

KUANGSHAN FEILIAO JIAOJIE CHONGTIAN

矿山废料胶结 充填

(第2版)

周爱民 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

矿山废料胶结充填

(第2版)

周爱民 编著

北 京

冶金工业出版社

2010

内 容 提 要

本书结合矿山废石、尾砂和赤泥三大金属矿山的固体废物，重点阐述了矿山废石胶结充填、全尾砂胶结充填和赤泥胶结充填的理论与工艺技术，以及胶结充填体的作用机理，特别是针对矿山废石、尾砂和赤泥等矿山固体废物作为充填材料的特殊性和矿山充填的特点，系统地论述了固体废物的基本特性、胶结强度理论、充填料配合原理、结构流输送理论，以及固体废物胶结充填料的制备和输送工艺技术、充填系统配置与装备技术、采场充填工艺技术等，介绍了矿山废石胶结充填、全尾砂胶结充填和赤泥胶结充填的典型应用。

本书适合从事矿山工程技术研究、设计、教学与生产技术管理的人员阅读，也可以作为高等学校相关专业教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

矿山废料胶结充填/周爱民编著. —2版. —北京:冶金工业出版社, 2010. 10

ISBN 978-7-5024-5361-9

I. ①矿… II. ①周… III. ①矿山—废料—胶结充填法
IV. ①TD853. 34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010) 第 181838 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 王之光 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5361-9

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2007 年 1 月第 1 版, 2010 年 10 月第 2 版, 2010 年 10 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 15 印张; 359 千字; 225 页

48.00 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(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)



第2版前言

随着全球可持续发展战略的深入实施，各级政府部门和矿业界越来越注重对矿区环境的保护和矿产资源的高效利用，致使矿山固体废物胶结充填方式的意义更显突出，备受重视；加上国内矿产资源的需求量持续增长，大量开发复杂难采矿床，进一步推动了胶结充填工艺与技术的发展。目前，充填采矿法及矿山固废胶结充填方式已成为新建和改扩建地下矿山的首选技术方案之一，并且从有色金属矿山迅速扩展到冶金、化工和煤炭矿山。用作矿山充填材料的固体废物，也从金属矿山的废石、尾砂与赤泥，拓展到化工矿、煤矿等多类矿山的废弃物的利用。固废胶结充填在矿山广泛应用的过程中，其理论与工艺技术得到了进一步发展，日趋完善和成熟，逐步形成了自成系统的理论与技术体系。特别是结构流全尾砂自流胶结充填理论与技术，在近五年中得到了快速发展，使全尾砂充填方式在经历了十多年的试验与研究阶段后，全面进入了工业应用阶段。目前在国内二十多座矿山推广应用了全尾砂自流胶结充填技术，尤其在新建地下铁矿山得到了快速推广应用，已成为地下铁矿山充填采矿的首选充填方式。借助于固废胶结充填技术的发展与应用，在国内建成了多座无尾砂库矿山，以及既无尾砂库，又无废石堆场的无废矿山，使我国无废开采进入国际先进行列。

采矿工业及其矿山充填的快速发展，为矿山固体废物胶结充填工艺技术创造了广阔的需求环境。自《矿山废料胶结充填》出版发行以来，得到了从事矿山工程技术研究、设计、教学和生产技术管理人员的普遍欢迎，为固废胶结充填的进一步发展与应用发挥了积极的作用。为了满足采矿工业发展对固废胶结充填的需求，也为了适应固废胶结充填理论与工艺技术的最新发展，作者在第1版的基础上进行修订后，将第2版奉献给读者，以期促进矿山固废胶结充填技术得到更加广泛的推广应用。

第2版针对全部章节,从系统性、简练性和规范性等方面作了较大篇幅的修改和完善,并且补充了作者近年来关于固废胶结充填方面的相关理论与工艺技术的研究成果,新增了由姚中亮教授、谢开维高工近年内完成的全尾砂胶结充填与磷石膏胶结充填方面的最新试验研究与应用内容。通过第2版以期尽量补充固废胶结充填技术的最新发展,完善固废胶结充填的理论与技术体系。但虽然进行了多次修改,却仍感有太多不足之处,仍有太多需要进一步完善的方面,期望得到广大读者的指正。通过读者和致力于发展矿山充填理论与技术的各方面人员的共同努力,真正完善固废胶结充填理论与技术体系,推进矿山充填及充填采矿的应用,促进采矿工业与资源、环境的协调发展。

