

[文章编号] 1004-0609(2001)04-0676-04

膏体泵送特性及减阻试验^①

方理刚

(中南大学 铁道校区 土建学院, 长沙 410075)

[摘 要] 基于管流流动基本理论, 对金川有色金属公司充填膏体的水平环形试验管路流动阻力进行了理论分析。为了检验理论分析结果的正确性和试验外加剂在减少膏体泵送阻力上的作用, 在现场约 90 m 的水平环形管路中进行了由混凝土泵驱动的充填膏体输送阻力试验。结果表明: 该充填膏体可以划归为宾汉姆流变体, 用基于宾汉姆流变体理论的公式能够预计膏体输送过程中的泵压损失; 提供试验的泵送外加剂能够显著地降低膏体的泵送阻力。

[关键词] 膏体; 泵送; 减阻

[中图分类号] TD 853.34

[文献标识码] A

全尾砂膏体充填泵送工艺是国际上近期发展起来的一项新技术。德国的 Grund 铅锌矿花了 6 a 的时间, 耗资 1 130 万马克, 于 1980 年首先试验成功全尾砂膏体充填工艺并应用于生产^[1]。此后, 膏体充填工艺在国外得到了较快的发展^[2]。Cooke 于 1991 年完成的高浓度分级尾砂膏体输送试验博士学位论文^[3], 为进行这方面的试验提供了借鉴, 但是由于该试验输送的材料仅仅包含分级尾砂一种成分, 论文提出的输送阻力公式很难普遍应用。1992 年 Spearing 等人^[4]对膏体泵送技术能否广泛地应用阐述了不同的观点, 分歧主要集中于膏体在管道中能否顺利地输送、膏体在泵送过程中的能量消耗及管道的磨损等流变学方面的问题。他们认为将来充填工艺的发展方向不是膏体而是浆体。此前已有一系列浆体充填胶凝材料和输送方法申请了专利^[5~7]。关于浆体输送的理论与试验研究也较膏体充分^[8, 9]。尽管如此, 膏体充填技术在欧美许多国家得到了广泛的应用, 主要是由于该技术可以利用尾砂充填采矿留下的空区, 既解决了由于采用棒磨砂或河砂作为骨料带来的充填材料成本过高的问题, 又解决了尾砂地表排放对周围环境污染的问题。该项技术引起了金川有色金属公司的广泛重视, 并决定着手开展这方面的研究和试验工作。经过几年的努力, 该项目于 1999 年在金川有色金属公司二矿区投入工业应用。本文作者结合膏体充填外加剂试验研究, 对膏体泵送管流流动阻力这一影响泵送膏体充填工艺成败的关键问题进行了理论和

试验研究, 并为寻求降低膏体充填过程中能量损耗的方法, 对泵送减阻剂在减少膏体泵送阻力方面的作用进行了试验。

1 膏体流变学特征

实验证实, 采用的膏体是由尾砂、棒磨砂、粉煤灰、水泥和水组成的高浓度混合物, 具有宾汉姆 (Bingham) 体的特征^[10], 即服从以下流动方程:

$$\tau = \tau_0 - \eta \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

上式表示: 在剪切力 τ 作用下, 结构粘度为 η 的膏体克服极限剪切强度 τ_0 开始流动后, 流动阻力大小与粘度 η 和流速 v 的梯度成正比。事实上, 工业试验所能测到的是管流沿程阻力, 而管流沿程阻力一般可以与管壁单位面积上的流体摩擦阻力联系。根据静力学平衡理论, 水平直管内的摩擦阻力可以表达为

$$\tau_w = \frac{r}{2} \frac{\Delta p}{L} \quad (2)$$

式中 r 为管道内半径, m; L 为水平管路长度, m; τ_w 为膏体与管壁之间的摩擦力, kPa; Δp 为管道沿程阻力损失, kPa。经过一系列的运算后得到 τ_w 与膏体流变参数之间的关系为^[11]

$$\tau_w = \frac{\eta}{1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\tau_0}{\tau_w} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^4} \cdot \frac{4 \bar{v}}{r} \quad (3)$$

