

TSINGHUA UNIVERSITY

清华大学学术专著

浆体与粒状物料 输送水力学

费祥俊

清华大学出版社

清华大学学术专著

浆体与粒状物料 输送水力学

费祥俊

清华大学出版社

内 容 提 要

本书是浆体及粒状物料输送方面的一本专著。全书分十二章,包括固体物料与固、液混合物的基本物理特性,均质(伪均质)流、非均质流、复合流的流动特性,工业浆体管道输送参数,以及输送系统有关的设计问题。本书从悬液流变学、泥沙运动力学等角度,对固、液混合物的流变特性、沉降特性,以及管道固体输送的水力学原理作了深入系统的论述。本书总结多年来国内外在固体管道输送方面的有益成果,利用我国在黄河高含沙水流、山区泥石流运动机理方面研究的最新成果和宝贵的野外资料,为工业浆体高浓度输送提出一系列新的确定输送参数的理论和方法。本书可供水利、电力、煤炭、化工、冶金及地理环境方面有关科技人员阅读,是一本矿山运输设计研究人员难得的参考书,也可作为高等院校有关专业的本科生和研究生的参考教材。

(京)新登字 158 号

浆体与粒状物料输送水力学

费 祥 俊

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

人民文学印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本:850×1168 1/32 印张:15.375 字数:398千字

1994年5月第1版 1994年5月第1次印刷

印数:0001—1000

ISBN 7-302-01384-5/TV·21

定价:20.00元

前 言

《浆体与粒状物料输送水力学》是一本研究浆体与固-液混合物物理特性及流动机理的专门著作。我国自然地理环境复杂、河流含沙量高及泥石流发育,都是世界上少有的。我国又是一个资源分布比较集中,而交通不发达的国家,大宗物料的运输将有相当部分要依赖于水力输送。所以,自然界和生产中大量出现的浆体与粒状物料水力学问题需要解决。这方面在国内外虽有不少研究资料,但都很分散,一般理论水平不高,经验性强。由于这类问题不但面广,并有很强的应用性,所以有的问题在国外还被列为商业秘密。因此,比较系统地论述这方面的问题,对促进我国社会生产力的发展是很有意义的。

作者多年来从事泥沙运动力学教学和河道高含沙水流运动的研究,80年代初开始接触固体物料管道输送问题,承担长距离煤浆管道输送的国家“六五”攻关课题,以后又参与我国多项固体管道输送的试验研究,包括煤炭、冶金、有色、化工等部门有些管道输送的可行性研究和咨询工作。80年代中期以后,又有机会参加泥石流研究和西南地区泥石流的野外考察和现场观测。在工作中深感高浓度工业浆体和自然界高含沙水流及泥石流具有共同的物理特性和流动规律,而且两方面可以相互补充,使以往认为难以解决的问题,变得容易解决。本书可以说是作者在以上各方面工作的积累,其有别于一般有关著作之处,正是把自然界和工业生产中碰到的浆体和粒状物料输送中的水力学问题联系起来,以统一的规律来解释现象和处理问题。

本书引用的资料有一部分是作者所在单位——清华大学水电系泥沙研究室的同事们,包括韩文亮、王可钦、杨美卿、府仁寿、任裕民等及几届研究生的劳动成果,还有一部分管道试验和泥石流

实际资料是通过学术交流和接触,由国内有关设计和研究单位提供的。作者在这里一并向他们表示感谢,同时也感谢泥沙研究室其他同事们对本项工作的支持和关怀。钱宁同志虽已谢世多年,但他生前对研究工作的指点和帮助,言犹在耳,是他首先提出要把管道输送研究成果早日总结成书,现在书成之时,聊志数语,以寄托对他的怀念。

本书第十一章由韩文亮负责编写。

作 者

1992年8月

绪 论

水力搬运固体物料有着巨大的潜力。河道水流每日每时地将大量泥沙从上游搬到下游并送出海。我国黄河每年将 10 余亿吨泥沙从西北黄土高原经上千公里流程搬到下游,并将其中一部分送入渤海。山区泥石流在沟道坡度并不很大的情况下,可将直径达 1m 或更大的巨石搬到沟口。这些是在没有人为控制条件下的固体水力搬运。