作者

2010年3月于长沙

第1版前言

采矿是矿产资源开发和利用的基础，但是采矿工业在为人类提供原材料的同时，不可避免地带来资源损失、地表塌陷、排放废料等负面效应。随着工业社会的飞速发展，矿产需求量迅速增加，金属矿产资源开发利用引发的地表破坏和废料排放，导致矿山环境恶化，给地球环境造成了很大的负面影响。尽管目前国内外在矿山环境治理和生态恢复方面做了大量的工作，但是收效不明显。采矿专家希望通过采矿技术进步，使采矿工业能实现零排放和不破坏地面环境。这就意味着不将废料排放在地表，采空区能被有效充填，同时还能充分地回收矿产资源，从根本上解决矿产资源开采带来的环境和安全问题。目前的采矿工业离此目标还有较大的差距，因此，需要全体采矿工程师和各方面人员的共同努力才能实现这一目标。

矿山废料胶结充填可以提高资源回采率，有效保护地表不塌陷和保护远景资源，消除或大量减少矿山固体废料的排放，保持矿区生态体系完整，从根本上最大限度地消除矿产资源开采所带来的负面影响，并且能使矿山效益最大化。矿山废料胶结充填是按照工业生态学思想发展起来的矿山充填新理论与新技术，能促进采矿工业与资源、环境、安全、经济的协调发展，符合可持续发展战略的要求。

本书是在作者多年来主持完成的多项科技攻关项目成果的基础上，以全部利用矿山固体废料作为充填材料为出发点，以实现高效、安全、低成本充填为目标进行组材编著。重点针对矿山废石、尾砂或赤泥作为充填材料的特殊性和矿山充填的特点，系统地论述了这些矿山固体废料的自然特性，以这些固体废料作为充填材料的胶结强度理论及材料配合原理，结构流充填料输送理论及其特性参数，废石胶结充填、全尾砂胶结充填和赤泥胶结充填的充填料制备工艺与装备技术、输送工艺与装备技术、充填系统配置以及采场充填工艺与技术

等，并阐述了矿山废石胶结充填、尾砂胶结充填和赤泥胶结充填的应用及其胶结充填体作用机理。

《矿山废料胶结充填》一书通过理论与实际相结合，以期在推广应用矿山废料胶结充填新理念、新理论、新工艺和新技术方面发挥积极作用，为实现采矿业与资源、环境、安全、经济的协调发展作出一定的贡献。

作者
2006年2月

目 录

1 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 矿床开采问题	1
1.1.2 工业生态学理念	3
1.1.3 环境治理新观念	4
1.2 无废开采	4
1.2.1 固废流量模型	5
1.2.2 工业生态型开采	6
1.3 矿山充填功能	7
1.3.1 充分回采资源	8
1.3.2 远景资源保护	10
1.3.3 防止地表塌陷	10
1.3.4 固体废物利用	10
1.3.5 工业生态型充填	11
1.4 充填技术评述	11
1.4.1 充填技术进展	11
1.4.2 充填新成就	13
1.5 充填技术应用	17
1.5.1 分级尾砂充填	17
1.5.2 全尾砂胶结充填	17
1.5.3 废石胶结充填	18
1.5.4 膏体泵送胶结充填	19
1.5.5 磨砂胶结充填	19
1.5.6 赤泥胶结充填	20
1.5.7 其他充填技术	20
参考文献	20
2 胶结充填体机理	23
2.1 胶结充填体力学	23
2.1.1 受压变形	23
2.1.2 测试特性	25
2.1.3 力学参数	31

