

# 充填料浆临界流态浓度的研究

李国政, 于润沧

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**摘 要:** 本文认为流体达到临界流态浓度时, 流体的浓度是个临界点, 应该同时符合牛顿体和非牛顿体, 既可以均质流状态认为是牛顿体, 其规律符合牛顿体的流体输送参数, 输送理论应符合扩散理论; 也可认为是非牛顿流体, 符合宾汉体的流变性能参数。按照这一观点, 本文将流体参数和流变参数共同引入浆体颗粒的微观受力分析, 建立了临界流态浓度的数学模型。

**关键词:** 临界流态浓度; 均质流; 牛顿体; 宾汉体

充填料浆就输送方式从以上水力充填方式按充填料浆管道输送状态看, 大体有以下几种状态<sup>[1]</sup>:

(1) 两相流体, 如分级尾砂水力输送, 输送流速必须大于临界流速, 可自流输送。

(2) 似均质流体, 如高浓度料浆, 输送过程中料浆不离析, 可在低流速下输送, 亦可自流输送。

(3) 膏体, 结构流体, 不但不离析, 进入采空场后亦不需脱水, 需要泵送。在充填倍线很小的情况下, 亦可自流输送。

料浆的浓度从水力充填变化到高浓度充填会有一个分界点——临界流态浓度。

临界流态浓度的定义如下:

充填料浆达到一定浓度时, 在管路截面垂直方向上的浓度梯度为零, 此时料浆的浓度称为临界流态浓度, 临界流态浓度是料浆呈均质性或非均质性的分界浓度, 大于等于这个浓度时, 浆体呈均质流特性。均质流(homogeneous flow)系统中, 固体颗粒均匀地分布在液体介质中。固体颗粒的存在对均质流的性质有重大的影响, 通常是使黏度增大, 因而这些系统常常呈现非牛顿体的流变特性, 似宾汉体。尽管业界普遍认可临界流态浓度值的存在, 但如何从理论上确定充填料浆的临界流态浓度却始终没有一个确定的数学模型。由于影响料浆达到高浓度状态的因素很多, 而且这些因素具有很强的个体差异性, 给建立数学模型带来很大的困难。在设计和生产实际中, 一般采用试验标定的办法来确定临界流态浓度: 按照临界流态浓度区域附近的各种料浆浓度配制料浆放置在量筒中, 静止一段时间后, 测定料浆的泌水率, 料浆的泌水率达到最小时的料浆浓度即为临界流态浓度。因此, 不同矿山的充填料浆的临界流态浓度值是不同的, 根据笔者所掌握资料中, 充填料浆的临界流态浓

度变化区域在 76% ~ 78% 之间<sup>[2]</sup>。

本文尝试从已有的资料文献中, 从理论上推导临界流态浓度的数学模型。

## 1 建立临界流态浓度的几个特征参数

(1) 料浆的质量浓度

$$M_z = \frac{G_s}{G_m} \quad (1)$$

式中,  $M_z$  为充填料浆的质量浓度, %;  $G_s$  为充填料密实干量的质量, kg;  $G_m$  为充填料浆的质量, kg。

(2) 充填料浆的密度

$$\gamma_l = \frac{\gamma_k}{\gamma_k - M_z(\gamma_k - \gamma_0)} \quad (2)$$

式中,  $\gamma_l$  为充填料浆密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\gamma_k$  为充填料密实干量的质量, kg/m<sup>3</sup>;  $\gamma_0$  为水的密度, kg/m<sup>3</sup>。

(3) 平均粒径

确定全尾砂的粒级组成选用泰勒筛法。平均粒径的确定采用质量平均粒径法:

$$\bar{d}_s = \frac{\sum_{d_{si}=d_{s,\min}}^{d_{si}=d_{s,\max}} x_i d_{si}}{\sum_{d_{si}=d_{s,\min}}^{d_{si}=d_{s,\max}} x_i} \quad (3)$$

式中,  $\bar{d}_s$  为质量平均粒径, m;  $\bar{d}_{si}$  为各级粒径, m;  $x_i$  为各级粒径在粒级组成中的份额, %。

(4) 绝对黏度系数和运动黏度系数

流体黏度可以理解是产生于流体内部质点之间的摩擦力, 而固体间的摩擦力是产生于两个固体间的接触面上, 对固体来说可以理解为外力。在流体质点内部对流体的运动产生阻滞。流体黏性对流体的流动产生的阻滞决定于流体运动的雷诺系数, 当雷诺准数很高, 流体的动力黏度可以忽略, 也就是说紊流状态非

常大时流体黏度对流体流动没有任何阻碍。但是层流状态下，流体动力黏度系数会增加流体运动的阻力<sup>[3]</sup>。

$$\mu = \frac{\eta}{\rho_j} \tag{4}$$

式中， $\mu$  为运动黏度系数， $\text{m}^2/\text{s}$ ； $\eta$  为绝对黏度系数， $\text{Pa} \cdot \text{S}$ ； $\rho_j$  为浆体的密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2 建立临界流态浓度数学模型的理论依据

