

国外管道输煤译文集

煤炭科学研究院唐山分院 情报研究室

一九八七年十二月

前 言

本译文集是《国外管道输煤译文集》第二辑。文中除一部分继续介绍国外管道输煤的发展现状、近、中、长期规划以及经济效益分析以作为第一辑的补充资料外,大部分文章在编排上侧重于介绍管道输煤的有关理论、工艺和设备。前后两辑译文集各有所侧重以保持所报导资料的连贯性和全面性。

由本译文集可看出,管道输煤工艺已发展到可全面实现工业化的成熟阶段,其技术经济可行性业已由理论及实践全面证实。但近两年来世界范围内的固体物料运输管道项目的发展似处于暂缓或停滞阶段,其中美国7条大型输煤管道计划的搁置,特别是E T S I管线的停运对各国仍有争议的管道输煤的发展产生了极为不利的影响,最为严重的是包括中国在内的一些已相继拟就的近、中期输煤管道的规划也因各种原因而受挫。

但是,作为煤炭运输方面的一次革命而出现的这一新输煤工艺所具有的巨大潜力是毋庸置疑的,在这方面的研究工作仍在稳步前进,而且国际性的技术交流无论从广度和深度来说都达到了一个新的阶段。近年来各国在管道输煤前、后处理环节,尤其是浆体利用技术方面的深入研究,为进一步促进和完善这一输煤工艺作出了新的贡献。

为了系统介绍国外管道输煤现状及发展趋势,如有可能将在后几辑中着重介绍近期固体物料运输管道及浆体开发利用的理论和研究成果。此外,介绍综合运输系统的实施情况也是陆续出版该译文集的意图之一。

参加本集编辑和出版工作的为李清华、刁乃秋、沈慧铭等同志,由于时间仓促,不足之处,望不吝指正。

煤炭科学研究院唐山分院情报研究室

《国外管道输煤》编辑组

目 录

- 1、煤水混合物的输送特性
- 2、高浓度水煤浆的管道运输
- 3、固体物料的长距离管道运输
- 4、浆体输送技术的研究开发动向
- 5、铁矿石和煤的远距离管道水力运输
- 6、管道水力输煤
- 7、固体物料管道运输系统及组成部分（第三部分）
- 8、高压煤浆试验回路的启动和运行
- 9、法国洛林煤田选煤厂的管道运输系统
- 10、洛林煤田的煤炭水力运输
- 11、苏联奥斯科尔电力冶金联合企业采用管道输送铁精矿的经验
- 12、煤浆管道运输对水质的要求
- 13、水力输煤过程中颗粒运动的试验研究
- 14、煤和矸石水力运输过程中固体载荷量和粒速的测定
- 15、水煤浆管道运输的压力损失
- 16、对固体物料管道水力运输的磨损评价
- 17、管道运输参数的最佳化和检测
- 18、用放射性检测仪检测固体物料在管道中的分布状态
- 19、煤浆流内煤炭粒度的检测
- 20、管道输送细煤浆脱水工艺现状及其今后发展
- 21、煤泥脱水
- 22、煤炭加工用的双带压滤机

- 23、双带压滤机
- 24、管道煤脱水用连续加压过滤机
- 25、高浓度水煤浆技术介绍
- 26、水煤浆应用技术研究计划
- 27、水煤浆的湿式研磨
- 28、为水煤浆制备粉煤的研磨设备
- 29、高浓度水煤浆燃烧技术
- 30、煤浆燃料的燃烧
- 31、水煤浆的燃烧
- 32、水煤浆燃烧试验方案
- 33、瑞典卡博格尔公司的水煤浆制备方法 & 添加剂专利
- 34、高浓度水煤浆的粘度调节剂 (专利)
- 35、水煤浆混合物管道输送时的检测仪器仪表
- 36、带有打印机的超声波测厚仪
- 37、电容密度计
- 38、R S—1000型岛津粒度分布自动测定装置
- 39、水力运输参数的测定仪表及检测系统

煤水混合物的输送特性

詹姆斯M·艾克曼

摘 要

本文介绍了为测定重量浓度58%—65%的煤水混合物的输送与贮存特性所进行的一系列初步试验结果。这些试验是在模仿工业锅炉典型燃料系统的管路中进行的。装设管路安设了仪表以测量管路的压力、压力损失、温度以及若干点处的燃料流量。对于匹兹堡煤层的煤来说,在上限流量情况下其平均热输入量 ϵ 大致为 $70 \times 10^6 \text{ BTU}$ (英热单位)/时。

本文将讨论在混合物的制备中遇到的困难,以及所使用分散剂的效能随时间的变化。并不专门制备有特定粒度分布的高浓度水煤浆。

迄今为止所进行的流动试验结果,证实了使用分散剂的效果。用浓度65%、经分散剂处理的水煤浆进行试验时泵的出口压力和管路系统的压力损失要比试验浓度为60%但未加分散剂处理的水煤浆低。通过大量试验得出的压力损失数值,以适用于分析伪均质流和非牛顿流的方法进行了分析。本文还讨论了粘度特性的试验室测定情况并与由试验管路所得出的结果进行了比较。文末还讨论了有关试验回路的今后计划。