2.1.4	破坏特征	32
2.2	胶结充填体承载	34
2.2.1	采场岩体性态	34
2.2.2	采区地压规律	35
2.2.3	充填体应力状态	36
2.3	胶结充填体力学作用	37
2.3.1	作用机理	37
2.3.2	作用模型	39
2.3.3	破坏机理	40
2.3.4	稳定性判断	41
	参考文献	42
3	矿山固体废物特性	44
3.1	废石	44
3.1.1	粒级组成	44
3.1.2	物化特性	44
3.1.3	力学特性	46
3.2	尾砂	47
3.2.1	粒级组成	47
3.2.2	物化特性	48
3.2.3	沉降特性	50
3.3	赤泥	51
3.3.1	矿物组分	51
3.3.2	粒级组成	51
3.3.3	潜在活性	52
3.4	高炉矿渣	53
	参考文献	53
4	固废胶结料强度	55
4.1	胶结料强度因素	55
4.2	废石胶结料配合	56
4.2.1	胶结体特性	56
4.2.2	组分效应	56
4.2.3	充填料级配	58
4.2.4	用水量	62
4.2.5	水泥用量	63
4.2.6	工艺因素	64
4.3	全尾砂胶结强度	64
4.3.1	胶结机理	64

4.3.2	活化机理	65
4.3.3	强度因素	66
4.3.4	胶结料特性	70
4.4	赤泥胶凝理论	71
4.4.1	强度特性	71
4.4.2	胶结机理	73
4.4.3	充填料强度	77
4.4.4	工作特性	79
4.5	矿渣胶结强度	80
4.5.1	胶结性能	80
4.5.2	矿渣尾砂强度	81
4.6	粉煤灰胶结原理	83
4.6.1	粉煤灰活性	84
4.6.2	胶结机理	85
4.6.3	强度作用	86
	参考文献	88
5	结构流充填料输送理论	89
5.1	结构流输送理论	89
5.1.1	结构流特征	89
5.1.2	阻力因素	91
5.1.3	阻力公式	93
5.2	自流输送	94
5.2.1	充填料特性	94
5.2.2	流变参数	97
5.2.3	输送参数	102
5.3	泵压输送	106
5.3.1	充填料特性	107
5.3.2	流变特性	107
5.3.3	可泵性	109
	参考文献	111
6	废石胶结充填	112
6.1	概述	112
6.1.1	废石胶结充填特点	112
6.1.2	充填工艺流程	113
6.1.3	应用概况	114
6.2	充填料制备	116
6.2.1	充填材料	116

6.2.2 废石集料制备	116
6.2.3 水泥浆制备	117
6.3 充填料输送	118
6.3.1 废石料输送	118
6.3.2 水泥浆输送	121
6.4 充填料直淋混合	122
6.4.1 直淋混合实验	123
6.4.2 水泥浆直淋混合	127
6.4.3 砂浆直淋混合	129
6.5 采场充填	129
6.5.1 充填隔墙	129
6.5.2 充填方式	129
6.5.3 充填接顶	130
6.5.4 质量控制	130
6.6 矿山应用	131
6.6.1 丰山铜矿废石水泥浆充填	131
6.6.2 铜坑锡矿废石砂浆充填	135
参考文献	138
7 结构流全尾砂胶结充填	139
7.1 发展概况	139
7.2 全尾砂充填料制备	144
7.2.1 全尾砂脱水	144
7.2.2 全尾砂造浆	156
7.2.3 充填料浆搅拌	157
7.3 全尾砂胶结料输送	163
7.3.1 自流输送	163
7.3.2 增压输送	163
7.3.3 膏体系送	169
7.4 采场充填	176
7.4.1 自流充填	176
7.4.2 泵压充填	177
7.5 矿山应用	179
7.5.1 凡口铅锌矿自流充填	179
7.5.2 南京铅锌矿自流充填	183
7.5.3 莱新铁矿自流充填	186
7.5.4 霍邱地区铁矿自流充填	188
7.5.5 用沙坝磷矿自流充填	189
7.5.6 烂泥沟金矿自流充填	192

7.5.7 金川二矿泵送充填	194
7.5.8 铜录山铜矿泵送充填	201
参考文献	209
8 固废自胶结充填	211
8.1 赤泥充填料特性	211
8.2 赤泥充填工艺	212
8.2.1 赤泥浆制备	212
8.2.2 石灰浆制备	213
8.2.3 普强赤泥充填	213
8.2.4 赤泥全尾砂充填	214
8.3 赤泥充填评价	214
8.4 湖田铝土矿泵送充填	216
8.4.1 充填料组分	217
8.4.2 充填实验	218
8.4.3 充填料制备	219
8.4.4 双管泵送	222
8.4.5 采场充填	223
8.4.6 充填效果	223
参考文献	225



