

孙西欢 阎庆绂 李永业 等 著

GUANDAO LUOXUANLIU SHUSONG

SHUILI TEXINGYANJIU

管道螺旋流 输送水力特性研究



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

管道螺旋流 输送水力特性研究

孙西欢 阎庆绂 李永业 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是由国家自然科学基金项目(59779009, 50579044)和山西省自然科学基金项目(971038)资助的管道螺旋流输送水力特性研究的工作总结,是一部论述管道螺旋流输送水力特性理论的专著。全书共分11章,主要内容包括绪论、流体运动与旋转流场一般性质、旋转流场中固体颗粒运动、起旋器及试验装置、局部起旋器后部流场特征、起旋器与螺旋流的能量平衡、局部起旋器流场的数值模拟、局部起旋器的接续、沿程起旋式圆管螺旋流流场特性、起旋器内部流场特性、动边界管道螺旋流水力特性等。

本书可供流体力学、物料输送、管道消能和水利等专业的教师、研究生及工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

管道螺旋流输送水力特性研究 / 孙西欢等著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2012.5
ISBN 978-7-5084-9713-6

I. ①管… II. ①孙… III. ①管道流动—螺旋流动—管道水力运输—研究 IV. ①U17

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第118830号

书 名	管道螺旋流输送水力特性研究
作 者	孙西欢 阎庆绂 李永业 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 23.75印张 563千字
版 次	2012年5月第1版 2012年5月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

在2010年10月18日通过的中共中央关于制定国民经济和社会发展第十二个五年规划的建议中,明确提出了要树立绿色、低碳发展理念。要以节能减排为重点,抓好交通运输等重点领域节能。调整能源消费结构,增加非化石能源比重。因此,研究开发一种以非化石能源为依托的运输方式迫在眉睫。管道螺旋流输送正是这样一种符合低碳理念的运输方式,其最大的优点在于集节能、节水和环保于一体,是一种有利于国民经济可持续发展的运输方式,因此具有广阔的应用前景。

管道螺旋流输送是一项正在不断完善发展的新技术、新课题,是人们寻找高效率低能耗输送方法和输送装置的新探索、新实践。作者通过多年的理论探讨和试验研究,找到了以起旋器作为产生旋转流场装置的基本方法和实现高效率低能耗输送的有效途径,为管道螺旋流输送工业化奠定了理论基础,指明了实践推广的方向。

本书是一本以作者十多年来所从事的管道螺旋流输送水力特性研究为主的专著。在国家自然科学基金“螺旋流中的泥沙特性研究(59779009)”和“筒装料管道水力输送的水力特性研究(50579044)”,山西省自然科学基金“粒状物管道螺旋流输送的水力特性试验研究(971038)”及相关项目的资助下,对旋转流场的基本特性及流场中固体颗粒的运动规律、圆管起旋器及试验装置、起旋器及其所产生的管道螺旋流流场的试验研究、数值模拟等内容进行了较为广泛的研究。本书是作者十多年来研究工作的系统总结。

全书共分11章:第1章介绍了管道螺旋流输送的研究背景及研究现状;第2章和第3章介绍了圆管起旋器的流场特性及管道螺旋流输送的基础理论;第4章为起旋器结构及试验装置;第5章和第6章为局部起旋器后部流场特性试验成果及分析;第7章是局部起旋器流场特性的数值模拟计算;第8章阐述了局部起旋器的接续问题;第9章为沿程起旋式圆管螺旋流流场特性;第10章是起旋器内部流场特性;第11章为动边界管道螺旋流水力特性。

本书由孙西欢、阎庆绂、李永业、赵运革、李正平合作完成,其中第1章、第6章、第7章由孙西欢执笔;第2章由阎庆绂执笔;第5章、第11章由李永业执笔;第8章、第10章由赵运革执笔;第3章、第4章、第9章由

李正平执笔。全书由阎庆绂统稿。

研究生张羽、张仙娥、兰雅梅、张红梅、孙雪岚、韩喜俊、张红霞、张向东、邱月辉、强浩明、张敏、路明、全炳欣、董显伦、童学卫、李飞、靳文字、张乐元、束德方、许飞等对管道螺旋流输送特性研究作出了一定贡献，研究生张雪兰、郝夏楠、张峰等对本书的文字进行了校对。国家自然科学基金委员会和山西省科技厅对管道螺旋流输送特性研究给予了大力支持。

本书参考和引用了许多专家、学者的文献。由于管道螺旋流输送涉及到多个学科的基础理论，实际工程中的管道输送又涉及许多行业，领域十分广泛，故而本书所能提供的成果是十分有限的，可能仅为冰山一角，作者只希望本书的出版能对该领域的研究和实践起到抛砖引玉的作用。

