

固体水力输送的理论基础和当前状况

W. Wiedenroth

目的 实施煤矿和铁矿管道运输计划出现一个问题，即在什么条件下固体水力输送在技术上是可行的，经济上是有意义的，特别是这样的设施在联邦德国是合宜的。本文概述决定铺设固体管道和影响经济性的技术因素。

历史上第一次使用管道运输的例子 据我们所知，固体水力输送最初不是在冶炼厂内而是在与其相关的范围如采矿业内有目的地应用的。1852年在加利福尼亚的 Merryweather，一位淘金者曾用管道输送金矿砂。从冒险时期提心吊胆的试验性应用到今天的工业应用，确实是一个巨大的进步，尽管现在也常常冒有风险。

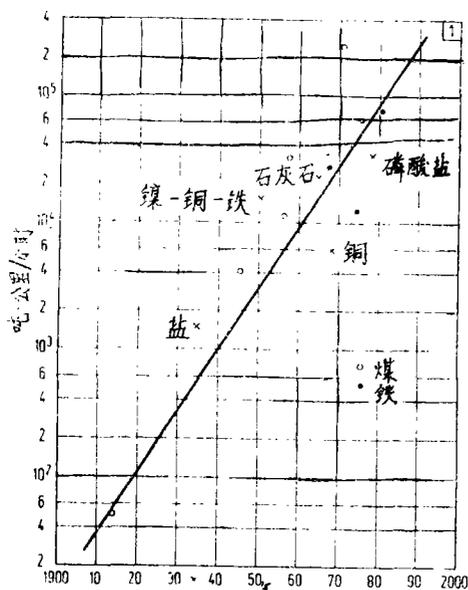


图1 1900年以来固体水力输送的进展

近几十年的发展 图1清楚表明固体水力输送在近几十年内取得的进展。可以看出，近30年内设计的运输能力增长约100倍。以两个选自不同技术领域的现代设备为例可以说明这一点。目前在易北河使用的德国效率最高的Hopper挖土机“北海”号，其载货体积为4500米³，用挖土机的离心泵装满沙土平均需41分钟（按额定体积流量15000米³/小时算），由直径900毫米、长1500米的管道运走。第二个例子是美国黑方山（Black-Mesa）管道。在长440公里距离内每小时管道输送660吨煤，约经72小时后到达Mohave发电厂。此设施自1970年以来使用率达98%以上。

固体水力输送的优点 上述例子除了说明水力输送装置效率高和可靠外还有其它优点，如沿运输线路无噪声、无尘、占地面积小且不破坏风景。可以毫不夸张地说，水力输送是当

前最利于环境保护的运输系统。

那么就产生下列疑问：优点如许多的运输方法为何在欧洲至今很少人问津？本文将就此综述几种看法并讨论之。

固体、载体介质和混合物

固体水力输送主要是输送二相混合物，即被输送的颗粒状固体和作为载体的液体。无需深究这就形成一宽广的组合领域。每种混合物均有其特殊的输送性能，同单纯的载运液体是完全不同的。

参与力学过程的物质的物理和流变特性适于表征此物质的性质。至于化学特性，则只有

当其变化在混合相时于运输终了对于被输送货物和载运液体的继续使用显示出优缺点时才至关重要。

固体 仔细研究固体颗粒的物理量与固体水力输送的关系后发现，颗粒的流动特性对固体水力输送是最重要的。颗粒流动特性的测量是困难的，必须求出影响此特性的各个因子的值。对于单个颗粒来说，首先有两个特征值，即沉降速度和阻力系数。它们又可分解为一系列既表征颗粒又说明液体详细特性的值，如粒径、固体密度、粒形、液体密度、温度和粘度。如果没有更好的办法，一般就根据上述两个量来描述单个颗粒的性状^[1]。

