研究与开发,2012,32(4):11-14.
- [35] 杜聚强,高谦,南世卿,等. 一种全尾砂充填新型胶凝材料的研制[J]. 金属矿山,2012,(5):152-155.
- [36] 钟海斌,高谦,南世卿. 金岭铁矿全尾砂新型胶凝材料开发研究[J]. 粉煤灰,2013(1):26-28.
- [37] 李茂辉,高谦,王有团,等. 司家营铁矿充填用新型胶凝材料制备中间试验[J]. 金属矿山,2013(8):153-156.
- [38] 魏微,高谦,杨志强. 全尾砂新型胶凝材料的现场力学试验[J]. 金属矿山,2013(8):150-152.
- [39] 魏微,高谦. 复配外加剂对全尾砂新型胶凝材料强度的影响[J]. 化工矿物与加工,2013(7):18-22.
- [40] 杨志强,王永前,高谦,等. 全尾砂棒磨砂混合充填料浆优化配比试验研究[J]. 中国矿山工程,2013,42(6):1-5.
- [41] 魏微,杨志强,高谦. 全尾砂新型胶凝材料的胶结作用[J]. 建筑材料学报,2013,16(5):881-887.
- [42] 魏微,高谦. 全尾砂新型胶凝材料的配合比优化[J]. 混凝土与水泥制品,2013(9):78-79.
- [43] 魏微,高谦,杨志强. 新型胶凝材料的流动性试验研究[J]. 金属矿山,2013(9):30-33.
- [44] 杨志强,高谦,董璐,等. 基于脱硫灰渣的新型充填胶凝材料关键技术[J]. 采矿技术,2013(5):20-27.
- [45] 李茂辉,高谦,南世卿. 新型胶结材料全尾砂浆流变特性试验分析[J]. 矿业研究与开发,2013,33(2):15-17.
- [46] 董璐,高谦,南世卿,等. 超细全尾砂新型胶结充填料水化机理与性能[J]. 中南大学学报,2013,44(4):1571-1577.
- [47] 夏德胜,高谦,南世卿. 充填采矿新型胶结材料流变特性研究[J]. 中国矿业,2013,22(1):108-111.