

长江学者奖励计划
国家“211工程” 资助项目

当代

胶结充填技术

孙恒虎 黄玉诚 杨宝贵 编著

冶金工业出版社



长江学者奖励计划
国家“211 工程” 资助项目

当代胶结充填技术

孙恒虎 黄玉诚 杨宝贵 编著
刘华生 ~~毛信理~~ 审校

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2002

4502/01

内 容 提 要

本书系统阐述了当代胶结充填技术中的充填胶凝材料的工艺理论,全面论述了细砂胶结充填;突出了作者近年来在该领域的主要研究工作,包括全砂土固结材料、膏体自流输送的管输特性,不稳定流,系统优化设计以及似膏体充填技术。全书共分八章,包括水泥及活性混合材料,高水材料,全砂土固结材料,胶结充填体的力学特性,充填流体力学基础,低浓度细砂胶结充填,全尾砂高浓度与膏体胶结充填,全砂土似膏体胶结充填。

本书可以作为矿业院校师生的教学参考书及矿山设计研究人员以及从事现场工作的工程技术人员的学习参考资料,同时对交通、建筑、水利等部门的工程技术人员也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

当代胶结充填技术/孙恒虎,黄玉诚,杨宝贵编著.

北京:冶金工业出版社,2002.3

ISBN 7-5024-2933-6

I. 当… II. ①孙… ②黄… ③杨… III. 胶结充填法 IV. TD853.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 004344 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 田 锋 谭学余 美术编辑 李 心 责任校对 王贺兰

北京鑫正大印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2002 年 3 月第 1 版,2002 年 3 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 19.5 印张; 468 千字; 296 页; 1-1500 册

45.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)



序

胶结充填作为深井、复杂、特殊条件矿床的一种行之有效的开采技术,在世界上还只有约半个世纪的历史。因此,它还是一门新兴的当代充填技术。

胶结充填技术以其特殊的工艺、突出的优点、可喜的前景而日益广泛地被应用。它能够更充分地满足保护资源,保护环境,提高效益,保证矿山可持续发展的要求。它在“采富保贫”、降低贫损、减缓冲击地压、防止内因火灾等方面已取得了前所未有的进展,创造出令人叹服的业绩,受到矿业界世人的瞩目,随着充填技术的进步和成本的进一步降低,将为我国煤矿“三下开采”开创岩层控制的新领域。胶结充填经历了低强度混凝土胶结充填、低浓度尾砂胶结充填、全尾砂高浓度胶结充填、全尾砂膏体胶结充填、块(碎)石胶结充填、高水速凝尾砂胶结充填等,以及新近本书作者提出的全砂土似膏体胶结充填模式,而每每出现一种新的胶结充填方式,都会给充填技术带来巨大的进步,甚至会产生质的飞跃。

然而,迄今为止我国自己编写的既系统论述胶结充填的基本理论,又紧密联系国内外矿山工程实际的著作却很少见,孙恒虎教授等撰写的《当代胶结充填技术》一书的出版填补了这一空白。可以说本书是作者在国内外近年来从事无机非金属材料、高水速凝尾砂胶结充填、全尾砂膏体胶结充填和全砂土似膏体胶结充填教学、科研工作所积累的知识及经验的系统总结。本书几乎涉及了所有细砂胶结充填技术问题,内容丰富,取材新颖。该书的出版堪称是胶结充填技术发展的产物和见证,而且必将对胶结充填技术的进一步发展起到重要的推动作用。

为此,我特向矿业界的同行们,以及对此有兴趣的矿山企业领导、企业家、工程技术人员和高等院校本专业及相关专业的师生们推荐。

中国工程院院士

钱鸣高

2002年2月25日

前言

矿产资源所提供的矿物原料、能源和建筑材料等,是人类赖以生存和社会发展中不可缺少的前提条件。矿业开发是人类进步和社会发展活动中一个重要的组成部分,它对人类社会的发展与文明进步产生着巨大的推动作用。因此,从某种意义上说,人类文明的发展史可视为一部矿产资源开发利用史。从旧石器、新石器时代,到青铜器、铁器时代,正是以矿产资源利用主体的变更,作为划分社会生产力进步各个阶段的重要标志。工业革命以来,又经历了煤、铁时代,石油、有色金属时代,核能与电子(硅)产品时代。直到现代社会,矿产资源依然是社会生产和人民生活最基本的物质基础。人类在生产和生存活动中,有90%的工业产品和17%的消费品是用矿物原料生产的;我国95%的能源、80%的工业原料以及70%以上的农业生产资料也都取自矿产资源。以矿产勘查、开采、利用为主体所形成的矿业处在整个社会产业链的最前端,产生着广泛的传递功能与辐射效应,几乎同一切社会经济息息相关。