管道螺旋流输送是不断发展完善的课题，加之作者水平有限，书中不可避免的会有失当和谬误之处，诚恳欢迎读者予以指正。

作者

2012 年 4 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 泥沙淤积与治理	1
1.2 两相流理论及两相流管道输送	3
1.3 管道水力输送及螺旋流的应用	6
1.4 本书的主要内容	13
参考文献	13
第 2 章 流体运动与旋转流场一般性质	26
2.1 流体运动描述	26
2.2 旋转流场基本特性	28
2.3 旋转流场分析	29
2.4 典型的旋转流场	32
2.5 圆管中的旋转流场	36
参考文献	38
第 3 章 旋转流场中固体颗粒运动	40
3.1 水平轴圆管螺旋流中固粒的悬浮运动	40
3.2 水平轴无界旋转流场中固粒的运动轨迹分析	46
3.3 水平轴旋转流场中固粒运动试验装置及方法	48
3.4 水平轴有界旋转流场中固粒运动试验结果与分析	50
参考文献	74
第 4 章 起旋器及试验装置	76
4.1 起旋方式	76
4.2 起旋器的构造与参数	77
4.3 起旋器的试验方案	80
4.4 试验方法与装置	80
参考文献	85
第 5 章 局部起旋器后部流场特征	87
5.1 起旋器出口流场特征	87
5.2 水平轴圆管螺旋流的水力特性	108

5.3 起旋器结构及流量对螺旋流特性的影响	111
参考文献	118
第6章 起旋器与螺旋流的能量平衡	120
6.1 起旋器的能耗与起旋效率分析	120
6.2 螺旋流的能量平衡	128
6.3 起旋器结构和工作流量的影响	134
参考文献	136
第7章 局部起旋器流场的数值模拟	138
7.1 基本数学模型	138
7.2 计及雷诺应力的数值模拟	160
7.3 用湍流数学模型进行数值模拟	193
参考文献	228
第8章 局部起旋器的接续	232
8.1 局部起旋式圆管螺旋流继旋器	232
8.2 继旋器流场的试验研究	234
8.3 继旋器后流场的数值模拟	245
8.4 计算结果与试验结果的比较分析	247
参考文献	248
第9章 沿程起旋式圆管螺旋流流场特性	250
9.1 圆管螺旋流沿程起旋方式	250
9.2 沿程起旋螺旋流的数值模拟	250
9.3 模型试验研究	258
9.4 计算与实测结果分析	267
参考文献	271
第10章 起旋器内部流场特性	272
10.1 内部流场特性试验研究	272
10.2 起旋器内部流场特性	278
10.3 起旋器内部涡量场特性	305
10.4 起旋器涡量场的产生与影响因素	308
10.5 能量来源及能耗分析	320
10.6 涡量场特性计算与涡线绘制	320
参考文献	325
第11章 动边界管道螺旋流水力特性	327
11.1 试验设计	327
11.2 起旋器运动特性研究	334

11.3 起旋器运动时的管内水流压力特性研究..... 340

11.4 试验参数的敏感性分析..... 350

11.5 起旋器运行时的能耗影响分析..... 354

11.6 起旋器运行过程中的数学模型研究..... 362

参考文献 370

第 1 章 绪 论

1.1 泥沙淤积与治理

我国北方河流大多数为多沙河流，其多沙的特点主要源于流域的水土流失^[1]。水土流失是一种由于自然或人为等综合因素影响而产生的自然环境被破坏的现象，如黄河流域中游的黄土高原，由于土层深厚，土质疏松，地面坡度较陡，植被稀少，因而抗冲能力差；加之暴雨集中，人类的社会经济活动长期以来不合理的利用土地，滥垦、滥牧破坏了生态环境，因而导致了严重的水土流失。据统计黄河中游地区的土壤侵蚀模数为 $3700\text{t}/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$ ，是世界均值的 27.6 倍^[2-4]。所以，水土流失是河流多沙的主要原因。

输沙管道是机械清淤的重要配套设备，若要发挥机械清淤的效力，则必须提高管道的输沙效率。管道输沙效率的高低对管道输沙的能耗有重大的影响。目前为了提高管道输沙效率，并阻止泥沙在管道内的淤积，往往采用大流速输送，以提高水流的紊动动能。如黄河下游的取沙淤背工程中，通常要用的流速为 $2\sim 3\text{m/s}$ ，因而其管道输送的阻力损失就较大。如果减小输送流速，则会迅速减小水流的挟沙力，在高浓度输送时必然会造成管内淤积，因为悬移质的挟沙力几乎是与平均流速的 $2\sim 4$ 次方成正比^[5]。因此高浓度、低能耗始终是管道输送研究的主方向。

关于管道输送的高浓度和减阻问题已有较多研究^[6-9]。如彭龙生教授在研究螺旋流冲沙（“旋流吸泥头”国家发明专利，85107771.4，1989 年）的基础上，提出了圆管螺旋流输沙^[10]。圆管螺旋流实质上为平轴柱状螺旋流，其可分解为强制涡流与轴向平直流。在平直流的情况下，泥沙的悬浮是依靠水流的紊动，而强制涡流的存在则会沿管道的周向“托抬”泥沙，使本来以推移质形式运动的泥沙较为容易地转变为悬移质，因而可以减少管道输送的阻力。从泥沙悬浮的动力因素分析，平直流中的泥沙悬浮动力是水流的紊动，而螺旋流中强制涡的作用则是托拽泥沙颗粒悬浮运动，因而后者较前者更容易使泥沙悬浮。由此可知，圆管螺旋流是一种全新的输沙方式。

圆管螺旋流输沙属于固液两相流的范畴，诸如圆管螺旋流的产生、圆管螺旋流的水力特性、固粒在旋流中的运动机理等一系列理论问题尚需进一步研究。10 多年来，太原理工大学的科研人员在国家自然科学基金“螺旋流中的泥沙特性研究（59779009）”、“筒装料管道水力输送的水力特性研究（50579044）”和山西省自然科学基金（971038）“粒状物管道螺旋流输送的水力特性试验研究”资助下，开展了该项研究工作。