图2示出室温下水中石英颗粒的沉降速度同粒径的关系，有两种情况。首先，在湍流范围内，颗粒沉降速度仅随粒径的平方根成比例地增加；其次，在层流范围内，沉降速度随粒径减小而呈平方迅速下降。球状颗粒的阻力系数的变化也基本如此，但其它形状颗粒的则一般向大值方向偏移^[2]。还有重要的一点：沉降速度同固体物质浓度特别是细粒固体物质浓度有关；这可以说是“有阻滞的沉降”。

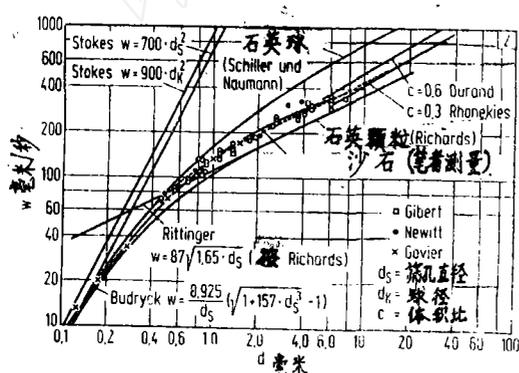


图2 石英球和沙石沉降速度与其粒径的函数关系

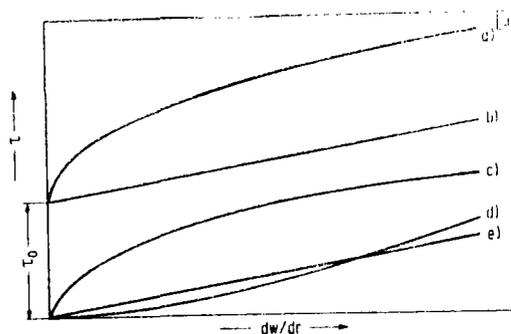


图3 几类流体的切应力状态曲线示意图
a)和b)是塑性流体和 Bingham 流体 c)是假塑性流体
d)是膨胀流体 e)是牛顿流体

液体及混合物 那些用作载体的液体的性质，虽然在密度和粘度方面各不相同，但从流体物理来看都是牛顿流体。由于掺入固体物质，尤其是细粒物质，此性质基本上改变了，简单说混合物显示出塑性流体性质。其特征是在开始流动时必须克服初始切应力。图3示出几类流体的流动状态。真实流体或多或少近似于此状态。

固体-液体混合物的管道流动

流动模式 固-液混合物若遵循不同的流动定律，就必定会影响管中的流动。一个有趣的极端例子是柱塞流动，由于初始切应力高，混合颗粒在柱塞内无法移动，混合物近似于一个抹过润滑油的活塞穿过管道运动。

第二个可能的模式称为混合物层流。只有当固体无需另外输入能量而仍能悬浮在载体介质中时才可将此模式用于水平管道中，否则管底会出现沉积而使运输中断。

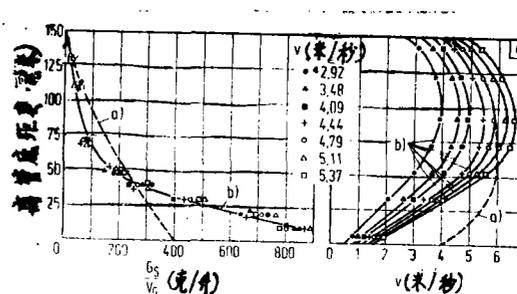


图4 混合物管道流动的固体物质浓度分布曲线和速度分布曲线
a) 均质混合物 b) 非均质混合物

技术应用时主要考虑水平管道中完全湍流的两种流动形式：均匀混合物和非均质混合物。均匀混合物的输送特征是管中速度分布大致对称，而非均质混合物则是从管底到管顶壁的速度分布不对称（图4）。这两种情况下的固体物质浓度的断面分布都是不对称的，即管的下半部物质较上半部为多。

