

矿山充填力学基础

KUANGSHAN CHONGTIAN LIXUE JICHU

蔡嗣经 编著

冶金工业出版社

序 言

《矿山充填力学基础》一书是作者十几年来科研成果和教学积累的总结，是一本很有价值的专著，同时也是一本大学本科生和研究生的教材及参考书。

充填采矿法的广泛使用，提出了许多理论上和实践上的研究课题，其中很大一部分是力学问题。这本书系统地阐述了充填材料的散体介质力学特性和充填材料水力输送所涉及的流体力学或流变力学问题，重点探讨了充填法采场稳定性的评估方法以及充填体维护采场稳定性的力学作用机理等问题。这本书内容丰富，充分反映了国内外充填采矿法现有工艺技术水平 and 理论研究的新进展，无论是对从事矿山设计、生产或管理的工程技术人员还是对从事理论研究的科技人员都将有所裨益。

这本书是第一本有关矿山充填力学方面的专著。它的出版发行，是我国采矿工程界的一件好事。期望这本书能很好地发挥作用。

北京科技大学采矿系
教授 童光煦

1993.5.

目 录

第1章 绪论	1
1-1 充填采矿法的使用现状和研究进展	1
1-2 充填采矿法的发展趋向	6
1-3 充填力学问题	14
第2章 充填材料散体介质力学基础	18
2-1 充填材料的分类	18
2-2 充填材料的物理力学性质	24
2-3 胶结脱泥尾砂充填材料的优化	32
2-4 充填材料散体介质力学基础	42
第3章 充填料浆输送流变力学基础	61
3-1 充填材料的输送方法	61
3-2 两相流体力学问题	69
3-3 膏体流变力学问题	78
3-4 计算流体力学在充填料浆管道输送研究 中的应用.....	94
第4章 充填法采场稳定性的评估方法	96
4-1 地下采场稳定性的几种评估方法	96
4-2 地下采场稳定性的能量平衡原理	102
4-3 灰色系统理论在地下采场稳定性研究 中的应用.....	107
4-4 使用充填方法维护矿山整体稳定的 一般原则.....	116
第5章 充填体支护采场围岩的力学作用机理	125
5-1 充填法采场围岩的力学响应特性	125
5-2 充填体支护采场围岩力学作用机理的 研究方法.....	129

5-2-1 实验室模型试验	130
5-2-2 数值模拟方法	137
5-2-3 现场实测方法	162
5-3 干式充填的支护作用机理	171
5-3-1 干式充填料的承载力学特性	171
5-3-2 干式充填料与采场围岩或矿柱之间的 相互力学作用	175
5-4 水砂充填的支护作用机理	179
5-4-1 水砂充填材料的承载力学特性	180
5-4-2 充填体与采场围岩相互作用的理论分析	183
5-4-3 回采工艺对水砂充填支护作用的影响	193
5-4-4 矿山实例	194
5-5 胶结充填体的所需强度设计	200
5-5-1 矿山实际使用的胶结充填体的设计强度	201
5-5-2 确定胶结充填体所需强度的方法	201
主要参考文献	214

第 1 章 绪 论

1-1 充填采矿法的使用现状和研究进展

最近十几年以来,充填采矿法在世界范围内得到越来越广泛的使用。这一方面是由于地下开采深度逐步增加维护矿山和采场的稳定的需要,另一方面是提高自然资源回收率和环境保护的需要而促成的。如澳大利亚,环境保护法要求采矿作业不得破坏地表风貌,因此,露天采矿坑场必须进行复垦,地下开采只好使用充填法或空场法事后充填,几乎不使用崩落采矿法。在加拿大,充填采矿法的使用比重达40%以上,如果加上空场法事后充填,则占采矿方法的70~80%。南非的黄金深井开采,差不多全部使用充填采矿法或壁式空场法事后充填。在我国地下开采有色金属矿山,充填采矿法的使用比重已达到20%左右(不包括空场法事后充填);而在地下开采黄金矿山,充填采矿法的使用比重更高;据山东省37个黄金矿山的统计,使用充填采矿法的矿山11个,使用留矿法和充填法的矿山9个;充填采矿法采出的矿石量占这37个矿山矿石总量的45%以上^[1]。

