

固体混合液的管路输送

—流动理论与阻力计算法—

鞍 钢 矿 山 设 计 院

79.3.199

8705291

固体混合液的管路输送

—— 流动理论与阻力计算法 ——



鞍钢矿山设计院

译者序

利用管路输送固体，是近代迅速发展起来的新技术。这种运输方式投资少，运输能力大，运营费用低，对地形、地貌适应性强，不污染环境，运行安全可靠，在我国将有广阔的发展前途。为促进管道输送技术发展，译者将日本寺田进著《固体混合液的管路输送》一书全文译出，供从事管路输送固体技术的科学研究、设计、施工、运行有关同志参考。本书译稿经冶金工业部长沙黑色冶金矿山设计研究院丁宏达同志，冶金工业部鞍山黑色冶金矿山设计研究院王绍周，王红丁，等同志审阅，译文经鞍钢矿山公司设计院杜春跃高级工程师校对，在此仅对本书翻译及出版有过帮助和支持的同志致谢。由于译者水平所限，不妥之处在所难免，请读者给予批评指正。

译者，1983，11，于鞍山

原 文 序

本书充实增加了1962年作者所著“水力输送”一书的理论篇，并增加了许多新的资料。

这十年间，浆体管路输送在理论上，实践上，都有很大发展，对节能起到了较大贡献。

扩大浆体一词意义，使之适用于粗颗粒混合液，以及需要采取高浓度，高粘度流变的固体微粒混合液。

以1970年第一次国际固体管路输送会议为起点，这种技术在工业界开始取得迅速发展。在日本目前也有了跨学会，跨专业的浆体研究会。日本学术会议，编制予算向政府提出了建立国立混相流研究所的建议。

本书对机械，土木，建筑，农业，矿业，鱼业，化学，运输，食品等有关工作人员进行解说浆体管路运输问题并详细介绍了计划管理内容。作者认为本书内容可满足使用者的需要。

本书虽然是作者40余年的经验与研究成果，但由于固液相混合液的管路输送技术发展迅速。作者仍拟尽力进行研究，进一步充实本书内容，望各位读者多加指导。

1973年6月，作者

目 录

1、概 论	1
1.1、固体颗粒混合液的管路输送与本书的目的	1
1.2、固体混合液管路输送的特点	2
1.3、使用机器的形式与分类	6
2、基础理论与流动性能实例	8
2.1、输送材料的物理性质	8
2.1.1 水的物理性质	8
2.1.2 输送材料的物理性质	9
2.1.2.1 土	10
2.1.3 微颗粒群混合液的物理性质	28
2.2 管内流体的流动	39
2.2.1 流变学概论	39
2.2.2 单纯牛顿流体的流动	41
2.2.2.1 直圆管的阻力损失	43
2.2.2.2 异形管的阻力损失	51
2.2.2.3 低浓度微颗粒混合液的流动	54
2.2.3 非牛顿流体(广义)的流动	55
2.2.4 栓 流	63
2.2.5 高浓度微颗粒浆体的流动	71
2.2.6 纤维纸浆的流动	87
2.2.7 新混凝土的流动	100
2.3 中等颗粒群混合液及粗颗粒群混合液的流动	106
2.3.1 概 况	106

2.3.2	终端沉降速度.....	108
2.3.3	垂直管内颗粒群混合液的流动.....	123
2.3.4	垂直管内颗粒群混合液的流动阻力与实用速度.....	127
2.3.5	颗粒群混合液的分类.....	131
2.3.6	关于水平管内颗粒群混合液的流动状态概况.....	133
2.3.7	水平管内单颗粒移动的始速度.....	137
2.3.8	开始淤积临界速度.....	140
2.3.8.1	利用高粘度浆体降低淤积临界速度.....	143
2.3.9	悬浮临界速度.....	144
2.3.10	水平管内颗粒群混合液的流动阻力与实用速度	150
2.3.10.1	A类颗粒群混合液	150
2.3.10.2	B类颗粒群混合液	150
2.3.10.3	C类颗粒群混合液	151
2.3.10.4	D类颗粒群混合液	161
2.3.11	倾斜管路, 异形管等滑动流动时的阻力	222
2.3.12	部分沉积的阻力	225
2.3.13	充填D类颗粒群的水平管的起动阻力	226
2.3.14	水平管路清洗时颗粒群末速度	227
2.3.15	输送用的重液	230
2.3.16	输送中的固体颗粒的细化	230
2.3.17	城市垃圾的流动	233