式中 $\bar{v}$ 为膏体在管道中的平均流速。当 $\tau_w \gg \tau_0$

① [收稿日期] 2000-09-15; [修订日期] 2001-02-23

[作者简介] 方理刚(1959-), 男, 教授, 硕士。

时，可忽略式中的高阶项，有

$$\tau_w = \eta(\frac{4\bar{v}}{r}) + \frac{4}{3}\tau_0$$

(4)

事实上，测量 τ_0 和 η 是比较困难的。为了方便起见，广泛采用 $\bar{v}$ 与 τ_w 之间的经验表达式

$$\tau_w = k_1 + k_2 \bar{v}$$

(5)

式中 k_1 为粘着函数，即启动时管壁初始剪切应力，kPa； k_2 为速度系数， $\text{kPa}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。 $k_2\bar{v}$ 相当于随速度增加而增大的管壁切应力， k_1 和 k_2 均与膏体的坍落度有关。在管路半径一定的条件下，式 (4) 与 (5) 代表的意义完全一致，只是式 (5) 将 k_1 和 k_2 与容易测得的膏体坍落度联系起来。式 (5) 代入式 (2) 得到长度为 L ，半径为 r 的管道的沿程泵压损失表达：

$$\Delta p = \frac{2L}{r}(k_1 + k_2\bar{v})$$

(6)

根据 $\bar{v}$ ， r 和 L ，可计算水平直管泵压损失 Δp 。试验中弯管的泵压损失同样可以通过平衡方程来确定。在弯管轴线与水平面平行的条件下，膏体流过弯管时的泵压损失为^[8]

$$\Delta p_w = \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \frac{4}{r} (k_1 + k_2\bar{v})$$

(7)

式中 α 为弯管转角，若 $\alpha = 90^\circ$ 、弯管数目为 n ，则

$$\Delta p_w = \frac{4r'}{r} n (k_1 + k_2\bar{v})$$

(8)

最后，膏体在水平环形试验管道内总泵压损失为

$$\Delta p_T = \Delta p + \Delta p_w = \frac{2L}{r}(k_1 + k_2\bar{v}) + \frac{4r'}{r} n (k_1 + k_2\bar{v}) = \frac{1}{r}(2L + 4nr')(k_1 + k_2\bar{v})$$

(9)

式中 r' 为弯管转弯半径，m。泵压损失与管道的半径 r 成反比，还与管道的长度 L 、弯管数量 n 、弯管曲率半径 r' 、膏体管流平均流速 $\bar{v}$ 和膏体的坍落度 S 有关。

2 现场试验

为了给工业化应用提供可靠的膏体管流流动阻力试验数据、查明泵送剂在降低膏体泵送阻力方面的作用，在金川有色金属公司二矿区地表进行了 90 m 长距离环管闭路试验，该试验跨越 2 a，实际耗时 7 个月。试验完成后，立刻投入工业生产。

2.1 试验采用的材料

膏体泵送试验主要材料是尾砂、棒磨砂、粉煤灰、水和泵送减阻剂。主要材料的粒级组成见图 1。泵送减阻剂是由木质素磺酸盐、萘磺酸盐甲醛缩合物及其它有效成分组成的复合剂。

