

高浓度充填料浆管道 挤压输送理论与应用

GAONONGDU CHONGTIAN LIAOJIANG GUANDAO
JIYA SHUSONG LILUN YU YINGYONG

何哲祥 隋利军 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高浓度充填料浆管道 挤压输送理论与应用

何哲祥 隋利军 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2013

内 容 提 要

本书概述了充填料浆管道水力输送的发展历程、充填料自流输送和泵压输送技术；重点阐述了充填料浆管道挤压输送方法思路的形成及原理，充填料浆单缸及双缸（并联）挤压输送模型，在机械力和重力的耦合作用下充填料浆的各种运动状态及受力分析，充填料浆管道挤压输送计算机模拟；介绍了首台管道挤压输送工业样机及挤压输送相关参数的确定方法与应用实例。

本书可供矿山及充填设备公司的技术人员阅读，也可供大专院校矿业类和机械类师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高浓度充填料浆管道挤压输送理论与应用 / 何哲祥，隋利军著. —北京：冶金工业出版社，2013. 6

ISBN 978-7-5024-6278-9

I. ①高… II. ①何… ②隋… III. ①高浓度—填充物—矿山运输—管道输送 IV. ①TD5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 120934 号

出 版 人 谭学余

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 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 于昕蕾 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙殿红

责任校对 郑 娟 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6278-9

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；北京百善印刷厂印刷

2013 年 6 月第 1 版，2013 年 6 月第 1 次印刷

148mm×210mm；7 印张；205 千字；212 页

28.00 元

冶金工业出版社投稿电话：(010)64027932 投稿信箱：tougao@cnmip.com.cn

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)



前 言

自 1864 年在美国宾夕法尼亚州的一个煤矿区进行了第一次水砂充填以保护一座教堂的基础以来，水力充填技术已在国内外矿山广泛推广应用。但由于缺乏高浓度充填输送专用设备，充填料浓度普遍偏低，造成材料的严重离析、水泥的流失和料浆的离析，降低了充填体质量，增加了水泥耗量和充填成本，产生一系列问题。

相对于其他工业领域，矿山充填管道水力输送具有运输物料成分复杂、充填骨料粒径变化大、输送浓度差别大、输送距离长等特点。针对这些特点以及为了克服低浓度充填给采矿工艺带来的问题，发展高浓度泵压输送一直是矿山充填管道输送的一个发展方向。由于矿山充填料是一种低标号的混合物，其级配以满足采矿工艺的力学性能为基本原则，不像混凝土集料级配那样严格，因此，其泵送性能远不如混凝土。过去几十年来，在泵送混凝土的基础上发展起来的泵送充填技术仅在少数矿山得到应用。国外引入建筑混凝土泵技术的充填法矿山往往要在细骨料的尾砂中掺部分粗骨料，以满足泵对物料的基本要求。另外，泵送充填对泵的关键机构——阀门的耐磨和腐蚀性要求高，并且泵的结构复杂，造价与运行费用高。

充填料浆管道挤压输送方法是作者与同事们在多年矿山充填研究与实践的基础上，提出的一种除自流输送和传统泵压输送方法之外的第三种水力输送方法。与传统膏体泵送的不同之处在于，它利用充填管路中垂直管路及其内的充填料浆自重和浆体沿管边的屈服应力，取代正排量泵结构的“心脏”部分——分配阀门。

因此，输送设备本身的结构与混凝土泵相比要简化得多，并且易磨损件少，相应大幅度降低运行费用。此外，此输送设备能够直接安装在已建成的任何一个水力充填系统上，不需要对原有系统进行改造，因而投资费用低。挤压输送设备具有正压排量泵的作用，使得充填管道挤压输送方法能够继承高浓度/膏体泵送充填的优点。

在研究充填料浆管道挤压输送方法的过程中，作者得到了尹慰农、刘德茂、周爱民、谢开维、谢长江、张常青和谢续文等专家及相关企业的前期支持，得到了“九五”国家重点科技专题（攻关）计划“大倍线高浓度充填新工艺技术研究”、湖南省自然科学基金“充填料挤压输送过程中重力-机械力耦合作用的料浆流动特性”和“十二五”国家科技支撑计划“废弃矿区尾矿处理与循环利用技术及示范”等课题的资助。在本书的撰写过程中，得到了古德生院士的悉心指导，在此一并表示诚挚的感谢！