建立临界流态浓度数学模型基于以下的条件和前提：

(1) 料浆达到临界流态浓度状态时，其流变特性符合宾汉体。其流态力学特征遵循扩散理论，即两相流中的固体颗粒与流体质点一样，一起参加扩散，视水与固体质点没有什么相对运动，而是以同一速度一起向流动方向流动，而且紊流程度越大，扩散的程度越充分。

(2) 达到临界流态浓度的充填料浆其泌水率为零，即最理想状态。

(3) 文章提到的微观颗粒的相关参数是一个平均的概念。例如，颗粒的粒径是指料浆中所有固体物料的平均粒径。

考察达到临界流态浓度的浆体中物料颗粒的受力状态，物料颗粒在重力、浮力和黏滞力的共同作用下达到平衡。见图 1。

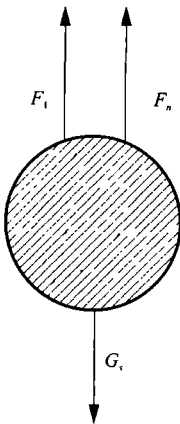


图 1 颗粒在圆管中的受力状态

得到如下方程

$$G_s - F_1 - F_n = 0 \tag{5}$$

式中， $G_s$  为颗粒的重力，N； $F_1$  为颗粒在料浆中的浮力，N； $F_n$  为颗粒在料浆中受到的黏滞力，N。

黏滞力  $F_n$  和宾汉体的切应力有关：

$$\tau - \tau_0 = \eta \frac{du}{dy} (\tau > \tau_0) \tag{6}$$

式中， $\tau$  为料浆受到的管壁切应力，Pa； $\tau_0$  为初始切应力，Pa； $\eta$  为绝对黏度系数， $\text{Pa} \cdot \text{S}$ ； $\frac{du}{dy}$  为切变率。

宾汉塑性体在  $\tau < \tau_0$  时，具有足够的强度抵抗任何外力；当  $\tau > \tau_0$  时，这种结构就分解了，流体的特性相当于在  $\tau - \tau_0$  作用下的牛顿体。当  $\tau < \tau_0$  时，屈服结构又重新恢复。

我们可以认为初始切应力  $\tau_0$  和保持流体的稳定结构的黏滞力是平衡的，即黏滞力  $F_n$  来自初始切应力  $\tau_0$  在颗粒表面的作用。

$$F_n = C_s \tau_0 A = \frac{\pi}{4} d_s^2 \tau_0 \tag{7}$$

式中， $C_s$  为形状系数，按表 1 选取； $A$  为颗粒的水平方向投影面积， $\text{m}^2$ ； $d_s$  为颗粒的粒径，此处指平均粒径，m。

表 1 不规则固粒形状参数 ( $C_s$ ，即修正系数)<sup>[3]</sup>

| 固粒形状  | 形状系数      |      |
|-------|-----------|------|
|       | 一般        | 平均   |
| 椭圆形颗粒 | 0.8 ~ 0.9 | 0.85 |
| 多角形颗粒 | 0.7 ~ 0.8 | 0.75 |
| 长方形颗粒 | 0.6 ~ 0.7 | 0.65 |
| 扁平形颗粒 | 0.4 ~ 0.6 | 0.50 |

将式 3-3 代入 3-1 得到

$$\frac{4}{3} \pi d_s^3 \gamma_k - \frac{4}{3} \pi d_s^3 \gamma_j - \frac{1}{4} \pi d_s^2 C_s \tau_0 \tag{8}$$

$$\gamma_j = \frac{\gamma_k}{\gamma_k - M_z (\gamma_k - \gamma_0)} \tag{9}$$

将 2-2 和 3-4 联立，化简后得

$$M_z = \left( 1 - \frac{16 d_s}{16 d_s \gamma_k - 3 C_s \tau_0} \right) \left( \frac{\gamma_k}{\gamma_k - \gamma_0} \right) \tag{10}$$

从公式(5)中可以看出，充填料浆的临界流态浓度只与固体物料的平均粒径、料浆的初始切应力、固体物料的密实密度和输送载体的密度有关，这可以解释以下几个在环管试验中遇到的现象。

(1) 料浆达到临界流态浓度需要一定比例的细颗粒物料。

(2) 不同固体物料制备均质流，不仅需要一定比例的细颗粒骨料，也和骨料的形状有关。

(3) 初始切应力反映出来的是料浆的黏滞力，而

黏度系数随温度和压力变化而变化,但压力的影响很微小,主要受温度变化的影响。这可以解释环管试验中,经长时间的运行,料浆温度升高后,料浆黏性变大,引起临界流态浓度值降低。

3 结论及存在的问题

本文从理论上建立临界流态浓度的数学模型,对充填料浆的制备、输送是个理论上的探索研究,欠缺的是,由于时间所限,缺乏数据验证。今后的工作中,收集或试验数据验证该模型,并不断修正完善,

才会使这一理论具有实际意义。

参考文献

[1] 于润沧,刘大荣等.全尾砂高浓度(膏体)料浆充填新技术.北京有色冶金设计研究总院,1992

[2] 刘同有,蔡嗣经.国内外膏体充填技术的应用与研究现状[J].中国矿业,1998,7(5):1-4

[3] [美]E·J·瓦斯普等.固体物料的浆体管道输送[M].北京:水力出版社,1980

[4] 佟庆理编.两相流动理论基础[M].北京:冶金工业出版社,1982