然而开发矿业却使“环境与发展”成为人类两难的选择,矿业开发一方面促进经济发展和社会进步,而另一方面却又造成了环境污染,危及社会发展。以工业固体废弃物——尾矿为例,世界每年排弃的尾矿大约50亿t,而我国黑色金属及辅料、有色金属、稀有金属、黄金、放射性、化学矿山等的选厂每年排放的尾矿量也高达5亿t以上,因此,必须寻求妥善的办法,合理利用尾矿,使矿业开发成为无污染或少污染的行业。矿业是国民经济的基础产业,矿山是矿业发展的基础,矿山开采的进步与发展直接影响到矿业的发展,因而这是我们应当高度重视的问题。面对能源消耗与日俱增,某些矿产资源正濒于枯竭,地球负荷一天天加重,特别是臭氧层破坏、温室效应、土地荒漠化等一系列全球环境问题,作为世界第三矿业大国,我们必须把人口、资源、环境的协调发展摆在首位,优化人与自然的关系,使地域之间的均衡发展得以实现。

面对21世纪人口、资源、环境全球三大热点问题,《中国21世纪议程》将目标确定在“建立可持续发展的经济体系、社会体系和保持与之相适应的可持续发展的资源和环境基础”之上。资源是家底,环境是家园,资源的发展就必须深度开发利用,构成补偿机制,形成良性循环,实行开源与节流并重的战略,变害为利,变废为宝,一物多用,永续利用,这是实施21世纪工程的需要。正是从这一战略需要出发,我们从20世纪80年代开始,紧紧抓住推进我国国民经济和社

会发展重要基础保证的资源与环境问题,紧紧围绕着支撑人类文明发展的,能使古老矿业工程获得新生的资源、材料、能源与环境科学,展开了锲而不舍的研究。在今后一个相当长的时期内,我们还将继续围绕着矿山充填工艺理论研究,建立充填系统计算机工作站;开发地热资源和利用井巷环境,实现区域性制冷供暖;以及在燃煤发电过程中,实现煤、电、材料生产一体化研究,煤、油、材料、综合技术体系的研究等科研方向而努力工作。

在20世纪80年代初,我们研制成功质量水固比达到了2.57:1的高水材料。它是由甲、乙两种组分的粉状物料组成,甲组分是由铝酸盐、硫铝酸盐和铁铝酸盐等为主要成分的特种水泥熟料,加入适量缓凝剂共同磨细制成的粉状物料;高水材料的乙组分是以硬石膏、生石灰与若干种促凝剂共同磨细制成的粉状物料。它可以像一般水硬材料一样,既能由时效性实现胶凝固结达到强度,也可以具有速凝早强的特性。为适应采矿工程的需要,我们率先建立了一套高水材料水化、硬化、合成的理论体系,将理论密切联系实际,开创了现代矿山采矿与无机非金属材料相结合的先例。

20世纪80年代末,我们首次研究成功的无煤柱沿空留巷巷旁支护新技术——高水巷旁泵充填技术,不仅是合理开发煤炭资源、提高煤炭资源回收率、延长矿井服务年限、减少巷道掘进量、缓解采掘接替矛盾、防止发火、有利于矿井安全生产和改善矿井技术效果的一项重大护巷技术,而且它也是矿山进行采煤方法改革,实现前进式和往复式开采的最有效途径。该技术先后在鹤壁矿务局一矿、开滦矿务局荆各庄矿进行了工业试验,取得了圆满的成功。在工程成功应用的同时,研究了沿空留巷围岩活动规律及支护围岩相互作用机理,揭示了开采过程中岩层加载“集硬效应”、承载体系“硬支多载”规律。建立了层状岩层载荷新的分割理论及力学模型,给出了沿空留巷支护原则,建立了沿空留巷巷旁支护与设计参数的计算方法,解决了无煤柱沿空留巷岩层控制、巷道合理设计与支护问题。