人们利用管道水流进行有控制条件下的固体水力输送已有 100 年的历史,但是大规模的工业应用,始于 50 年代后期。1957 年投入运用的美国俄亥俄输送煤浆的管道全长 173km,管径 254mm,年输煤 130 万吨。在这以前,一些距离较短、运量不大的管道还是很多的。我国在第一个五年计划期间也修建了一定数量的管道,主要用于冶金矿山的尾矿输送,一般距离较短,输送的固体浓度也较低。60 到 70 年代以后,在世界范围内建成并投入运行的管道较多。其中最著名的是 1967 年澳大利亚的萨瓦奇河铁精矿输送管道,长 85km,外运精矿 250 万吨/年。1970 年美国建成第二条长距离输煤管道,即黑迈萨管道,全长 440km,年输煤约 500 万吨。1977 年在巴西建成世界上规模最大的萨马尔柯铁精矿管道,长 400km,管径达 500mm,年输送能力为 1200 万吨。

固体物料水力输送并不限于压力管道,在有利的地形条件下也可采用明槽自流输送,并可节约能源。

固体水力输送,尤其是管道高浓度浆体输送,有很多优点。首先,与其他传统的运输方式相比,管道建设周期短、投资少,而运量却很大。如直径 1m 的煤浆管道,年输干煤约 3000 万吨。其次是维护简单,便于自动化控制,因此用人很少,运行费用低。此外,社会效益显著,因管道埋设在冻土层以下,不占或少占地面,对环境和

生态的影响也小,而且运行不受气候条件的影响。当然,这种运输方式也有缺点,如只能单向、定量运输,而且物料品种单一,工艺比较复杂。

我国交通运输紧张,燃料和原材料等大宗物料的运输问题制约着能源和矿山建设。我国煤炭资源丰富,但集中在山西、内蒙等地,外运任务很大,铁路运力不足,迫使煤炭生产常常处于“以运定产”的状态。我国金属及非金属矿产资源也很丰富,但多数分布在交通不便的山区,离运输干线较远。新建铁路、公路等运输干线往往投资大,建设时间长,而且要多占日益减少的珍贵土地和增加对环境的压力。因此,我国发展固体物料的水力运输,作为对现有运输体系的补充,有更重要的现实意义,并已为有关部门所重视。“六五”期间曾就山西煤炭管道长距离运输的技术问题组织攻关。在原材料输送方面,甘肃厂坝铅锌矿、贵州翁福磷精矿、山西尖山铁精矿等的运输,都已就管道运输方案进行设计,有的已在施工或将投产。建国初期,运用苏联技术建设的铁尾矿管道输送系统,一般距离不长、输送固体浓度低、效益差,经过多年的运用经验,现在也开始分期分批进行改造。

固体物料水力输送,包括长距离管道输送在内,虽然在世界范围已广泛地应用于生产,作为这项技术的理论基础也有相应的发展,70年代以来,不仅国际性的水力输送学术会议相当频繁,也有一些专门著作问世,但总的说来这种固体运输方式的发展速度还是比较缓慢的,这除了上述提到的一些缺点以外,另一个原因是水力搬运固体的机理,特别是高浓度固体输送中,固、液混合物运动理论,还有待深化。这表现为一些输送参数的研究(其中最重要的如管道的摩阻损失,合理的输送流速及浓度等),较长时间以来进展不大,一般要依靠室内环管试验来间接确定。虽然国外的管道输送实践经验较多,上述输送参数的确定已逐渐摆脱费时费事的环管试验,但仍有较大的经验局限性,因而其主要方法仍处于商业保

密阶段,设计只能偏于保守,使固体水力输送的经济效益未能充分发挥。

事实上,中国具有特殊的有利条件来解决上述问题。我国河流含沙量之高,居世界首位,黄河最大含沙量达 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 以上,水流中固体物质如此之多,反过来改变了水流的物理性质,其运动机理已超出泥沙运动力学中研究的水流挟沙力的理论。我国西北地区的引黄灌溉渠道,过去在含沙量超过 $100\text{kg}/\text{m}^3$ 以后,渠道即产生泥沙淤积,因而历史上限定当含沙浓度达 15% (相当于含沙量 $160\text{kg}/\text{m}^3$ 左右) 闭闸停灌。但实践表明,还是这些渠道,现在当含沙浓度高达 50%~60% (相当于含沙量 $730\sim 950\text{kg}/\text{m}^3$) 的情况下,水流通过渠道时仍不产生淤积。黄河洪水高含沙水流运动的种种现象,为固体水力输送提供了很多给人启迪的重要信息。我国还是泥石流发育的国家之一,西南和西北地区山地泥石流中固体物质含量比河道中高含沙水流还要高出很多。据小江流域泥石流观测,其单位体积重往往在 $2.0\text{t}/\text{m}^3$ 以上,相当于固体含量 80% 以上,或含沙量在 $1600\text{kg}/\text{m}^3$ 以上,最高可达 $2000\text{kg}/\text{m}^3$, 并且大部分物质是直径很大的砾石和石块。这样高浓度的固、液混合物能在坡降不大的沟道中高速直下。我国西南地区泥石流观测的大量资料是国外所罕见的,无疑,泥石流运动的观测和研究也从另一侧面为固体高浓度水力输送提供了有用的宝贵资料。十多年来,我国在高含沙水流和泥石流方面的研究、观测取得了丰硕的成果,得到了国外同行的承认和重视,这就使我们更有条件把自然界水力搬运固体的客观规律,自觉地应用于工业管道或明渠高浓度固体水力输送中去,发展这项运输技术,为经济建设服务,这也就是本书写作的出发点。

