

# 高浓度浆体的浓度判据及其层流输送特性<sup>①</sup>

陈广文 古德生 高 泉<sup>②</sup>

(中南工业大学资源开发工程系, 长沙 410083)

**摘 要** 通过分析高浓度浆体中颗粒作用机理, 建立了高浓度浆体的浓度判据; 分析了高浓度浆体输送的水流结构; 根据大红山铁矿高浓度全尾砂浆输送试验结果, 采用宾汉体和宾汉-幂律流两种流体模型描述高浓度浆体层流输送特性。

**关键词** 高浓度浆体 浓度判据 水流结构 层流输送

浆体管道输送作为一种高效率、低成本、占地少、无污染的固体物料输送技术, 几十年来得到迅速的发展, 已成为当今世界上五大运输手段之一。高浓度浆体输送技术的应用和发展, 使管道输送效率进一步提高, 为管道输送技术应用展现了更加广阔的前景, 同时也向人们提出了新的研究课题。目前对浆体管道输送技术的研究, 从浆体的流变特性及试验模型理论, 到输送用整套设备, 已经涉及到各个层次的研究内容。但对于高浓度浆体输送仍存在一些有待解决和进一步研究, 如当浓度为多大时属高浓度浆体以及高浓度浆体在管中的运动特性等。本文对此进行了分析和研究。

## 1 浆体的高浓度判据

何谓高浓度浆体, 目前仍没有统一的判定标准。大量输送实践表明, 不含细颗粒或者细颗粒含量很低的粗颗粒物料难以实现高浓度输送, 更不适合长距离输送。由此说明, 实现高浓度浆体输送, 细颗粒的存在起着重要的作用。

### 1.1 细颗粒在高浓度浆体输送中的作用

国内对高含沙水流特性的研究<sup>[1]</sup>揭示, 上限粒径大约处于  $d = 0.03 \sim 0.04$  mm 的泥沙在高浓度时, 颗粒将形成空间絮网结构, 从而改变浆体的流型和物理力学特性, 将导致输送能力的提高和能耗值的降低。高浓度浆体中细颗粒的作用, 即表现为絮网结构的作用, 概括起来, 主要有以下几点<sup>[2]</sup>:

(1) 由于絮网结构具有一定的刚度, 它不仅能阻止形成絮网本身的细颗粒群因自重而沉降, 而且能支承一定数量的粗颗粒, 有利于增大浆体的浓度;

(2) 由于絮网结构的存在, 使得颗粒不致沉降管底而形成推移质和组成定床;

(3) 絮网结构具有一定的胶结作用, 充填于粗颗粒之间, 有利于实现颗粒的整体输送;

(4) 絮网结构的形成还具有一定的减阻作用。

### 1.2 细颗粒的上限粒径和下限浓度

浆体中并非所有的颗粒都参与絮网结构的形成。如果用粒径  $d_m$  来划分, 则粒径小于  $d_m$  的细颗粒才有形成絮网结构的能力。这一粒径就称之为细颗粒的上限粒径。综合文献<sup>[1, 2]</sup>

<sup>①</sup> 国家自然科学基金资助项目 收稿日期: 1994-06-10; 修回日期: 1994-08-22

<sup>②</sup> 长沙矿山研究院

的研究,可以确定:

$$d_m = 0.04 \text{ mm}$$

要形成稳定的絮网结构,不但要有  $d \leq d_m$  的细颗粒存在,而且细颗粒的含量还要达到一定的(体积)浓度  $C_{vm}$ <sup>[2]</sup>。该浓度称之为细颗粒的下限浓度。侯晖昌通过分析以往的试验资料,得出<sup>[2]</sup>:  $C_{vm} = 6.7\%$ 。

一般说来,细颗粒浓度的增加,有利于增大絮网结构的刚度,增强其对粗颗粒的承载能力;同时,细颗粒浓度增大,浆体的粘性也随之增大,从而加大输送阻力损失。此外,从工程应用方面考虑,浆体抵达目的地后大都要进行脱水处理,如细颗粒含量过高,则会使存贮浆体长时间不能自重脱水,从而使脱水工艺更加复杂,增大脱水成本。这些方面综合考虑,说明物料中细颗粒的含量和浆体中细颗粒的浓度都存在优化值。这一问题已作过研究<sup>[3,4]</sup>,这里就不赘述。