20世纪90年代初,以高水速凝材料为基础发展起来的新工艺——高水速凝尾砂胶结充填新工艺,如雨后春笋般地在中国大江南北非煤地下矿山推广开来。该项新技术使用全尾砂做惰性充填材料,避免了使用分级尾砂过程产生的细粒级尾砂筑坝及坝体维护的困难,减少了尾砂库的建造甚至可实现无尾排放;充填料浆低浓度、大流量输送,料浆在井下不脱水,充填体早强、速凝,整体性能和接顶效果好,改善了井下的作业环境,提高了资源回收率,缩短了采场生产循环周期,保证了井下安全生产,实现了资源、环境、作业条件对采矿工艺的要求。在高水材料理论与实践密切结合方面,得出了充填材料的经济合理配比,两相流流体力学参数设计方法及管输系统的计算公式,研制出高水充填采矿工艺系统及其相配套的自动控制系统,提出了高水固结充填体的物理力学特

性、岩体力学计算模型与支护围岩相互关系的理论。

20 世纪 90 年代中后期,我们又先后研究成功了“高浓度胶结充填材料及其应用技术”,“快凝高强喷射混凝土材料”等。自 1996 年至今,作者先后作为加拿大 Sungeric International Inc. 首席科学家和国际知名矿业公司加拿大 INCO 公司科学技术专家,对充填材料和膏体充填自流输送技术开展了研究,运用流体力学、射流、汽蚀和冲蚀磨损等理论,深入全面地揭示了膏体自流输送过程中的相变过程及破管、堵管机理,建立了优化管路参数设计的“五参数方程”,提出了一套新的理论。正当国内外仍把注意力集中在膏体泵压输送工艺理论研究方面之际,我们在矿用充填材料多项研究成果和实践经验的基础上,研究成功“全砂土固结材料”。该材料对含细粒级尾砂量高的全尾砂及含粘土量高的砂土具有很强的固结能力;而且全砂土材料固结体与水泥胶结体在配比相同的条件下,其早期强度是水泥胶结体早期强度的 2~3 倍。在分析尾砂胶结充填和膏体充填的基础上,通过大量的实验和理论研究,提出影响充填质量和效果的“六大因素”和评价充填技术经济指标的“四大目标”。正是从这“四个目标”着眼,以“全砂土固结材料”作为物质基础,通过优化六大因素,首次提出一种集膏体充填与尾砂胶结充填两者优点于一体的“全砂土似膏体胶结充填”新模式:其充填体强度接近于膏体充填的强度,远高于水力充填的强度;流动能力相当或略小于水力充填,远高于膏体充填;不加细粒级充填料时,其浓度接近于水力充填的上限,加入一定量的细粒级充填料时,料浆看上去像膏体,浓度接近于膏体充填的浓度;井下不需脱水或少量脱水,兼有水力充填和膏体充填两者的技术优点。该技术的突出特点是:充填体早期强度高、整体性好,制浆设备(施)简单,输送稳妥可靠,投资小,成本低。能适应资源、环境、作业条件对工艺的要求。

《当代胶结充填技术》一书的基本内容正是上述研究成果的概括与总结,《当代胶结充填技术》一书也是“长江学者奖励计划”和“211 工程”资助项目研究工作的总结。本书在搜集、整理和研究有关资料的基础上,系统总结了胶结充填领域国内外已有的最新研究成果、工业成就,并着重介绍了作者近年来在这一领域的研究工作及研究成果。

书中着重介绍了全砂土固结材料的生产特点、水化机理,硬化体微观分析及其力学特性、稳定性能;膏体自流输送的管输特性,破管、堵管机理分析及管输系统的优化设计以及似膏体充填工艺技术、模拟系统与充填料浆流动性、充填体强度影响因素的分析等。本书编写是建立在作者及其所在的研究所多年实验室实验、现场测试和理论分析的基础上,总结研究成果,提出个人看法。《当代胶结充填技术》是按照近半个世纪新发展起来的细砂胶结充填的系统进行撰写的,为此,书中体现出了在细砂胶结充填领域技术发展的系统性、继承性和创新性。书中可能会有不妥之处,欢迎读者不吝斧正。

本书 8 个主要专题是:

- (1) 水泥及活性混合材料;
- (2) 高水材料;
- (3) 全砂土固结材料;
- (4) 胶结充填体的力学特性;
- (5) 充填流体力学基础;
- (6) 低浓度细砂胶结充填;
- (7) 高浓度与膏体胶结充填;
- (8) 全尾砂似膏体胶结充填。

