

全尾砂高浓度(膏体)料浆 充填新技术

中国有色金属工业总公司铅锌局

北京有色冶金设计研究总院

1992年12月

全尾砂高浓度(膏体)料浆 充填新技术

主编 于润沧 刘大荣
编写 魏孔章 秦 毅 肖尚武
张双运 王艳雯
审阅 姜富昌 罗建川

中国有色金属工业总公司铅锌局

北京有色冶金设计研究总院

1992年12月

前 言

随着采矿科学技术的发展和矿床特点的要求，充填采矿法在国内外有色金属和黄金矿山中得到了迅速的发展。作为充填采矿方法的核心——充填工艺技术更是方兴未艾。80年代中期以来，国内外对全尾砂充填技术和装备的研究和应用有所突破，我国金川镍矿、凡口铅锌矿全尾砂充填获得成功，各种不同的全尾砂充填工艺技术正在一些单位开展研究，这种新充填工艺技术显著的经济效益和社会效益，正日益引起我国采矿界的关注和兴趣。

本书在金川镍矿全尾砂膏体泵送充填工业试验实践的基础上，结合国内外全尾砂充填矿山的生产、试验经验编写而成。文中简要系统地介绍这一新充填工艺的概念、理论基础、制备技术、泵送工艺以及经济和社会效益；并在第九章中介绍了国内外矿山实例和试验经验。本书力求尽可能将搜集到的资料，即使有的仅系情报性的，均介绍给读者，便于全面了解这一新充填工艺的特点和应用情况。

由于过去没有这方面的专著，国内又缺乏大量的生产实践经验，而理论方面的研究尚待进一步深入，加上编写者的水平所限，不妥之处希望读者批评指正。我们还希望这本书对于矿山企业和有关大专院校各个专业的同仁们有所帮助和启发。

编者

目 录

前 言

第一章 概论	(1)
1.1 胶结充填技术发展的新阶段.....	(1)
1.2 全尾砂高浓度充填的种类及其特点.....	(4)
1.3 开发和应用全尾砂高浓度充填技术的出发点.....	(12)
第二章 全尾砂高浓度(膏体)充填材料及配比选择	(13)
2.1 充填材料.....	(14)
2.2 强度及其影响因素.....	(23)
2.3 添加粉煤灰的强度效果.....	(36)
2.4 全尾砂细石胶结膏体充填料配比选择.....	(36)
第三章 全尾砂高浓度(膏体)充填料浆的流变特性	(42)
3.1 引言.....	(42)
3.2 非牛顿体流变学.....	(42)
3.3 新拌水泥石灰、水泥砂浆和混凝土的流变特性.....	(46)
3.4 全尾砂高浓度(膏体)充填料浆的流变特性.....	(55)
3.5 全尾砂高浓度(膏体)料浆流变特性测量.....	(67)
第四章 全尾砂高浓度(膏体)料浆充填系统及制备	(81)
4.1 全尾砂高浓度(膏体)料浆充填系统.....	(81)

4.2	全尾砂料浆脱水·····	(83)
4.3	全尾砂高浓度(膏体)料浆充填材料搅拌·····	(99)
第五章	全尾砂高浓度(膏体)料浆的管道输送·····	(113)
5.1	全尾砂高浓度(膏体)料浆的管输特点·····	(113)
5.2	高浓度(膏体)料浆的主要输送特性·····	(113)
5.3	似均质充填料浆的管输计算·····	(123)
5.4	影响阻力损失的主要因素·····	(119)
5.5	输送参数的确定·····	(130)
第六章	全尾砂高浓度(膏体)料浆的泵送工艺及 设备·····	(134)
6.1	膏体充填料的可泵性·····	(134)
6.2	全尾砂膏体泵送工艺·····	(142)
6.3	膏体泵送设备·····	(148)
第七章	全尾砂高浓度(膏体)胶结充填水泥添加 方法与装置·····	(163)
7.1	各种水泥添加方法的特点·····	(163)
7.2	水泥气力输送基本参数的选取和计算·····	(166)
7.3	水泥气力输送设备·····	(171)
7.4	压缩空气干燥设施·····	(180)
7.5	料气分离和收尘设施·····	(190)
7.6	坑内水泥添加装置·····	(193)
第八章	全尾砂高浓度(膏体)料浆泵送新工艺的 经济效益·····	(197)
第九章	全尾砂高浓度(膏体)充填试验及矿山应 用实例·····	(203)
9.1	金川镍矿工业试验·····	(203)
9.2	凡口铅锌矿工业试验·····	(230)