绪 论

矿产资源对后续产业所具有的强劲效益传递功能和广泛的社会辐射效应，使人类社会得以进步和发展。可以说，人类的进步以利用矿物的能力来衡量。矿产资源开采是社会生产链的最前端，生产的许多重要工业原料是国民经济、国防工业、高新科学技术领域不可缺少的原材料和重要战略物质。矿物产品对保障国民经济和社会发展的重要作用 and 战略价值，决定了其在国民经济中的不可替代的地位。我国是矿产资源大国，也是矿产资源生产和消耗大国。

采矿是矿产资源开发和利用的基础工业，但是采矿工业在为人类提供原材料的同时，也不可避免地会扰动和破坏地球环境，带来安全隐患。随着工业社会的飞速发展，矿产需求量迅速增加，矿产资源开采利用引发的环境破坏和废物排放，已成为相当严峻的环境问题。世界各国领导人、环境专家和采矿专家都希望采矿工业实现零排放和不破坏生态环境。这就意味着不能将矿山固体废物排放地表，采空区能被及时充填，同时还要充分地回收利用矿产资源。但尽管目前国内外采矿技术已取得很大进展，要实现这一目标仍然有很大的难度。因此，需要全体采矿界同仁和各方面人员的共同努力才能逐渐实现这一目标。本书也正是希望为实现这一目标作出一定的贡献。

1.1 概述

1.1.1 矿床开采问题

按照人们对矿产资源开发和利用的传统认识，通常只注重于矿床开采的经济活动，较少地考虑矿床开采过程对地球环境的严重负面影响；往往在出现生态破坏和环境污染后再进行局部的末端治理，较少按照矿产资源开采与生态环境相协调的理念，将矿床开采的各个工序作为一个系统从源头解决矿山环境问题。以致国内因矿床开采造成了超过400万公顷的土地受到破坏，排放的固体废物达工业行业排放固废总量的85%。矿山固体废物的排放占用了大量宝贵的土地，造成生态环境恶化，同时也造成大量可利用矿物资源的流失。特别是国内矿山数量众多，大多数矿山生产规模小，技术水平差别大，较多矿山的环境保护工作滞后，因而矿山生态环境严重恶化，给当地自然生态环境、社会经济与人们生活带来了很大的负面影响。国内矿产资源开发与利用引发的环境破坏已成为不可忽视的严峻问题，显著增加了地球的负荷。

1.1.1.1 资源浪费

国内金属矿产资源的开采损失比较严重。根据地矿部门在全国组织的矿产资源开发利用水平抽样调查结果表明，国内主要金属矿产的开发利用水平有了很大的提高，但仍然远低于主要矿业大国的水平。目前工业发达国家有色金属矿产资源综合利用率达到70%左右，而国内有色金属矿产资源的综合利用率不到60%，其中采选回收率不到70%，采矿

回收率不到 80%，比矿业发达国家低 10~20 个百分点。

另外，当代被采矿体的围岩也极有可能含有远景矿产资源，能在将来得到利用。但按照目前通常的认识，它们在现有技术条件下不能被利用，或还不能被认识到将来的可利用价值。因而，在当代采矿活动中很少考虑这些远景资源在将来的开发利用。事实上，在远景资源还不能被明确界定的条件下也难以进行综合规划。因此，在开发资源的过程中，远景资源往往受到极大破坏，很难被再次开发，或者即使能开发也增加了很大的技术难度。

1.1.1.2 地表塌陷

采矿工业在向地球索取资源的同时，因开采而在地下形成大量采空区，即矿石被回采后，遗留在地下的回采空间。采用崩落采矿法回采时，在覆盖岩石下出矿，需要崩落上部矿岩充填回采空间，造成地表塌陷。采用空场采矿法回采时，出矿后留下采空区。采空区的存在使岩体中的应力重新分布，在空区的周边产生应力集中形成地压，使空区顶板、围岩和矿柱发生变形、破坏和移动，产生顶板冒落；或者强制崩落上部围岩充填采空区，造成地表塌陷。无论是强制崩落采空区顶板，还是采空区失稳塌陷，都会造成地表和植被遭受破坏。矿山开采诱发的地面崩塌、滑坡、塌陷等地质灾害已十分普遍。