引 言

水煤浆作锅炉燃料是煤炭应用研究方面的一个新的重要领域。六十年代,西德和苏联曾进行过燃烧方面的大量研究工作,但研究内容并不包括有关水煤浆流动特性的问题。研究对象仅限于重量浓度为60%或60%以下的煤水混合物。近年来,对煤水混合物重新发生了兴趣,并制备出了高浓度(煤约占70%)并且稳定的水煤浆(下文简称CWM)。美国的研究方向主要是研制一种现有的烧油和烧煤设备可使用的燃料。目前这方面的研究正集中于该类燃料流动特性的试验室测定上。现有的管道流数据包括有给定流动特性的煤浆或浓度在60%以下的煤浆。

本文是采用试验管道回路所进行的一系列初期 ϵ 流动试验结果的报告。试验管路模仿典型的锅炉管路系统或厂内燃料贮运管道系统设计的。该管道系统包括若干弯管,水平段与垂直段,以便建立一个大压力降的流动系统。对管道回路的试验方案,为试验煤含量、颗粒粒度、煤的种类及管道尺寸等变量的影响,试验用的CWM为煤水及添加剂构成的混合物。由于采用简单的混合法和单峰颗粒粒度分布,最大固体含量被限制在70%

以下(按重量计)。如果在试验计划的执行过程中能制备出高浓度CWM时,也打算进行一定的试验。

初期试验是在直径为1英寸的管道回路中进行的。试验的目的是对CWM的混合、贮存和处理过程进行分析。试验用的CWM匹兹堡煤层的煤制备(磨碎至-200网目占85%)。此外对浓度分别为60%、63%和65%,并加减粘剂的煤水混合物进行了试验。PH值对CWM的特性的影响也进行了试验研究。流动数据是在2~15加仑/分的流量范围内得出的。颗粒粒度分布、颗粒磨损、固体含量以及流动特性则有选择性地进行了试验室测定。另外,还就一些添加剂的特性和PH值的控制进行了试验室研究。

通过这些试验项目的实施,获得了大量的流动数据和操作经验。所遇到的混合问题在本文中将要进行讨论,另外,还要讨论由匹兹堡煤层的煤制成的煤水混合物的腐蚀性。本文也将述及煤浆的老化变质问题以及为克服煤浆特性的变化所采取的措施。所获得的流动数据采用质流和非牛顿流的通用相关分析法进行分析,还将以各种状态的煤浆流之间的一般相互关系分析这些数据。本文还要对试验室流动数据进行分析,其方程式要和由流动数据得出的方程式进行比较。试验室数据将用来对CWM流动数据的专用流动模型适用性进行检验。

试 验 项 目

1、管道环路的设计与检测仪表

本文介绍的试验项目是在如图1所示的1英寸直径为40号管道环路(内径为1.047英寸)中进行的。搅拌桶的容量为500加仑,并装有一台搅拌机。泵是罗普尔型涡流泵。

该泵用来输送不加减粘剂的浓度为60%的CWM时体积流量很大,流速可达至5英尺/秒。由泵算起环路中共有3个弯管段。每个弯头的弯曲半径为18英寸。压力传感器是普通压力传感器和阿梅泰克型SN隔膜密封的组合件。隔膜密封件有一个弹性隔膜,并能承受350°F的温度和1500磅/英寸²的压力。整个系统(密封件和传感器)的精度为传感器满量程的1%。流量计是一种微动型质量流量计,它有一个和管道直径相同的U型管式传感器。安过第一个弯道后的垂直管段上安有两个超声流量计,而且也进行了短期试验。

质量流量绝对压力压差以及温度等均自动测定,各个检测点的数据均由一个数据获取系统收集。绝对压力的检测包括泵的出口压力,沿35英尺垂直管段全长3个点处的压力及第3个弯头入口处的压力。压差测定的是第1—第2个弯头之间及水平试验管段的压差。温度传感器安装在整个管道环路上的若干个点,其中包括:搅拌桶上三个点,泵的排料口,流量计及靠近每个弯头处。另外,在8英尺的垂直管段上安装了—含3个热电偶的传感器。这三个热电偶检测管道轴线处,径向距离的 $\frac{1}{2}$ 处、及管壁附近的温度。

数据收集系统每分钟从各检测点上抽样1次。通常,每次试验包括5—9组流量值,流量范围为2—15加仑/分。每选定一个流量值,持续试验30—45分钟。质量流量选定之后,系统要有15分钟的平衡时间,然后信息收集系统才收集新的数据。采用这种方

法，每组数据由35—45个检测点的数据构成，其中30个点是典型数据点。对每组数据均进行统计分析，以便确定数据的分布。对仪表精度和可靠性也进行了全面考虑。一般情况下，所给的数值是每组数据的平均值，有关原始数据的详细分析将在下文中介绍。