### 1.3 高浓度判据

根据以上分析,说明浆体浓度达到某一值时,其中细颗粒浓度为  $C_{vm}$ ,则细颗粒即可形成稳定的空间絮网结构。

设物料中  $d \leq 0.04 \text{ mm}$  的细颗粒的百分比含量为  $P_{0.04}$ ,则可建立下列浓度判据:

$$C_{vc} = C_{vm}/P_{0.04} \quad (1)$$

式中  $C_{vc}$  为细颗粒浓度达到  $C_{vm}$  时的浆体体积浓度。

由上式可以判定,当浆体浓度  $C_v \geq C_{vc}$  时即为高浓度浆体,否则属低浓度浆体。

将  $C_{vm} = 6.7\%$  代入(1)式,得:

$$C_{vc} = 0.067/P_{0.04} \quad (2)$$

因此,根据输送物料中  $d \leq 0.04 \text{ mm}$  的细颗粒的百分比含量,用(2)式即可计算出其高浓度临界值( $C_{vc}$ )。表 1 为国内外几条商用管路输送物料浆体的高浓度临界值。

## 2 水流结构与流态判别

### 2.1 高浓度浆体输送的水流结构

高浓度浆体输送大都为非牛顿体输送,其

表 1 高浓度浆体临界值计算

管路名称	$P_{0.04}$	临界值 ( $C_{vc}$ )	实际输送浓度 ( $C_v$ ) <sup>[2]</sup>
加拿大 Mc Intrre 输煤管路	16	42	45
加拿大 Sheerness 输煤管路	18	37	45
加拿大 Lignife 输煤管路	16	42	33
美国 Black Mesa 输煤管路	17	39	—
澳大利亚 Keebla 铁精矿管路	15	45	—
中国大红山矿全尾砂管路	24	28	—

特性之一就是存在屈服剪切应力  $\tau_0$ 。在输送中,只有当边壁剪切应力达到  $\tau_0$  时,浆体才开始运动。由于  $\tau_0$  的存在,且输送过程中,浆体的剪切应力从管壁处的  $\tau_w$  变到管心处为零,管道中心还有一部分半径为  $r_0$  的浆体不受剪切作用,以流核的形式运动着<sup>[5]</sup>。因此,在水流结构上,管道中运动浆体可划分为流核区和非流核区(图 1 所示)。在流核区,浆体的速度梯度  $du/dr = 0$ ,且不存在速度脉动和浓度梯度;在非流核区,速度梯度  $du/dr \neq 0$ ,同时存在浓度梯度<sup>[6]</sup>。随着输送速度的变化,非流核区内可能出现层流流态,也可能为紊流流态。

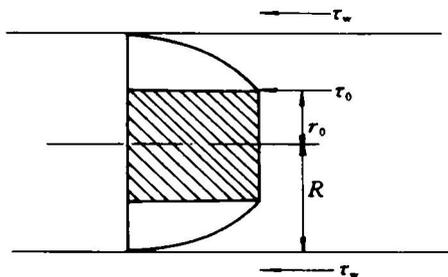


图 1 高浓度浆体输送的水流结构

### 2.2 管内高浓度浆体的流态判别

管内低浓度浆体和清水的流态可用雷诺数的大小来判别,而对于可视为均质流的高浓度浆体,在输送中的流态则可用 Hanks 和 Pratt 提出的过渡流速  $v_t$  来判别。当输送速度  $v < v_t$  时,为层流输送,  $v > v_t$  时,则为紊流输送。流态的变化虽然表现在非流核区内,但也会引起流核区厚度的改变。

文献[7]中令:

$$\alpha_c = \frac{\tau_0}{\tau_w} \quad (3)$$

$$\text{且定义 } H_e = 16800 \frac{\alpha_c}{(1 - \alpha_c)^3} \quad (4)$$

式中  $H_e$  叫做 Hedstron 数。

则过流速处的临界雷诺数为：

$$R_c = (1 - \frac{4}{3}\alpha_c + \frac{1}{3}\alpha_c^4) \cdot \frac{H_e}{\alpha_c} \quad (5)$$

根据雷诺数定义，临界雷诺数与过渡流速 ( $v_t$ ) 的关系为：

$$R_c = \rho_m v_t D / \eta$$

由此得出过渡流速为：

$$v_t = \eta \frac{R_c}{\rho_m D} \quad (6)$$

式中  $\eta$  为浆体的刚度系数， $\rho_m$  为浆体密度。

在不同流态下，高浓度浆体的输送机理完全不同，即使在层流态下，由于  $\tau_w - 8v/D$  关系曲线的变化趋势不同，浆体流变参数之间的关系也不能用单一的流体模型来描述。