随着充填采矿法的广泛使用,其工艺技术和相应的理论研究也得到了迅速的发展。在国际上召开了数次充填采矿法学术研讨会:第一次1973年在澳大利亚的芒特·艾萨(Mt. Isa)矿业公司,会议主题为“矿山充填”^[2];第二次1980年在瑞典律瑞欧(Luleå)大学,会议主题为“岩石力学在分层充填采矿法中的应用”^[3];第三次也在瑞典律瑞欧大学,会议主题为“充填采矿法”^[4];第四次在加拿大蒙特利尔(Montreal)大学,会议主题为“充填采矿技术革新”^[5],在本次会议上还成立了国际充填采矿学会。预定1993年9月在南非约翰内斯堡(Johannesburg)举

行第五次国际充填采矿学术研讨会。在国内也召开了两次充填采矿法学术研讨会：第一次1982年在金川有色金属公司，第二次1989年在山东招远市。这两次会议均出版了学术论文集。

从我国充填采矿法的使用现状来看，其主体依然是上向水平分层充填采矿法，使用胶结或非胶结的脱泥尾砂作为充填材料。国内使用上向水平分层充填法的主要矿山情况列于表1-1中。此外，还有下向进路胶结充填法、削壁充填法、分段充填法等等，使用的充填材料除脱泥尾砂外还有块石、粗粒级碎石、磨砂、天然砂和全尾砂等。

机械化上向水平分层充填采矿法的典型布置方式如图1-1所示。为提高生产效率和设备利用率，国内外研究并试验了多种采场布置形式，如盘区式开采、长壁式回采、圆环式采场布置、多中段组合开采等，如图1-2。

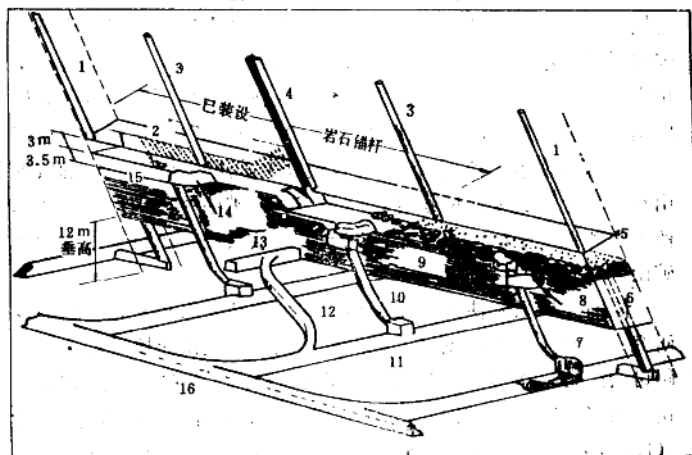
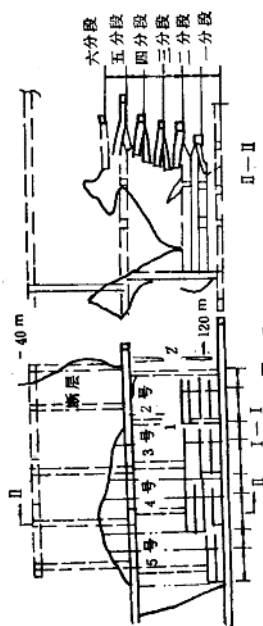


图 1-1 机械化上向水平分层充填采矿法

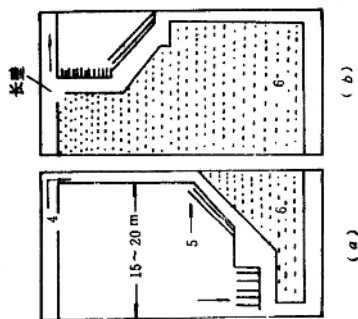
- 1—通风井；2—上向炮孔；3—人行井；4—措施井；5—采场顶板；
6—泄水井；7—漏斗；8—挡墙；9—充填料；10—溜矿井；11—穿
脉巷道；12—采场斜坡道；13—切割平巷；14—充填料挡墙；15—
湿充填料；16—中段主运输巷道