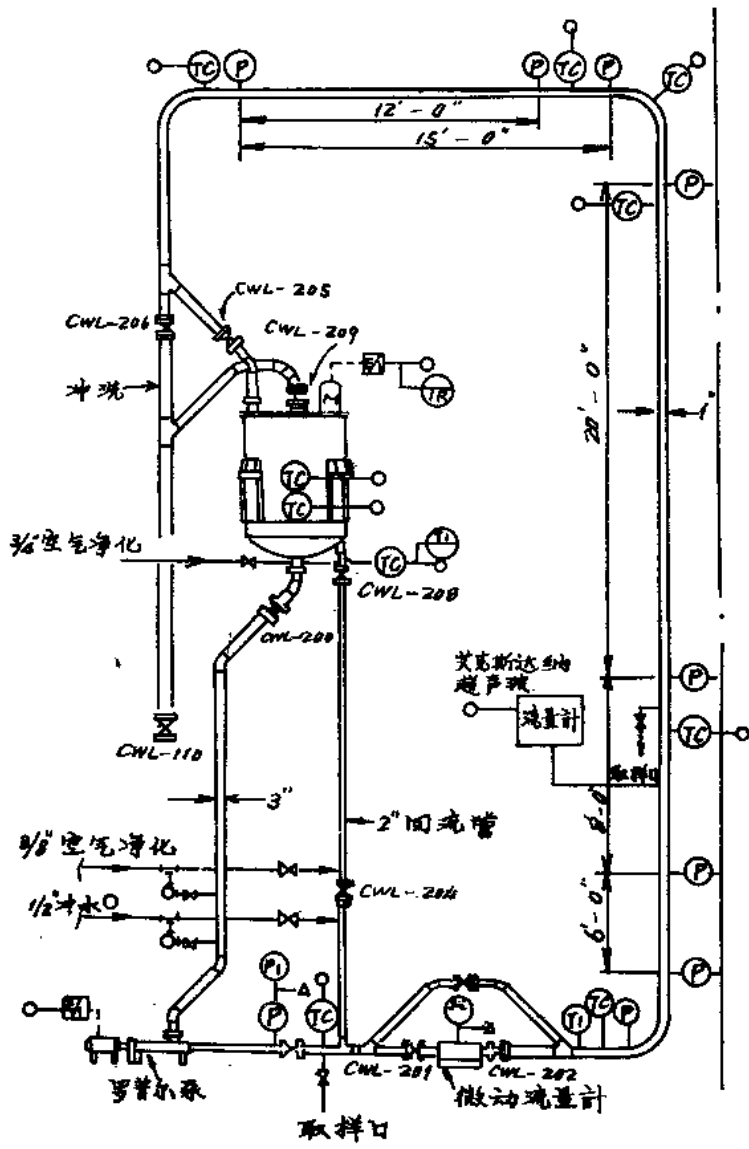


图1 试验环路示意图

2、试验项目

试验项目包括27项试验内容。其中7项试验中是CWM在管路中循环几天后再出去。两项基础试验以及浓度分别为60%、63%和65%的CWM试验。大多数所试验的CWM中均采用了减粘剂。有20项试验的目的是研究搅拌、贮存及输送特性与时间PH值以及使用添加剂的关系。每组试验包括4个试验为期两周。当流动试验进行到CWM制备混合以后的1天，3天，7天和9天再进行试验，第一组试验的CWM浓度为6%，

不加添加剂；第二组试验亦采用浓度60%的CWM，但在CWM制备过程中加一次0.5%的劳马尔—D型添加剂；第三组试验的CWM浓度为60%，但添加剂的初始剂量为0.5%（劳马尔—D型药剂）。在进行每个流动试验之前，再另加添加剂（0.25%）。在第四组试验中，在加入劳马尔型添加剂（添加剂量在整个过程中始终保持在0.5%）之后，分两步调节PH值。最后，在第五组试验过程中，混合物的PH值首先调整到8.0，几天以后，再加入减粘剂。进行这些试验的同时，在试验室内还要进行辅助性研究。对每种CWM，都要测定其初始级配，随后再在较长一段连续试验期间（如10天）分几次测定。粘度的测定，是在固定的剪切率和某些温度条件下，通过测量剪应力和时间的关系来实现的。另外，也要找出剪应力与剪切率的关系。CWM的固体含量通过水的蒸发来确定。另外，在一个小型密封容器（~1加仑）中进行了一组混合试验，以模拟环路中出现的老化作用。

3、运转经验

流动环路的运转一直很顺利，但是，也发现了一些问题。首先是CWM制备过程中的浸湿问题。在这个系统中，干煤是通过搅拌桶顶部的一个进料口慢慢给入的。因此干煤漂浮在混合物上部。这个问题，通过对固体物料添加速度的控制，容易解决，但是流动数据表明，混合物中的煤并不均匀弥散，搅拌一天之后，煤方全部浸湿。使用诸如特里通X—100或甲醇等浸湿剂虽然能提高湿润速度，但对流动特性有不利影响。

其次，将匹兹堡煤层的煤加到PH值为6的水中后，混合物的PH值会迅速下降到3或4左右。泵的转子虽然是采用镀铬的耐磨材料制造的，在这么低的PH值情况下，也有严重腐蚀。PH值低的原因是可溶性硫酸盐造成的，甚至在西部煤田的煤制备的煤浆中也有这种现象。其实西部与东部煤田的煤相比，煤中含有天然的缓冲剂（强碱性）。另外，可溶性的氯化物亦能大大加重潜在的腐蚀性。还有，在PH值超过8时，减粘剂的使用期限和应用效果均会得到提高。现有的资料表明，把PH值调整到8.0左右，可明显降低CWM的表观粘度。

用以降低粘度的添加剂，在添加之后即刻会发生作用。但是，当PH值较低时，在25—36个小时内，这种粘度的降低作用就会消失。此时CWM呈现无减粘剂时的典型流动特性。若再次添加药剂，也只能有一天减粘作用。当PH值达到8.0左右时，添加剂的效能将会持续很长一段时间。

