



金属矿膏体 充填理论与技术

吴爱祥 王洪江 著

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

金属矿膏体充填理论与技术

吴爱祥 王洪江 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面系统地阐述了金属矿膏体充填理论与技术,包括膏体充填材料性质、膏体主要性能、尾砂浓密脱水、膏体制备和膏体管道输送理论与工艺,以及膏体充填物料计量与控制系统等内容。本书兼顾膏体充填基础理论、工艺技术及装备,并反映了近十年来膏体充填技术在国内外金属矿山应用的新进展。

本书兼顾学术性和资料性,可供从事采矿工作的科研人员、高等院校相应专业的教师、矿山设计人员以及从事矿山生产的工程技术人员参考;也可作为采矿工程专业等相关学科研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

金属矿膏体充填理论与技术 / 吴爱祥,王洪江著. —北京: 科学出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-03-045927-5

I. ①金… II. ①吴… ②王… III. ①金属矿开采-充填法-研究 IV. ①TD853.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 240512 号

责任编辑: 王 运 韩 鹏 李 娟 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 10 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 10 月第一次印刷 印张: 28 1/2

字数: 670 000

定价: 248.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介

第一作者，吴爱祥，教授、博士生导师、教育部长江学者、国家杰出青年基金获得者，教育部“金属矿山高效开采与安全”重点实验室主任、教育部创新团队首席教授，兼任中国金属学会采矿学术委员会主任、中国有色金属学会采矿学术委员会副主任、《金属矿山》等杂志理事，国家“863”计划资源环境领域专家，享受国务院政府特殊津贴。

作者长期从事膏体充填采矿、矿岩散体动力学和溶浸采矿等方面的科研与教学工作。先后主持和承担了50多项科研项目，其中包括国家科技支撑计划项目、国家“973”计划课题、国家自然科学基金重点项目及面上项目、博士点基金及多项校企合作课题等。相关科研成果已获国家科技进步二等奖4项、省部级科技进步特等奖和一等奖6项。获得国家发明专利授权13项，出版专著3部，在国内外学术刊物上发表学术论文200余篇。



第二作者，王洪江，教授、博士生导师，2007年入选“教育部新世纪优秀人才支持计划”，2011年到澳大利亚南澳大学作访问学者。

自参加工作以来，一直从事金属矿开采技术研究，内容涉及地下硬岩矿床的采矿方法、尾矿处置与综合利用技术、溶浸采矿等领域研究，取得了巨大的经济效益与社会效益。先后负责和参加了20余项科研项目，其中包括国家科技支撑计划、国家自然科学基金、博士点优先发展领域项目、云南省科技强省计划以及厂协合作项目。近十年来获国家、省部级科技奖7项，其中国家科技进步二等奖2项，北京市科学技术基础研究类一等奖1项。获得授权专利10项，在国内外知名刊物上发表学术论文90余篇，其中三大检索机构共收录39篇。



序

《金属矿膏体充填理论与技术》一书，是吴爱祥教授率领的团队根据多年从事膏体充填技术的教学、科研工作积累的成果和经验，并参阅了国内外大量文献撰写而成，是一部重要的专著。

胶结充填工艺技术在我国应用已有 30 多年的历史，经历了水力充填、高浓度充填、膏体充填三个发展阶段。胶结充填工艺技术的应用较好地解决了采空区塌陷、地表因采矿引起的大面积沉降、山体滑坡等灾害的威胁，为保证生产安全、保护生态环境发挥了重要的作用。随着日益严格的环保要求，充填采矿法的应用获得了急速的推广，过去传统上都习惯采用崩落采矿法的铁矿山，也不得不研究改用充填采矿法。然而，充填采矿法目前仍面临着一些技术和管理上的难题。首先，充填成本高，胶结充填法的充填成本一般占采矿总成本的 20% ~ 40%。昂贵的充填成本不仅给矿山造成很大的经济压力，也严重制约充填采矿法的发展。其次，充填料浆的浓度和灰砂比不易控制，浓度的降低，导致胶凝材料流失，充填料的分层，严重影响充填体的强度。