表 1-1 国内应用上向水平分层充填法的主要矿山情况(6)

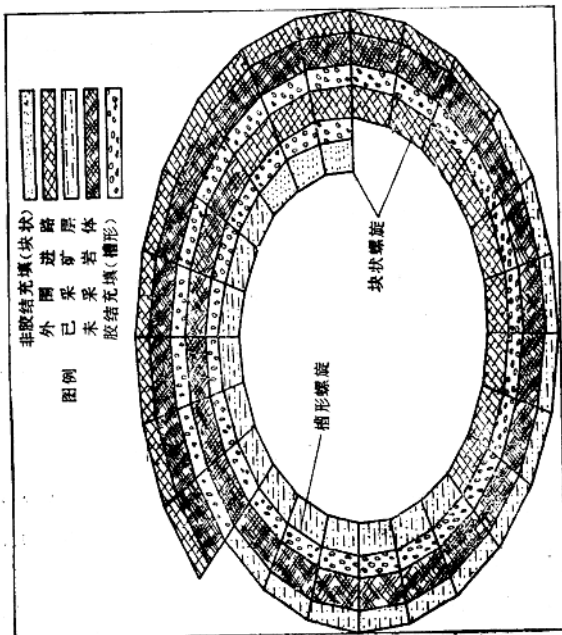
矿 山 名 称	采 矿 方 法	使用充填法的主要原因
凡口铅锌矿	上向水平分层充填法机械化盘区充填法	矿石品位高, 要求限制围岩移动, 防止岩溶水灌入井内
金川龙首矿	上向水平分层充填法	矿岩不稳定, 矿石品位高, 尽量减少损失贫化
金川二矿区	上向水平分层充填法上向机械化进路充填	矿岩不稳固, 矿石品位高, 保护上部贫矿
黄沙坪铅锌矿	上向尾砂胶结充填采矿法	矿石品位高, 矿体形态复杂
凤凰山铜矿	点柱式尾砂充填采矿法	保护地表河流
柏坊铜矿	上向分层胶结充填采矿法	矿石品位高, 矿体形态复杂
红透山铜矿	上向机械化分层充填采矿法	控制地压, 回采厚矿体
大冶丰山铜矿	上向尾砂充填采矿法	保护地表河流
三山岛金矿	点柱式机械化分层充填采矿法	防止海水渗入坑内
焦家金矿	上向分层胶结尾砂充填采矿法	矿岩不稳固, 保护地表高产农田
新城金矿	上向分层胶结尾砂充填采矿法	保护地表, 矿体上盘不稳固
白银小铁山铅锌矿	上向进路充填采矿法	矿岩破碎, 矿石品位高
托里铬矿	上向分层胶结充填法	尽量减少损失和贫化
铜录山铜矿	点柱水砂充填法 (V号矿体)	矿石品位高, 矿体厚度大
哈拉通克铜镍矿	上向分层胶结充填法	回采特富矿, 保护贫矿
青山铜矿	上向分层充填采矿法 (带隔离墙)	矿体上盘不稳固, 地表不允许崩落
铜山铜矿	上向分层充填采矿法	露天和地下同时开采, 保护露天出入沟



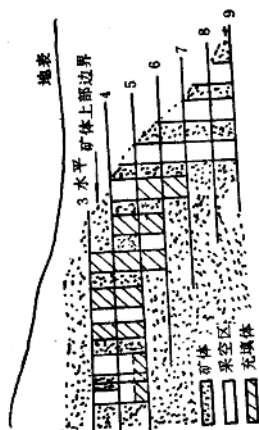
(A)



(B)



(C)



(D)

图 1-2 充填法采场的几种布置形式^[1,4]

(A) — 凡口铅锌矿的机械化盘区充填采矿法;

(E) — 加拿大Macassa金矿的长壁式充填回采

(a) — 20%回采率, (b) 80%回采率;

(C) 美国矿山局研究人员设计的圆环式充填采矿法;