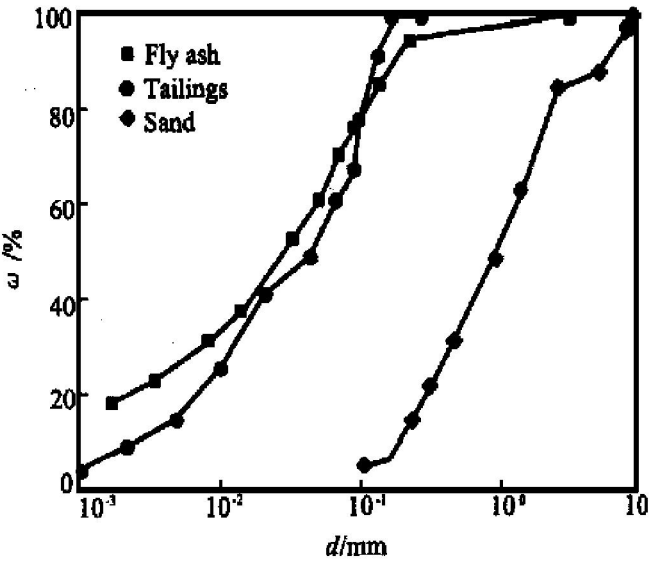


图 1 膏体主要材料粒级组成

Fig. 1 Size compositions of paste materials

2.2 充填料的制备

充填料的制备完全实现全自动控制。砂仓内的棒磨砂由出口的轮盘给料机计量给料，经过皮带直接进入卧式搅拌槽。尾砂由带式过滤机过滤至浓度 80% 以上后，再经另一条皮带也进入卧式搅拌槽，尾砂是由设置于皮带上方的核子秤计量的。粉煤灰则由冲板流量计计量后，经过螺旋给料机进入搅拌槽内。计量后的干料与水混合搅拌制成膏体，各种材料配比由控制室进行全自动控制与调节后进入混凝土泵进料口。

2.3 试验管路系统参数及试验过程

试验管路为水平环形闭路布置，即泵送膏体经过环行管路后，回到搅拌槽内重复利用。环形管路系统几何参数如表 1 所示。

表 1 试验管路系统几何尺寸参数

Table 1 System parameters of test loop pipe

r/m	L/m	n	r'/m
0.15	83.5	8	1.5

输送泵为德国 Schwing 公司生产的 KSP-140 型混凝土泵，最大输送能力 $120\text{ m}^3/\text{h}$ ，最大泵压 12 MPa。泵压测量采用 Schwing 公司生产的 DMU-91 型压力表，最大量程为 20 MPa。

膏体管道输送由双缸柱塞混凝土泵驱动，当混

凝土泵其中一个混凝土缸完成向前的行程后,膏体流动即停顿,缸的分配阀换向,使缸与泵的料斗接通,吸入混凝土。同时,摆管与另一混凝土缸接通,随后缸的活塞向前,推动缸内的膏体前进,并通过与之接通的摆管流向钢管。

在进行膏体管流泵压损失计算中,需要知道膏体流动时的平均流速 $\bar{v}$,而现场实测膏体流速比较困难。一般采用的方法是实测缸的往复频率 f ,通过实验标定往复频率 f 与输送能力 Q 之间的关系,计算 f 与平均流速 $\bar{v}$ 之间存在着的对应关系。往复频率 f 与平均流速 $\bar{v}$ 之间的关系如图 2 所示。

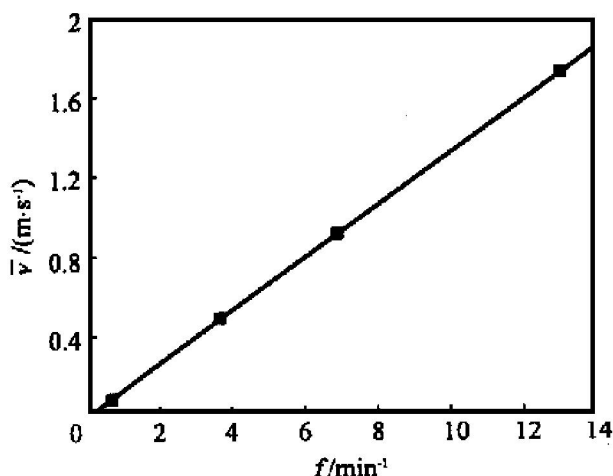


图 2 混凝土缸往复频率 f 与平均流速 $\bar{v}$ 之间的关系

Fig. 2 Relation between to and pro frequency f of concrete cylinder and average velocity $\bar{v}$ of flow