膏体充填工艺技术有利于解决或缓解上述难题。膏体充填料浆属于似宾汉体，其物理特性是输送过程中不会产生离析，有利于保持料浆浓度的稳定；在保证同样充填体强度的条件下，可以比水力充填，甚至也比高浓度充填减少胶凝材料用量，从而有利于控制成本；在正常情况下，采场基本无需脱水，既简化采场的防堵构筑物，又有利于改善矿井的环境。所以，这是一种有效利用全尾砂的技术，是一种适应环保要求日益严格的技术，是一种有前途的值得大力推广的技术。还应当指出的是，利用膏体充填装置，可以实现满足充填使用后多余全尾砂的干堆。这是一种既节约用水又节约用地的先进技术。

该书对尾砂浓密脱水、料浆制备、膏体输送、井下充填的理论、装置、

工艺技术进行了全面系统的论述，既有作者的研究成果和工程应用实例，也充分反映了国内外相关理论和工艺技术研究的新进展，对广大从事矿业工程设计、科研、生产、教学的同行具有较大的实用价值。是为序。

中国恩菲工程技术有限公司教授级高工
北京科技大学兼职教授、博士生导师
中国工程院院士 于润沧

前 言

尾矿库和采空区成为目前金属矿安全生产中的两个重大隐患，经常引起采空区采动灾害、尾矿库垮塌等严峻的安全与环境问题，已经影响到我国金属矿开采的可持续发展。充填采矿法可以充分利用矿山固体废弃物，及时填充采空区，可从源头解决这些问题。2012年3月国家安全生产监督管理总局等五部委联合发文“安监总管——〔2012〕32号”，要求新建矿山必须对能否采用充填采矿法进行论证，必须优先推行充填采矿法。

与传统的水砂充填相比，膏体充填具有“三不”特性，即浆体不分层、不离析、不脱水。膏体强度均匀、接顶率高，能有效控制岩层移动、防止地表塌陷，可提升金属矿安全生产水平。膏体固结时间短、易实现强化开采，为金属矿高效生产提供新的技术途径。在相同充填体强度前提下，膏体充填的胶结材料耗量少，运营成本低，是性价比最高的充填方式，其充填技术最经济合理。它可以提高全尾砂利用率，最大限度地减少矿山固体废弃物的排放量，实现尾矿废水的循环利用，能有效控制充填材料中有害金属离子扩散，是金属矿绿色开采体系的一个重要组成部分。因此，膏体充填技术体现了“安全、高效、经济、环保”的内涵，已成为全球矿业领域的技术热点和发展新动向。

本书是在作者团队近年来的工程实践积累、理论研究成果的基础上写成的。作为国内第一本针对金属矿膏体充填方面的著作，本书系统地阐述了金属矿膏体充填理论与技术，并涉及到主要仪器与装备。全书共11章，主要内容包括膏体充填的应用现状，膏体充填材料配比原则，膏体的主要性能及其影响因素，尾砂浓密脱水、膏体搅拌制备以及膏体管道输送的基础理论，尾砂浓密、搅拌制备、管道输送的工艺与设备，膏体充填物料的计量与控制系统，国内外膏体充填的典型工程实例。其中，云南某铅锌矿、新疆某铜矿、云南某铜矿以及非洲谦比希铜矿膏体充填工程这四个实例来自于作者团队完成的科研项目。

本书由北京科技大学吴爱祥、王洪江主笔，蔡嗣经教授主审。参加全书审校工作的有王贻明、韩斌、尹升华、王少勇等。参与本书资料查阅、收集、整理、文稿打印校对的人员有焦华喆、刘晓辉、王勇、孙伟、兰文涛、程海勇、李公成、杨柳华等。