(D) 德国梅根 (Meggen) 矿的多中段组合充填采矿法

1—掘路溜井, 2—顺路人行井, 3—斜坡道, 4—充

填上山, 5—炮孔, 6—中段平巷

在充填工艺方面,主要的进展有:寻找新的充填材料,如挪威Kiruna矿所报道的使用冰作充填料^[4],以及加拿大Denison-Potacan钾盐公司所报道的使用盐尾矿作充填料^[5];降低充填成本,研究用不加水泥的粗粒级碎石充填料取代胶结脱泥尾砂充填料,这在我国锡矿山矿和会泽铅锌矿麒麟厂矿区得到了成功的应用。据麒麟厂矿区的试验资料,充填成本降低42.7%^[9]。

中国矿业大学北京研究生部孙恒虎等研制成功不脱水全尾砂速凝固充填材料。这种充填材料是在不脱水的全尾砂中加入特种吸水胶凝混合料,使之快速凝固硬化。经测试,当这种混合料占全尾砂的10%、砂浆重量浓度40%时,速凝后的早期强度为0.1 MPa;砂浆重量浓度60%时,则早期强度可达到0.5 MPa。由于这种充填料进入采场后无重力水渗透排出,解决了坑内充填水污染及排水问题。

在充填料输送方面,最引人注目的研究成果是全尾砂膏体充填料泵压输送技术。关于这一点,在随后的有关章节中作进一步的介绍和讨论。

在充填法采场生产方面,针对矿体和围岩的不稳固程度,广泛研究使用了长锚索预支护、注浆预加固、锚杆护顶以及光面爆破等施工技术。当采场用非胶结尾砂充填时,为方便矿柱的回收,一些矿山试验成功了挂柔性挡料帘、用块石砌隔离墙等工艺,国外一些矿山还进行了非胶结充填料的冰冻及注浆固结等试验以形成一定宽度的整体性隔离墙。

关于充填采矿法一些理论方面的研究课题及其进展,将在本章第三节中提及。

1-2 充填采矿法的发展趋向

在可以预见的将来一段时期内,地下采矿方法变革的总趋向是:把矿房、矿柱回采和采空区处理作为一个整体予以考虑,有步骤地全面回采,既减少矿石的损失贫化又消除采空区隐患,同时,改革采矿方法结构,实现机械化的强化开采,降低开采成本

并提高劳动生产率。因此,充填采矿法是二十一世纪的最主要的采矿方法之一。

可以认为,对于我国大中型地下矿山来说,充填采矿法的发展趋向在目前主要集中在以下几个方面:

1. 大规模的机械化盘区开采

传统的上向水平分层充填采矿法的主要缺点之一是采场生产能力低,以及工人劳动生产率低。凡口铅锌矿在1992年底试验成功了大型机械化盘区式上向中深孔水平分层充填采矿法。中深孔孔深4.0m,由凿岩台车上向钻进。4~6个采场组成一个盘区,其布置形式如图1-3所示^[10]。采矿作业全部使用大型自行设备:

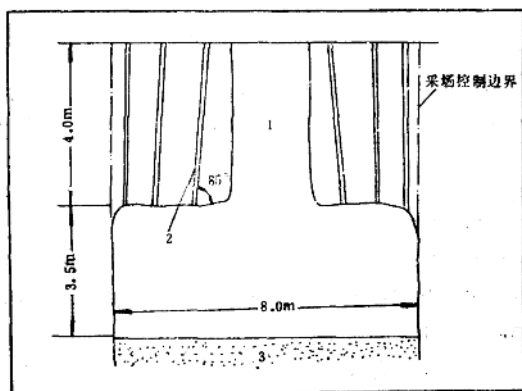


图 1-3 凡口铅锌矿中深孔上向水平分层充填采矿法

1—采场通风天井; 2—炮孔; 3—充填体

凿岩作业为芬兰生产的MONOMATICH S105X型上向自动接杆凿岩台车,装药作业为芬兰生产的NT30/NBB150型井下装药车,采场装运为美国生产的ST-31/2型3 m³铲运机和德国的LF-4.1型2m³铲运机,采场顶板处理为瑞典Brokk300型撬毛车,井下破碎大块为长沙矿山研究院制造的SYG-2.5型井下自行式碎石机,坑内材料运送及采场顶板和帮壁的安全检查为南昌通用机械厂生