参加本书编写工作的还有赵福收、盖光举、徐维瑞、段鸿杰、刘轶男和胡华。全书最后由孙恒虎教授定稿。

作者十分感谢在本书撰写过程中得到的所有帮助。感谢中国矿业大学“211 工程”和“长江学者奖励计划”给予项目研究所提供的资助;感谢中国工程院院士钱鸣高教授在百忙中为本书题写了序;本书还得到了北京科技大学赵万智教授的关心和支持。感谢在本书的撰写过程中,山东省黄金集团公司焦家金矿、新城金矿、招远玲珑金矿、凡口铅锌矿、金川有色金属公司、北京有色冶金设计研究总院、长沙有色冶金设计研究院,西北矿冶研究院等单位所提供的帮助。在为书稿提供打字、电脑排版、整理插图和校对等方面感谢李春玲、郑娟荣、关传香、崔刚、崔明义、廖道争、姜妮、李海滨等同志的鼎力相助,如果没有他们的支持和出色工作,本书也难以如期交付出版。作者对上述所有的帮助再次致以衷心的感谢!

编 者

2002 年 2 月 25 日

目 录

导论	1
第一节 胶结充填技术概要及其发展	1
第二节 当代胶结充填的种类及其特点	5
第三节 胶结充填技术研究发展的基点和观念	14
第一章 水泥及活性混合材料	15
第一节 硅酸盐水泥的凝结硬化	15
一、硅酸盐水泥的化学成分及工艺过程简述	15
二、硅酸盐水泥熟料的矿物组成及其特性	16
三、硅酸盐水泥的水化、凝结与硬化过程	17
第二节 影响水泥凝结硬化的因素	18
一、养护时间	19
二、温度和湿度	19
三、石膏的掺量	19
第三节 硅酸盐水泥的主要技术性质	20
一、细度	20
二、标准稠度用水量	21
三、凝结时间	21
四、体积安定性	21
五、强度等级	22
六、水化热	22
七、密度及松散密度	23
第四节 活性混合材料	23
一、混合材料	23
第二章 高水材料	26
第一节 高水材料的物理力学特性	26
一、高水材料的主要技术特征	26
二、高水材料的力学特性	26
第二节 高水材料的水化硬化机理	29
一、高水材料的水化反应	29
二、高水材料的水化硬化机理	32

第三节 高水材料的稳定性能	32
一、高水材料的碳化	32
二、高水材料的热稳定性	34
三、高水材料的耐蚀性	35
第三章 全砂土固结材料	37
第一节 全砂土固结材料及物理力学特性	37
一、概述	37
二、全砂土固结材料硬化体的物理特性	39
第二节 全砂土固结材料的水化产物及其微观结构	41
一、全砂土固结材料水化产物的 XRD 分析	41
二、全砂土固结材料的 DTA 分析	42
三、全砂土固结材料水化硬化体的微观形貌分析	43
第三节 全砂土固结材料硬化体的稳定特性	44
一、全砂土固结材料的抗碳化性能	44
二、全砂土固结材料耐酸、碱、盐的稳定性	47
三、全砂土固结材料的热稳定性能	52
四、全砂土固结材料抗冻性能	55
第四章 胶结充填体的力学特性	56
第一节 胶结充填材料及主要性质	56
一、水泥胶结充填材料	56
二、充填材料的物理性质	63
三、充填材料的化学性质	72
第二节 水泥胶结充填体的力学性质	73
一、低浓度细砂胶结充填体	73
二、细砂高浓度胶结充填体	74
三、全尾砂高浓度胶结充填体	75
四、膏体胶结充填体	76
第三节 高水固结充填体的力学特性	77
一、高水固结充填体的基本力学性质	77
二、高水固结充填体的蠕变特性	82
三、高水固结充填体的抗冲击性能	84
四、高水固结充填体的自立	88
五、配置钢筋对高水固结充填体的影响	90
第四节 全砂土固结充填体的特性	97
一、试验用骨料	97
二、充填体强度	99

第五章 充填流体力学基础	105
第一节 充填料浆的主要参数	105
一、密度	105
二、体积浓度和质量浓度	105
三、粘性	106
第二节 水力学基础	107
一、水静力学	107
二、水动力学基础	108
三、液流状态和雷诺数	110
四、液流压力损失	111
第三节 固液两相流的伯努利方程	113
第四节 悬液的流型	114
一、牛顿体	114
二、非牛顿体	115
第五节 固液两相流的管流特性	117
一、均质固液两相流的管流特性	117
二、非均质固液两相流的管流特性	122
三、非均质-均质复合两相流的管流特性	127
第六节 充填料浆管道输送的水力计算	133
一、充填料浆管道输送摩阻损失计算的经验公式	133
二、充填料浆管道输送的临界流速经验公式	134
三、充填倍线	135
四、充填料浆管输中的不稳定流	136
 第六章 低浓度细砂胶结充填	141
第一节 尾砂胶结充填	141
一、尾砂分级脱泥	141
二、砂仓	146
三、水泥的贮存	155
四、充填料浆制备	157
五、充填料浆管道输送	162
六、采场充填工作	170
七、尾砂胶结充填的评价	171
第二节 高水速凝尾砂胶结充填	172
一、概述	172
二、招远金矿玲珑分矿的试验	174
三、焦家金矿的实践	177
四、鸡冠嘴金矿的试验	187
五、招远金矿灵山分矿的应用	191