据水利部统计表明,截止到2008年底,我国已建成各类水库86353座,其中大型水库529座、中型水库3181座,小型水库82643座。水库总库容达到6924多亿 m^3 ,相当于我国河历年径流总量的1/4。水库除了具有巨大的拦蓄及调节洪峰功能外,还有灌溉、发电、供水、旅游、养殖等综合效益。经过50多年的建设,我国主要江河初步形成了以水库、堤防、蓄滞洪区为主体的拦、排、滞、分相结合的防洪工程体系^[3]。这一重要体系在抵御历年发生的洪水中发挥了重要作用,大大减轻了灾害损失,保证了社会稳定和国民经济的发展。

然而,由于我国有许多河流,特别是北方许多河流大都发源或流经黄土地区,而这些地区地表植被覆盖少、汛期多暴雨,水土流失严重,河流的含沙量都很高。河道上建堤形成水库,水库改变了河道流量,使河流失去了原有平衡和输沙能力,使得水库泥沙淤积问题异常严重。主要表现在^[11-15]:淤积数量大,淤积速度快。据统计黄河多年平均输沙量为16亿t,由于其下游河道比降较缓,每年约有4亿t泥沙淤积在下游河道内,以致河床日益升高,使其一般高出两岸地面3~5m,最高达10m,成为世界上著名的“地上悬河”,洪水时常有漫堤或冲决的危险。南方河流含沙量虽低,但径流量大,输沙总量亦不容忽视,水库淤积问题也较严重。如长江多年平均含沙量只有 $1.18\text{kg}/\text{m}^3$,但每年的输沙量却达到5.2亿t。据测算,三峡水库年平均入库泥沙量达5.3亿t。水库淤积已成为全球性的问题^[16],密西西比河流域面积322.2万 km^2 ,年平均悬浮质泥沙32万t。尼罗河流域面积297.8万 km^2 ,年平均悬浮质泥沙11万t。

淤积产生的危害性主要有^[17-22]:减小有效库容,降低兴利效益;水库淤积末端上沿,造成上游的“翘尾巴”现象,影响上游河道的引洪能力;坝区泥沙淤积,威胁工程安全;加重对泄流建筑物和过流部件的磨蚀;改变下游河道自然的来水来沙条件;阻碍航道;污染水质,影响水产养殖等。水库的严重淤积,不仅影响水库兴利效益的发挥,严重威胁水库的使用寿命,而且大大降低了河流的调蓄能力,对人民的生命财产安全及工农业生产构成了威胁。因此解决水库淤积问题是发挥水库综合利用效益,促进我国水利事业发展,保证国民经济持续稳定发展的一个战略问题。

关于水库泥沙淤积的防治措施,20世纪60年代初,我国的科技工作者就对此进行了大量的试验研究。科技工作者从调度水库运用方式着手,总结出“蓄清排浑,引洪淤灌”这一水库排沙运用经验;在黄土丘陵沟壑地区,因地制宜地采用库坝联合或上下库联合运用、以及清洪分治等方法,减少入库泥沙。20世纪70年代以来,一些科研成果的显著特点是研究在汛期蓄水的条件下,保持一定有效库容的水库排淤技术,在一定程度上缓解了蓄水与排淤的矛盾。与此同时水土保持工作也日趋加强。

就水库泥沙防治措施而言^[3,23-28],可分为3大类:减少入库泥沙、排浑减淤及排淤。减少入库泥沙措施包括水土保持措施、清洪分治及库坝联合运用;排浑减淤措施包括异重流排沙、滞洪排沙和浑水水库排沙;排淤措施包括空库排淤、横向冲蚀和机械排淤。从上述水库泥沙淤积防治措施来看,大多数措施对地形条件或来水来沙条件,或库水位条件等具有一定的依赖性,尚不能成为随时随地可以应用的措施,而且有些清淤排沙措施耗水较多,这对解决北方水资源紧缺这一矛盾不利。但机械清淤措施则具有机动性好,不受季节、地域限制等优点,且其中的虹吸法、气力泵清淤法、旋流吸泥法等排出浑水含沙量可

达 $200\sim 900\text{kg/m}^3$ ，因而具有水的利用率高的优点。因此，发展机械清淤可以对建筑物前、航道及其他泥沙淤积区域实施有效清淤。

1.2 两相流理论及两相流管道输送

两相流动涉及的范围非常广泛，相应地描述两相流动的理论也是多种多样。从对流体中单个颗粒运动的描述到高浓度颗粒流化床理论，甚至到颗粒碰撞作用占优势的颗粒流和不动床的多孔介质理论等，无不都属于两相流理论的范畴。通过多年来对两相流动的各方面的研究，人们已逐步建立起完善的两相流理论体系。