水平输送的模式 关于输送机理可以很简单地以下列模式为依据：一个颗粒由于其阻力被载体介质向主要流动方向带动。同时由于其沉降速度此颗粒在管中又向下沉。当它碰到管的下壁时被减速。要使此颗粒在能量上再处于初始状态，必须将其抬升起来。图5示出此过程。由此可立即推论出，在一个给定距离内，颗粒沉降速度愈快，升起次数就愈频繁。此基本情况属实（尽管还叠加有许多附加效应），并用一原理模式原则上说明了水力管道水平输送固体物质时预期的压力损失的增加，可以表达成下式：

$$i_s = \lambda \frac{1}{D} \rho \frac{v^2}{2} + C(\rho_s - \rho) g \frac{w}{v}$$

广泛使用的 Durand 压力损失经验公式也反映了这个基本关系，据此，

$$\frac{i_s - i_w}{C_r i_w} = \varphi_D, \text{ 其中 } \varphi_D = 180 \left[\frac{gD}{v^2} \frac{1}{\sqrt{C_r}} \right]^{1.5}$$

式中 i 代表输送混合物和输送水的压力损失梯度， C_r 是管道中的输送浓度， D 是管径， v 是平均输送速度， C_r 是从沉降试验中得出的固体物质阻力系数。

由此式以及上述模式可知，鉴于存在压力损失（也称能量损耗），输送颗粒的沉降状态对固体物质的水平输送具有决定性的影响。在相同条件下，大颗粒物质由于其沉降状态，要求更多的输送能量。

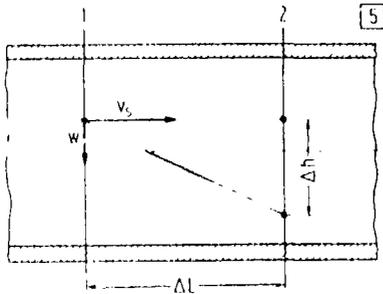


图5 沿管固体物质的水平输送模式

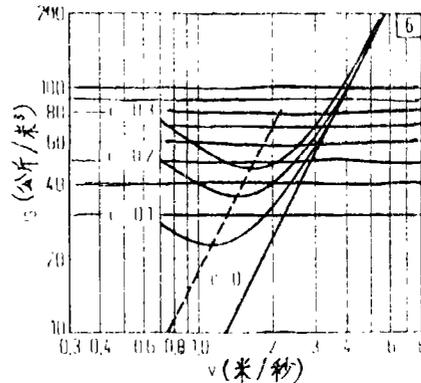


图6 在固体水力水平输送条件下压力梯度的定性变化

无需穷究理论，就可证实混合物水平输送时的压力损失最小值在给定的参数下同平均输送速度的关系（图6）。压力损失为最小自然是设计固体输送管道时所追求的，由于此压力损失最小值正好发生在固体最初沉积在管道中的时候，所以实际流速应选得高一些。假设安装费用按管径的平方增加，根据 Durand 关于能量损耗的压力损失公式可以得出，成本最低的输送速度是最有利的纯水输送速度和临界输送速度之和。在临界输送速度下正好在管底观察到固体沉积。

沿水平管道的不同输送状态 这可以说是混合物水平水力输送的另一基本特征，即管道中各种输送物质状态的特征。

静止状态时，只要固体密度大于载体介质密度，固体就沉积在管底。若提高流速，则最上面一层固体被卷带走，常常形成沙丘，该沙丘缓慢地沿流动方向移动。粗大的颗粒由于 Magnus 效应跳跃式地向前移动。继续提高流速就会使得全部固体物质同时运动，形成剧烈的混合，输送物就成为非均质混合物。最后再提高速度，使得速度分布比较适中，形成均匀的悬浮物。对本文来说，这样粗线条的轮廓式描述水平管道输送混合物已足够了。关于固体垂直输送补充说明几句。

垂直输送 当液体以固体沉降速度流经固体时，密度大于周围液体密度的固体就悬浮在液体中，所有其它的次要效应（如壁接触、流动断面积由于有大量颗粒而减小等等）若都忽略不计，则当载体液体流速大于被载固体颗粒沉降速度时就产生向上输送。这个事实说明，即便非常粗大的颗粒（例如锰块）的垂直输送较之水平输送显然易于实现，水平输送时固体悬浮状态是由次生流动促成的。