六、武山铜矿的试验	193
第三节 高水巷旁泵充填技术	196
一、概述	196
二、鹤壁矿务局一矿的应用	198
三、开滦矿务局荆各庄矿的应用	203
第七章 全尾砂高浓度与膏体胶结充填	210
第一节 全尾砂高浓度胶结充填	210
一、工艺特点及充填机理	211
二、充填料及充填系统	211
三、对充填料(体)的质量评价	212
第二节 膏体泵送胶结充填	214
一、膏体充填的概念和特点	214
二、膏体充填材料及强度特征	216
三、全尾砂膏体流变特性	217
四、膏体充填料的可泵性	218
五、膏体泵送充填系统	219
第三节 膏体自流输送的管输特征	219
一、膏体自流输送的管输模型	220
二、极限流速、流量与管径的分析	222
三、膏体管道输送参数的分析	223
四、 H 对各参量敏感度的分析	227
第四节 膏体自流输送破管和堵管机理的分析	232
一、膏体自流输送不满管流的产生	233
二、膏体料浆运动过程的射流效应和相变	234
三、料浆相变过程中的破坏作用	236
第五节 充填管道输送系统的优化设计	238
一、优化设计的目标和原则	238
二、充填管输参数的优化	238
三、充填管线的优化布置	240
第八章 全砂土似膏体胶结充填	246
第一节 充填材料物理力学特性主要影响因素	246
一、胶凝材料	246
二、不同惰性材料或填料的影响	248
三、不同细粒级添加量对充填体强度和料浆流动性的影响	248
四、温度对充填体强度和料浆流动性的影响	254
五、浓度对充填体强度和料浆流动性影响	256
六、灰砂比对充填体强度及料浆流动性的影响	258

七、化学特性对充填体强度和料浆流动性的影响	259
八、料浆稳定性及沉降特性的研究	261
九、六大影响因素与四大技术经济目标的关系	265
第二节 似膏体充填工艺技术	266
一、似膏体充填模式	266
二、提高强度和流动性的几个措施或方案	268
三、管输参数及能力的计算	277
第三节 似膏体充填模拟系统的构想	281
一、似膏体充填模拟系统的初步方案	282
二、模拟系统的自动控制	287
参考文献	293
编后语	296

第一节 胶结充填技术概要及其发展

〔通常按照充填材料和输送方式,将矿山充填分为干式充填、水力充填和胶结充填 3 种类型。〕

干式充填是将采集的块石、砂石、土壤、工业废渣等惰性材料,按规定的粒度组成,对所提供的物料经破碎、筛分和混合形成的干式充填材料,用人力、重力或机械设备运送到待充空区,形成可压缩的松散充填体。

水力充填是以水为输送介质,利用自然压头或泵压,从制备站沿管道或与管道相连接的钻孔,将山砂、河砂、破碎砂、尾砂或水淬炉渣等水力充填材料输送和充填到采空区。充填时,使充填体脱水,并通过排水设施将水排出。水力充填的基本设备(施)包括分级脱泥设备、砂仓、砂浆制备设施、输送管道、采场脱水设施以及井下排水和排泥设施。管道水力输送和充填管道是水力充填最重要的工艺和设施。砂浆在管道中流动的阻力,靠砂浆柱自然压头或砂浆泵产生管道输送压力去克服。选择输送管道直径时,需要先按充填能力,砂浆的浓度和性态算出砂浆的临界流速、合理流速和水力坡度等。这些计算的理论基础是充填流体力学基础(见第五章),计算结果一般需经实验验证。

胶结充填是将采集和加工的细砂等惰性材料掺入适量的胶凝材料,加水混合搅拌制备成胶结充填料浆,沿钻孔、管、槽等向采空区输送和堆放浆体,然后使浆体在采空区中脱去多余的水(或不脱水),形成具有一定强度和整体性的充填体;或者将采集和加工好的砾石、块石等惰性材料,按照配比掺入适量的胶凝材料和细粒级(或不加细粒级)惰性材料,加水混合形成低强度混凝土;或将地面制备成的水泥砂浆或净浆,与砾石、块石等分别送入井下,将砾石、块石等惰性材料先放入采空区,然后采用压注、自淋、喷洒等方式,将砂浆或净浆包裹在砾石、块石等的表面,胶结形成具有自立性和较高强度的充填体。