由于膏体在泵送过程中所受阻力并不为常值,而与时间有关。因此试验过程中,分别记录最高泵压值、最低泵压值和平均泵压值。造成泵送过程中堵泵的原因是由于最高泵压超过混凝土泵的设计泵压,本试验取最高泵压值。

2.4 试验结果及其分析

6 次地表膏体环管泵送阻力试验结果表明:各次试验的最高泵送阻力(泵压损失)与平均泵送速度之间的关系符合式(9)描述的规律,说明膏体在泵送过程中遵循宾汉姆方程,即泵压正比于膏体的泵送速度。同时,泵压与膏体的坍落度有关,坍落度越大,泵压越小,相反,泵压越大。在没有添加泵送减阻剂的情况下,试验结果与采用本文公式计算的结果基本一致(图 3)。当泵送减阻剂掺量为 0.5% 和 1.0% 时,能够将基准膏体的坍落度从 18 cm,分别提高到 21 cm 和 25 cm,即提高坍落度 16% 和 39%,而泵压平均降幅超过理论预计的结果,尤其当管流速度较大时,作用更为明显(图 4)。

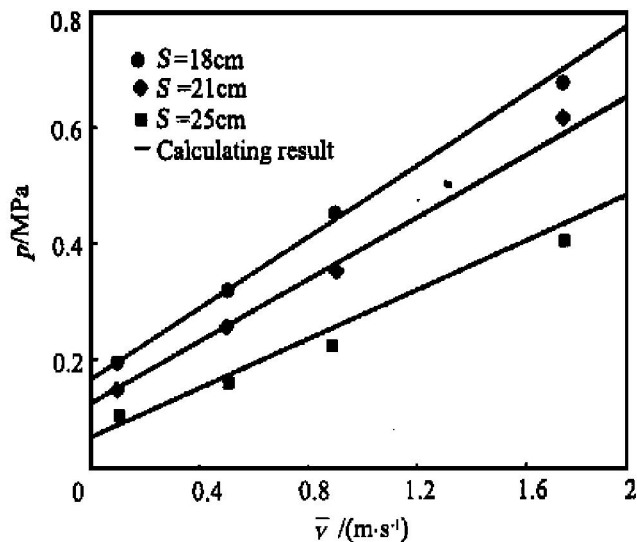


图 3 膏体坍落度 S 和泵送速度 $\bar{v}$ 对泵压的影响

Fig. 3 Effects of paste slump S and average velocity $\bar{v}$ on pumping pressure