9.3	德国格隆德铅锌矿 (Bad Grund)	(241)
9.4	南非库基-3号矿井 (Cooke-3)	(256)
9.5	奥地利布莱堡 (Bleiberg) 铅锌矿	(266)
9.6	美国幸运星期五 (Lucky Friday) 银铅矿	(272)
9.7	德国莫诺波 (Monopo) 煤矿	(275)
9.8	加拿大多姆金矿	(277)
9.9	南非西部采金公司 (Western-Holdings... ..)	(287)
9.10	摩洛哥哈贾尔铜矿	(289)
9.11	原苏联全尾砂胶结自流充填工艺	(290)
9.12	美国矿业局进行的全尾砂膏体充填试验研究	(297)

第一章 概论

1.1 胶结充填技术发展的新阶段

1.1.1 胶结充填技术发展概况

胶结充填技术用于金属矿山，大体上始于60年代初。1953年加拿大鹰桥矿开始在上向分层充填法采场内试用胶结尾砂取代木板做工作底板，1960年加拿大国际镍公司开始试验用波特兰水泥固结水砂充填料的技术，1962年在Frood矿投入实际应用。随后的六十年代成为胶结充填技术蓬勃发展的时期。国外围绕充填材料特性和以两相流理论为基础的输送机理进行了大量的试验研究工作，促进胶结充填技术在生产中获得日益广泛的应用。

胶结充填技术的出现和发展，给坑内采矿带来了巨大的影响，不少复杂的技术难题从此找到了解决的途径。采用胶结充填技术使厚大矿体矿柱回采的回采率和出矿品位大幅度提高，从而可以最大限度地回收高价和高品位矿石。采用胶结充填技术可以成功地控制地压，缓解深井开采时岩爆的威胁。采用胶结充填技术还可以有效地阻止岩层发生明显的移动，实现水体下、建筑物下采矿和优先开采下部或下盘富矿而不造成资源的破坏，对保护地表生态环境也具有重要的意义。胶结充填能有效地隔离和窒息内因火灾，因而也成为开采有自燃性矿床的良好手段。总之，胶结充填技术与无轨自行设备相结合，不仅使古老的充填采矿法面貌一新，而且还使之进入了高效率采矿方法的行列。难怪在许多采矿业比较发达的国家，胶结充填采矿法所占的比重迅速增长。

然而在那个时期，人们对胶结充填料浆浓度这样一个十

分重要的问题还缺乏认识，生产中实际使用的料浆重量浓度，一般为62~68%，所以胶结充填也带来一些新的问题。例如在料浆充入采场后的脱水过程中，由于料浆的离析难免会带走部分水泥和细粒级尾砂，严重污染井下作业环境，给排水、清仓造成麻烦，一旦跑浆，就更为严重，水泥的流失也影响充填体的强度。也是由于胶结充填料浆的离析，充填体表层往往是一层含水泥较多稀泥，对采矿作业不利，更为严重的是水泥随矿石进入选厂，给选矿带来不良影响。过去一般采用分级尾砂作充填料，-37~-20 μm 的细粒级物料送往尾矿库，给堆坝增加了困难，也提高了尾矿库的建设费用。再则胶结充填耗用大量水泥，自然也提高了采矿成本。

到了70年代后期，浓度问题才逐渐引起人们的重视。一些国家的学者和工程技术人员开始探索高浓度的优越性和实现高浓度的有效途径。

我国对高浓度胶结充填技术的研究，起步是比较早的，金川有色金属公司、北京有色冶金设计研究总院和长沙矿山研究院从1975年开始，便利用-3mm戈壁棒磨砂进行高浓度胶结充填料浆制备及输送工艺的半工业性和工业性试验以及理论上的探讨，并且根据试验成果设计建立了新的充填系统，投入实际应用，解决了料浆离析问题。