本书得到了国家“十一五”科技支撑计划（2006BAB02A01）、国家“十二五”科技支撑计划（2012BAB08B02）、长江学者和创新团队发展计划（IRT0950）、国家自然科学基金项目（51374034）、国家安全生产监督管理局“四个一批”项目（KY20130593000001）等资助。

本书得到了飞翼股份有限公司、巴斯夫浩珂矿业化学（中国）有限公司、德国普茨迈斯特固体泵贸易有限公司等企业的大力支持，为此表示深深的谢意。另外，本书引用了许多专家、学者和矿山现场工程技术人员的重要研究成果，这里无法一一署名，在此一并表示衷心的感谢。特别感谢北京金诚信矿山技术研究院与“基于膏体充填的绿色采矿技术”北京市国际科技合作基地对团队发展的长期支持，并在膏体充填领域展开了密切的合作。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者不吝赐教，批评指正。

作者

2015年中秋于北京

目 录

序

前言

第1章 绪 论	1
1.1 胶结充填技术面临的主要问题	2
1.1.1 充填成本居高不下	2
1.1.2 尾砂脱水速度慢	3
1.1.3 充填料浆制备质量差	4
1.1.4 管道输送过程中磨损与堵塞严重	4
1.2 膏体充填的基本概念	5
1.2.1 泌水率与饱和度	6
1.2.2 颗粒级配	7
1.2.3 基于颗粒级配的膏体体积浓度计算	8
1.2.4 从屈服应力角度探讨膏体定义	8
1.3 膏体充填技术的发展历史	10
1.4 膏体充填技术应用与研究现状	12
1.4.1 膏体充填材料	12
1.4.2 尾砂浓密技术	14
1.4.3 膏体搅拌技术	15
1.4.4 膏体输送技术	16
1.4.5 自动控制技术	16
1.5 膏体充填的技术优势	18
1.6 膏体充填发展趋势	21
1.6.1 基础理论的发展趋势	21
1.6.2 工艺技术的发展趋势	22
1.6.3 专用设备的发展趋势	23
参考文献	23
第2章 膏体充填材料及其配比	25
2.1 膏体充填原材料	25
2.1.1 尾砂	26

2.1.2	粗骨料	28
2.1.3	水泥及其替代品	30
2.1.4	膏体化学添加剂	36
2.2	膏体充填材料物理性质	43
2.2.1	粒级组成	44
2.2.2	比表面积	47
2.2.3	相对密度	48
2.2.4	容重	49
2.2.5	孔隙率	49
2.2.6	浓度	50
2.2.7	沉降性	51
2.2.8	渗透性	52
2.3	膏体材料配比	56
2.3.1	确定膏体材料配比的原则	56
2.3.2	不同采矿方法对充填体强度的要求	57
2.3.3	流动性的要求	59
2.3.4	充填材料的级配要求	59
	参考文献	63
第3章	膏体主要性能及其影响因素	65
3.1	膏体流动性能及其影响因素	65
3.1.1	塌落度及扩展度	65
3.1.2	稠度	67
3.1.3	流动度	68
3.1.4	膏体流动性的影响因素及其规律	69
3.2	膏体流变性质及其影响因素	73
3.2.1	膏体流变学基本概念	73
3.2.2	膏体流变模型	76
3.2.3	膏体流变性能测试仪	77
3.2.4	膏体流变性的影响因素	80
3.3	膏体凝结性能及其影响因素	85
3.3.1	凝结时间	85
3.3.2	抗压强度	89
3.3.3	收缩与膨胀	93
	参考文献	96