浆体和粒状物料输送,作为一种专业技术,涉及到的方面很多,如有关输送工艺、输送设备,以及技术经济等问题。本书作为一本专著,自然不能面面俱到,只能着重阐明固、液混合物的物理特

性及不同条件下输送的力学原理和最新的研究成果。即使这样,涉及到的学科已超出水力学、泥沙运动力学等的范围。因此,从学科角度看,本书具有水力学,泥沙运动力学,固、液两相流以及悬液流变学等交叉学科的性质,这也是本书的一个特点。

固体物料水力输送,具有广阔的应用前景,被输送的物料包括燃料(煤炭)、原材料(金属或非金属矿物、建材等)、废料(如电厂粉煤灰、冶金或化学矿山的各种尾矿、工业废渣等),还有河道或水库淤积的清除、土方搬运等,涉及到水利、电力、冶金、煤炭、化工以及地理、环境等许多部门,服务面广,应用性强,这可以说是本书内容的另一个特点。

本书侧重固、液混合物运动规律,研究水力输送固体的力学机制。自然界的高含沙水流和泥石流运动与工业高浓度浆体管道或明渠输送具有共同的特性和普遍的规律。本书在叙述中以统一规律来解释自然界的固、液混合流和工业浆体的流动现象,并相互借鉴。将明渠高浓度输送与管道高浓度输送技术结合起来研究,又各有特点,这又是本书的一个特点。

本书虽是一本专门著作,但为照顾读者的不同层次和专业偏向,在叙述上尽量做到深入浅出,理论结合实际。全书共12章,大体上分三部分。包括绪论在内的1—5章叙述固体颗粒及浆体的基本特性,以及水流中颗粒运动和输送模式,可以说是全书的基础部分。第二部分6—8章分别讨论均质流、非均质流等的流动特性以及在不同条件下的有关参数,从理论与实践结合上论述浆体与粒状物料输送机理,可以说是全书的核心部分。第三部分9—12章为工业浆体管道水力计算,输送系统工艺、设备、技术经济问题简介,以及包括非恒定流在内的一些固体输送专门问题,偏重于实际应用及某些专门问题的探讨,也可称为应用和专题部分。

目 录

前言	IX
绪论	XI
第一章 固体颗粒特性及固、液混合物的浓度	1
第一节 粒状物料的基本特性	1
一、固体颗粒的比重	1
二、固体颗粒的硬度	2
三、颗粒的大小和形状	3
第二节 颗粒的群体特性	5
一、颗粒级配	5
二、孔隙率与堆积密度	8
三、干容重	11
四、休止角	13
第三节 细颗粒的表面物理化学特性	13
一、双电层及吸附水膜	13
二、絮凝和分散现象	17
三、细颗粒沉积物的压密过程	17
第四节 浆体及固、液混合物的浓度	18
一、几种浓度的表达方式及相互关系	18
二、体积浓度与输送浓度	19
三、相对体积浓度与线性浓度	20
参考文献	22
第二章 悬液的流变特性	23
第一节 悬液的流型	24
一、切变率与时间无关的流体	24