从流动工艺知识推导的结论及其对实践的影响

功率消耗计算举例 以下的讨论仅针对固体水力水平输送的较重要的和较临界的情况。

以固体密度 2.65 公斤/分米³、输送体积浓度 30% 为计算实例，确定临界速度下某一固体流量时的压力梯度和比功率消耗。计算主要依据上述 Durand 公式，但粒径改变了。假设输送量为 500,000 吨/年以及纯水输送时管道阻力系数为 $\lambda = 0.015$ 。图 7 示出根据几个基本值算出的压力梯度和比消耗功率。

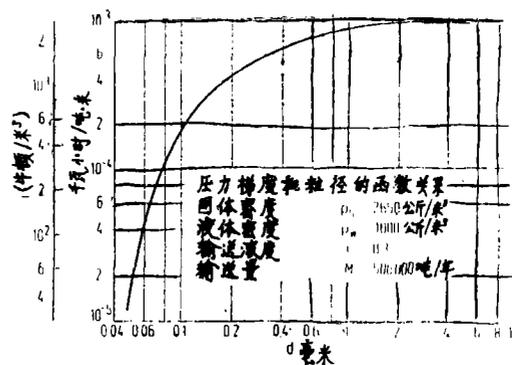


图 7 水平水力输送时的压力梯度和比消耗功率（算例）

我们看到，在从 1 到 5 毫米这样大的粒径范围内，压力损失和功率消耗几乎不变。而在平均粒径较小时，压力梯度和比功率消耗明显下降。当粒径减小 0.1 毫米时，这两个值就下降 1/5 左右。若再继续减小粒径，那么混合物就变成一种高密度的均匀流体，但有时其流变性能也改变了。

近距离和远距离输送 从上述关系可见，密度显著大于载体介质密度的粗粒固体，只能在企业内或在较短的距离内（几公里）水力输送。细粒固体才考虑远距离输送。由于同样物质的运输性能随粒径明显变化，故认真求取这些数据是必要的。

固体远距离水力输送举例

简单了解固体水力输送的关系之后，现介绍已完成的固体管道和计划，以便进一步认识本文开头提出的问题。依据的是 Gødde 的文章 [5]。

俄亥俄管道 此输煤管道从加的斯到克利夫兰电力照明公司动力发电厂，距离 172 公里。在 50 年代末投入使用，工作很有成效并且是赢利的，直到铁路工会在与此平行的铁路线段上将运输价格降低到利润率极限以下。但管道继续使用，以限制铁路的价格上涨。

这条管道的使用说明，工艺流程最佳化在经济上有重要意义。为了长期使用，必须采取预防措施防止管道受化学和物理的综合侵蚀。有目的地使用防腐剂可明显减少损伤，尤其是管道的开始端。

黑方山管道 它是根据俄亥俄管道的经验兴建的。此管道经过不便通行的广阔山岳地带，将露天采掘的燃料运送给发电厂。前面已提到管道长440公里，运输容量每年约6百万吨，使用率达98%以上。

萨马科运铁管道 在巴西1977年投产。管道长396公里，运输粒径74微米的精铁矿，速度从1.65到2.2米/秒，运输量为1044米³/小时。这条从内地到海边的管道是铁路线的补充。尽管它是工艺流程的补充装置，但比铁路运输经济得多，故其运输容量上升到每年1200万吨。

猛河(Savage-River)管道 它建在澳大利亚的塔斯马尼亚，在85公里距离内运送磁铁矿，运送能力每年250万吨。此管道是固体水力输送的范例。若没有这种技术，要在不平坦的地形上经济地开采矿藏是不可能的。在此情况下自然也应注意选矿费用和脱水费用。

库尔斯克计划 最后谈谈在苏联库尔斯克正由Salzgitter公司建造的设备。按此计划，在26公里距离上首次直接通过水力输送系统每年给冶炼厂输送230万吨铁矿。

各个机组的配置 主要选用离心泵和容积式泵做驱动设备。在大流量、大通道断面情况下，亦即输送没有处理过的物质时，使用离心泵；输送距离若远，中间再接上增压泵。这种泵的功率使人联想到Hopper挖土机“北海”号用的泵。