研究流场中单颗粒或有着相互作用的多颗粒运动，以及考察含有颗粒的流场本身可用来推测流场中有关的流动信息，如探讨作用在颗粒上的合力和通过对流场平均得到流变性质或输送性质等。Happle 和 Brenner^[29]、Bremer^[30]、Batchlor^[31]、Herbzyński 和 Pienkowska^[32]、Leal^[33]、Rusell^[34]、韩其为和何民明^[35]、倪晋仁、王光谦和张红斌^[36]、胡春宏和惠遇甲^[37]、Meng^[38]、李嘉和张永泽、李克峰^[39]、黄社华和李炜、程良骏^[40]等人进行了这方面的理论研究工作。流态化的流动方式是最复杂的颗粒—流体流动的实例，其间颗粒浓度较高，颗粒间的碰撞经常发生，颗粒相的运动是随机的微观运动。Jackson^[41]、Murray^[42-43]、Andersen 和 Jackson^[44]、Ogawa^[45]、Homsy^[46]、Cai 和 Cen^[47]、费祥俊、陈立^[48]、齐璞和赵文林、杨美卿^[49]在这一方面进行了研究论述。多孔介质理论也可看作是一种两相流理论，只是这里的固相没有显著的运动。Biot^[50]、Scheileger^[51]对多孔质理论及模型进行了研究论述。颗粒流是指液体或气体介质中高浓度粗颗粒的高速剪切流动，这样的条件下颗粒间的碰撞传递作用占优势。颗粒流作为自然界中的泥石流、滑坡、河流底部粗颗粒泥沙运动等现象的流动机理的科学抽象，也属于两相流问题。近 30 年来对颗粒流的研究得到了迅速发展，Savage^[52]、Lun^[53]、Wang 和 Fei^[54]、戴继岚和夏震寰^[55]、万兆惠和宋天成、齐璞等人进行了大量的研究论述。关于颗粒床床体形态及运动，诸如两层流体界面的稳定性、颗粒沉积的宏观特性及床体的演化等，Bagnold^[56]、钱宁等人、Engelund 和 Fredse^[57]以及胡春宏和惠遇甲等人都进行了这方面的研究论述。

两相流系统的研究方法有宏观和微观两种方法，相应的理论分别称为两相流宏观的连续介质理论和微观的运动理论，而且宏观的研究方法采用较多。宏观的连续介质模型可分为 3 类：①分流模型，对于分层流和管中的环状流这些有着固定分界面的多相流，可与单相流一样把各相假定为连续介质；②两流体模型，把两相流中的各相都分别假定为连续介质，它们同时充满整个流场；③扩散模型（或称单流体模型），假定相互作用着的两相或组分构成了一种新的物质（一般称作混合物）且连续充满整个流场。两相流微观方法的运动理论相应于单相流中的气体分子运动论，这种方法对气固或液固两相流才比较合适。把固相的一个个颗粒看作类似于气体分子运动论中的分子，用 Boltzmann 方程描述；而对流体相可有两种不同的考虑，即用分子描述或用连续介质模型描述。

两相流理论的系统发展始于 20 世纪 50 年代,连续介质模型是两相流模型研究的主体模型。对连续介质理论中的两流体模型,已有许多人进行了研究。Truesdell 和 Toupin^[58]、Marble^[59-60]、Murry^[42]、Soo^[61]、Wallis^[62]、Ishii^[63]、Pai^[64]、Boothroyd^[65]、Beattie^[66]、Herringehe 和 Davis^[67]、Yadigarolu 和 Lahey^[68]、Buyevich 和 Shchelchkova^[69]、Drew^[70]、Stewart 和 Wendroff^[71]、Ahmadcli^[72]、Fan 和 Crowe^[73]、蔡树棠^[74]、陈天翔^[75]等人进行了研究、论述或评述,涉及两相流运动的各个方面。虽连续介质理论中的单流体模型,Trusdell 和 Toupin 基于 Fick 的扩散思想和 Prigogine 等的混合热力学概念,首先阐述了混合物理论。随后 Kelly^[76]、Metigue^[77]、Atkin 和 Craine^[78-79]、Bedford 和 Drumheller^[80]进行了研究和评述。

两相流管道水力输送作为一门新兴的综合技术,涉及流体力学、固液两相流动、流变学等多门学科。但从技术应用的观点来看,主要围绕以下 4 个方面进行研究:

(1) 在流动状态研究方面:Newitt^[81]通过对 $D=25\text{mm}$ 和 152mm 水平管道内的泥沙 ($\gamma_s=2.65$) 运动进行试验观察,将固体物料在管道内的流动状态分为均质流、非均质流、推移层流动和固定沉积层流动。Turian^[82]在前人试验成果的基础上做了大量的补充实验,作为分析基础,提出了一新的流型分布图。Roco^[83]采用微观结构的观点,以固体的扩散程度、颗粒的作用机理以及流动的稳定性,作为流型判据,并考虑到颗粒与流体间的运动及相互作用,得出一个非常复杂的流型分布图。Wasp^[84]等通过研究,将固体物料在管道中的流动状态分为均质流和非均质流两类。Druand^[85]提出了以颗粒粒径大小作为判别流态标准的方法,认为对水、沙流系统来说,粒径大于 0.02mm 的可看成是非均质流。Govier^[9]用颗粒沉降速度来作判别,认为凡沉速小于 $0.6\sim 1.5\text{mm/s}$ 即为均质流。Thomas^[86]和 Charles^[87]则以颗粒沉降速度 v_0 和管道摩阻流速 v_c 之比作为判定标准,分别取值为 0.2 和 0.13。沈学汶^[88]用悬浮指数作为判别标准,并根据 Newitt 的试验结果,算出从均质流过渡到非均质流的临界 Z 值为 0.19。Wasp^[89]从便于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定量指标,即以管顶下 0.08 倍管径 D 处的固体体积分数 CVB 与管中心处的体积分数 CVA 之比作为判定均质性的指标。认为 $CVB/CVA>0.8$ 时为均质流, $CVB/CVA<0.1$ 时为非均质流。对于 $CVB/CVA=0.1\sim 0.8$ 的中间状态,费祥俊^[90]对此进行了深入研究,并把它称为均质—非均质复合流。