2.3.18	囊袋密封舱输送	234
--------	---------------	-----

1. 概 论

1.1 固体颗粒混合液的管路 输送与本书的目的

浆体用砂泵和疏浚用泥浆泵，几十年前已有大量需要，虽然设计了各种产品予以应用，但那只是根据片断的经验来决定规格、制造和使用的。开始有组织地进行研究大约从，20年前才开始，前所未有的巨大实用设施相继纳入计划、投入生产，根据其经验又产生了新的设计，作为一种大有前途的

表 1.1.1

地 点	物 质	管径D(mm)	管长l(km)
统 一〔美国〕	煤	250	174
黑密萨〔美国〕	煤	450	440
加拿大	煤	600	806
乌达〔美国〕	硬沥青	150	116
英 国	煤	250	92
哥伦比亚〔美国〕	煤	125	15
特立尼达	石灰石	200	9.6
卡拉维拉斯〔美国〕	煤	175	28
南 非	金矿渣	150/225	36
塔斯马尼亚	铁矿	225	85
秋田〔日本〕	铜矿渣	200	65
加拿大	硫黄/石油	300/400	1290
包根维尔	铜矿	150	23
西伊里安	铜矿	75	110
非 洲	磷酸矿	300	4.8
统 一〔美国〕	原废弃物	300	21
统 一〔美国〕	处理废弃物	150	73
新西兰	磁铁矿	200/300	9.6

技术，受到人们重视。

表 1.1.1¹⁾ 为世界上有代表性的包括计划，建设，设计等阶段的管路输送设施。

一方面，输送规模在增大，另一方面输送液也从过去的低、中等浓度的微颗粒至粗颗粒固体混合液，发展为处理未曾想过的高浓度混合液，不仅输送容易沉淀的混合液，也输送高粘度不易沉淀的混合液，寻求新的流动理论，准备设计计划资料，已成为当务之急。另一方面，容易变质和吸湿的物质，过去用空气输送，但由于固体物质性质的限制又不能用空气输送，用车辆和人力运送又不经济，现在通过开发囊袋密封舱水力输送，一下子解决了这个难题，像这样，新技术的应用得到迅速发展。

机器的改进和发明，虽属必要，但各种混合液的理论阐述，实验性能的剖析尤为重要。本书追溯到原理叙述初步知识，并叙述应用方法，注意对不断出现的新的混合液所应采取的措施。

在说明流动理论以前，先概略叙述管路输送混合液方法的特点和使用的机器。

1.2 固体混合液的管路输送特点

固体混合液的管路输送，具有其他输送法所见不到的以下各种优点：

(1) 输送管路占地面积最小，有时既可以安装在顶棚和墙壁上，也可以利用现有水平的、倾斜通路的一个角落或

1) (a) 配管, 6, 6, (1971—8), 6.

(b) 配管, 6, 7, (1971—8), 15.

(c) Wasp, E.J.etal, Slurry Pipeline Economics and Application, Proc.Hydrotransport1, K. 3, (1970—3).