如果跨越的距离大，根据上述原因只能考虑细粒固体作输送混合物，该固体在晶粒分布方面极其紧密，在这种情况下，考虑到需安装的中间泵站的数目应选用高压容积式泵。

举两个例子就可清楚机器大小及其应用。这就是驱动功率960千瓦的泵机组，由Wirth机床厂生产的三气缸式泵；安装五个泵来输送白垩浆，66巴压力时最大输送量为2440公升/分。由同一制造厂生产的这种活塞式泵组各以315千瓦供给水泥厂输送原材料。

经济观点

每次使用都必须重新核算，即便按所有观点认为最优的系统，如果不经济，那也休想得到广泛的应用。至于固体水力输送，首先要最佳调整由方法决定的反趋势“输送能量的消耗”和“为制备混合物及其最后脱水的工艺流程消耗”。由于参与影响的因子很多，这个任务不仅复杂且耗费昂贵。再者任务的解决相当大程度上取决于影响因子本身的不确定性。由此得出

两点结论：第一，每次采用水力输送时都需要精确地并彻底地研究所有影响因子、它们的不确定性及其相互作用；第二，从沉降研究获得的数据只能反映出趋势和作为辅助的佐证，由此不能直接做出决定。

各个部分的费用量级 这里还应指出几个研究结果以介绍影响因子的量级。图7根据算例表明，输出物质的功率消耗同粒径大小有明显的关系。由此可以看出，运输能量费用同粒径保持比例关系。Köhling^[4]在

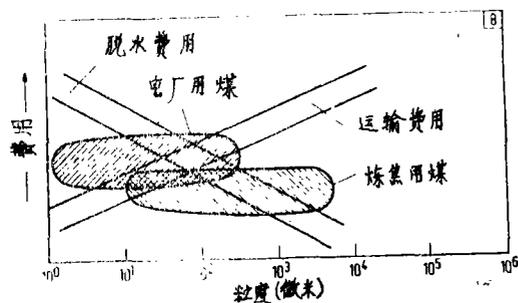


图8 输送费用和脱水费用同被输送固体粒度的定性关系^[5]

表 1 中给出水力输送烟煤时事前和事后的处理费用。可以看出，全部处理费用以最大粒径的 -1.3 次方下降： $K_{处理} \sim d_{最大}^{-1.3}$ 。

按 [7] 得出的图 8 再一次定性说明了上述关系。

表 1 水力输送烟煤的前、后处理费用

粒 径 (毫米)	预处理费 (马克/吨)	从力学上等出的 最终水质量含量 (%)	费 用 (马克/吨)	烘干10%质量 含量的附加费 (马克/吨)	前、后处理 总 费 用 (马克/吨)
10-0 (一般粒径)		10.5	1.10	0.26	1.46
19-0 (最细粒径或分高)		14.5	3.25	3.51	6.76
2.4-0	2.00	19.0	3.30	7.44	12.74
1.4-0	3.50	21.9	4.10	10.14	17.74

整个系统中各个部分的费用分配并非不重要。对此 [6] 提出费用分配并用图 9a 示出。由图不难看出，发送站和终点站占有很重的比例。将远距离输送管道的全部费用分类，我们得到 [8] 中提出的和图 9b 上反映的分配。管道输送同其它运输方法相比有两大优点：其一可长期计划的固定费用占主要成分；其二最难估计的人员费用仅占 10%。