产的井下服务车等。由6名工人组成采矿作业队操作所有种类的机械设备,经7个采场16个分层共生产约15万吨矿石的工业试验,其主要技术经济指标见表1-2。

**表 1-2 凡口铅锌矿机械化中深孔分层充填法
主要技术经济指标**

项 目	单 位	指 标
凿岩爆破平均效率	t/班	523.0
铲运机出矿效率:		
2m ³ 铲运机	t/d	560.0
3m ³ 铲运机	t/d	1160.7
掌子面工效	t/工班	80.0
单个采场生产能力:		
2m ³ 铲运机	t/d	190.0
3m ³ 铲运机	t/d	252.0
采矿贫化率	%	7.26
矿石损失率	%	0.39

由表1-2可见,这种大型机械化盘区分层充填采矿法其生产能力和生产工效甚至优于一般的空场采矿法或崩落采矿法,接近国际上采矿先进国家的水平。

2. 充填采矿法与空场采矿法或崩落采矿法联合开采

为充分发挥充填采矿法和空场法或崩落法各自本身的优点,国内外很多矿山都设计使用了这种联合开采方案。如澳大利亚的芒特·艾萨矿1100号巨型矿体的开采,在平面上划分成40×40m的棋盘式采场,在垂直方向上不划分中段,矿体全高90~260m为采场高度,使用分段空场法开采,然后用胶结块石充填。加拿大萨德伯里(Sudbury)国际镍公司的所属矿山,一般用水平分层胶结充填法回采矿房,再用VCR法回采矿柱。我国小铁山铅锌矿成功地试验应用了分段分条胶结充填采矿法,如图1-4所示^[11]。该法结合了充填法进路回采和分段崩落回采两种回采方式的优