埋在浅沟中，特别是利用铁道的铺设更为有利，所以并不一定需新建设专用道路。

(2) 安装管路的地形，稍有起伏和弯曲也问题不大。

(3) 除泵和在管内的流动以外没有可动部分，所以事故少，消耗备件也少。

(4) 泵和输送管既没有噪音（噪音公害）也没有危险。目前已有大容量，高压也能十分安静运转各种泵类。

(5) 不用担心运输中的漏货和被盗。

(6) 因为不与大气和灰尘或日光等接触，故可以保持质量及卫生管理上的良好状态，保持运输的安全。

(7) 因为是连续运输，所以管径虽小，但单位时间输送量大。

(8) 输送作业，几乎不受天气和气候的影响。

(9) 泵设备与管路可以分别分成重量轻的小形部件，所以正个设备的运输、安装，或移动都很容易。

(10) 试运转也容易。

(11) 可以在软弱地基上配置设备，安装管路。

(12) 在海、河、湖、沼等任何场所，都可以浮装设备，管路。有的在海底移动或固定的设置。

(13) 与其他运输方法比较，可大幅度地减少作业人员，和监视人员。

(14) 容易实现安全自动运转。

(15) 因为输送管内可依次清扫，所以可用一条管路，分任意时间输送不同种类的物料。

(16) 停止输送时可以进行管内的彻底清扫，当输送结束时，管内可以充满水或任意一种液体进行防锈。

(17) 按照需要，可以进行管内的混合和在输送途中连

续进行选别。

(18) 在管路上任何地点，发生偶然堵塞事故或因磨损造成管壁破坏，也不会造成危险的局面。

(19) 除囊袋密封水力输送法外，输送设备只向一个方向配管，不像车辆和各种胶带运输机那样，需要向始点回送空的容器，建设费用低。

(20) 水的密度是空气密度的 800 倍，所以管内平均流动速度比空气输送装置低得多（砂粒相同时约 1/12 即可），因之，管壁和固体磨损少。

(21) 虽然较低的流速，也可以产生脉动流，安全输送，故适于长距离输送。

(22) 粗颗粒混入一定比例的极微细颗粒群时，产生栓流，可以进行高浓度以极低流速安全运行，所以可用于更经济的长距离输送。

(23) 与类似的空气输送相比，需要动力少。表 1.2.1 引用了上潼氏²⁾的著作，作者进行了部分补充。

表 1.2.1 各种输送装置性能实例

性能形式	输送量 t/h	输送距离 m	所需动力 HP	$\frac{HP}{t \cdot h \cdot m}$	输送速度 m/mn
叶轮式砂泵(砂)	50	150	50	0.0067	200
水力提升(矿石)	105	1130	500	0.0042	200
真空式空气输送	150	50	280	0.037	500—1000
压送式空气输送	50	180	300	0.033	500—1000
皮带输送机	300	80	41	0.002	60—120
链条输送机	300	18	79	0.015	10—50
溜板给料机	100	33	7.5	0.023	30—40
斗式提升机	30	12.5	7.5	0.023	

(输送距离为垂直与水平的合计)

2) 上潼、西网，粉粒的空气输送，(1961)，9，日刊工业新闻社

(24) 从深的地下用管路提升煤和矿石时，可以兼作坑内排水，所以可大量节省动力。

(25) 在煤矿可以和水力采煤，坑内排水，防尘，防爆，选煤等作业连续进行。

(26) 在煤矿，可以不重复以前那样矿车的工作面运输，坑道运输，竖井或斜井提升等若干不同的复杂的运输系统，而归纳成单一的安全的系统。

(27) 如果利用囊袋密封舱输送法，丝毫不损坏被输送固体的物理的化学的性质，也几乎不损坏管路。

上面列举了水力输送的很多特点，但是不能勿视下列本质上的缺点，有必要进行了解，很好地使用。

(1) 如果不是囊袋密封舱水力输送，则不能输送混入水中变质的物料，以及运输后必须脱水，而在经济上有困难的物料。

(2) 同卷扬机和胶带运输机相比，单位输送量（每小时单位固体重量输送单位距离，见表1.2.1 吨/时·米）所需要的动力增大，这是因为除了输送固体外，还要输送和固体的比重差不多的大量水，混合液与管壁间磨擦损失，比其他输送方式（除空气输送外）接触磨擦损失大得多。