20 世纪 40 年代末、50 年代初,国外开始采用选厂分级尾砂进行水力充填。当采用分级尾砂水力充填时,其突出的问题是将分级脱泥后的细粒级尾砂送至尾矿库会带来一系列的问题,同时还会带来充填用尾砂供应不足的问题;若采用全尾砂水力充填工艺,则会出现充填中存在着过量的 $\sim 20\mu\text{m}$ 的细泥。这种细泥浆在采场内留在充填分层的表面,就会使回采工作难以继续进行,而且也无法形成稳固的能够自立的帮壁。进入 20 世纪 60 年代后,加拿大、澳大利亚、德国、美国、前苏联、中国等国家,围绕着新型充填材料及其特性,多相流流体力学及充填流变学为基础的浆体输送理论的研究取得了新的进展,并研制了充填料浆新的制备、输送设备,加上无轨采矿设备的应用,使胶结充填工艺取得了巨大的进步,使充填采矿法的面目为之一新。胶结充填工艺用于开采高品位富矿、矿岩不稳固的厚大矿体、深矿井

及大面积区域性地压支护体系、“三下”(水体、道路、建构筑物下)及自燃发火倾向矿床的开采,已经成为干式和水力充填工艺根本无法取代的充填工艺。1962年加拿大弗鲁德(Frood)矿尾砂胶结充填工艺投入工业应用,在这之后,尾砂胶结充填技术在加拿大萨德伯里(Sudbery)地区的格瑞登(Creighton)矿,列瓦克(Levack)矿、汤普森(Thompson)矿、米瑞(Murray)矿、斯托比(Stobie)矿、加尔森(Garson)矿等矿山普遍应用开来,使得分层充填采矿和矿柱回采工作大为改善,使原用的水力充填采矿法大大地提高了机械化程度,形成了一种新的较高效率的采矿方法。以后在美国犹他州的马夫劳韦尔(Mayflower)矿和南达科他州的霍姆斯特克(Homstake)矿,希拉克(Helca)采矿公司幸运星期五(Lucky Friday)矿试验成功了在尾砂充填层上用波特兰水泥:尾砂等于1:7配比的砂浆铺面,平均厚度0.15m。这就为分层充填采矿法提供了一个具有一定强度的分层平整表面。在水力充填料浆中添加胶凝材料对节省开支、改进品位控制以及提高采矿方法回采效果和适应性等诸多方面,都显示出了明显的优越性。我国于1964年,凡口铅锌矿首先开始进行低浓度尾砂胶结充填的试验,以后陆续在全国数十个矿山采用尾砂胶结充填技术,都取得了显著的技术经济效益。然而,在一个相当长的时期内,人们对胶结充填料浆浓度这样一个十分重要的工作参数还缺乏认识,在生产实际中使用的料浆真实质量浓度一般为60%~68%,因而尾砂胶结充填也就暴露出了一些新的问题。采用这种低浓度尾砂胶结充填,在采场脱水过程中,由于料浆出现离析,这就难免会从采场渗滤出的废水中带走部分水泥和细粒级物料,污染作业环境,增加水泥流失,降低充填体强度,提高采矿成本,更为严重的是水泥随矿石进入选厂,也给选矿带来不良影响。

到了70年代,对低浓度尾砂胶结充填所存在的问题,即料浆浓度这个至关重要的问题才开始被人们所重视,并着手研究和探索高浓度料浆的优越性及实现料浆高浓度的有效途径。不少矿山采取措施将料浆真实质量浓度提高到大于70%以上,即所谓高浓度或浓砂浆胶结充填。与此同时,还研究了利用不分级脱泥($-20\sim-37\mu\text{m}$)的细粒级物料的全尾砂作惰性充填材料的胶结充填工艺。按照提高浓度和利用全尾砂的要求,就需要解决全尾砂料浆的浓密、过滤、强力活化搅拌、料浆管道输送、采场脱水及充填体强度等一系列复杂的技术问题。中国、德国、南非、美国、加拿大、哈萨克斯坦,奥地利等国,采用不同的工艺,先后实现了全尾砂高浓度胶结充填。