1.1.1.3 排放废物

目前的工业体系实际上是一个开采资源和排放废物的过程。采矿活动是向环境排放废弃物的主要来源，其固废排放量占工业固体废物排放量的 80%~85%。据报道，澳大利亚每年产生约 21 亿吨工业固体废物，约有 80% 来自矿业部门。世界矿业开发所产生的尾砂，每年在 50 亿吨以上。国内在矿产资源开发利用过程中产生的尾砂、废石、煤矸石、粉煤灰和冶炼渣已成为排放量最大的工业固体废弃物，占全国工业固体废弃物排放总量的 85%。据统计，国内矿山年产尾砂与废石 18 亿吨以上，排放 87%。截止到 2009 年底，全国尾砂库共计 12523 座，堆存尾砂总量 70 多亿吨。可见，现有的采矿工业模式显著增加了地表环境的负荷，不能满足可持续发展原则。

1.1.1.4 安全隐患

矿床开采留下的采空区、堆放的废石场和构筑的尾砂库带来严重的安全隐患。诸如采空区产生或诱发矿区塌陷、崩塌、滑坡、地震、矿井突水、顶板冒落等地质灾害，废石场引发泥石流以及尾砂库溃坝等灾害事故时有发生，严重威胁矿山正常生产和矿区人民的生命财产安全，带来了大量人员伤亡和经济损失。据统计，我国因采矿引起的重大塌陷超过 180 处，发生采矿塌陷灾害的城市 30 多个，其中造成严重破坏的有 25 个。尤其是尾砂库与采空区已成为我国矿山的重大安全隐患。

1.1.1.5 治标不治本

人类在采矿工业的发展进程中已认识到矿产资源开采所引发的生态问题与环境问题。特别是工业革命以来，矿产资源的大量开发遗留给人类的生存环境日趋恶化。为了解决这一问题，世界各国一方面逐步制定和完善了各类法律、法规和技术规范标准，以规范采矿业的行为；另一方面则研究矿产资源开发新技术，如地下矿山的充填采矿技术、原地溶浸采矿技术，以及露天坑与废石场的复垦技术等，以尽量减少矿产开采对自然生态环境的破坏。但是在解决方案方面，即使是采矿工业发达的国家，自 20 世纪 60 年代以来所采用的法律与技术手段，均一直是采取措施来治理污染和恢复生态，即末端治理。这些国家的经验表明，生产过程末端治理方案治标不治本，并且治理不及时，不是一个有效的解决方

案。末端治理方案往往只是将问题在时间和空间上进行转移，比如塌陷区回填需要获取土石，必然对其他地段造成破坏；尾砂库的复垦只是解决了地面的污染问题，而尾砂对土地的污染依然存在。从长远来看，生产过程末端治理所需的资金投入极大，废物还必须进行最终处理。

1.1.2 工业生态学理念

世界各国领导人、环境专家和采矿专家都希望采矿工业实现零排放和不破坏地表环境。《中国矿业城市 21 世纪宣言》宣称：“……矿业城市要走可持续发展和环境保护之路，以科学、求实、奉献的精神，把我们的城市建设成为山清水秀、自然和谐、文明富裕、生机盎然的美好家园。”不管是矿山零排放还是矿业城市的山清水秀，均意味着不将矿山废物排放在地表，采空区被有效充填，同时还要充分地回收利用矿产资源。

工业生态学能较好地解决矿床开采的负面问题，它是一个将工业体系模仿生物界的生态规则运行的类比概念，属于可持续发展科学。最早于 20 世纪 70 年代初由联合国工业发展组织在维也纳的一次讨论会上提出了“与环境平衡的工业联合企业”和“零污染”的观点。1976 年联合国欧洲经济委员会组织的一次“技术与无废物生产”报告会上，许多文章提出的观点也类似于工业生态学的观点。但直到 90 年代初，工业生态学才开始引起人们的重视。目前，正在逐步形成一个由工程学、生态学和生物经济学交叉构成的学科与技术新领域。工业生态学的任务是要借助于对生态系统和生物圈的认知，寻找能使工业体系与生物生态系统协调运行和相互匹配的途径；借助于生态科学、自然科学和工程科学，研究工业体系的整体和长期的发展。