(2) 在浓度和速度的分布方面:Durand^[91]曾在 $D=150\text{mm}$ 的管道中研究了粗细两种粒径 (d_s 为 0.18mm , 2.04mm) 泥沙的浓度和流速分布。Newitt^[92]等曾在 25mm 的管道中在压力梯度为 0.28 的条件下,试验研究了各种泥沙的浓度及流速分布, Toda^[93]等用 2.07mm 的玻璃球代替泥沙进行了相关研究,并提出了一些相应的计算公式。Roco^[94]、Askuar^[95]、Ayukawa^[96]、Alajbegovic^[97]、许振良^[98]、魏进家^[99]、傅旭东^[100]、刘诚^[101-102]等人用数值方法对管道两相流的浓度、速度等分布进行了研究。张兴荣^[103]则提出了高浓度管道输送中的速度分布模型。

(3) 在临界流速的研究方面:长期以来,国内外许多学者对此作了大量工作,但是由于两相流问题的复杂性,目前对这一问题的认识还很不一致。Thomas^[86]使用“最小输送流速”,即在管道底部出现不动的或滑动的颗粒时的流速。Durand^[85]使用“极限

淤积速度”，即在管道中出现淤积时的速度。Graf^[104]等人则采用“临界淤积流速”，即固体颗粒从悬浮状态沉淀下来并形成固定底床时的流速。费祥俊^[90]、王邵周^[105]、张兴荣^[106]等则主张“临界不淤流速”，即固体颗粒从悬浮状态转入在床面滑动或滚动时的流速。李鹏程等^[107]在国内多家研究单位进行大量试验的基础上，对固液两相流机理进行了研究，开发了计算管道输送水力坡降及临界输送流速的电算模型。刘弦^[108]则对90°弯管内固液两相流的临界流速进行了研究。汪东^[109]等对非均质流水平管道的临界流速进行了研究，并在前人试验研究的基础上，得出了影响浆体管道临界流速的主要因素并对其进行了分析。由于各家对临界速度的定义不一，加之试验手段各异，导致了各种不同的计算公式。国外学者 Durand^[85]、Wasp^[84]、Shook^[110]、Yufin^[90]、Zandi^[111]、Cave^[112]、Turian^[82]、Kazanskij^[113]等人都提出了一些经验和半经验公式。国内学者刘德忠^[114]、王邵周^[105]、张兴荣^[106]、费祥俊^[90]、汪东^[115]等人也都提出了一些临界流速的计算公式。

(4) 在摩阻损失的研究方面：20 世纪 80 年代以后，为了提高输送效率和节约能源，减阻力学的研究也越来越受到重视，出现了多种减阻方法，使之成为一门独立的学科。减阻研究的早期应用是在减小消防系统的阻力，增大喷射高度；城市下水道的污水和洪水排泄；船舶和水上运动武器等方面。目前，减阻技术在管道输送中的应用主要有石油、原油、煤浆、矿砂、泥浆及其他物料的浆体输送。但是，从减阻机理上来划分，油的管道输送与煤浆等其他固体物料的浆体管道输送是不同的。前者是一相体系，而后者为两相或多相体系，大多为非牛顿体系的管道输送。在减阻力学研究中，我国学者侯晖昌在其《减阻力学》一书中，首次将减阻力学作为一门学科进行了系统的论述。该书概括了减阻研究的历史、现状和主要成果，阐明了减阻的基本原理。邓子胜^[116]将目前的减阻研究归纳为型体减阻和静减阻两大类，并在分析两类减阻研究存在的问题基础上提出了主动减阻的新思路。吴爱祥^[117]、孙业志^[118-119]在总结传统减阻方法的基础上，对高浓度浆体振动减阻问题及力学机理作了深入探讨。1984 年，Kano 在垂直面内 90°弯管以及长度为 5m 的直管上探索振动对栓流气力输送的影响。结果表明，弯管的压力减少了 20%，直管的功率消耗减少了 16.7%。陈广文等^[120]也研究了固液两相管道流的振动减阻问题。传统的减阻方法有：高分子溶液减阻、弹性膜减阻、纤维材料减阻、水环减阻和型体减阻等。Toms^[121]发现高分子稀溶液或弹性护面材料都能实现黏性减阻。D. Ohlendorf^[122-123]发现由于受泵的机械力作用，高分子聚合物的长链会断裂而使减阻的效果逐渐丧失；并发现界面活性剂加到水中之后也具有减低湍流阻力的效果，而且稳定性高。陈仕伟^[124]给出了高分子稀溶液管内流动减阻的理论依据。李克文^[125]早在 1991 年就对湍流边界减阻和一些重要的减阻方法与减阻理论进行了详细的论述。韩式方^[126]在非牛顿流体边界层方面，完成了一系列工作。L. I. Sedov^[127]，L. Hoffmann 和 P. Schiimmer^[128]各自通过实验得到了不同浓度的高分子添加剂在不同雷诺数下对于摩擦阻力减小的影响。李沛文^[129-130]等人论述了减阻添加剂对湍流脉动抑制的机理。孙宴增^[131]对国内外研制的减阻剂的应用和发展进行了论述。何钟怡^[132]对高分子减阻的成果给出了一篇综述报告。我国学者韩文亮等人针对全尾砂充填料浆的减阻问题提出了“水环减阻”措施，试验研究证明，这种措施只适用于层流情况，对湍流并不适用。Heywood Richaidson 等人通过实验研究认为，在层流中注入气