(上述变革的思路总是围绕着提高料浆浓度这个重心,以解决低浓度尾砂胶结充填由于采场脱水所引发的一系列问题,如井下废水环境污染问题、充填体强度问题等。然而另一种思路却是:20世纪80年代末中国矿业大学北京校区孙恒虎教授提出的在低浓度料浆的条件下,改用高水材料作胶凝材料,利用稍加改动的低浓度尾砂胶结充填制备和输送系统,将高水固结充填料浆送入井下,使采场充填多余的水速凝固结起来,从而也解决了充填废水问题。20世纪90年代初,国内不少金属矿山成功地应用了高水速凝尾砂胶结充填工艺,但后因高水速凝材料较贵,充填作业成本较高,限制了该胶结充填工艺在更广泛领域中推广应用。)

少数国家和矿山在全尾砂高浓度胶结充填试验研究的同时,又进一步改进惰性充填材料的组成和级配,同时进一步提高料浆浓度,于是产生并发展了以德国普鲁塞格金属公司(Preussage AG Metall)为代表的全尾砂膏体泵送胶结充填工艺。这种工艺可提供在低水泥耗量下的高强度充填体,且充填材料选用范围广,既可以采用全尾砂或分级尾砂,也可以添

加不同比例的 30mm 以下的碎石、戈壁集料、天然砂或炉渣以及粉煤灰、煤泥等工业废料。其充填理论、流变特性、膏体材料制备、泵送工艺、充填体强度等均有其鲜明的特点。

开发和应用全尾砂高浓度胶结充填工艺和全尾砂膏体泵送胶结充填工艺是为了实现:(1)最大限度地减少水泥消耗量,以降低充填成本;(2)提高充填体强度,改善充填体质量,更有效地发挥其支撑功能;(3)实现“三无”矿山设想,改善环境条件;(4)解决尾砂供小于求的矛盾。以全尾砂和高浓度为标志,使胶结充填工艺发生了飞跃性的变化,使胶结充填迈入了一个新的阶段,是当代胶结充填技术进步的重要标志之一。

〔全尾砂膏体胶结充填虽然有其鲜明的技术特点,并具有料浆浓度高、水泥用量少、充填成本较低、充填体强度高突出优点,但由于其工艺技术复杂、管理技术水平要求高、一次性基建投资大等主要问题的存在,因而自 20 世纪 70 年代末开展该项试验研究以来,我国仅建成了金川镍矿和铜绿山铜铁矿两个膏体泵送充填系统。针对全尾砂膏体胶结充填存在的主要问题,我们研究了既考虑充填料浆浓度的适度提高(相对于低浓度而言),又考虑改变胶凝材料,创建了采用固土能力极强的新型胶凝材料——全砂土固结材料,形成并构建了全砂土似膏体胶结充填模式。这种新的充填模式无论在料浆的可输性、充填体的强度、充填料脱水性以及该充填技术的经济性等方面都具有显著的优势。〕

〔在细砂胶结充填技术迅速发展的同时,自 70 年代以来,澳大利亚、前苏联等国家,在用空场法采完的空区内,先倒入块石充填,再向块石中压注水泥净浆或水泥砂浆,形成块(碎)石胶结充填体;或者在块(碎)石倒入采空区的同时,将用管路输送的水泥砂浆也注入空区自淋混合;也有在待充空区的上口处,用电耙、铲运机或带折返板的溜槽混合拌制,而后充填进采空区的胶结充填工艺。〕在形成的块(碎)石胶结充填体固结后,再进行矿柱或周围采场回采。块石胶结充填在国内外所进行的大量的试验研究工作,其成功的范例当推澳大利亚的芒特艾萨(Mount Isa)矿,1973 年,该矿便在 1100 铜矿体开始应用块石胶结充填。生产实践表明,在相同水泥添量的条件下,与其他胶结充填工艺相比较,这种充填工艺所形成的胶结充填体,能够达到更大的强度,可以起到人工矿柱的作用,其强度和稳定性都比细砂胶结充填为好,能保证第二步骤回采时的安全。由于节约了水泥,充填成本降低了 30%~50%;该工艺还可以明显地收到矿石贫化小、生产能力大、废石提运少,并能缓解地表废石堆对环境污染的效果。块石胶结充填可以看成是干式充填和细砂胶结充填工艺的结合,是当代胶结充填工艺的发展方向之一。