在研究提高胶结充填料浆浓度的同时，又提出了利用全尾砂（即不分级尾砂）作充填料的问题，根据全尾砂中细粒级含量多的特点，这就需要解决过滤脱水，贮存、制备、输送条件，充填体强度等一系列复杂的技术问题。德国、南非、美国、哈萨克斯坦、加拿大、奥地利等国采用不同的工艺，实现了全尾砂高浓度胶结充填。我国凡口铅锌矿与长沙矿山研究院、长沙有色冶金设计研究院合作，在1987年完成

了半工业试验，1991年实现了全尾砂高浓度胶结充填料浆自流输送的新工艺。金川有色金属公司与北京有色冶金设计研究总院合作，于1991年完成了全尾砂膏体泵送充填新工艺的工业性试验。

全尾砂和高浓度的应用，使胶结充填技术发生了飞跃性的进展，因此可以说，以高浓度和全尾砂为标志，从70年代后期开始，胶结充填技术发展到了一个新的阶段。

1.1.2 料浆浓度对胶结充填的重要意义

本书中所称“高浓度”并不是一个相对的概念，如同65%对60%来讲就是高浓度那样，而是有其特定的内涵。

随着浓度的提高，胶结充填料浆的流态特性逐渐发生变化。当料浆浓度达到某一限值时，料浆便从非均质的两相流体转变为似均质的结构流体，从而发生质的变化，这个转折点称为“临界流态浓度”。这从量变到质变的过程从图1-1

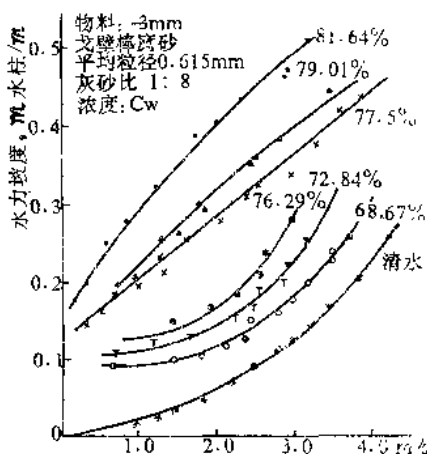


图1-1 $\phi 100\text{mm}$ 水平直管水力坡度与流速关系曲线

所示水力坡度与流速关系曲线组可以很清楚地看出。当浓度低于临界值时，水力坡度随流速的增长呈 $n>1$ 的指数函数关系，接近临界流态浓度时，它们之间大体呈线性关系，超过临界值之后，又呈 $n<1$ 的指数函数关系。本书所称高浓度即指大于临界值的浓度。

在两种流体的管道输送中，临界流速是一个非常重要的参数。它描述某个系统的稳定流动状态占优势运行时的最低流速，表征安全运行的下限。高浓度胶结充填料浆由于不产生离析，在沿管道横断面的垂直轴线上没有明显的浓度梯度，通常以较低的流速呈“柱塞状”运动，因而临界流速的概念对其已失掉意义。正是由于这一特性，高浓度料浆输送可靠，不易堵管，在工业应用上具有很重要的意义。

胶结充填料浆的浓度对充填质量具有决定性的影响。根据金川的试验资料，略超过临界值的高浓度胶结料浆充填体的单轴抗压强度，比低浓度时最少可提高12~50%，抗剪强度也相应提高。从另一个角度讲，如果充填体强度一定，采用高浓度料浆也是节约水泥，降低充填成本最有效的重要途径。高浓度料浆的干缩率小，也是改善充填体质量的重要因素。同样根据金川的试验资料，当灰砂比为1:8，料浆浓度从70%提高到80%时，体积干缩率从21.51%缩小到6.96%。此外，高浓度胶结充填料浆在管道内输送时，料浆与管壁之间有一层水泥浆膜，因而也降低了料浆对管壁的磨损。对于全尾砂膏体，由于其浓度更高，达到在采场内无需脱水的程度，以上这些高浓度的优点就体现得更加显著，而且为解决环境污染问题，提供了更为有利的条件。后面有关章节还会对此作详细的阐述。

1.2 全尾砂高浓度充填的种类及其特点

目前还没有统一的全尾砂充填的分类方法和名称,为研究问题的方便,本书采用以输送浓度和工艺为主线,以胶结材料有无与胶结材料添加方式、尾砂脱水方式、有无粗骨料等为辅线作如下分类:

I、全尾砂膏体泵送工艺

加粗骨料(ATPP)或不加粗骨料(TPP)