作 者

2013年3月于中南大学

目 录

1 概述	1
1.1 矿山水力充填的早期发展	1
1.2 泵压输送充填	1
1.3 高浓度充填料流变特性	2
1.3.1 流型的分类	2
1.3.2 高浓度浆体输送的流变模型	4
1.4 高浓度充填料管道输送设备	8
1.4.1 离心式浆体泵	8
1.4.2 隔离泵	9
1.4.3 正排量泵	10
1.5 充填料管道自流输送	12
1.5.1 自流输送充填倍线	12
1.5.2 自流输送低浓度充填料浆对采矿的影响	14
1.6 泵压输送高浓度/膏体充填料的研究	15
1.6.1 泵压管道输送的充填料粒级组成	15
1.6.2 泵送设备易损件寿命	17
1.6.3 泵送充填系统可靠性	18
1.7 充填料管道输送的发展趋势	18
2 充填料浆管道挤压输送原理	20
2.1 充填料浆管道挤压输送方法	20
2.1.1 矿山充填料浆水力输送存在的问题	20
2.1.2 充填料浆管道挤压输送方法思路的形成	22
2.2 管道挤压输送原理及分析	23
2.2.1 挤压输送基本原理	23
2.2.2 挤压输送原理分析	24

2.3 挤压输送原理验证	28
2.3.1 试验材料	28
2.3.2 自流输送	28
2.3.3 挤压输送	31
2.4 挤压输送方法的优点	35
2.4.1 挤压输送设备与库依曼型混凝土泵原理比较	35
2.4.2 挤压输送方法的优点	37
3 充填料浆并联(双缸)管道挤压输送	38
3.1 充填料浆并联(双缸)管道挤压输送模型	38
3.2 充填料浆并联(双缸)管道挤压输送假设条件	39
3.3 充填料浆并联(双缸)管道挤压输送速度、 加速度关系分析	40
3.4 充填料浆并联(双缸)管道挤压输送各管段受力分析	42
3.4.1 入口管段受力分析	42
3.4.2 并联管段受力分析	45
3.4.3 出口管段受力分析	50
3.5 并联(双缸)管道挤压输送料浆各种运动状态	52
3.6 典型状态下的速度、加速度推导	52
3.7 各种状态下速度、加速度方程	58
4 充填料浆管道挤压输送计算机模拟	59
4.1 假设条件	59
4.1.1 充填系统及管路	59
4.1.2 挤压输送设备活塞的运动规律	60
4.2 充填料浆管道挤压输送有关计算式推导	62
4.2.1 基本方程	62
4.2.2 料浆不同运动状态的速度、加速度方程	64
4.3 计算机模拟	68
4.3.1 长距离管道挤压输送模拟	69
4.3.2 高浓度管道挤压输送模拟	78

4.4 小结	84
5 充填料浆并联(双缸)管道挤压输送计算机模拟	86
5.1 模拟研究方法	86
5.2 程序框架图及模拟程序	87
5.3 计算机模拟及分析	87
5.3.1 充填料并联(双缸)管道挤压输送模拟	87
5.3.2 曲柄半径对料浆流动性的影响	97
5.3.3 活塞周期对料浆流动特性的影响	99
5.3.4 管道垂直高度对挤压输送的影响	100
5.3.5 各管段长度及并联管段长度比对挤压输送 的影响	101
5.3.6 浆体流变力学参数对挤压输送的影响	103
6 充填料浆管道挤压输送设备及应用参数	106
6.1 管道挤压输送设备结构与原理	106
6.2 工业样机主要技术参数	111
6.3 挤压输送设备在充填管路中的安装位置	112
6.3.1 挤压输送设备安装位置的理想状态	112
6.3.2 挤压输送设备的安装位置确定方法	113
6.4 倾斜管测试充填料浆流变力学参数	116
6.5 小结	119
7 充填料浆管道挤压输送应用实例	121
7.1 铜绿山矿充填系统及其存在的问题	121
7.1.1 充填料浆制备系统	121
7.1.2 充填料浆制备系统存在的问题及解决方案	123
7.2 铜绿山矿尾砂流变参数测试	123
7.3 挤压输送设备的安装位置确定	124
7.4 充填料浆挤压输送	129
7.4.1 清水挤压输送	129