从胶结充填技术的发展不难看出,当代胶结充填正是围绕着“软性”胶结充填料充填和“刚性”胶结充填料充填的试验研究而展开的。“软性”、“刚性”的划分,主要是指胶结充填料中惰性材料的种类及其组成不同。所谓“软性”胶结充填料,就是细砂胶结充填料,例如取其配比为尾砂:水泥:粉煤灰:水=10:0.5:1.0:2.3;所谓“刚性”胶结充填料,就是块石胶结充填料,例如加入-25mm 的碎石后,其配比为碎石:尾砂:水泥:粉煤灰:水=5:0.4:0.6:0.6:0.8。软性和刚性胶结充填料不仅在物理力学特性上有所不同,而且在制备和输送工艺上也有所不同。这两类胶结充填,按照掺入惰性材料的不同进行区分的方法,已开始引起矿业学术界的重视。表 0-1 列出了两种类型充填料的物理力学性能比较。由表可以看出,块石胶结充填料的强度和粘结力较尾砂胶结充填料增加了数倍,而弹性模量竟增加了数十倍之多;单位胶结充填料中水泥用量的增加并不多,若获得的强度相等时,显然块石胶结充填可以节省更多的水泥。

表 0-1 两类充填材料物理力学性能比较

灰砂比	1:5			1:10			1:20		
胶结充填料类型	A	B	B较A增加/%	A	B	B较A增加/%	A	B	B较A增加/%
水泥量/kg·m ³	288	352	20	156.6	195	21.6	81.6	102	26
水灰比(质量比)	1.47	0.72	-50	2.72	1.22	-55	5.24	2.21	-57
抗压强度/MPa	4.36	13.18	200	0.798	5.796	626	0.476	2.377	399
抗张强度/MPa	0.66	1.98	200	0.160	0.984	526		0.411	
粘结力/MPa	0.84	2.55	202	0.180	1.197	576		0.495	
静弹性模量/MPa	181.2	9206.3	4098	54.1	3906.2	7120		1470.5	

注: A—惰性材料是尾砂; B—惰性材料由粗粒大理岩(含 60%)和尾砂(含 40%)混合组成。

纵观胶结充填的沿革及发展,可将当代胶结充填技术的基本内容及特点归纳如下:

(1) 细砂胶结充填及粗砾胶结充填所用新型胶凝材料和活性混合材料的开发研制与应用;充填材料主要物理力学性质及测试方法、胶凝固结机理、充填材料(包括各种添加材料)对充填材料力学特性、管输特性以及充填体强度的影响等。

(2) 在原来低浓度尾砂胶结充填、低强度粗惰性材料混凝土充填以及高浓度细砂胶结充填的基础上,开发出利用全尾砂为主体的全尾砂高浓度胶结充填,全尾砂膏体胶结充填,高水速凝尾砂胶结充填和块(碎)石胶结充填以及作者新近研制的全砂土似膏体充填等新材料、新工艺、新技术。

(3) 对充填料的采集加工、贮存、制浆、输送、充填、脱水及排泥等工艺进行合理配置;采用立式砂仓(半球底、锥形底)、流态化卸料技术,锥形仓底单管重力放砂技术以及虹吸放砂技术,保证了供料的连续性和放砂浓度;利用立式水泥仓散装水泥风力吹送入库,将砂浆和水泥定量向搅拌桶供料,实现了充填制备系统的自动化。

(4) 全尾砂地面脱水工艺流程及设施的配置,制备膏体的深浓密机系统,高速高剪力胶体活化搅拌机及搅拌机理,确定和控制影响浆体流变特性的所有物理参数如温度、溶解的固体含量、悬浮体的真实质量浓度、粒度分布、絮凝剂浓度、pH值和矿物成分等;切变速率(1/s)与剪切应力(kPa)关系的流变特性量测等,以及井下充填料分配系统的优化。

(5) 充填料浆的物理力学参数,固体颗粒的运行阻力,沉降及悬浮机理,固液两相流的伯努利方程、流型及管流特征,管流阻力特性及阻力损失计算,浆体管输的水力计算及管输中的不稳定流等。

(6) 胶结块石、胶结碎石和含水泥量高的胶结细砂等形成的胶结充填体,用于支护采场围岩时其物理力学性质(如刚度、体积压缩率等)及胶结充填体与胶凝材料的性质、养护特性、制备方式、输送条件的关系等。

总之,当代胶结充填技术的发展,已将地下开采技术推向高新技术领域,使地下采矿方法获得新的技术突破。当代胶结充填工艺将可以更好地满足保护资源,保护环境,提高效益,保证矿山可持续发展的要求。胶结充填在 21 世纪的矿业发展中必将有着更加广泛的应用前景。