流动条件由泵的转速确定，而泵的转速又由变速驱动装置控制。泵的转速和流量之间的关系，在不同煤浆浓度的情况下进行了确定，其测定结果为线性关系（图2）。另外，随着固体含量的增加，流体性的变化情况可由三种浓度煤浆在泵送时的流量和泵出口压力的关系曲线看出（图3）。

最后，质量流量计又在泵速固定的情况下通过将混合物打入一容器中然后再称重的方法进行了校定。效果是令人满意的。流速则用以下两种超声仪器测定：艾克斯达纳DEX—800—b型和一种正在研制的高温情况下应用的试验型流量计。虽然这两种流量计的测定值与计算值有较大偏差，但还是能反映出流速的变化。只不过是流速小时，测值较大，流速较大时所测值偏小。泵的流量、质量流量计的读数以及艾克斯达纳超声波流量计读数见表1。

流量计的比较(浓度为60%的煤浆, 104°F)

表 1

A, 泵的技术特性

转速	出口压力(磅/英寸 ²)	平均流量(磅/分)
50	58	23.4
100	74	47.3
150	90	70.9
200	102	94.2
250	116	117.8
300	131	141.1
350	148	164.2

B、流量计的比较

泵的转速	磅/分	微动流量计		超声流量计	
		加仑/分*	英尺/秒*	英尺/秒*	加仑/秒*
50	23.2	2.167	0.80	0.90	2.52
100	47.3	4.40	1.63	1.75	4.9
150	70.5	6.56	2.43	2.80	7.14
200	95.0	8.84	3.28	3.30	9.24
250	118.2	11.0	4.07	4.15	11.62
300	142.2	13.23	4.90	4.80	13.44
350	165.7	15.41	5.71	5.40	15.12
380	170.0	15.81	5.86	5.60	15.68

• 测定值

* 由管道直径或煤浆密度计算出的数值

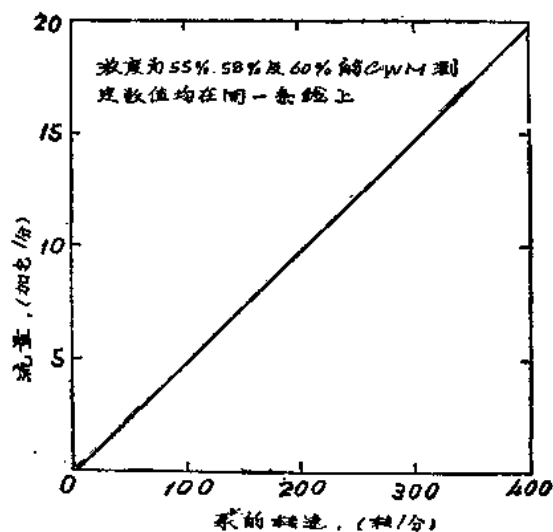


图 2 泵的性能、流量和泵转速之间的关系

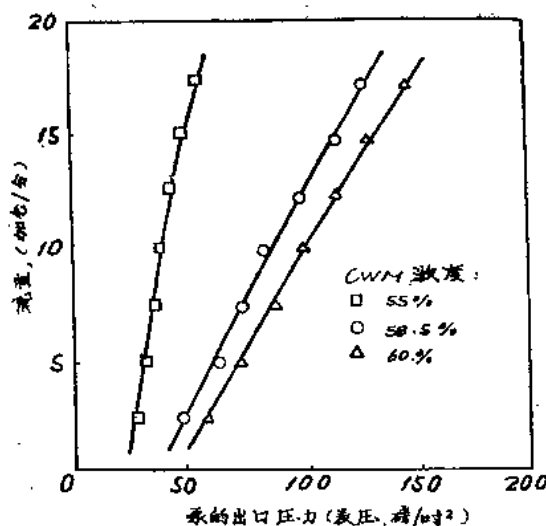


图3 泵的性能、流量和泵出口压力之间的关系

试验结果与数据分析

1、数据处理方法

如上所述,安装在试验管道中的所有检测仪表均与一个数据自动收集系统相连接。在每一组流量条件下,每分钟要记录30个信号。因此,进行一次典型的试验时,有9组流量值就得持续大约270—400分钟,而每个信号要抽样270—400次,每定一次流量就获得一组数据。由特定通道获取的所有数据(比如质量流量)、均求出平均值并对数据进行统计分析。大大超过计算标准误差的乱真数据(假信号)点要清除,再计算出一个新的平均值和标准误差。在初步运转过程中即采用这种数据筛选法来确定物料流的平均特性。今后还将对各组数值进行更加细微的分析,以研究数据的分布特点。

对所获得的实际数据进行粗略的分析研究,即可说明数据收集系统的效果及所获数据的可靠性。表2所列采用浓度为60%的CWM作5次试验后选出的数据。在两种情况下未进行粘度调整,而在另外三种情况,则在3个不同的煤浆pH值的条件下使用了减粘剂。在20英尺高垂直管段的顶部所测得的压力值亦表示2号弯管的入口压力。对于弯管2的入口压力所列举的数值是根据弯管3的入口压力以及20英尺长的水平管段和弯管2两端的总测定压降。另外,进入20英尺水平管道以前的4英尺长入口段上产生的压降要进行测定并计入总的压降中。测定值与计算值相当吻合并在该系统的精度范围之内。表3给出了垂直管段上端所记录的压力值的总误差,总误差是各数据组的标准误差和数据收集系统中的累积误差总和。这些误差包括每个仪表的精度误差,电子装置的转换误差以及将电信号拟合到每个仪表的校准值的误差(内插误差)。