工业生态学完全推翻了末端治理的观念，并就工业技术问题提出以下三个主要观点：

(1) 无碍环境的清洁技术与其他技术之间的区分将不复存在，因为只要优化物质与能量流，所有的技术都会趋于越来越清洁。

(2) 工业体系需要在总体上朝着成熟的生态系统方向演进，企业应在分析整体工业系统的基础上进行规划和选择技术，对于各自孤立的企业，则无论多么优化、多么清洁，都是不够的。

(3) 环境问题涉及所有技术，同样也涉及科技政策，包括对国际经济竞争力背景下的关键技术的判断。

工业生态学还没有标准的定义。加拿大新苏格兰省哈利法克斯达尔荷西亚大学的雷蒙·柯特曾作了一番统计，有关工业生态学不同的定义达 20 种之多。但在关于工业生态学的三大基本要素方面有共同的认识：

(1) 工业生态学是一种关于工业体系的所有组成部分及其同生物圈的关系问题的全面的、一体化的分析方法。

(2) 工业生态学研究的范围，是工业体系的生物物理基础，即与人类活动相关的物质和能量流动与储存的总体。

(3) 科技的动力，关键技术的发展进化，是工业体系的一个决定性因素，有利于把现有的工业体系转换为可持续发展的体系。

传统的工业体系是一些相互不发生关系的线形物质流的叠加，每一道制造工序都独立于其他工序。其运行方式，简单地说就是开采资源和抛弃废物，这是环境问题的根源。按

照传统的工业体系不可能实现可持续发展，只有通过一种更为一体化的工业生产方式来代替简单化的传统生产方式，才能实现可持续发展，这就是工业生态系统。

为了将工业体系真正转变成为可持续的形态，就必须以完全循环的方式运行。在这种形态下，不再区分资源与废物。对一个有机体来说是废物，但对另一个有机体却是资源，只有太阳能是来自外部的支援。这就是第三级生态系统（图 1-1）。在这样的一个生态系统之内，众多的循环借助太阳能，既以独立的方式运行，也以互联的方式进行物质交换。理想的工业生态系统应尽可能接近第三级生态系统。

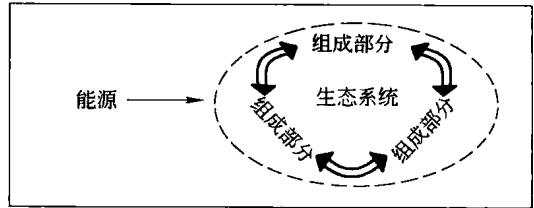


图 1-1 第三级生态系统示意图

一个工业生态系统包括四类主要行为者：资源开采者、产品制造者、消费者和废物处理者。较理想的系统将通过集约再循环，使系统内不同行为者之间的物质流远远大于出入系统的物质流。

1.1.3 环境治理新观念

环境问题的传统观念认为解决方案是采取措施来治理环境，也即末端治理。这是自 20 世纪 60 年代以来，工业化发达国家广泛采用的技术手段。但是，这些国家的经验表明，生产过程末端治理不是有效的解决方案。工业生态学认为，在节约资源的同时又减少污染源及其污染物的处理成本是可能的。在一些情况下，运用工业生态学方法可以把一道工序或一个企业所产生的废物，转换成其他工序或企业所需要的原料。因而，可以将费用昂贵的废物处理转变成企业的一个新的利益源。

减轻采矿工业对自然环境的破坏，充分回收利用有限的矿产资源，是世界范围内需要有计划地完成的一项重大环保任务和资源战略。工业生态学为全面解决环境污染和资源利用，以及提高矿山企业的竞争力，提供了理论方法和实施方案。