7.4.2	5412 号采场充填挤压输送	130
7.4.3	5414 号采场充填挤压输送	131
7.4.4	充填挤压输送结果	131
7.5	充填料浆管道挤压输送存在的问题与展望	132
7.5.1	存在的问题	132
7.5.2	展望	133
参考文献		135
附录		142
附录 1	管道挤压输送计算机模拟程序	142
附录 2	并联挤压输送料浆 50 种可能的运动状态速度、 加速度方程	150

1 概 述

1.1 矿山水力充填的早期发展

水力充填的历史可追溯至 19 世纪中叶。1864 年,在美国宾夕法尼亚州的一个煤矿区进行了第一次水砂充填以保护一座教堂的基础。1884 年,在该州的另一矿山曾将废渣用水力充填到井下以控制火灾。大约在 1909 年前后,南非的威特瓦特斯兰、德国的煤矿、澳大利亚与美国科罗多州的金矿,首先实行了水砂充填^[20]。1932 年,美国的霍姆斯退克(Homestake)金矿开始采用水砂充填制止地表沉陷,由分级磨砂和水泥组成的充填料通过重力自流至采空区^[21]。1949 年,芒特艾沙矿首次采用了脱泥后的铅尾矿作水砂充填料,1972 年,随着该矿新充填站的建立,质量浓度为 68% 的充填料用瓦曼(Warman)系列 A 型 6/4 高压密封离心式砂泵输送至井下^[22]。在 20 世纪 40~50 年代,加拿大萨德伯里(Sudbury)盆地各矿山广泛采用分级尾砂水力充填^[23]。我国水力充填始于 20 世纪 60 年代,湘潭锰矿从 1960 年开始采用碎石水力充填工艺,以防止矿坑内火灾。1965 年,锡矿山南矿为了控制大面积地压活动,首次采用了尾砂水力充填采空区工艺^[24]。同年,金川龙首矿和凡口铅锌矿开始试验水砂胶结充填^[25,26]。在 20 世纪 70 年代末之前,国内外矿山水力充填主要采用的是自流输送,在充填料浆临界流速和水力坡度方面,开展了大量环管试验并归纳出许多计算管道摩阻损失和临界流速的经验式^[13,27]。

由于自流输送充填浓度低,给采矿工艺带来诸多问题,所以自 20 世纪 70 年代末开始,加拿大、南非、澳大利亚、德国、美国和中国等国家开始研究高浓度/膏体泵压输送充填技术^[28~32]。

1.2 泵压输送充填

泵压输送充填是基于高浓度固液混合物的流变特性及其在管道

内的特有流动状态,并在泵送混凝土的基础上而发展起来的一种充填方式。膏体泵送充填可获得高密度的高质量充填体,在井下不需脱水,由于采用加压输送,则充填不受倍线的限制^[33]。1979年,德国普鲁萨格金属股份公司在格伦德铅锌矿开始试验泵送充填,采用经过改型的BRA 2100H型四活塞混凝土泵输送膏体充填料^[34,35]。1985年,该矿正式采用泵送高浓度充填料,采用两台160kW经过改装的双活塞液压混凝土泵,输送距离达到3500m,充填料浆浓度为71%~82%^[36~38]。1982年,加拿大多姆矿(Dome Mine)开始研究高浓度充填工艺^[14]。Inco公司利瓦克(Levack)也在大约同期开发高浓度管道输送充填系统^[39,40]。1986年,利瓦克矿开始试验采用混凝土泵(Schwing BP 250)输送高浓度充填料^[41]。为确定高浓度充填料的泵送特性,美国矿业局Vickery等人于1989年完成了6次大规模泵送试验,结果表明,在一定流量下,随管道直径减小,压力梯度增加^[8]。南非在一座矿山建设了一套水力输送试验系统,利用Schwing KSP17双缸正排量泵或Warman AH3/2离心泵进行环管试验,研究高浓度充填料浆输送的流变性能^[42,43]。1991年加拿大国际镍公司加森矿进行了泵送膏体充填料试验,充填料输送水平距离1006m,垂直距离1036m,膏体充填料质量浓度为84.7%^[44]。除此之外,先后试验和采用泵送高浓度/膏体充填料的矿山还有德国瓦尔苏蒙煤矿(Ruhrkohle Walsum Colliry)和莫洛波(Monopol)煤矿^[45]、加拿大Louvicourt矿^[46]和Morocco矿^[47,48]、美国Lucky Friday金矿^[6]等。国内金川有色金属公司^[49~52]、山东铝厂湖田石灰石矿^[53]、济钢张马屯铁矿^[17,54,55]、大冶有色金属公司铜绿山矿^[56,57]、江西武山铜矿^[58,59]等矿山先后试验和/或应用了泵送高浓度/膏体充填。