地表加水泥或井下加水泥

II、全尾砂高浓度料浆自流输送工艺(THF)

采用不同的脱水方式

III、全尾砂不脱水速凝充填工艺(TUDD)

IV、全尾砂不脱水动电效应固结工艺(TLUDED)

1.2.1 自流输送工艺(THF)

(1) 70年代初美国Joy公司研制了全尾砂脱水用的离心式脱水机(Tailspinner)并获得了专利。该机由四个主要构件组成,即空心中轴、上转筒、下转筒和环形转筒密封装置,如图1—2所示。该机外形尺寸最大直径24英寸,高36英寸,电机功率22kW,转速1500~3000r/min。每分钟能处理60~80加仑重量浓度为35~65%的尾砂浆,固体物料回收率85~95%,底流重量浓度76~85%,每小时生产干料15t。设备外形尺寸很小,可放在充填工作面附近的巷道内。脱水后的尾砂用压风或机械送入充填采场,也可加水泥后送入。5~15%的固体物料从溢流中流走,给井下处理增加了困难,是一个有待进一步研究解决的问题。

1976年秋,在南非Anglo American公司的Western Holdings金矿建立了脱水试验车间,随后又在井下安装了两台离心脱水机,利用底流加水泥进行充填。

这种工艺和设备后来并未得到广泛的应用和发展。

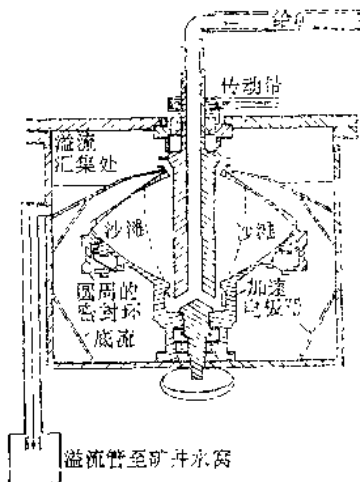


图1—2 离心式尾矿脱水机剖面

(2) 70年代末，前苏联哈萨克工业大学等单位利用物理学和胶体化学的原理，处理未脱泥的细粒级尾矿（ $-43\mu\text{m}$ 粒级占70~100%），使之形成浓度为80~83%具有触变性的标准分散系浆体，自流输送到井下充填采场。

制备这种充填料，首先需要将全尾砂脱水，列宁山多金属公司的脱水工艺为两段脱水，第一段采用聚氨酯水力旋流器，回收 $+25\mu\text{m}$ 的粗砂。溢流进入板式浓缩机，回收分散的细粒。浓缩机的给料浓度为10~12%，小时给料量25~40 m^3 ，浓缩产品的浓度可达82%，浓缩机生产能力平均4.5 m^3/h 。其溢流含固量为1~2.5%，经两段脱水回收的尾砂进入双轴叶片式混合机，加入水泥，初步搅拌，然后再进入活化搅拌机（взвихриватель），使混合料的颗粒能以不同的速度、方向和不同的加速度运动，颗粒间的内聚力急剧

减小，形成胶体，落入充填管道，自流输运到充填采场。列宁山的生产系统实际并未回收旋流器溢流中的尾砂，因此使用的仍属粗砂。

从1977年开始，哈萨克斯坦阿契沙伊多金属公司利用尾矿库的尾砂，按上述工艺建立了生产系统，只是无尾矿脱水部分。图1—3为其活化搅拌机的示意图。该系统的年生产能力为30万 m^3 。由于水泥耗量的降低，矿柱回采率的提高，从1977年8月到1981年7月共充填空区150万 m^3 ，节约资金1700万卢布。1988年以后，该公司又建设了利用选厂全尾砂的生产系统。