表2中所列出的数据表明两种趋向。首先,当pH值增加时,尽管流体的平均温度降低了,但该系统(泵出口到弯管3入口)的总压降也会减小。试验室数据(图中未示出)表明,物料的流动性随温度的增加而提高。此外,最初两个试验的结果表明,浓度为60%,不加添加剂的CWM在制备和储存第一天以后,其表观流动会减弱。

表2

由试验管路获得的典型数据

项 目	60%的煤浆, 无添加剂 ¹		60%的煤浆, 无添加剂 ²		60%煤浆, 加添加剂 ³		60%煤浆, 对PH值 ⁴ 进行控制 ⁵		60%煤浆, 对PH值 ⁶ 进行控制 ⁶	
	平均值	标准误差	平均值	标准误差	平均值	标准误差	平均值	标准误差	平均值	标准误差
质量流量(磅/分)	68.4	0.3	68.5	0.3	68.2	0.2	67.9	0.2	67.8	0.4
弯管3的入口压力(磅/英寸 ²)	8.1	<0.1	4.1	<0.1	6.2	<0.1	1.7	<0.1	0	—
由入口至12英尺水平管道的压力(磅/英寸 ²)	18.4	<0.1	11.3	<0.1	14.6	<0.1	7.1	<0.1	3.6	<0.1
计算出的弯管2的出口压力(磅/英寸 ²) ⁶	21.0	—	13.1	—	16.7	—	8.5	—	4.5	—
弯管2的入口压力(磅/英寸 ²) ⁷	26.3	<0.1	17.0	—	20.9	<0.1	11.6	<0.1	7.1	<0.1
20'垂直管道上部压力(磅/英寸 ²) ⁷	26.8	0.1	17.0	0.1	22.2	<0.1	13.0	0.1	7.5	<0.1
20'垂直管道底部压力(磅/英寸 ²)	55.1	0.1	39.3	—	44.8	—	30.0	0.1	22.4	0.1
8'垂直管道的底部压力(磅/英寸 ²)	68.3	0.1	49.4	<0.1	54.9	—	37.9	0.1	29.6	0.1
泵的出口压力(磅/英寸 ²)	112.1	0.4	72.3	0.1	93.4	0.3	63.6	0.2	48.2	0.4
流体平均温度(°F)	107.0	0.2	93.0	0.1	93.0	0.1	86.0	<0.1	78.0	0.1
温度梯度(°F)	-2.6	0.1	-2.6	<0.1	-2.9	0.1	-2.3	<0.1	-2.4	<0.1
总压降($P_D - P_{E3}$) (磅/英寸 ²)	104.0	—	68.2	—	87.2	—	61.9	—	48.2	—

1、加煤以后立即检测。

2、加煤3天以后检测。

3、加劳马尔—D型药剂 (PH<4.0)。

4、PH值控制初期试验 (PH<7.0)。

5、7天以后控制PH值(PH<8.0)。

6、根据12'管道的 $\Delta P/\text{ft}$ 计算。

7、计算出的弯管2的入口压力应等于20'管道上部的检测压力。

在对压降数据作详尽分析讨论之前,先介绍一下试验室的验证试验。

2、试验室试验

验证试验在试验室内进行,以验证试验管路中获得的结果,并提供一些进行环路研究时所需要的基础数据。

弯管 2 人口处计算压力和检测压力的比较分析

表 3

混合物 (见表 2)	1	2	3	4	5
差 值 ¹	1.9%	0	5.9%	10.8%	5.3%
压力测定的 累积误差 ²	1.2磅/英寸 ²	1.2磅/英寸 ²	1.2磅/英寸 ²	1.2磅/英寸 ²	1.2磅/英寸 ²
%误差 ³ (最大)	4.5%	7.1%	5.4%	9.2%	16%

1、百分比差 = (测定值 - 计算值) × 100 / 测定值。

2、根据标准误差平方和的平方根以及仪表和数据收集系统的误差。

3、%误差(最大) = (累积误差 × 100) / 测定压力。

基础数据包括煤的颗粒粒度分布,试验用煤浆的级配(目的在于观察颗粒的碎化和团聚情况)及粒度分布随时间的变化。另外,还要提供以下资料:干固体含量、剪应力和剪切率的关系曲线、剪应力和时间的关系曲线。粘度使用哈克 R V₃型系统测定。该系统的性能特征及标定常数,均在若干剪切率温度条件下以粘度标准进行了检验,对从流变学角度来看不太复杂的流体也采用筒式和平板式粘度计进行了相同分析。

对于搅拌方法和在环路中所使用的CWM制备技术,均已进行过验证试验。另外也进行了长时间的搅拌试验,目的是研究在使用添加剂和对pH值进行控制的条件下CWM随时间的变化。试验为期10天是在一封闭系统中以连续搅拌的方式进行的。每隔1至3天,对于固体物料的含量进行一次测定,并每隔1—3天在200秒⁻¹的固定剪切率下测定一次剪应力和时间的关系曲线。