针对矿床开采造成地表塌陷、排放尾砂、排放废石和浪费资源等四大危害，可以按照工业生态学的理念，通过重构生产系统，结合开采过程消除环境污染和生态破坏，使矿山工程与生态环境融为一体；并使采矿过程和谐地纳入自然生态系统物质循环利用过程，形成产品清洁生产、资源高效利用和废物循环利用为特征的生态经济发展形态。这样，就可以从根本上解决传统开采方式所带来的资源浪费、破坏生态、污染环境及安全隐患问题。完成这一任务的解决方案是按照工业生态学的观点，把矿山充填作为矿床开采的一道必要工序，并且完全利用矿山固体废物进行充填。也就是说，在矿山工业系统中，利用采矿和选矿工序所产生的废物作为充填工序的原料。

1.2 无废开采

实现矿床无废开采的总体思想是按照工业生态学的理念，通过矿床开采工艺和技术的创新，最大限度地利用矿产资源和保护远景资源，最大限度地减少矿山固体废物的产出，最大限度地把固体废物转变成二次资源被重新利用和抑制地表塌陷，从根本上解决矿区环境与生态破坏问题。

1.2.1 固废流量模型

金属矿山在生产出工业产品的过程中，产生的固体废物主要为废石、尾砂（包括赤泥等其他尾废）。对于具体矿山来说，尾砂大至是一个常量，而废石量可以通过开采工艺进行适度控制。在矿床开采物流模型中，既要使产品最大化和固体废物产出量最小化，又要充分利用固体废物以减少流出量。

在矿床开采过程中，一方面会生成采空区，另一方面会产生废石和尾砂等固体废物。通过矿山充填新技术利用矿山固体废物充填采空区，既有效地处理了空区隐患，并为下一步骤的回采创造了作业条件，又能够将矿山固废转化成为资源被二次利用起来，使采空区和固体废物得到协同处理。因此，根据矿山生产流程，可构造矿山固体废物的流程见图 1-2。由此可知，工业生态型的矿床开采模式的固体废物流量目标，就是要通过开采工艺的创新减少废石产出，通过充填技术的创新尽量利用废石和尾砂，实现固体废物流出量的最小化。

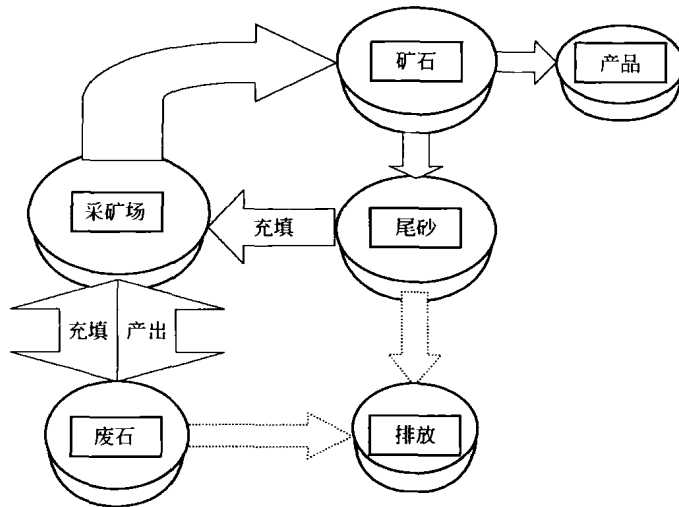


图 1-2 矿山固体废物流程

假设矿山生产过程中的矿石产出量为 Q_r ，废石产出量为 Q_g ，尾砂产出量为 Q_f ，最终排放的固体废弃物总量为 Q_o ，则矿山固体废物流量的数学模型可构造为如下最优化目标函数：

$$\min Q_o = Q_g(1 - P_g) + Q_f(1 - P_f) \quad (1-1)$$

式中 $Q_g = K_g \cdot Q_r$;

$Q_f = K_f \cdot Q_r$;

P_g, P_f ——分别为矿山废石和尾砂的综合利用率；

K_g, K_f ——分别为矿山废石和尾砂的产出率。

可见，无废开采模式的目标是 Q_o 的最小化。由式 (1-1) 可知，实现 Q_o 最小化，需要 Q_g, Q_f 最小，或 P_g, P_f 趋近于 1，即实现最小的废石与尾砂产出率和最大的废石与尾砂利用率。