第4章 尾砂浓密脱水原理	99
4.1 高分子絮凝剂作用机理	99
4.1.1 高分子絮凝架桥模式	99
4.1.2 不同类型絮凝剂作用机理	101
4.2 尾砂动态浓密半工业模拟试验	103
4.2.1 半工业实验平台研制	103
4.2.2 尾砂浓密半工业试验方案及其步骤	106
4.2.3 尾砂浓密底流浓度影响规律	109
4.2.4 浓密机内尾砂浓度宏观分布特征	111
4.3 尾砂重力浓密理论	116
4.3.1 静态沉降理论	116
4.3.2 动态沉降理论	121
4.4 尾砂过滤脱水理论	128
4.4.1 过滤的关键参数	129
4.4.2 非压缩过滤的基本方程	132
4.4.3 压缩过滤的基本方程	135
4.5 尾砂浓密性能理论表征	137
4.5.1 影响尾砂浆沉降浓密的参数	137
4.5.2 尾砂沉降特性	138
4.5.3 尾砂压缩特性	143
4.5.4 尾砂浓密性能表征实例	148
4.6 膏体浓密机耙架扭矩计算模型	151
4.6.1 浓密机内部散体区域划分	151
4.6.2 耙架受力分析	153
4.6.3 复杂结构搅拌耙架扭矩计算模型	155
参考文献	159
第5章 尾砂浓密脱水工艺与设备	161
5.1 絮凝剂制备与添加	161
5.1.1 絮凝剂溶解原理	161
5.1.2 絮凝剂溶解设备	162
5.1.3 絮凝剂制备与添加应用实例	163
5.2 尾砂浓密脱水工艺	164
5.2.1 一段脱水工艺	165
5.2.2 二段脱水工艺	167
5.2.3 多段联合脱水工艺	169

5.3	国内外重力浓密设备及其性能	170
5.3.1	立式砂仓	171
5.3.2	普通耙式浓密机	173
5.3.3	高效浓密机	175
5.3.4	膏体浓密机	182
5.4	国内外过滤设备及其性能	194
5.4.1	过滤设备的分类	194
5.4.2	带式真空过滤机	196
5.4.3	陶瓷过滤机	198
5.4.4	立式全自动过滤机	200
5.4.5	尾砂浓密脱水与过滤脱水方式的比较	203
5.5	膏体浓密工程实例	204
5.5.1	膏体浓密机结构	205
5.5.2	尾砂一段浓密工艺	208
5.5.3	浓密效果	208
	参考文献	208
第6章	膏体搅拌理论	210
6.1	膏体搅拌机理及主要影响因素	210
6.1.1	膏体搅拌机理	210
6.1.2	膏体搅拌主要影响因素	211
6.2	膏体搅拌均匀性评价	214
6.3	双轴卧式搅拌机结构参数分析	216
6.3.1	搅拌臂	216
6.3.2	搅拌机叶片布置	220
6.3.3	搅拌筒长宽比	222
6.3.4	搅拌转速	223
6.3.5	容积利用系数	224
6.3.6	搅拌能力	225
6.4	搅拌功率计算及其影响因素	226
6.4.1	搅拌功率计算	226
6.4.2	搅拌功率与塌落度之间的关系	227
6.4.3	搅拌功率与流变特性之间的关系	228
6.5	搅拌低效区及其消除方法	229
6.5.1	搅拌低效区现象	229

6.5.2 搅拌低效区的消除方法	229
参考文献	231
第7章 膏体搅拌工艺与设备	233
7.1 膏体搅拌工艺分类及特点	233
7.1.1 间歇式膏体搅拌工艺	233
7.1.2 连续式膏体搅拌工艺	234
7.1.3 连续式与间歇式搅拌工艺之间的区别	235
7.2 国内外膏体搅拌设备及其性能	236
7.2.1 混凝土搅拌机	237
7.2.2 金属矿山粗骨料膏体连续搅拌机	243
7.2.3 细骨料膏体搅拌机	250
7.2.4 其他新型搅拌机	255
7.3 膏体制备工程实例	259
7.3.1 全尾浆体高速活化搅拌实例	259
7.3.2 全尾-碎石高浓度卧式搅拌工程实例	260
参考文献	262
第8章 膏体管道输送理论	263
8.1 现有膏体管流阻力计算方法	263
8.1.1 基于两相流理论的阻力计算方法	263
8.1.2 基于流变学理论的阻力计算方法	268
8.2 膏体管流阻力的试验测试及影响因素	271
8.2.1 管流阻力的实验测试方法	271
8.2.2 膏体管流阻力的影响因素	281
8.3 膏体触变性对其管流阻力的影响	284
8.3.1 膏体触变模型构建	284
8.3.2 管流阻力时间变化特征	286
8.3.3 试验现象分析	287
8.4 管壁滑移条件下膏体管流阻力的计算	288
8.4.1 膏体管壁滑移机理	289
8.4.2 膏体管内滑移流动分析	290
8.4.3 膏体管壁滑移速度模型推导	292
8.4.4 考虑管壁滑移效应的管流阻力计算	292
8.4.5 管流阻力计算模型适应性分析	294