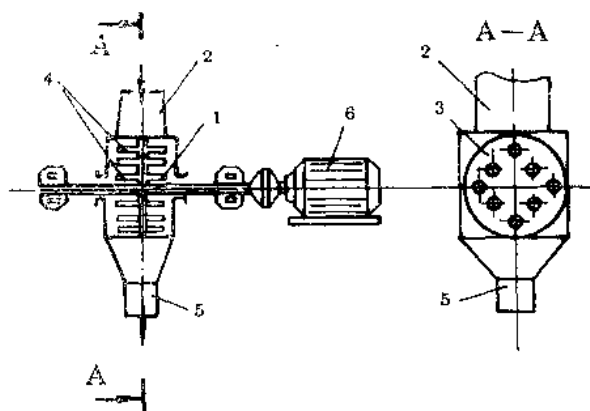


图1—3 阿契沙依公司的活化搅拌机

1—外壳；2—进料口；3—搅拌料筋子；4—转子横杆；5—排料口；
6—电动机

(3) 我国凡口铅锌矿与长沙矿山研究院、长沙有色冶金设计研究院合作，通过试验，也建立了全尾砂高浓度料浆的自流输送系统，1991年4月投入生产。该系统采用高效浓

密机和盘式过滤机脱水，振动放料机放料，双轴叶片式搅拌机和活化搅拌机两段搅拌，然后自流将浓度为70~72%的胶结全尾砂浆送入采场。系统能力 $50\text{m}^3/\text{h}$ 。对凡口矿全尾砂充填的情况，本书第九章还要作较详细的介绍。

1.2.2 泵送工艺 (TPP和ATPP)

(1) 德国Preussag金属股份公司从1978到1983年在政府财政资助下，共耗资1130万西德马克，在格隆德 (Bad Grund) 铅锌矿开发试验了泵送全尾砂膏体的工艺系统。此种膏体由粒级为 $0\sim 0.05\text{mm}$ 全尾砂与粒级为 $3\sim 30\text{mm}$ 重介质尾矿按重量 $1:1$ 的比例混合而成。全尾砂用 35m^2 真空水平带式过滤机脱水 (加絮凝剂) 至含水 $18\sim 20\%$ ，定量配制的混合物料经双轴叶片式搅拌机第一段搅拌，然后再经双螺旋搅拌机第二段搅拌。此搅拌机的两根轴可以同向同速转动，也可以异向异速转动，而且其容积较大，具有一定的贮仓的功能。搅拌好的充填料用装在地面的双活塞混凝土泵通过管路送往井下。水泥在管道往采场排料之前以水泥浆或干水泥方式注入。通常加入 $3\sim 4\%$ 的水泥即足以使充填体具有 $1.5\sim 2.0\text{MPa}$ 的强度。干式投料法可以形成较大自然安息角的下硬混合物，有助于回收管道和临时支护。Preussag泵送充填工艺充填料的含水量很低，只有 $12\sim 15\%$ ，密度可达 $2.1\text{t}/\text{m}^3$ ，在采场内没有多余的水需要脱出，既简化了复杂的采场充填脱水工艺，又可消除对井下环境的污染。

此种充填工艺初期投资较高，但充填成本很低，充填体质量良好。

(2) 金川有色金属公司与北京有色冶金设计研究总院为解决尾矿对环境的严重污染，目前充填成本高，以及管路系统剩余压头造成上部垂直空管段的严重冲刷磨损等问题，

于1986年3月经论证后将“全尾砂下向胶结充填技术及设备的研究”列入国家“七五”科技攻关专题。该专题包括全尾砂高浓度胶结充填料浆自流输送工艺和全尾砂膏体泵送工艺两项内容。后者于1987年10月正式开展工作，到1990年7月～1991年8月完成工业试验，从理论和实践上为在我国采用这项新技术趟出了一条道路，奠定了良好的开端。目前，武山铜矿、焦家金矿、铜录山铜矿、大红山铜矿等均在积极筹办采用这项新技术。

金川尾矿粒度很细，筛上存留50%试样时的筛孔直径 $d_{50}=26\sim34\mu\text{m}$ ，而且MgO含量高达28%，这给全尾砂膏体充填带来了新的技术难点。剩余压头对膏体管路输送以及管路系统设计的影响，也是全尾砂膏体充填的新问题。通过攻克这些技术问题，毫无疑问对此项新技术的发展提供了新的经验。

有关金川全尾砂膏体泵送充填的具体情况将在后面详细介绍。

(3) 为了改善全尾砂膏体的泵送性能，可以根据不同需要在膏体中加入不同的添加剂。

例如中国科学院感光化学研究所发明一种由流动剂和起泡剂组成的复号添加剂，用以降低全尾砂膏体的粘度，增加其稳定性。只要使用相当于干基尾砂量0.01～5%的添加剂，便可保证重量浓度高达82%最大粒径小于2mm的全尾砂膏体顺利地远距离输送，而这种浓度的全尾砂膏体本来是不能泵送的。此项发明已于1990年2月21日提出申请发明专利。其添加剂中的流动剂是指碱金属芳香族磺酸盐及其衍生物或磺化木质素盐或腐植酸磺酸盐中的一种或它们的混合物；起泡剂是指脂肪醇、脂肪酸皂、酚类或长链醇的磺酸盐