体,其减阻效果较好。郑永刚^[133]等人对管流掺气减阻进行了研究并取得了一些成果。加气减阻属于三相流问题,武汉水利电力大学管道输送科研组从1982年开始进行了三相流管道输送问题的研究。三相流管道输送的试验研究表明:加气后对减轻管道磨损、防止管道堵塞、降低管道结垢程度等均有一定的作用,更有利于长距离、高浓度浆体的输送,以节约能源、降低投资费用。Duckworth^[134]采用比水轻和比水重的物质进行试验,研究了颗粒密度对管道摩阻损失的影响;Shook^[135]采用中径分别为0.2mm及0.5mm且各具3种不同分散程度的泥沙,在直径为53mm及107mm的管道中,研究了泥沙级配对管道摩阻损失的影响;戴继岚^[136]、钱宁^[6]等研究了泥沙级配对管道摩阻损失的影响。Thomas^[137]以粗细不同的泥沙研究了颗粒粒径对摩阻损失的影响。邹伟生^[138]等人研究了在不同pH值、流速、矿浆颗粒粒度条件下,铁精矿对3种钢材的长距离浆体管道的磨蚀情况。甄云军^[139]等人对长距离浆体管道的磨蚀率进行了预测。胡华^[140]分析了浆体动态管道输送的黏弹效应,建立了管道输送黏弹塑性流变模型,推导了流变方程,并从黏弹性能量释放对管道的作用力、管道的共振、疲劳损伤等方面分析了黏弹效应对输送管路的损伤破坏作用。郑志^[141]等人则对NGH浆体管道的阻力特性及其摩阻损失进行了分析。赵立娟^[142]等编制了细泥沙管道输送阻力损失计算的Wasp方法程序,并通过试验得到了验证。由于固液两相流管道输送的减阻问题不仅关系能源的节约和效率的提高,而且对长距离的输送效果有极大的影响。因此,固液两相流管道输送的减阻问题越来越引起人们的关注。

1.3 管道水力输送及螺旋流的应用

1.3.1 管道水力输送概况

管道水力输送^[143]是一种以液体(通常为水)作为载体通过封闭管道来输送固体物料的运输方式。固体物料的管道水力输送作为一种现代化的运输方式,自20世纪50年代在工业上应用以来,它以其效率高、成本低、占地少、无污染、安全可靠和可合理配置等优点,在世界各地得到了迅速的发展^[144-147]。国内外管道水力输送技术的发展也逐渐从短距离、低浓度向长距离、大管径、高浓度和大运量方向发展。管道水力输送作为固液两相流在工程中最典型的应用,发展到目前,管道水力输送主要有浆体管道水力输送、型料管道水力输送和筒装料管道水力输送方式。

1. 浆体管道水力输送

浆体管道水力输送就是将颗粒状的固体物质与液体输送介质混合,在管道中采用泵送的方法运输,并在目的地将其分离出来。输送介质通常采用清水。

浆体管道水力输送系统一般有三大环节,其分别是浆体制备系统(前处理)、中间输送系统(泵站和管道)和后处理系统(过滤脱水)^[148-150]。浆体制备系统的作用是制备适

宜于浆体管道输送系统的浆体,浆体应该具备合格的料度、浓度、浆体 pH 值和除氧。主要制浆设备为破碎、磨矿、筛分、浓缩、贮浆、pH 调整、除氧、监测设施等。中间输送系统主要是泵站和输送管道,其作用是将合格的浆体输送到目的地。浆体输送系统包括有喂料泵、主泵、阀门、输送管道、管道清洗水设施、清管器的投加与回收设施、管道消能减压设施、中间贮浆和浓缩设施、数据传输和监控设施、输送管道阴极保护设施等。根据输送管道的长短,输送的物料和管道经过的地形条件可适当增减。后处理过程主要是指浆体到达输送终点后要通过一定的工序进行脱水。脱水后的物料可以直接使用或贮存。污水经处理后可作为工业用水或循环使用^[151-155]。