8.5	系统启动过程中膏体管流阻力的计算	296
8.5.1	试验现象分析	296
8.5.2	停泵再启的阻力模型	298
8.5.3	工程实例分析	300
8.6	膏体管道输送的数值模拟技术	301
8.6.1	数值模拟的基础理论	301
8.6.2	数值模拟软件及应用现状	303
8.6.3	膏体管道输送数值模拟实例	304
	参考文献	314
第9章	膏体管道输送工艺设备及其系统维护	316
9.1	膏体自流输送工艺	316
9.1.1	深井矿山自流输送的两种模式	317
9.1.2	非满管流动的管道破坏机理	318
9.1.3	满管自流输送原理	319
9.1.4	满管流输送技术措施	320
9.1.5	满管自流输送优化实践	325
9.2	膏体管道泵压输送工艺	327
9.2.1	泵压输送工艺的优点	327
9.2.2	泵压充填对膏体充填料的要求	328
9.2.3	膏体充填泵选型原则	328
9.3	国内外膏体泵压输送设备及其性能	329
9.3.1	往复式活塞泵	330
9.3.2	往复式隔膜泵	340
9.3.3	浆体其他输送设备	346
9.4	充填管道布置方式	347
9.4.1	充填钻孔	347
9.4.2	管道系统	348
9.4.3	管道布置形式优化	349
9.5	管道失效模式及其防护措施	351
9.5.1	堵管原因分析及其防护措施	351
9.5.2	充填管道爆管原因分析	351
9.5.3	管道磨损规律与预防措施	354
9.6	膏体充填管道减阻技术	358
9.6.1	水环减阻	358

9.6.2 振动减阻	358
9.6.3 外加剂减阻	361
9.7 膏体充填管道清洗技术	363
参考文献	365
第10章 膏体充填过程自动控制	366
10.1 膏体充填工艺流程概述	366
10.1.1 尾砂浓密工艺流程	366
10.1.2 粗骨料制备流程	367
10.1.3 水泥添加流程	368
10.1.4 膏体搅拌流程	369
10.1.5 膏体管道输送流程	369
10.2 膏体充填过程计量与控制设备	370
10.2.1 散体物料计量设备	370
10.2.2 散体物料输送与控制设备	376
10.2.3 浆体计量与控制	379
10.2.4 物位计	382
10.2.5 管道压力计	386
10.2.6 阀门	387
10.3 充填系统控制算法与实现	393
10.3.1 工业自动化控制系统的分类	393
10.3.2 主要控制回路	395
10.3.3 工艺控制算法	397
10.3.4 执行器	399
10.4 膏体充填自动控制工程实例	402
10.4.1 新疆某铜矿膏体充填自动控制系统	402
10.4.2 赞比亚某铜矿膏体充填自动控制系统	405
参考文献	408
第11章 国内外膏体充填工程实例	409
11.1 国内工程实例	409
11.1.1 云南某铅锌矿	410
11.1.2 新疆某铜矿	412
11.1.3 云南某铜矿	415
11.1.4 甘肃某镍矿	417