1.3 高浓度充填料流变特性

1.3.1 流型的分类

与单相流的流型分类不同,管道输送的固液混合状态属于两相流动问题,由于液体中掺入了固体物料,因此除了层流与紊流之分外,管道两相流的流型还要根据两相间的相对位置、相对含量和相

对速度等划分为各种复杂流型^[10,60~64]。几十年来,各国学者根据对流动机理的分析和实验提出了许多用来确定流型分类的标准,但是由于影响因素的复杂性和测试的困难,迄今对此尚无统一的看法。

充填料浆流一般可分为均质流、非均质流和复合流三大类。

均质流是指流体系统中,固体颗粒均匀分布在液体介质中。固体含量高且粒径细小的浆体基本上属于均质流或近似均质流。含有大量固体微粒的均质流体在输送时,常常使黏度迅速增大,呈现非牛顿流体的特性。除常见的井下污泥外,高浓度尾砂浆、高浓度水泥浆和高浓度棒磨砂浆都可呈现近似均质流。

非均质流是指流体系统中,固体颗粒不是均匀分布的,沿管道流动方向的垂直轴线有明显的浓度梯度,甚至在高流速时,在流体断面也有浓度梯度。流体相和固体相在很大程度上保持各自的特性。非均质流浆体与均质流浆体相比,一般固体颗粒含量较少而颗粒较大些,如普通的水砂充填料浆、低浓度分级尾砂充填料浆等。

复合流是介于均质流与非均质流之间的一种流型。

Wasp^[65]从工程设计的实际考虑,提出用管道断面的垂向浓度分布作为一定量指标,即以管顶下0.08倍管径处的固体体积浓度 C 与管中心处的体积浓度 C_A 之比来作为判定均质性的指标。他认为 $C/C_A > 0.8$ 时为均质流, $C/C_A < 0.1$ 时为非均质流,值得注意的是,对于 $C/C_A = 0.1 \sim 0.8$ 的中间状态,Wasp并没有说明属于哪一类流型,费祥俊^[13]把它称为均质非均质复合流。表1-1列出了3类不同的流动状态及其主要特征。

表1-1 均质流、非均质流和复合流的主要特征

名称	均质流	非均质流	复合流
C/C_A	$C/C_A > 0.8$	$C/C_A < 0.1$	$0.1 < C/C_A < 0.8$
载体	浆体本身	清水	两相载体
粒度	细颗粒	粗颗粒	粗细混合颗粒
流型	非牛顿体	牛顿体	非牛顿体
流态	层流或紊流	紊流	紊流
实例	高浓度煤浆或精矿浆	粗颗粒矿石水力输送	尾矿浆、灰渣浆、粗细颗粒矿石

1.3.2 高浓度浆体输送的流变模型

高浓度充填料浆是一种多项复合体，包含有不同粒级的粗骨料、尾砂、水泥和水，有时还包含一部分无机集料、添加剂或水泥代用品等材料。陈广文等^[66]根据细颗粒在高浓度浆体输送中的作用，提出下列浓度判据：

$$C_{vc} = C_{vm} / P_{0.04} \tag{1-1}$$

式中 C_{vc} ——细颗粒浓度达到 C_{vm} 时的浆体体积浓度；
 C_{vm} ——浆体浓度达到某一值时，其中细颗粒浓度；
 $P_{0.04}$ ——物料中 $d \leq 0.04\text{mm}$ 的细颗粒的百分比含量。

由式 1-1 可以判定，当浆体浓度 $C_v \geq C_{vc}$ 时，即为高浓度浆体，否则属低浓度浆体。

根据以上判据，计算出国内外几条商用管路输送物料浆体的高浓度临界值，见表 1-2。

表 1-2 国内外几条商用管路输送物料浆体的高浓度临界值^[66]

管 路 名 称	$P_{0.04}$	临界值 C_{vc}	实际输送浓度 C_v
加拿大 Mc Intyre 输煤管路	16	42	45
加拿大 Sheerness 输煤管路	18	37	45
加拿大 Lignite 输煤管路	16	42	33
美国 Black Mesa 输煤管路	17	39	—
澳大利亚 Keebley 铁精矿管路	15	45	—
中国大红山矿全尾砂管路	24	28	—