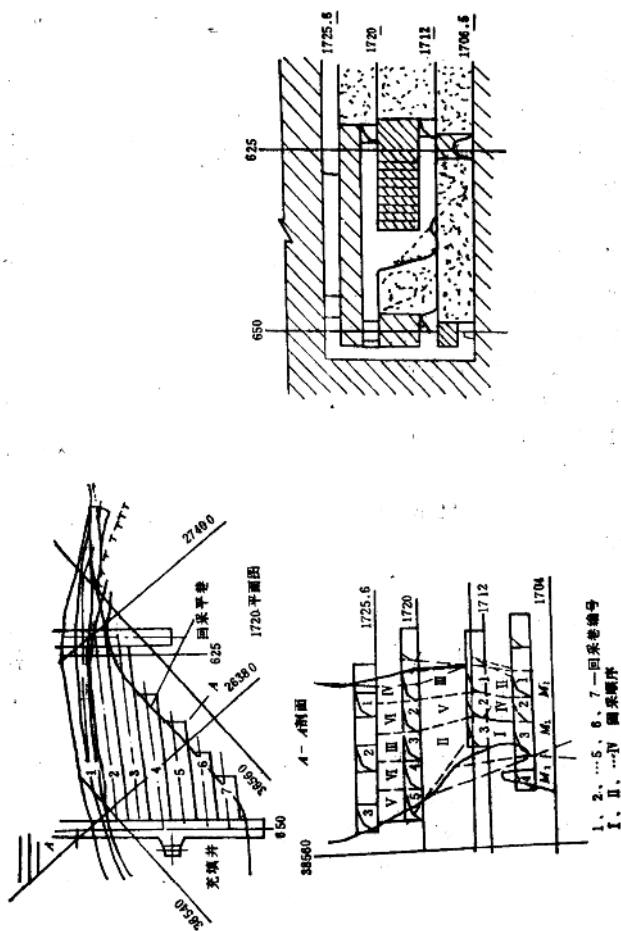


图 1-4 小铁山矿的分段分条充填采矿法

点,分条宽3.5~4.5m,分段高6~8m;充填料为地表采集的风砂,容重 2.65t/m^3 ,孔隙率47.17,平均粒径 0.2044mm ,灰砂比为1:8,设计充填体强度为 $0.5\sim 0.8\text{MPa}$,经现场测试实际达到 $0.6\sim 1.0\text{MPa}$ 。使用YG-80凿岩机打上向扇形中深孔,用斗容为 0.75m^3 的EHST-1A型电动铲运机出矿。主要技术经济指标为:采场生产能力 170.5t/d ,采矿工班效率 $7.8\text{t/工}\cdot\text{班}$,矿石损失率6%,矿石贫化率3.5%,采准比 12.23m/kt 。

此外,山东省河西金矿也在进行类似的垂直分条胶结充填采矿法试验。

3. 全尾砂膏体胶结充填技术

鉴于传统的分级尾砂充填的一些缺点,德国和前苏联等国家在70年代末开展了全尾砂膏体充填泵送技术研究。所谓“膏体”,是指料浆浓度很高,在管道排料口以牙膏状被挤出。德国Preussage 金属公司于1978年首先在格隆德(Grund)铅锌矿进行该项研究,历时6年,形成了“Preussge Pumped Fill”泵压充填新工艺,并申请了专利。其后,南非、加拿大、美国、澳大利亚和我国也开展了试验研究。

凡口铅锌矿从1982年开始与长沙矿山研究院和长沙有色冶金设计研究院合作,进行了高浓度全尾砂胶结充填新工艺和装备的试验研究。该项目于1987年转入现场工业试验,并于1991年5月通过了中国有色金属总公司组织的鉴定。高浓度全尾砂充填系统如图1-5所示,采用了活化搅拌、自动输送等新工艺,尾砂利用率超过90%。充填料浆重量浓度为70~76%,水泥耗量为 210kg/m^3 ,充填能力为 $48\sim 55\text{m}^3/\text{h}$ 。

金川有色金属公司与北京有色冶金设计研究院合作进行的“全尾砂膏体充填新工艺及装备研究”,从1987年开始工作,于1991年8月通过了鉴定。其工业试验流程图如图1-6所示。

此外,焦家金矿、武山铜矿等矿山也积极与国内外有关单位合作,拟进行全尾砂膏体充填的试验研究。

全尾砂膏体充填技术的主要优点有:

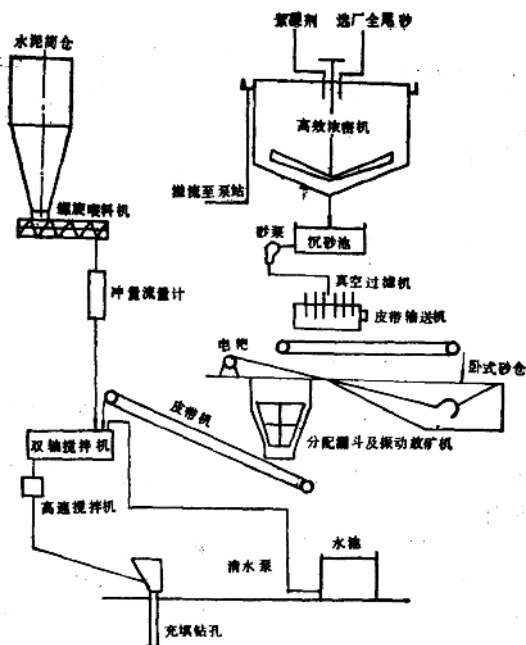


图 1-5 凡口铅锌矿高浓度全尾砂充填系统

(1) 尾砂利用率高，一般为90~95%，个别情况下可达到99%，取决于脱水设备和脱水技术。而分级尾砂的利用率一般只有50~60%，至使充填材料数量不足，许多矿山只好采集地表天然砂或将块石磨碎成砂用作充填料。采用全尾砂充填，可节省大部分采集或磨制充填料的费用。