类之中的一种或它们之间的混合物。流动剂与起泡剂的重量比为 $1:1 \sim 1:0.001$ 。举例来说,重量浓度为78%的全尾砂膏体(最大粒径 $<1\text{ mm}$)粘度为 $>20\text{ Pa}\cdot\text{S}$,加入添加剂后,粘度可降低至 $1.4 \sim 1.3\text{ Pa}\cdot\text{S}$ 。

又如中国科学院成都分院进行了在全尾砂膏体中加入减阻剂的研究。所用减阻剂为魔芋水溶液。实验室试验结果表明,减阻效果明显。在现场实验中,由于 N_R 甚低,减阻效果受到限制。另外,减阻剂的添加方式也还值得进一步研究。

1.2.3 动电效应固结工艺 (TUDED)

美国矿业局于1974年在爱达荷州斯塔矿 (The Star Mine) 将斯波坎采矿研究中心 (The Spokane Mining Research Center) 70年代初实验室动电效应 (Electrokinetic Densification) 处理全尾矿的科研成果于工业试验。在充填层的上、中、下部设三个电极系统。一般以钢丝网或轨道构成阳极,多孔管作为阴极,通以直流电,形成电位差,并在两个不同的电极间形成一个电场。选矿厂尾矿中硅质细泥普遍带有负电荷,正是由于这同性表面电荷使细泥颗粒互相排斥,延缓其沉淀过程,并阻止其形成致密的沉淀物。但在此电场中,带负电荷的微小固体颗粒向正极移动,带正电荷的微细颗粒则流向负极。料浆中绝大部分细粒并不带电荷,但由于带正电荷的移动着的水分子粘性所产生的牵引力,也会使这些细粒随着被推向负极,从而促使固液分离,最终形成坚硬密实的充填体。

后来美国又在几个矿山对这项技术进行了实验室和井下试验,英国和前苏联也做过类似的试验。我国凡口铅锌矿也做过井下工业试验。看来这种工艺由于耗电量大(凡口试验

时为44度/ m^2), 难以普遍推广。但若用于解决局部问题, 还不失为一项可行的技术。

1.2.4 不脱水速凝充填工艺 (TUDD)

80年代末, 开始在实验室和个别矿山进行不脱水全尾砂加特种水泥或其它添加剂速凝充填工艺的试验研究。

中国矿业大学北京研究生部孙恒虎在招远金矿开展了这项试验, 称为“高水速凝胶结充填新工艺”。胶凝材料分甲、乙两料, 甲料为硫铝酸盐水泥熟料及缓凝剂, 乙料为硬石膏、石灰、膨润土及速凝剂。使用时甲、乙两料分别与尾砂浆或水混合搅拌, 各自形成悬浮浆液, 两种料浆分别通过管道送到充填采场附近的一个混合系统中。甲、乙两料一经混合, 便很快发生反映, 将料浆中的大量水变为凝胶等水化产物, 于是混合料便凝成固体。开始凝结时间可根据需要调节控制, 从数分钟到几小时, 其初步试验结果如下:

尾砂浆浓度 (%)	固化料占充填料浆比例 (%)	充填体大约体重 (kg/m^3)	单轴抗压强度(MPa)		
			1 天	3 天	28 天
25	16—18	1330	1.10	1.30	1.50
35	14—16	1420	1.35	1.60	1.80

小铁山铅锌矿也准备采用此种技术进行试验。

湖北荆襄磷化学工业公司五集磷矿与东北工学院合作, 于1987年6月~1990年9月进行了在一段脱水后全尾砂浆速凝新工艺的试验研究, 以解决该矿用细粒级尾砂充填的问题。五集磷矿选厂尾矿产率在进一步提高回收率后可能只有30%左右, 全尾砂中 $-37\mu m$ 含量达70%, $-20\mu m$ 含量也超过50%, 用于充填难度很大, 因此该课题被列为国家“七