二、切变率与时间有关的流体	27
第二节 无粘性颗粒的悬液粘度	28
一、悬液粘性变化的物理图形	28
二、悬液粘滞系数表达式	30
三、悬液的屈服应力	32
第三节 含有粘性细颗粒的悬液粘度	34
一、悬液的有效浓度	34
二、悬液粘度的计算模型	35
三、悬液的极限浓度及粘度公式的验证	40
四、悬液的非牛顿体特性及宾汉极限剪切力	42
第四节 悬液流变试验原理	49
一、立管式粘度计的装置	49
二、立管式粘度计测验原理	51
三、同轴圆筒旋转式粘度计试验原理	58
第五节 悬液流变试验结果评价	62
参考文献	71
第三章 固体颗粒与流体的相对运动	73
第一节 单颗粒在静水中的沉降	73
一、圆球在静水中的沉速	73
二、颗粒形状对沉速的影响	77
第二节 均匀颗粒的群体沉速	79
一、无粘性均匀颗粒在层流区的沉速	79
二、无粘性均匀颗粒在过渡区及紊流区的沉速	83
三、细颗粒均匀沙的群体沉速	85
第三节 粗颗粒在稳定悬液中的沉降	86
一、粗颗粒在牛顿体悬液中的沉降	87
二、球体在非牛顿体悬液中的沉降	87
三、关于不沉粒径的概念	92

第四节	非均匀颗粒的沉降规律	93
一、	无粘性非均匀颗粒沉降现象的物理图形	94
二、	非均匀颗粒的沉降试验	96
第五节	非均匀颗粒群体沉速的实用估算方法	101
一、	浆体或粒状物料流动阻力确定时的非均匀 颗粒平均沉速估算	101
二、	浆体浓缩或浑水澄清时的非均匀颗粒群体 沉速估算	105
三、	浆体的浓缩与浓缩池尺寸的选择	110
参考文献		114
第四章	明渠与管道的水流阻力	117
第一节	水流能量的转换过程	117
一、	定床均匀水流的平均流速	117
二、	水流垂向的能量分布与传递	119
三、	近壁区的能量转化	121
第二节	管道水流流速分布与阻力系数	122
一、	层流流速分布与阻力系数	123
二、	紊流流速分布与阻力系数	124
三、	光滑与粗糙过渡区紊流阻力系数	126
第三节	明渠水流流速分布与平均流速	129
一、	对数流速分布公式	129
二、	平均流速公式	130
第四节	固体悬浮颗粒的存在对水流流速分布 的影响	135
参考文献		138
第五章	水流中的颗粒运动及固体水力输送的基本模式	140
第一节	床面固体颗粒的受力	140
一、	水流拖曳力与上举力	140

二、粒间离散力	142
三、重力或有效重力	147
四、粘性颗粒的粘结力	147
第二节 固体颗粒的起动条件	148
一、起动拖曳力	149
二、起动流速	152
第三节 固体颗粒的运动形式	154
一、推移运动	154
二、悬移运动	155
三、中性悬浮运动	156
第四节 推移运动的基本规律	157
一、推移运动的物理图形	157
二、推移质输沙率关系式	159
第五节 紊流中颗粒的悬移	169
一、紊流扩散方程	169
二、悬移颗粒的垂线分布	171
三、悬移颗粒垂向浓度分布的实用处理方法	177
第六节 固体水力输送的基本模式	182
参考文献	185
第六章 均质浆体的流动特性	188
第一节 均质浆体的流态	188
第二节 明渠及管路中的层流流速分布	189
一、明流的层流流速分布	190
二、管流的层流流速分布	191
第三节 均质浆体的层流阻力	194
一、以平均流速表示	194
二、以水力坡度表示	195
三、以阻力系数表示	198

四、层流阻力系数与水力坡度的统一表达式	200
第四节 层流到紊流的过渡流速与临界雷诺数	205
一、基本关系式的推导(宾汉体)	206
二、过渡流速的其他公式及评述	209
三、伪塑性体及膨胀体浆液的过渡流速	213
第五节 均质浆体层流的不均匀性和不稳定现象	213
第六节 流动条件下宾汉型浆体屈服应力的变化	220
一、浆体结构的破坏与修复模式	220
二、浆体结构系数估算的水槽试验	221
三、浆体结构系数估算的球体沉降试验	224
第七节 均质浆体的紊流阻力	230
一、悬移质的存在对水流阻力系数的影响	232
二、均质浆体紊流减阻的分析与试验	235
三、非牛顿均质浆体紊流阻力系数的其他 表达式	241
四、均质浆体阻力平方区的水槽试验	244
参考文献	246
第七章 非均质浆体的流动特性	249
第一节 非均质流的基本特征、流区与界限流速	250
第二节 均匀颗粒非均质流的临界流速	253
一、现有非均质流临界流速公式及其局限性	253
二、非均质流临界流速的简化模型	262
三、粒径不均匀的非均质流临界流速	264
第三节 非均质流管道摩阻损失	265
一、现有非均质流管道摩阻公式及其局限性	266
二、非均质流管道水力坡度的计算模型	275
三、非均匀颗粒的处理	282
第四节 垂直及倾斜管道中的摩阻损失	283