(2) 减少尾砂库经营和维护费用。全尾砂膏体充填的溢流水在满足环保要求的排放标准时，矿山可不建尾矿库或只建小型的尾矿库。

(3) 充填料浆浓度高，大大减少了水泥用量，降低充填成本。据德国格隆德矿的统计资料，当设计的充填体强度相同时，

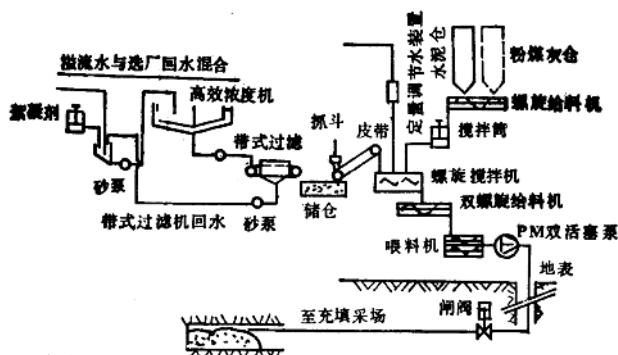


图 1-6 金川镍矿全尾砂膏体胶结充填工业试验流程图

全尾砂膏体胶结充填料的充填成本比分级尾砂胶结充填料的充填成本降低23.6%。

(4) 全尾砂膏体充填料在采场一般无渗流水排出,改善了井下作业环境,节省了井下排水及清理污泥等方面的费用。

全尾砂膏体充填技术的主要缺点是一次性投资较大,如凡口矿的高浓度全尾砂充填系统仅脱水设备就投资150万元。这在中小型矿山或地方矿山推广尚有一定困难。因此,需要改进技术和设备,以适应中小型矿山的需求。

全尾砂膏体充填的技术关键,据认为主要是下列几点^[12]。

(1) 尾砂脱水浓缩技术。按照全尾砂膏体充填的技术要求,尾砂脱水后的重量浓度应达到75~80%以上。因此,需采用大型脱水设备,有的还需进行二级浓缩脱水:选厂送来的尾砂先经浓缩机脱水后,再送至过滤机脱水。表1-3列出了几个矿山所使用的脱水设备及性能。

(2) 膏体的泵压输送技术。全尾砂膏体充填料需用高浓度砂泵或混凝土泵输送。目前,国内使用的输送泵主要有德国生产的PM双缸活塞泵以及沈阳工程机械厂生产的混凝土泵。PM泵为普

茨迈斯特机械有限公司（简称PM公司）的产品，金川矿在试验中引进的是KOS-2170型，由KOS泵和电动液压装置两部分组成。电动液压装置为HA132型，电动机132kW，转速1500r/min，380V，50Hz。设备只需平放在平整的混凝土地面上即可。由电动机带动液压油泵，油压随泵的出口压力而自动升降，达到 250×10^5 Pa后流量会自动降低。当油压升到 300×10^5 Pa时不会再升高。

表 1-3 脱水设备及其性能

矿 山 名 称	脱 水 设 备	进料浓度 (%)	排料浓度 (%)	溢流浓度 (%)	处理能力 m ³ /h	回收率 %
加拿大多姆 (DOM)金矿	离心式脱水机	58.0	76.5	32.0	8.86	77.0
南非西德里方廷 金矿(WEST DRIEFONTIEN)	脱水机	66.0	78.0	28.0	9.72	90.0
前苏联列宁山多 金属公司	薄片式浓密机	11.0	82.0	1.75	4.5	
中国凡口矿	高效浓密机、过 滤机	13.02	79.7	0.444	8.38	>90
中国金川矿	15m ² 带式过滤 机	35.0	73~80		9t/h	

KOS-2170泵的结构简单，泵的主要环节安全保护系统完善，采用了严密密封的S转向管来分配双缸的给排料，能适用大流量长时间连续工作的膏体充填作业，其有关技术性能见表1-4。

(3) 膏体管道输送系统的监控技术。全尾砂膏体充填的浓度要求高，因此，需准确控制充填料各组分的给料量并监测管道输送过程中的有关参数。整个充填系统应组成闭路循环控制系统，自动协调和处理作业过程中某个环节出现的问题，诸如压力过高或过低以及管道堵塞等，并应装备遥控和遥测仪表。