在工业应用方面:早在 1891 年美国就有人将煤捣碎在管道中用水冲走,并获得专利。但正式用于工业生产是在 1914 年英国泰晤士河畔的一家电厂,该厂利用管径为 200mm,长 604m 的管道水力运煤,而这只是浆体短管路的输送。直至 1950 年,美国俄亥俄州建成了世界上第一条输煤管道——俄亥俄州煤浆输送管线(长 173km、直径 254mm,年输送量 130 万 t)、1967 年澳大利亚建成世界上第一条铁精矿输送管道——萨凡奇河铁精矿输送管道(长 85km、直径 228.6mm,年输送量 230 万 t),使浆体管道输送的概念正式应用于长距离的固体输送。目前世界已建成 100 多条浆体管道长距离输送管线,总长度近 4000km。其中最具代表性的有 1970 年美国建成的黑梅萨(Black Mesa)输煤管道,全长 440km,管径 457mm,年输煤 450 万 t;1977 年巴西建成的世界上规模最大的萨马柯(Samarco)铁精矿管道,长 410km,管径达 508mm,年输送能力为 1200 万 t。此外,澳大利亚、美国、加拿大和南非等国正在建或拟建长达几千公里的浆体输送管道^[156-157]。当前,随着管道水力输送技术的发展,它的应用领域也变得越来越广泛。我国自 20 世纪 80 年代初才开始开发长距离高浓度浆体管道输送技术,真正使浆体管道输送成为我国大规模运送物料的运输方式之一。从 20 世纪 80 年代初到 90 年代初,我国管道输送工程技术人员进行了众多矿山物料浆体管道输送的研究、可行性分析,以及工程项目的前期准备工作。在铁精矿方面我国完成了尖山、攀枝花、白马、调军台、梅山等矿山铁精矿浆体管道输送试验研究,为 20 世纪 90 年代中期长距离浆体输送管线的建设和我国浆体管道输送技术的实用化奠定了坚实的基础。从 20 世纪 90 年代初至今,我国浆体管道输送有了长足的、突破性的发展,已从技术研发阶段迈入到了实际应用的发展阶段。目前我国已建成了尖山铁精矿(管线全长 102km,年输精矿 200 万 t)、瓮福磷精矿(管线全长 45.6km,年输送矿量为 200 万 t)等多条浆体输送管线。另外,我国在 1995 年还投产修建了一条从山西省孟县至山东省黄岛的孟(县)—潍(坊)—黄(岛)输煤管道,运距为 720km,管径为 454mm,输送重量浓度达 50%,年输送能力为 70 万 t^[158-161]。

在理论、实验和应用技术的研究方面:Huang Cunkui^[162]等基于湍流理论和单粒子侵蚀模型,在水平浆体管道流中建立了物质的侵蚀现象学模型。S. K. Lahiri, K. C. Ghanta^[163]基于人工神经网络相关性的发展来对浆体管道输送的滞留量进行预测。Sunil Chandel^[164]等对高浓度粉煤灰浆体在输送中的沉积特性进行了研究。R. Giguère^[165]等使用电阻层析 X 射线摄影法对弯管下游的浆体流动状态进行了分析。D. R. Kaushal^[166]等使用 γ 射线浓度计对浆体管道粗颗粒近壁区的浓度分布进行试验研究。Liangyong

Chen^[167-168]等对煤浆在管道中的滑移流动及流变特性进行了研究。Václav Matoušek^[169]则提出了稳定沉降的浆体管道摩阻压降预测模型。冯巨恩^[170]等以目前国内金属矿山采用的较为典型的两相流管道重力自流输送工艺为基础,应用水力学方法并结合生产实际,分析了充填浆体管道输送中发生故障的主要原因,指出水击是造成输送管道爆裂、跑浆等事故的主要原因。谢鹏^[171]等通过系统介绍铁精矿浆体管道输送的实验、设计等方面的研究及实际应用,对管道输送存在的影响因素进行了剖析。张士林^[172]从清水与固体颗粒之间的动量传递入手,分析了水平管道内沉降性浆体流动时清水与固体颗粒之间的相互作用机理,分别得到了输送流体、固体颗粒和浆体的速度分布。同时,根据固体颗粒的起动条件,研究在不同水力坡度下的堆积层厚度的变化规律。于志永^[173]等从煤浆密度和浓度、流变参数和粒子带电量测量3个方面简要地总结了美国煤浆检测技术的新方法、新仪器的发展状况,分析了其发展特点。杨金艳^[148]等通过对国内外浆体管道输送试验研究结果及工程实例的收集、整理、分析和利用,证明了长距离管道输送技术是一种经济高效、技术成熟及可靠性强的运输方式,对远离铁路线矿山资源的开发,缓解运输紧张状况均有重要作用。张乐元^[149]等介绍了浆体管道输送的特点、工艺组成和几种典型的浆体管道运输方式。黄晓云、刘晓明^[174-178]等通过介绍几种高压浆体泵的组成、工作原理特点及应用领域,分析指出高压浆体泵是实现长距离、高扬程、高浓度浆体管道输送的核心设备。赵清泉^[179]着重分析了各种浆体输送泵的工作原理及使用范围,介绍合理选择浆体输送泵的方法与主要运行参数。郝雪弟^[180]等针对高浓度膏体状煤泥管道输送流动规律不确定的现状,通过试验对煤泥管道的输送压力损失特性进行了研究。汪东^[181]等针对浆体管道输送的低浓度短距离现状,通过试验证明有效控制颗粒的上限粒径和级配,可改善浆体在输送中的流动性和稳定性,以提高浆体输送浓度,降低输送能耗。王秀兰^[182]等针对长距离浆体管道输送过程中存在着输送稳定性的问题,分析了管道输送的主要影响因素,运用实验的方法论述了颗粒级配对浆体输送稳定性的影响。

就目前的浆体管道水力输送研究而言,已取得了长足的进展,但许多理论和技术问题解决得还不够完善,尚有待进一步研究。就浆体管道水力输送的工业应用水平而言,据报道,输送流速在4m/s以上,能耗尚较大;浆体输送到目的地后的脱水时间长占地多,一些减阻充填物的分离会产生一定的环境污染,这些问题都有待进一步解决。