第五节 明渠非均质流·····	287
一、明渠非均质流的临界流速·····	289
二、明渠非均质流的阻力·····	293
参考文献·····	295
第八章 固体颗粒的推移和层移·····	298
第一节 全部颗粒推移或层移的阻力·····	299
第二节 圆管中颗粒层移运动与阻力估算·····	301
一、层移运动占据部分断面时的圆管阻力·····	302
二、全管层移运动及阻力特性·····	307
第三节 明渠中颗粒层移运动与流速估算·····	308
一、饱和层移运动·····	308
二、非饱和层移运动·····	312
参考文献·····	322
第九章 非均质-均质复合流·····	324
第一节 复合流中固体细颗粒的作用·····	326
一、细颗粒的加入对复合流浓度垂向分布的影响·····	326
二、细颗粒的加入对复合流阻力的影响·····	327
三、细颗粒的加入对复合流临界流速的影响·····	330
四、细颗粒的加入对浆体粘性的影响·····	330
第二节 宽粒度组成的浆体流变参数·····	331
第三节 复合流管道水力坡度的现有研究·····	335
一、T. Masuyama 等的研究·····	335
二、N. Hisamitsu 等的试验研究·····	337
第四节 复合流中粗、细颗粒的合理组成·····	340
一、粗、细颗粒掺混的浆体降粘效应·····	340
二、复合流中粗、细颗粒的最佳组成·····	343
第五节 自然界高浓度复合流中固体颗粒的组成	

特征·····	345
一、高浓度复合流中的细颗粒含量特征·····	345
二、高浓度复合流中颗粒平均直径的变化规律·····	348
三、高浓度复合流中颗粒组成接近最佳化·····	350
第六节 复合流输送中颗粒级配的优化及应用前景·····	352
一、长距离输煤管道浆体级配的优化问题·····	352
二、大粒度物料的管道输送·····	354
三、水煤浆粒度组成的优化问题·····	355
参考文献·····	357
第十章 工业浆体输送的水力计算 ·····	359
第一节 浆体管道输送摩阻损失确定方法的评述·····	359
一、浆体管道摩阻损失的经验公式·····	360
二、煤浆管道摩阻损失的“SRC”公式·····	363
三、E. J. Wasp 的复合流阻力计算方法·····	364
第二节 浆体管道摩阻损失的计算模型·····	374
一、摩阻损失计算模型的推导·····	375
二、摩阻损失计算模型的简化与讨论·····	378
三、摩阻损失计算模型的验证·····	382
第三节 浆体管道临界流速的确定方法及评述·····	388
第四节 浆体管道临界流速计算的新模型·····	392
一、浆体管道临界流速计算模型的推导·····	393
二、浆体管道临界流速计算模型的检验·····	395
三、浆体浓度、管道直径、颗粒组成等因素对 管道临界流速影响的分析·····	395
第五节 浆体的明流输送·····	400
一、浆体明流输送的阻力·····	400
二、浆体明流输送的临界流速·····	404
参考文献·····	406

第十一章 长输管线中的不稳定流	407
第一节 管道中水击的几个基本问题	407
一、水击的基本概念	407
二、水击的计算公式	408
第二节 浆体水击	411
一、伪均质流压力波的传播速度	411
二、非均质流压力波波速计算公式介绍	412
三、浆体管道水击压力波波速影响因素的分析	416
四、浆体水击压强的计算	419
五、长输管线浆体水击的特点	423
六、降低水击压强的措施	425
第三节 长输管线的真空不满流	429
一、真空不满流的流动形态	430
二、预防真空不满流现象的措施	433
参考文献	437
第十二章 浆体管道输送系统	439
第一节 浆体管道输送的流程简介	439
一、长距离浆体管道输送系统	439
二、尾矿矿浆输送系统	442
第二节 浆体管道输送系统的参数	444
一、浆体管道内径的选择	445
二、系统泵送压力的确定	450
第三节 浆体管道的泵送设备	454
一、离心式浆体泵	454
二、正排量泵	455
三、隔离泵	458
第四节 浆体管道输送的有关经济因素	463
一、概述	463