尽管试验室内CWM特性的变化与环路中的时间间隔不同,但是,一般地说试验室数据和环路试验的结果是一致的。另外,试验室试验时除了添加劳马尔—D和碱性添加剂(如NaOH)外,还需要加第三种添加剂,以稳定劳马尔—D,而在环路中不必加第三种添加剂。所使用的第三种添加剂是戴蒙德·沙姆罗克公司的产品,即CW—11型添加剂。当使用NaOH, Na₂CO₃, Ca(OH)₂和NaHCO₃时,即使不用劳马尔—D药剂,也可调整PH值并改善试验用CWM的流动性。

3、数据分析

根据水煤浆流的一般相关性,150微米以下的煤颗粒会形成可以要求流速运输的均质悬浮液。就150微米以上的颗粒而言,水煤浆流的特性取决于颗粒比重及其流速。在进行该试验的早期阶段,所用CWM是由85%左右—200网目的煤制备的,属于均质流。流速取决于流体的体积流量和管道的截面积,流速变化范围为1英尺/秒—6英尺/秒左右。

均质或伪均质水煤浆的模型,经常采用非牛顿流模型的形式,基本上与时间无关,(如同宾汉塑性流,伪塑性流,或屈服伪塑性流)。据报导,现正广泛采用各种模型来研究大范围的非牛顿流和层流,平移流及紊流。由于在所进行的试验项目中,固体含量、颗粒粒度和流量的变化范围较大,另外,也由于存在象煤的氧化和化学药剂的性能等不容易控制的变量,难于精确确定流动特性,故找到了一种表示流动特性的通用方法。

梅茨纳和里德所提出这个通用方法是1955年为分析非牛顿流(层流)而发展起来的。对于1英寸直径的管道,计算结果表明,物料流的雷诺数在2100以下,因而可考虑为层流。梅茨纳和里德研究出了下述表达式:

$$\frac{D\Delta P}{4L} = K' \left(\frac{8V}{D} \right)^{n'} \quad (1)$$

式中, D 为管道直径, L 为长度,

ΔP 为压降, V 为流速。

另外,他们引入了摩擦系数 f , f 由下式得出:

$$f = \frac{g_c D \Delta P}{2 \rho V^2 L} \quad (2)$$

(式中, ρ 为密度, g_c 为尺寸转换系数, $32.2 \text{ 磅} \cdot \text{英尺} / \text{磅} f \text{ 秒}^2$)

通用雷诺数由下式求得:

$$f = 16 / \text{Re}_{MR} \quad (3)$$

因此,通用雷诺数可由下式得出:

$$\text{Re}_{MR} = \frac{D n' V^{2-n'} \rho}{r}$$

式中, $r = g_c K' 8^{n'-1}$

(4)

在对数—对数纸上划出

$\frac{D \Delta P}{4L}$ 与 $\frac{8V}{D}$ 的关系曲线可求得 K' 和 n' , 即流体的实际物理特性。这和

利用转筒粘度计就同一种浆体在试验室内进行试验分析所确定的流变常数没有直接关系。

K' 和 n' 值能够用来计算雷诺数,并且可以绘出摩擦系数计算值(由方程2得出)和雷诺数计算值(由方程式4得出)的关系曲线。摩擦系数点应位于方程式(3)给出的直线上,表4给出了 K' 和 n' 的计算数值,这些数值是通过通过对数据进行最小二乘拟合法确定的。试验浓度为63%和65%,而且试验前不久又加入添加剂的CWM时,所获数据的指数 n' 约为1.0, K' 值是十分小的(其大小为 $10^{-8} \frac{\text{磅} f \cdot \text{秒}}{\text{英寸}^2}$)

另外两种情况, n' 值大约为0.7 K' 的平均值约为 2.8×10^{-2} , 这些数值很明显地表示非牛顿流的特性。使用由水平管段的数据计算出的结果与使用由垂直管段计算出的结果大致相符。通常,施用添加剂有效时,指数 n' 近于1,而 K' 值为 $10^{-8} \frac{\text{磅} + \text{秒}^{2-n'}}{\text{英寸}^2}$ 。

使用添加剂无效或不曾使用添加剂时,指数变化范围是0.5—0.8, K' 值则为

所计算出的梅茨纳—里德常数

表 4

试 验	流动管数	添加剂*	n'	K', $\frac{\text{磅} \cdot \text{秒}^{2-n'}}{\text{寸}^2}$
CWM的浓度均为63%和65%	20' 垂直	(加/不加) <加	1.03	3.9×10^{-3}
混合试验 4 1 和 2	20' 垂直	<不加	0.72	2.5×10^{-2}
混合试验 4 1 和 2	12' 水平	<加	0.69	3.1×10^{-2}

*“加”指加添加剂后有效

“不加”指未加添加剂或施加添加剂也无效。

$$10^{-2} \frac{\text{磅} \cdot \text{秒}^{2-n'}}{\text{英寸}^2}$$

图 4 和图 5 所示为摩擦系数 f 和宾茨纳—里德、雷诺数的关系曲线，其试验数据见表 4。应该注意的是雷诺数为 20—250 不超出层流范围。摩擦系数 f 的计算值完全符合 $16/\text{Re}_{\text{MR}}$ 直线。应该指出，图中的每个点大约表示 30 个数据点，因此，两种计算方法是非常一致的。