### 3 高浓度浆体层流输送机理

图 2 为大红山铁矿高浓度全尾砂浆输送试验结果。从图中可以看出，由于输送浓度不同，边壁剪切应力  $\tau_w$  与视剪切速率  $8v/D$  的关系曲线表现为两种形式： $C_w \geq 67.2\%$  时， $\tau_w$  与  $8v/D$  之间呈线性关系(图 2 中曲线 4 和 5)；而  $\tau_w < 67.2\%$  时， $\tau_w$  与  $8v/D$  之间为非线性关系(图中曲线 1, 2, 3)。它们的共性就是曲线延长线在  $\tau_w$  轴上都有一大于零的截距，说明浆体为存在屈服剪切应力  $\tau_0$  的非牛顿体。根据浆体输送理论，在层流态下，对  $\tau_w$  与  $8v/D$  之间为线性关系的浆体可用宾汉体模型来描述，而对  $\tau_w$  与  $8v/D$  之间为非线性关系的浆体，作者采用宾汉-幂律流(也称广义宾汉体<sup>[8]</sup>)模型进行描述。

#### 3.1 $\tau_w - 8v/D$ 线性关系的宾汉体描述

(1) 边壁剪切应力与视剪切速率的关系

根据两相流理论，层流态下宾汉体模型为

$$\tau = \tau_0 + \eta(-\frac{du}{dr}) \quad (7)$$

则速度梯度可写为：

$$-\frac{du}{dr} = \frac{\tau - \tau_0}{\eta} \quad (8)$$

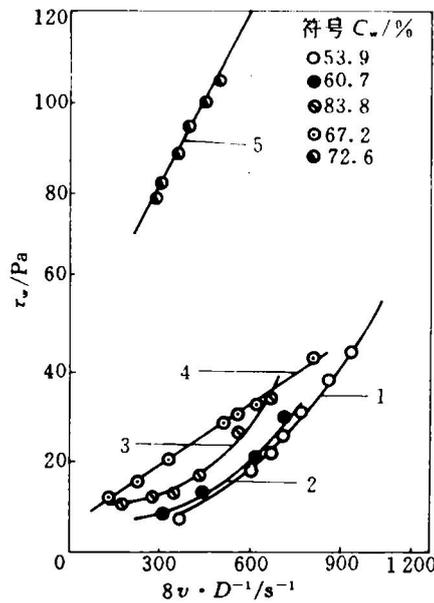


图 2  $\tau_w - 8v/D$  关系曲线

圆管中浆体的体积流量为：

$$Q = \int_0^R 2\pi r u_r dr \quad (9)$$

式中  $u_r$  为半径为  $r$  处的流速。

将(8)式代入(9)式，进行分部积分后并整理，可得白金汉(Buchingham)方程：

$$\frac{8v}{D} = \frac{\tau_w}{\eta} [1 - \frac{4}{3}(\frac{\tau_0}{\tau_w}) + \frac{1}{3}(\frac{\tau_0}{\tau_w})^4] \quad (10)$$

一般认为  $\frac{\tau_0}{\tau_w}$  的高次项很小，可以忽略，(10)式

中将  $(\frac{\tau_0}{\tau_w})^4$  项舍去，则得边壁剪切应力  $\tau_w$  与视剪切速率  $8v/D$  之间的关系：

$$\tau_w = \frac{4}{3}\tau_0 + \eta \frac{8v}{D} \quad (11)$$

由于流变参数  $\tau_0$  和  $\eta$  可以通过试验确定，说明  $\tau_w$  与  $8v/D$  成线性关系。

根据管流，半径为  $r$  的柱状流体单元上切应力为：

$$\tau = \frac{\Delta P r}{2L} \quad (12)$$

在管壁处， $r = R$ ， $\tau = \tau_w$ ，代入上式得：

$$\tau_w = \frac{\Delta P R}{2L} \quad (13)$$

令  $i_m = \frac{\Delta P}{L}$ ，则：

$$i_m = \frac{2}{R}\tau_w \quad (14)$$

上式说明, 属宾汉体的高浓度浆体输送阻力损失可以用边壁剪切应力来表示。

将(11)式代入(14)式, 又得:

$$i_m = \frac{16}{3D}\tau_0 + \eta \frac{32v}{D^2} \quad (15)$$

(15)式则说明, 对于用宾汉体描述的高浓度浆体, 其输送阻力损失还可用流变参数  $\tau_0$  和  $\eta$  来计算。

(2) 非流核区速度分布

将(12)式代入(8)式, 得到非流核区的速度梯度函数:

$$\frac{du}{dr} = \frac{\tau_0}{\eta} - \frac{\Delta Pr}{2L\eta} \quad (16)$$

(16)式以  $r$  为变量进行积分可得:

$$u = \frac{\Delta Pr^2}{4L\eta} + \frac{\tau_0 r}{\eta} + C \quad (17)$$

式中  $C$  为积分常数, 可由边界条件确定: 当  $r = R$  (在管壁处) 时,  $u = 0$ , 代入(17)式得:

$$C = \frac{\Delta PR^2}{4L\eta} - \frac{\tau_0 R}{\eta}$$

将  $C$  值代入(17)式, 则得到非流核区的速度分布方程为:

$$u = \frac{\Delta P}{4L\eta}(R^2 - r^2) - \frac{\tau_0}{\eta}(R - r) \quad (18)$$

(3) 流核区的速度

流核区的厚度半径用  $r_0$  表示, 则在  $r = r_0$  处, 为非流核区和流核区的分界面。在该面上, 非流核区流速达到最大, 且等于流核区的流速, 用  $u_0$  表示。因此, 将  $r = r_0$  代入(18)式, 即可得:

$$u_0 = \frac{\Delta P}{4L\eta}(R^2 - r_0^2) - \frac{\tau_0}{\eta}(R - r_0) \quad (19)$$

上式只要确定了  $r_0$ , 就可计算出  $u_0$ 。

(4) 流核区的厚度半径

由流核区内浆体的运动特性知道, 在区域  $0 \leq r \leq r_0$ ,  $\frac{du}{dr} = 0$ , 则将  $r = r_0$  代入(16)式, 并令  $\frac{du}{dr} = 0$ , 则可得流核区的厚度半径为:

$$r_0 = \frac{2\tau_0 L}{\Delta P} = \frac{2\tau_0}{i_m} \quad (20)$$

由(20)式可以看出, 当  $\tau_0 = 0$  时  $r_0 = 0$ , 在一般浓度的浆体输送中, 由于不存在屈服剪切应

力( $\tau_0 = 0$ ), 因此就不存在流核结构。由此说明, 流核结构是高浓度浆体输送特性之一。

3.2  $\tau_w - 8v/D$  非线性关系的宾汉 - 幂律流描述<sup>[9]</sup>

(1) 边壁剪切应力与视剪切速率的关系

宾汉 - 幂律流模型为<sup>[9]</sup>:

$$\tau = \tau_0 + \eta \left(-\frac{du}{dr}\right)^n \quad (21)$$

由上式得:

$$-\frac{du}{dr} = \left(\frac{\tau - \tau_0}{\eta}\right)^{1/n} \quad (22)$$

将(22)式代入(9)式, 积分后整理得:

$$\frac{8v}{D} = \left(\frac{\tau_w}{\eta}\right)^{1/n} \cdot \frac{4n}{3n+1} \left(1 + \frac{\tau_0}{\tau_w}\right)^{(n+1)/n} \left[1 - \frac{2n}{2n+1} \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_w}\right) + \frac{2n^2}{(2n+1)(3n+1)} \left(\frac{1 - \tau_0}{\tau_w}\right)^2\right] \quad (23)$$

从(23)式可以看出, 边壁剪切应力  $\tau_w$  与视剪切速率  $\frac{8v}{D}$  之间存在一种较复杂的函数关系, 很难通过上式解出  $\tau_w$ 。

(2) 非流核区速度分布

(12)式代入(22)式, 得:

$$-\frac{du}{dr} = \left(\frac{\Delta Pr}{2L\eta} - \frac{\tau_0}{\eta}\right)^{1/n} \quad (24)$$

上式积分得:

$$u = -\frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta Pr}{2L\eta} - \frac{\tau_0}{\eta}\right)^{(n+1)/n} \cdot \frac{2L\eta}{\Delta P} + C \quad (25)$$