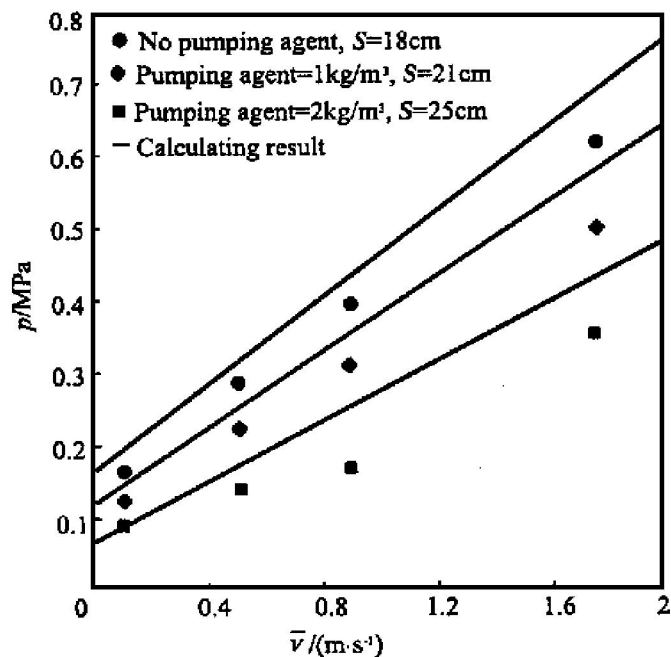


图 4 泵送减阻剂对降低膏体泵压的作用

Fig. 4 Effects of pumping agent on pumping pressure

3 结论

由尾砂、棒磨砂和粉煤灰组成的膏体流变特征可以用宾汉姆方程来描述。根据该方程得到的计算式可以较准确地确定膏体输送过程中泵压沿程损失;在泵送减阻剂试验中,当膏体基准坍落度为 18 cm,泵送减阻剂掺量为 0.5% (1 kg/m³) 和 1% (2 kg/m³) 时,分别能够将膏体坍落度提高到 21 cm 和 25 cm,即提高坍落度 16% 和 39%。泵压最大降幅超过理论计算值,说明泵送减阻剂在降低膏体泵送

阻力方面的作用十分明显, 可以在膏体浓度较大、输送困难时使用。

致谢

本研究是金川有色金属公司膏体泵送外加剂试验研究的一部分, 得到了金川有色金属公司的大力支持, 为研究提供了经费、设备和场地。特别是刘同有副总经理、周成浦副总工程师对试验给予了极大的关心和指导。金川有色金属公司和北京有色金属研究总院的张宏光、袁家谦、王佩勋、陈遥和魏孔章等工程技术人员指导并参加了本项试验, 在此一并表示衷心的感谢。特别感谢长沙矿冶研究院多年来对作者的培养和提供的科研基础条件。

[REFERENCES]

- [1] Anderson S, Landriault D, Lippold A, et al. A paste fill primer [J]. Canadian Mining Journal, 1995, 2: 19 – 21.
- [2] Brummer R, Moss A. The fill of the future [J]. Canadian Mining Journal, 1991, 11– 12: 31– 35.
- [3] Cooke R. The dense phase hydraulic transport of high concentration cyclone classified tailing in pipelines [D].

Cape Town: University of Cape Town , South Africa. 1991. 124.

- [4] Spearing A J S, Steward N R. Slurry, not paste, will be the fill of the future [J]. Canadian Mining Journal, 1992, 6: 31– 40.
- [5] Kellet W H. Methods of stowing cavities with flowable materials [P]. US4357167, 1982.
- [6] Smart R M. Foamable composition [P]. US4979990, 1990.
- [7] Gilbert G M, McConnachie T M, Kirsten P S. Grouting composition [P]. US5454866, 1955.
- [8] FEI Xiang-jun(费祥俊). Slurry and Grainy Solid Materials Transporting Hydraulics(浆体与粒状物料输送水力学) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994. 249– 406.
- [9] XU Zhen-liang(许振良). 沉降性浆体在水平管道内输送时的水力坡度 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1999, 9(2): 441– 447.
- [10] Brachebusch F W. Basics of paste backfill system [J]. Mining Engineering, 1994, 10: 1175– 1178.
- [11] ZHAO Zhi-ji(赵志缙). Pumping Concrete(泵送混凝土) [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1985. 76– 128.

Investigation on paste pumping characteristics and reducing pumping resistance

FANG Li-gang

(School of Civil Engineering, Central South University,
Changsha 410075, P. R. China)

[Abstract] Based on the basic theory of pipe column flow, the pumping resistance of backfill paste was analyzed and over 90 m long horizontal loop pipe tests driven with a concrete pump were carried out in situ to compare calculated pumping resistance with measured ones. The test results show that the fluid properties of paste mixes may be described in Bingham plastic fluids and the pumping pressure loss can be predicted with the theory. A special admixture (pumping aids) available for test can significantly reduce the pumping resistance of backfill paste.

[Key words] backfill paste; pumping; reducing pumping resistance

(编辑 吴家泉)