对于流变特性很复杂的流体、对层流范围内的流体或数据有误差，关系曲线不太可靠的情况下，使用通用的梅茨纳—里德法是相当有效的。但是，与专用的模型相比一例如宾汉塑性流模型或幂律伪塑性流模型等，当测定由层流到紊流的过渡时，梅茨纳—里德法就不那么精确了。

为了确定选用通用方法时，会产生哪些不同于专用模型的影响，进行了一次试验室测定，目的是根据宾汉流计算浓度为 63% 的 CWM 的过渡雷诺数，对于宾汉流来说，由层流过渡到紊流时的临界雷诺数为：

$$(\text{Re}_s)_c = \frac{\text{He}}{8x_c} \left(1 - \frac{4}{3} \times x_c + \frac{1}{3} \times x_c^4 \right) \quad (5)$$

$$\text{式中, } x_c \text{ 为 } x \left(= \frac{\tau_y + \epsilon \text{Id}}{\tau_{wa} \text{Il}} \right) \text{ 的临界值, } \frac{x_c}{(1-x)^3} = \frac{\text{He}}{16800} \quad (6)$$

$$\text{且: } \text{He} = \frac{D^2 \tau_y \rho g_c}{\eta^2}$$

式中， τ_y = 屈服应力， ρ = 密度，

而 η = 宾汉塑性流的刚性系数。

由转筒粘度计确定的 τ_y 值为计算值 750 达因/厘米²，临界雷诺数变化范围为 2115 (1 英寸直径的管道)—2230 (5 英寸直径的管道)。此时，赫兹特罗姆数， He 分别在 42—672 范围内变化)。用其他方法确定的屈服值都偏高，这就会使紊流发生期更加迟缓，在采用梅茨纳—里德法的条件下，过渡雷诺数大约为 2100。

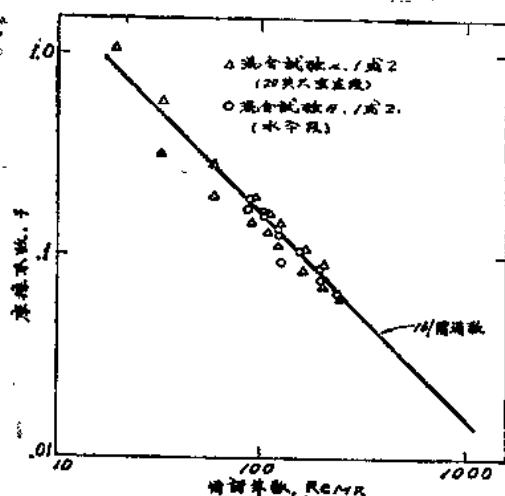


图4 浓度为60% CWM的摩擦系数 f 和 Re_{MR} 关系曲线

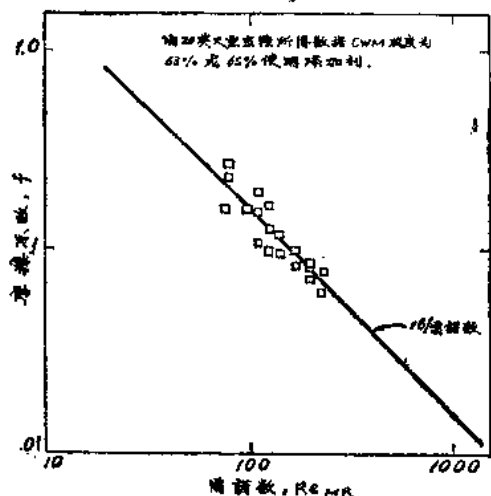


图5 浓度为63%或65% CWM的摩擦系数 f 和 Re_{MR} 关系曲线

摩擦系数和雷诺数是根据好几次试验所获得的数据计算出的，有时是使用一种CWM，进行连续两周试验求出的。试验室数据表明，这些混合物的固体含量变化不超过 $\pm 0.5\%$ ，而颗粒粒度的分布变化则为 $\pm 2\%$ （200网目以下的物料占83%—87%）。颗粒粒度变化不大则表明，管路中粒度碎化现象不严重。这和以转筒粘度计研究颗粒粒度分布的卡拉贝拉斯所获得的结果是相符的。对于剪切率为 100 s^{-1} 和 200 s^{-1} 的细粒煤浆（1微米—300微米），卡拉贝拉斯找到了一个系数 K ，其值为 10^{-4} s^{-1} 。该系数随着颗粒粒度和剪切率的增大而增大，44微米以下的颗粒碎化量很少。关于颗粒碎化现象，今后还要研究。