将边界条件, 当  $r = R$  时,  $u = 0$  代入上式得:

$$C = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta Pr}{2L\eta} - \frac{\tau_0}{\eta}\right)^{(n+1)/n} \cdot \frac{2L\eta}{\Delta P} \quad (26)$$

(26)式代入(25)式, 则得非流核区速度分布为:

$$u = \frac{2L\eta}{\Delta P} \cdot \frac{n}{n+1} \left[ \left(\frac{\Delta Pr}{2L\eta} - \frac{\tau_0}{\eta}\right)^{(n+1)/n} - \left(\frac{\Delta Pr}{2L\eta} - \frac{\tau_0}{\eta}\right)^{(n+1)/n} \right] \quad (27)$$

(3) 流核区的速度

同样以  $r_0$  表示流核区的厚度半径, 与 3.1 节中分析同理, 将  $r = r_0$  代入(27)式, 可得流

核区的速度为:

$$u_0 = \frac{2L\eta}{\Delta P} \cdot \frac{n}{n+1} \left[ \left( \frac{\Delta PR}{2L\eta} - \frac{\tau_0}{\eta} \right)^{(n+1)/n} - \left( \frac{\Delta PR}{2L\eta} - \frac{\tau_0}{\eta} \right)^{(n+1)/n} \right] \quad (28)$$

## 4 流核区的厚度半径

将  $r = r_0$  代入(22)式,并令  $\frac{du}{dr} = 0$ , 得:

$$r_0 = \frac{2\tau_0 L}{\Delta P} = \frac{2\tau_0}{i_m} \quad (29)$$

(29)式与(20)式完全相同,说明高浓度浆体层流输送时,不论用那一种流体模型描述,其流核厚度计算公式完全相同。

由上述推导结果可以看出,当指数  $n = 1$  时,(21)式即变成宾汉体模型(7)式,其结果(边壁剪切应力与视剪切速度的关系,非流核区速度分布及流核区的速度等)也与宾汉体描述的结果完全一致。由此说明宾汉体模型只是宾汉-幂律流模型的特殊情形;用宾汉-幂律流来描述高浓度浆体输送更具一般性,但指数  $n$  的变化规律有待研究确定。

## 5 结语

通过以上分析研究,可以得到如下结论:

(1) 要实现高浓度输送,浆体中必须含有粒径  $d \leq 0.04 \text{ mm}$  的细颗粒,且细颗粒的浓度不应小于 6.7%。在此基础上,作者首次建立了输送浆体的浓度判据(1)式,不仅揭示了高浓度浆体中颗粒作用机理,而且为实践中浆体的浓度选择提供了理论依据。

(2) 对于高浓度浆体输送,其水流结构可分为非流核区和流核区。在非流核区存在速度梯度和浓度梯度,且流速分布随流态的变化而改变;而流核区内不存在速度梯度和浓度梯度,流态的改变只是引起流核区流速和厚度的变化。

(3) 高浓度浆体以层流输送时,输送浓度不同,  $\tau_w - 8v/D$  之间表现为线性和非线性关系,前者可用宾汉体模型来描述,后者可用宾汉-幂律流模型来描述。

(4) 在层流态下,属宾汉体的高浓度浆体其输送阻力损失可用边壁剪切应力  $\tau_w$  或流变参数  $\tau_0$ 、 $\eta$  来计算。

## 参考文献

- 1 万兆惠等. 人民黄河, 1979, (1): 4-9.
- 2 侯晖昌. 泥沙研究, 1981, (4): 50-61.
- 3 Sakamoto M, Mase M. British: BHRA, Hydrotransport, 1978, 5: D 6.
- 4 Haas D B, Husband W H W. British: BHRA, Hydrotransport, 1978, 5: H1.
- 5 Wasp E J(著). 黄河水利委员会科研所(译). Solid-Liquid Slurry Pipeline Transportation. 北京: 水利出版社, 1980: 21.
- 6 张兴荣. 见: 第一届中日浆体输送技术交流会议论文集(1). 1990, 论文 B18: 143-151.
- 7 Hans R W, Pratt D R. Soc of Petroleum Engineers J, 1967, (10): 342-346.
- 8 佟庆理. 两相流动理论基础. 北京: 冶金工业出版社, 1982: 89.
- 9 陈广文. 中南工业大学博士学位论文, 1994: 23-25.

(编辑 何学锋)