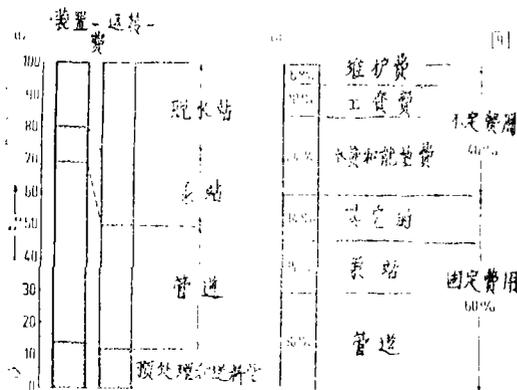


图 9 远距离水力输送的费用分配

a) 各部分的设备费用和运转费用 b) 总的费用

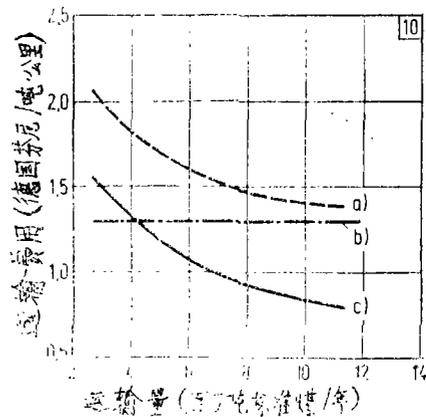


图 10 美国 800 公里距离能量运输费用
同运输容量的函数关系

各种运输形式的比较 最后在图 10 上介绍常常引用的 Bechtel 公司的研究结果 [9]，比较了输送系统的费用同年能量生产量的关系。由图可见，在年生产量大于 400 万吨标准煤的情况下，固定水力输送要比输电线和铁路运输都优越。因而美国建造了最长的和效率最高的输煤管道，将燃料从矿山经 1000 多公里运至消费中心。

总结

固体水力输送是有益于环境的大批量输送粒状货物的最好办法。其物理基础已有了相当

大程度的说明,其工艺正被掌握。在地球各大洲里,固体运输管道在广阔的地区内正安全地输送着大量物资。而在接受相当大部分经这样输送的物资的地区,至今管道运输仍得不到相宜的应用,这是何故?

简单分析本文提出的正在运转的或计划中的装置,至少可部分地回答这个问题。首先,管道具有特定的输送方向。为了经济地运转,根据其高运输能力需要在两个固定站之间连续不断地输送物质。即便这个先决条件得到满足,在工业中心的欧洲铺设这样一条管道还会碰到其它更大的障碍。

几乎在所有情况下,运输物质的办法首先是公路、水路、铁道、传送带或传输线。在我们欧洲,已为这些运输办法提供了优良的必要措施,此外还得到大量的国家资助。因而纯商业性管道必须具有竞争性,就是说必须比国家资助的传统运输办法便宜。要在这种条件下使相对短距离的运输获利,那就要不断增大运输容量。

除此之外,使用这个技术上和经济上最有益益的装置还有一些巨大的障碍。例如,担心管道失灵而使地下水受到污染,因而必须采取相应的预防措施;失去铁路和航运的运输收入和与此有关的生产增长;以及[7]中提出的看法:在象400公里长的萨马科管道线路上,必须与70位土地私有者交涉磋商,而在澳大利亚只需与3到4位打交道。那么从鹿特丹、埃姆德或威廉港到顿因豪森、杜伊斯堡或多特蒙德港,要与多少位土地私有者打交道,其困难就可想而知了。

尽管铁矿管道和/或煤矿管道在西德也显示出它是远距离输送大宗散装货物的最经济办法(经Salzgitter中心深入研究过),但如同其它许多计划一样,目前要付诸实施却是另一回事。

在德国工程师协会“固体水力输送委员会”中,有工业和研究方面的权威人士参加,他们将这方面的研究和实践成果推广使用。本文的撰写也得到他们的帮助。

参 考 文 献(略)

李素琴译自: *Stahl und Eisen*, 102, 11 (1982): 555—560.

固体的水力管道运输

C. F. Round

引言

大家知道,固体物质,尤其是颗粒固体物质,可以用运动着的流体来运输。只需观察一下波浪的沉积运输,沙漠中的风沙迁移,江河中的冲积运动,就可以确信这种运输方式的效能^[1]。同样很明显,颗粒的粒度和密度,颗粒所处的速度场这样一些参数,会对这种运动发生影响。但颗粒的形状,流体的湍流度,相邻颗粒的作用,颗粒群的粒度分布等的影响,则可能不那么显著。