11.2 国外工程实例	420
11.2.1 中色谦比希铜矿	420
11.2.2 坦桑尼亚 Bulyanhulu 金矿	424
11.2.3 加拿大 Williams 金矿	426
11.2.4 瑞典 Garpenberg 矿	427
11.2.5 智利 El Toqui 矿	429
11.2.6 爱尔兰 Lisheen 铅锌矿	432
参考文献	433
附录 膏体充填领域著名厂商名录	434

第1章 绪 论

矿业是我国国民经济的基础和支柱产业之一，我国矿山类企业达 12 万家，其中就业人员 2100 万人，全国工业总产值的 30% 来自矿产资源，矿业对促进我国国民经济发展起到不可估量的作用。但是，采矿工业在为人类提供原材料的同时，也不可避免地产生大量固体废弃物，其中尾砂的排放量在工业固体废弃物总量中占据第一位，比例高达 29%。我国现有尾矿库约 12655 座，尾砂积存总量超过 80 亿 t，成为诱发环境污染、泥石流、尾矿库溃坝等事故的严重隐患。同时，地下矿山开采产生了大量的地下采空区，我国矿山采空区体积累计超过 250 亿 m^3 ，相当于三峡水库的容量。采空区是诱发井下岩石冒落和地表塌陷的主要原因。综上所述，尾矿库和采空区是金属矿山的两大危险源，处理不当将给人民生命财产安全和生态环境带来巨大的威胁。

充填采矿法将地表堆积固体废弃物回填到井下采空区，既可以提高井下采矿作业的安全性，又能防止地表塌陷，而且还可充分利用地表固体废弃物，成为矿山安全、高效、环保的采矿方法。充填采矿法已有近 60 年的发展历史，从最初的以处理废石为目的发展到后来的改善采场稳定性，该方法在现代采矿活动中所占的比重越来越大。按照充填工艺和充填材料的不同，充填采矿法从最初的干式充填，发展到水砂充填、胶结充填，再到膏体充填，每一个发展阶段都有其特殊的时代特征和技术特点。

20 世纪 40 年代以前，采矿技术简单落后，人力劳动是矿山运转的主要动力。为降低劳动强度，很多矿山将井下废石就近填入采空区，成为充填采矿法的雏形。随着这种技术的发展，其附加优势逐渐显现，如能够较好地处理采空区，一定程度上控制地压等。在 20 世纪 50 年代以前，干式充填法在我国 50% 以上的有色金属矿山中都有应用，采出的矿石占总矿石量的 1/3 以上。但随着矿山开采规模的加大，干式充填法因工艺繁杂、劳动力需求大、作业成本高、采场充填时间长、矿石贫化率高、生产率低等缺点，已经逐渐适应不了采矿技术发展的需要。因而，从 1956 年以后国内干式充填所占的比重逐年下降，到 1963 年已经到了被淘汰的地步。

水砂充填技术是利用砂浆泵或自流方式将尾砂、炉渣、碎石等充填料以固-液两相流输送到井下充填采空区。1864 年在美国宾夕法尼亚州的一个煤区进行了第一次水砂充填以保护一座教堂的基础。1909 年，南非的 Village 金矿尝试用水砂充填体来支护井筒和中段车场周围劣化的矿柱，后来发展到直接用水砂充填采空区来支护不稳固岩层。自 1917 年开始，在美国巴特山地区的一些矿山利用选厂尾砂进行水砂充填。1929~1932 年，澳大利亚的 Mount Lyell 铜矿、赞比亚的 Mulfulira 铜矿和美国的 Homestake 金矿均有水砂充填的生产实践。由于水砂充填采矿法具有充填效率高、劳动强度低等优势，加拿大等国也逐渐进行了推广应用。我国从 20 世纪 60 年代开始引进水砂充填技术，1965 年在锡矿山南矿首次采用水砂充填工艺，有效地减缓了地表下沉。水砂充填采用管道输送，改变了传统的充填料输送方式，对充填采矿技术的发展具有划时代的意义，为后续充填技术的发展提供了创