以同心圆筒粘度计获得的试验室粘度数值和由试验环路得出的数值进行了比较。由试验室数值可以看出，对于所研究的浓度为63%的CWM来说，剪应力很小或可忽略不计，因此符合幂律伪塑性流方程。常数 K 和 n （和 K' 和 n' 不同）也求出来了并且转换成 K' 和 n' 值，对于伪塑性流来说， $n' = n$ ，而 K' 值则由下式得出：

$$K' = \frac{K}{g_c} \left(\frac{1+3n}{4n} \right)^n \quad (7)$$

在试验管路中确定的 K' 为：

$$3.9 \times 10^{-3} \frac{\text{磅} \cdot \text{秒}^{2-n'}}{\text{英寸}^2}$$

而由试验室数据求得的 K' 值则为：

$$4.5 \times 10^{-3} \frac{\text{磅} \cdot \text{秒}^{2-n'}}{\text{英寸}^2}$$

n' 值分别为1.03和1.1, 另外, 试验室数据表明, K 值和温度的关系很大, 而 n 则与温度无关, K 值的温度关系式可为:

$$K = A \exp(B/T) \quad (8)$$

结 束 语

初步试验结果表明, 大量的中等浓度CWM在运输和燃烧方面没有困难。采用PH值控制剂和减粘剂后, CWM的粘度与油煤浆或6号燃油的相同, 约为200—600厘泊, CWM不加减粘剂时呈非牛顿流特性, 其表现粘度大于1000厘泊。试验管路所获结果有再现性, 并可用均质流模型描述。试验室数据与通过试验管路所获数据相符, 而且均与剪切率有关, 但均匀性指数相仿。

今后的试验内容是研究高雷诺数条件下以及颗粒有偏析现象情况下的流动状态。此外, 管路和弯头压降以及管道延长与缩短后的压降也将进行研究。

李学亮译自《第四届国际煤浆燃烧会议论文集》, 1—19

(英文)

李清华校

高浓度水煤浆的管道运输

美国大西洋研究公司K·S·布莱根等

前 言

煤水浆工艺是大西洋研究公司七年来的主要研究课题。目前, 此项研究已经进展到利用半工业性设备达到日产600桶的程度。此半工业性设备已运转了一年多。所生产的标准ARC—COAL(产品的商业名称)含70%的煤、1%的添加剂和29%的水, 其粘度为1000厘泊, 而且非常稳定。静止数星期至数月不发生沉淀, 也就是说是一种均质浆体。其确切名称应该是煤水燃料, 因为它的固体颗粒粒度小于干粉煤燃料粒度, 其中85%小于75微米, 可在不脱水的情况下代替油作为大型锅炉的燃料或喷入工业高炉内进行燃烧。为了进行泵送、运输、雾化, 特别是燃烧实验, 已生产了大量的煤浆, 美国电力研究所曾用杜邦的锅炉进行了一次试验。这次试验利用ARC—COAL连续试烧了30天, 燃烧速度为60百万Btu/时, 我们认为, 这种产品已达到工业化阶段。不久的将来进行初次工业性应用。

上文所提到的标准煤浆只不过是个例子, 实际上, 各种不同性质的煤浆都可以制

备。譬如说，烟煤的浓度可以达到75%或75%以上，对于次烟煤来说，目前浓度限制在60%左右。在某些场合下，浓度为70%时，粘度可低至100厘泊。此外，煤浆中还可以增加细粒级或粗粒级含量。用多种煤所制备的高浓度水煤浆都符合管道运输时的流变学要求。本文给出了若干种煤浆的一些流变数据，并证明利用管道运输的适宜性。至于在这方面的一些经济 and 环境保护问题，本文不予探讨。

牛 顿 流

粘度达数百厘泊高浓度煤水浆之所以能够利用管道进行运输，其前提条件是静态实验时浆体应为均质，在管道运输时仍然能保持均质状态。管道输送普通的煤水混合物时，要求煤浆为紊流，以保证固体颗粒悬浮和避免出现导致管道快速磨损的滑动层。为此，要求煤的重量浓度为45%~50%，粘度为25~50厘泊。这里对以下两种煤浆进行了对比：一种是普通煤浆，煤的重量浓度为47%，粒度上限为14网目；另一种是两种重量浓度分别为60%和70%，粒度上限均为50网目(85%小于200网目)。假定普通煤浆的粘度为40厘泊，高浓度煤水浆的粘度为500厘泊，而且假定两者均为牛顿流(一般情况下高浓度煤水浆不是牛顿流)，则两种煤浆都有屈服点，而且具有超出了屈服应力的非线性剪切应力/剪切率。假定管子的额定内径为18英寸，煤的比重为1.3，利用率为100%，年运量为 5×10^5 吨(类似黑迈萨管道)。则可列出下式：

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{2f\rho v^2}{D}$$

式中 $\Delta P/L$ —磅/英寸²/英里，

f —范宁摩擦系数，

ρ —密度，

v —流速，

D —管径，

g —32.2磅·米·英尺/磅·英尺·秒²。

通过上式可获得以下结果。

层流时，范宁摩擦系数为 $16/Re$ ；紊流时，则取一般粗糙度工业钢管手册值。

很明显，高浓度的牛顿流液体，在管道运输过程中的压力损失和普通煤浆的差不多。原因是运输速度较低，可以补偿比较大的摩擦损失。另外，高浓度煤水浆的粘度可以允许大一些。因为泵送能量不必消耗在产生紊流上。上述计算表明，高浓度煤水浆适宜管道运输，而且具有适宜的参数值。下一步是分析高浓度煤水浆的数据及非牛顿流特性。这里需要强调说明，下文所介绍的都是所获得的一些典型结果，但是，每种浆体都有其独特性，其流变特性取决于煤的种类、煤的含量、添加剂及其它因素。我们制备和分析了无数煤浆，并发现每一种煤浆的特性都可以根据其用途进行调查。因此，仅能够测定研究范围内的流变特性，所获得的数据不宜广延推广，