高浓度充填料浆性质复杂、影响因素多，而且某些参数的变化又不易控制，随着充填料浆浓度的提高，使胶结充填料浆的流变特性也逐渐发生变化，当浓度提高到一定时，充填料浆已从非均质的两相流体转变成似均质的结构流体，即流体的性质发生了质的变化，呈现非牛顿体特性，其特性之一就是存在屈服剪切应力 τ_0 。在输送中，只有当边壁剪切应力达到 τ_0 时，浆体才开始运动。由于 τ_0 的存

在，且输送过程中，浆体的剪切应力从管壁处的 τ_w 变到管心处为零，管道中心还有一部分半径为 r_0 的浆体不受剪切作用，以流核的形式运动着^[65]。因此，在水流结构上，管道中运动浆体可划分为流核区和非流核区，如图 1-1 所示。在流核区，浆体的速度梯度 $du/dr = 0$ ，且不存在速度脉动和浓度梯度；在非流核区，速度梯度 $du/dr \neq 0$ ，同时存在浓度梯度^[66]。随着输送速度的变化，非流核区内可能出现层流流态，也可能为紊流流态。

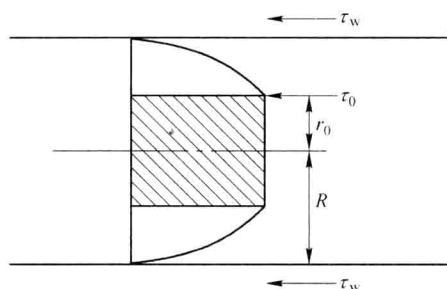


图 1-1 高浓度浆体输送的水流结构

图 1-2 是金川公司全尾砂料浆剪切应力与剪切速率的关系曲线^[67]，从图中可以看出，当质量浓度达到 77% 左右时，剪切应力与剪切速率的关系呈线性，当浓度降低时，便发生剪切稀化，剪切速

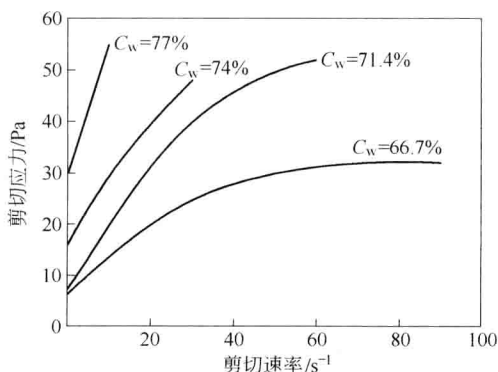


图 1-2 剪切应力与剪切速率的关系曲线

率的增长比剪切应力要快。于润沧等试验证明,金川全尾砂膏状充填料可以近似地由宾汉姆模型来描述^[63]。

Wingrove 等^[11]对南非西部地区金矿的尾矿管道试验结果见图 1-3 和图 1-4,从图中可以看出,膏体总是呈某种屈服应力状态,其屈服应力值随质量浓度增大而提高。这种线性关系表示出随质量浓度加大而产生一种伪塑性体特性曲线的某种宾汉型流体。西部地区金矿的尾矿泥还表现出触变特性,图 1-5 表示用黏度计测定尾矿黏度所得出的这种触变特性。