(3) 需要连续的丰富的澄清水。

(4) 当流速度低时容易产生沉淀或堵塞。

(5) 控制流量，多不能使用类似阀门那种节流装置。

(6) 固体的粒度有限制，输送大块时，必须用大的管道，需要大量水。

(7) 立管或倒虹吸部分，停止运转时，必须清扫或打开最低处的阀，将全部混合液放出管外。

(8) 不适于远距离输送像家庭采暖用块煤那样贸易

上，要防止破坏的物料，这种情况必须采用有回路的囊袋密封水力输送。

(9) 输送重而颗粒粗的矿石类和水泥原料块石，需要很大流速，因之增加所需动力和管壁磨损。如用囊袋密封舱水力运输可避免这个缺点，但建设费用增加。

(10) 管子中途发生故障时，必须暂时全部停止工作。

1.3 使用机器的形式与分类

如前所述，固体混合液管路输送的主要装置为可广义称为泵，但进一步可细分为：(a) 在低压力下将固体与水(母液)混合，一同进行加压的泵送式 (b) 低压下固体加

表 1.3.1 分类

形 式		适 用 范 围		用 途	
大分类	中 分 类	小 分 类	容量 出口压力		
a 泵	往 复 泵	活 塞 形	中, 小	低~特高	微粒矿粉, 矿微粒
		隔 膜 形	中, 小	低~高	煤粉, 新混凝土
	离 心 泵	单 级 砂 泵	大~小	低, 中	微矿粉, 污泥
		纸浆泵	大~小	低, 中	一般泥浆用, 疏浚
		叶轮砂泵	中, 小	低, 中	纤维胶状污泥
		多 级	中, 小	高	大块, 结晶粒, 生
	旋 回 泵		中, 小	低, 中	鲜鱼, 新污物
管 道 泵		小	低	微煤粉, 泥浆	
b 密闭加 压式(水 力提升 式)	侧 筒 重 力 式		中, 小	高	粗颗粒
	侧 筒 差 压 式		中, 小	高	微粒混合
	侧 筒 排 出 式		中, 小	高	粗颗粒
	主 管 压 送 式		中, 小	中~高	微粗混合用、新污
	利用球体主管压送式		中, 小	中~高	物
	囊 袋 密 封 式		中, 小	中~高	泥浆
					输送干燥固体, 特
c 喷射泵		小	低~中	殊液体及气体输送	
d 密闭罐		中 小	低	采砂用, 送灰	
e 组合式	以上各种的组合			污物	

水，用另外的清水泵加压成高压水，使之间断工作的密闭加压式，（c）由另外的泵喷射加压的高压清水，连续吸入低压下混水固体的喷射泵式等等。详细再行分类如表 1.3.1。

2. 基础理论与流动性能实例

2.1 输送原料的物理性质

2.1.1 水的物理性质

作为固体混合液的母液流煤最重要的是水，清水。有时用海水代替，现概略的研究水的性质。

水的重量。标准大气压（1标准大气压=1.034公斤/厘米²）下，4°纯水的单位体积重量（以后称为容重）为1.00kg/l，其他温度下的单位体积重量用 γ 表示，容重单位为吨/米³或公斤/升其值与比重 δ 相一致，各种温度水的容重如表 2.1.1

表 2.1.1 水的容重与运动粘滞系数

温 度 C°	容 重 t/m ³	运动粘滞系数 ν cm ² /s	温 度 C°	容 重 t/m ³	运动粘滞系数 ν cm ² /s
0	0.9999	17.889 × 10 ⁻³ (5°)	40	0.9922	6.584 × 10 ⁻³
4	1.0000	15.165 //	50	0.9881	5.563 //
10	0.9997	13.065 //	60	0.9832	4.781 //
15	0.9991	11.416 //	70	0.9778	4.154 //
20	0.9982	10.064 //	80	0.9718	3.659 //
25	0.9971	8.967 //	90	0.9653	3.259 //
30	0.9957	8.054 //	100	0.9584	2.943 //