2. 型料管道水力输送

型料输送是基于密封容器管道输送的水力学原理和散粒体压力成型技术而提出的物料管道输送新概念。这种管道输送技术首先将散料模压或挤压成耐水抗磨的圆柱状型料,然后把型料注入输送管道中,以泵为动力、水为载体进行长距离输送。目前这方面研究的型料多为煤锭(煤柱)。

20世纪90年代美国密苏里哥伦比亚大学的Henry Liu等^[183]发明了煤锭管道水力输送技术,该技术一问世,便得到美国政府的重视,开始实施商业化计划,随后Henry Liu等^[184-187]人对煤锭管道水力输送技术以及囊体管道输送的现状与未来作了详细而全面的阐述,同时就击实模具的出口形状对煤柱质量的影响以及煤锭管道水力输送技术的经济可行性等进行了研究,认为其具有很好的应用开发前景。Liu, Y等^[188-190]对煤锭在管道中的运动特性、煤锭管道的水力特性以及煤锭压实过程中管壁摩擦力的变化进行了研究。Qing-

wen Deng 等^[191]对煤錠的柱塞挤压进行了分析。S. M. Merayyan 等^[192]对煤錠在管道中的磨损情况进行了研究。Brett Gunnink 等^[193-194]对煤錠管道水力输送中快速压实煤錠的最优水分含量以及形成煤錠的热水无黏压实进行了研究。

近年来,我国在这一领域也有了一定的研究,林愉等人基于流体力学理论对煤柱在管道中的流动性状进行了分析讨论,导出了有关的水力学计算公式^[195];对圆柱状型料在管道内的运动形态以及在流体的动力作用下的受力和悬浮间隙度进行了分析,揭示了圆柱状型料在水平输送管道内的悬浮机理和制约条件^[196];通过分析管道内绕静止圆柱状型料的流线分布和局部阻力损失的成因,借鉴同心环隙流理论,对绕静止圆柱状型料管道流的水力损失进行了研究,并通过试验得出了计算绕静止圆柱状型料管道流水力损失的半经验公式^[197];通过对煤柱起动、悬浮、运动速度、管道压力损失等的研究,揭示出煤柱在煤浆管道内的运动特征,同时建立了水平同心型料管道输送的数学模型^[198-199];在动量定理和能量定理的基础上,建立了静止圆柱状型料在浆体管道内起动的动量方程和能量方程,并由此导出静止型料在浆体管道内的起动速度计算公式^[200];通过对煤柱在煤浆管道中的输送机理进行研究,建立了煤浆管道输送煤柱的水力学方程和参数计算公式,并通过实验探讨了管道输送各水力学参数间的关系^[201]。张晓东等人^[202-203]对煤錠管道输送的动力学特性、运动特性进行了试验研究,阎庆斌等人^[204]分析了煤錠管道输送的平均能耗。在理论研究的基础上,林愉等人^[205-213]开展了型料输送管道试验系统的设计研究、型料输送管道动力驱动装置和注入装置的设计研究、型料试验输送管道控制系统的设计以及型料管道减阻问题的研究。张晓东等^[214]根据煤錠管道水力输送的特点,建立了煤錠管道水力输送的试验系统。林愉等^[215-217]从散体煤颗粒模压成型的机理研究出发,阐述了煤柱模压成型的制备工艺环节,研究了煤柱模压成型时的压力、壁面摩擦、压头位移、煤柱强度、煤柱密度和孔隙率等,推导出煤柱模压成型时压强沿煤柱纵向呈指数幂分布的关系式,建立了压力分布、模压力、成型摩擦力、煤柱强度和煤柱密度的关系式以及模压力、煤柱孔隙率和煤柱强度与模压位移量的关系式。饶运章^[218]进行了管道输送尾砂型料的强度试验。赵轲等^[219]对定常管流中煤錠表面压力分布进行了试验研究。林愉等^[220-222]针对管道输送性和燃烧固硫高度匹配的洁净煤柱的制备,研究煤柱成型和固硫机理,设计出合理的洁净煤柱制备工艺,配制出兼具黏结和固硫作用的复合固硫黏结剂。湛伦建等^[223]对型煤的固硫机理进行了研究。俞月根等^[224]对型煤的防水性能进行了研究。这些都标志着型料输送管道已开始了应用领域的研究。但型料输送也存在许多缺点和技术难点,如:需选用合适的无污染黏结剂,输送前需将散料模压或挤压成耐水抗磨的圆柱状型料,输送后又需将型料加工成散料,增加了输送成本;输送过程中型料运行不稳定,对管道的磨损较大,输送能耗较大,影响管道水力输送的安全稳定运行;型料输送只能输送固体物料,输送范围窄,不利于推广应用。

3. 筒装料管道水力输送

筒装料管道水力输送技术是继浆体管道水力输送和型料管道水力输送技术后,近年来由太原理工大学的孙西欢教授提出的一种新型的输送技术,它是基于水力学原理,以水为载体,将物料(液体或固体)装盛并密封在圆筒状的管道车内,然后注入输送管道,依靠水流作用来推动管道车运动,以此来输送物料的一种新型的管道水力输送