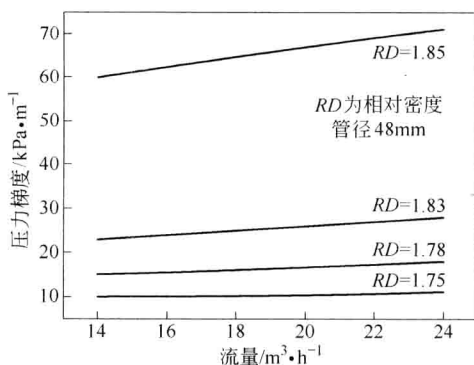


图 1-3 直径 48mm 的管道中尾矿的管道摩擦损失

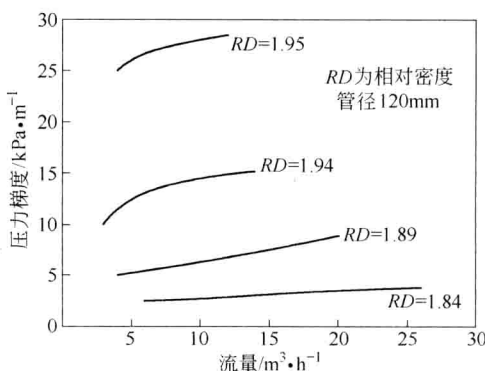


图 1-4 直径 120mm 的管道中尾矿的管道摩擦损失

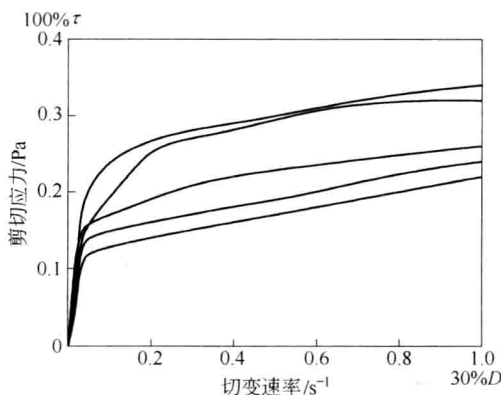


图 1-5 西部地区金矿尾砂的触变特性

综合国内外的研究^[69~76]，对于高浓度充填料浆，普遍用赫谢尔-布尔克莱（Hershel-Bulkey）流变模型来描述高浓度充填料浆的流变方程，即：

$$\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{du}{dr} \right)^n \quad (1-2)$$

式中 τ ——半径为 r 处的剪切应力，Pa；

τ_0 ——屈服应力，Pa；

μ ——黏度系数，Pa·s；

du/dr ——剪切速率， s^{-1} ；

n ——流变特性指数， $0 < n < 1$ 。

流变特性指数 n 对料浆的浓度非常敏感，并随浓度的提高而逐渐增加，最后接近于 1。由于料浆触变性的影响，黏度系数表现为剪切速率的函数，随剪切速率的增加而减小，但变化范围不大，黏度系数和流变特性指数都需经试验求得。

当充填料浆的浓度超过临界浓度，形成在静止状态下颗粒不沉淀，可保持一定形状的膏状浆体时，流变方程 1-2 可以简化为：

$$\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{du}{dr} \right) \quad (1-3)$$

充填料浆的 τ_0 、 μ 值主要是由组成料浆的材料和料浆浓度决定

的。表 1-3、表 1-4 和表 1-5 分别是招远金矿、凡口铅锌矿和金川公司试验测得的全尾砂充填料浆的屈服应力^[77]。

表 1-3 招远金矿全尾砂料浆屈服应力

项 目	全 尾 砂 浆				另加 5% 水泥	
浓度 $C_w/\%$	75.1	76.0	77.3	78.0	76.0	77.2
屈服应力 τ_0/Pa	53.9	69.6	109.8	168.6	74.5	79.4

表 1-4 凡口铅锌矿全尾砂料浆屈服应力

项 目	全尾砂浆		灰砂比 1:8		灰砂比 1:4	
浓度 $C_w/\%$	67.17	72.57	70.01	71.97	70.31	72.74
屈服应力 τ_0/Pa	43.60	170.09	102.23	187.78	95.52	175.59

表 1-5 金川公司全尾砂料浆屈服应力

项 目	全 尾 砂 浆			灰砂比 1:4
浓度 $C_w/\%$	72.2	75.8	78.9	78.1
屈服应力 τ_0/Pa	144.4	271.5	564.5	208.7

德国埃森矿业公司利用管式黏度计测定选厂尾砂加电厂粉煤灰浆体的流变参数，当质量浓度 $C_w = 67.6\%$ 时，其屈服应力值 $\tau_0 = 92.99\text{Pa}$ ^[64]。

1.4 高浓度充填料管道输送设备

目前用于矿山充填的泵送设备主要是以下三类：

- (1) 低扬程的离心泵，包括衬胶泵、瓦曼泵及渣浆泵；
- (2) 高压力的往复泵（即正排量泵），如柱塞泵、活塞泵等，前者具有更良好的抗蚀性；
- (3) 介于离心泵和往复泵之间的隔离泵，如油隔离泵、水隔离泵（又称球隔离泵）、膜隔离泵等。

1.4.1 离心式浆体泵

离心式浆体泵由泵内叶轮旋转将动能转化为压力能，泵内没有