水的粘度，1大气压下，温度与运动粘滞系数 ν 厘米²/秒的关系也表示在表 2.1.1 中。

表 2.1.2 海水及食盐水的比重与粘滞系数

液 体	温 度 t C°	比 重 δ	运动粘滞系数 ν cm ² /s
一 般 海 水	15	1.01~1.05	约 11×10^{-3}
10% 食 盐 水	20	1.07	10.1×10^{-3}
20% 食 盐 水	20	1.148	10.6×10^{-3}

海水的比重与粘度，地点不同比重有所差别，如表 2.1.2 所示，一般可按 $\delta = 1.025$ 或 1.03 计算， $15 \sim 20^\circ$ 的普通水和海水的粘度可按 11×10^{-3} 厘米²/秒 (1.1×10^{-6} 米²/秒) 计算。

水的压缩率，长距离管路输送时，由于流动阻力的关系，有时是很高压的液体，忽视水的压缩性是危险的。

体积 V ，压力 p_1 的水，加 Δp 的压力将压力提高至 p_2 时的体积减少量 ΔV 为：

$$-\Delta V = \beta \cdot V(p_1 - p_2) = \beta \cdot V \cdot \Delta p \quad (1)$$

$$\text{或} \quad \frac{-\Delta V}{V} = \beta \cdot \Delta p \quad (2)$$

式中 β 为水的压缩率，其实测值如图 2.1.1³⁾ 所示。计算时用平均压力 $p = (p_1 + p_2)/2$ 时的 β 值。

海水，温度 10°C ($p = 1 \sim 150$ 公斤/厘米²) 时 $\beta = 4.4 \times 10^{-5}$ 厘米²/公斤。有时计算配管和容器的压力变化所引起的膨胀时，要考虑压缩量。

2.1.2 输送材料的物理性质

被输送的材料有砂，砂砾，煤，矿石，炉渣，灰尘，垃

3) 板谷，水力学，(1936)，19，日本机械学会，朝仓书店。

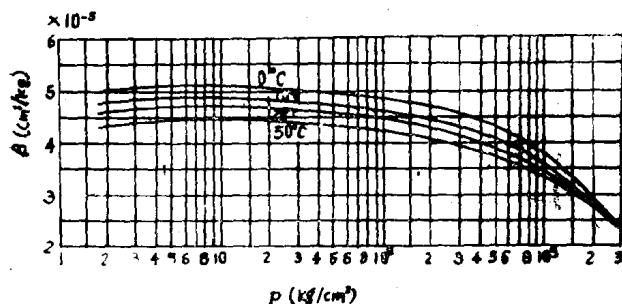


图 2.1.1 水的压缩率

圾，原污物，污泥，生鲜鱼类，纤维，泥煤，纸屑，谷粒，果实，食品原料，食物半成品，食品，水泥原料，新混凝土，纸浆，各种结晶物，塑料聚合颗粒，海草，贝壳，囊袋密封舱水力输送等，各种物质比重，表 2.1.3 为其部分材料的比重。

2.1.2.1 土

生育农作物基础的土称为土壤，是与人类关系最密切的物质之一。作为管路输送对象的土包括岩石，砾石，砂，泥渣，直到粘土广泛的范围。研究和确认这些土或土与水的混合液的性质对于推导其他一般固体物的性质有很大作用，所以首先要说明关于土的各种性质。

土的基本性质的定义⁴⁾

设 γ_s = 土颗粒容重 (克/厘米³)， W_s = 炉温 (100~110°C) 干燥试料重量 (克)， V_s = 土颗粒的真体积 (厘米³)，则

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (3)$$

4) 土质工程学会，土质试验法解说 (第1集) (1981)。