

# 水平管道淤积断面紊流的速度分布研究

王冬梅<sup>1</sup>, 张士林<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学土木学院, 辽宁阜新 123000;

2. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁大连 116024)

**[摘要]** 对固定床水平管道断面的紊流速度分布进行研究。将整个断面分为弓形圆弧断面和渗流断面。弓形圆弧断面的速度分布研究基于圆形断面管道紊流理论, 并且结合一定的假设数值模拟弓形圆弧断面管道的紊流速度分布规律; 渗流断面的速度分布研究基于渗流理论。通过一定的边界条件将两部分断面速度分布组合成整个断面的速度分布。大量的实验证明本研究方法及程序较好地模拟了此断面的紊流速度分布。

**[关键词]** 弓形圆弧断面; 固定床; 紊流速度; 零剪力点; 水力坡度

**[中图分类号]** TV 131.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)02-0066-03

目前, 固体物料的管道输送形式正在发展中, 即把煤和矿石等物料磨碎、制成浆体, 通过管道送往目的地, 再进行脱水处理以备使用<sup>[1]</sup>。沉降性浆体在管道输送中, 因意外使浆体淤积形成固定床(堆积层)时, 会降低效率, 堵塞管道, 影响生产。为了研究堆积层厚度与水力坡度的关系, 对具有固定床的管道断面的紊流速度分布进行研究。将整个断面分为弓形圆弧断面和渗流断面(假定渗流断面是固体骨架不变形的孔隙介质)。设管道内径为 $2r_0$ , 堆积层厚度为 $b$ , 堆积颗粒的粒径为 $d_e$ ,  $\tau_w$ 和 $\tau_b$ 分别为弓形圆弧断面圆周部分及底部的边壁切应力,  $p_1$ ,  $p_2$ 分别为管道两端的压力。

## 1 弓形圆弧断面紊流速度分布

设流过弓形圆弧断面的平均流速为 $U$ , 则根据范宁公式<sup>[2]</sup>可得弓形圆弧断面圆周部分及底部的边壁切应力<sup>[3,4]</sup>:

$$\tau_w = \frac{\lambda_w}{4} \gamma \frac{U^2}{2g} \quad (1)$$

$$\tau_b = \frac{\lambda_b}{4} \gamma \frac{U^2}{2g} \quad (2)$$

沿程阻力系数 $\lambda_w$ ,  $\lambda_b$ 可用柯列布鲁克-怀特公式<sup>[5,6]</sup>求得。

由平衡条件可得

$$A_0(p_2 - p_1) = \tau_w 2r_0(3.14 - \alpha)L + \tau_b 2r_0 L \sin \alpha \quad (3)$$

水力坡度 $j = \frac{\Delta p}{\gamma L}$ , 将其代入公式(3)得

$$j = \frac{2r_0 \left[ \tau_w \left( \pi - \arcsin \left[ \frac{\sqrt{2r_0(b-d_e) - (b-d_e)^2}}{r_0} \right] \right) + \tau_b \frac{\sqrt{2r_0(b-d_e) - (b-d_e)^2}}{r_0} \right]}{\gamma \left[ r_0^2 \left( \pi - \arcsin \left[ \frac{\sqrt{2r_0(b-d_e) - (b-d_e)^2}}{r_0} \right] \right) + (r_0 - (b-d_e)) \sqrt{2r_0(b-d_e) - (b-d_e)^2} \right]} \quad (4)$$

**[收稿日期]** 2004-03-17; **修回日期** 2004-04-26

**[作者简介]** 王冬梅(1969-), 女, 河北石家庄市人, 辽宁工程技术大学土木学院高级工程师; 张士林(1974-), 男, 辽宁新民市人, 大连理工大学土木水利学院博士研究生。主要从事于非饱和土坡稳定性分析和固、液两相流的研究

根据对称性可知，零剪力点一定在断面的中垂线上，且是最大流速  $u_{\max}$  的所在位置。

设当零剪力点  $o'$  在圆心  $o$  点以下时，如图 1 所示，且设  $oo' = a$ ； $\angle AoA' = \frac{s}{r_0}$ ； $\angle o'oA = \arccos\left(\frac{r_0 - (b - d_e)}{r_0}\right)$ 。

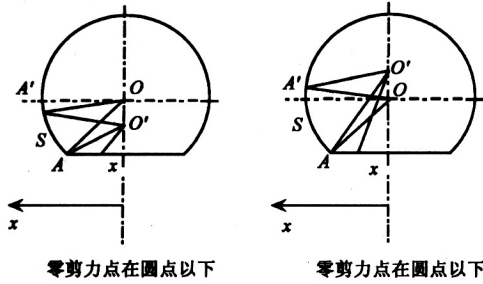


图 1 零剪力点计算图

Fig.1 Zero shear point calculation figure

底面上的剪力矩为：

$$M_1 = 2 \int_0^{\sqrt{2r_0(b-d_e)-(b-d_e)^2}} \tau_b \sqrt{x^2 + (r_0 - a(b - d_e))^2} dx,$$

圆周上的剪力矩为：

$$M_2 = 2 \int_0^{r_0(3.14-a)} \tau_w \cdot \sqrt{r_0^2 + a^2 - 2ar_0 \cos\left(\frac{s}{r_0} + \arccos\left(\frac{r_0 - (b - d_e)}{r_0}\right)\right)} ds$$

然后，求使剪力矩  $M = M_1 + M_2$  最小的  $a$  值，即  $M(a_0) = \min(M(a))$ 。则  $a$  是设零剪力点  $o'$  在圆心  $o$  点以下的最小剪力点。当零剪力点  $o'$  在圆心  $o$  点以上时，同理可得。

在确定了边壁切应力及零剪力点后，求解弓形圆弧断面管道的紊流流速分布<sup>[7-9]</sup>。显然，零剪力点就是最大流速  $u_{\max}$  所在位置。若假定：

1) 由该点（即零剪力点）向边壁按任一方向引射线，在该射线上任一点的剪力  $\tau_r$  仍近似符合线性关系，即  $\tau_r = \tau_0 \frac{r}{l}$ ，式中  $\tau_0$  为边壁切应力； $l$  为零剪力点（或  $u_{\max}$  所在点）到边界的距离。

2) 剪力  $\tau_r$  沿该射线仍用普朗特半经验理论公式表达，即， $\tau_1 = \rho k_0^2 \left(\frac{\partial u(r, \theta)}{\partial r}\right)^2$ ，式中  $k_0 = a'(l - r)\sqrt{\frac{r}{l}}$ ； $a' = 0.4$ 。

如果零剪力点  $o'$  在圆心点  $o$  以上，且零剪力点  $o'$  距圆心  $o$  点为  $oo'$ ，如图 2 所示。采用极坐标形式， $\theta$  为任一射线与中垂线的夹角； $\tau_0$  为射线与固定边界交汇处的边壁切应力；射线与底部相交时  $\tau_0$  就是  $\tau_b$ ；射线与圆周相交时  $\tau_0$  就是  $\tau_w$ 。由对称性可知，只求出一半即可。

因为  $\tau_r = \tau_0 \frac{r}{l}$  与  $\tau_r = \rho k_0^2 \left(\frac{\partial u(r, \theta)}{\partial r}\right)^2$ ，则

$$\frac{u_{\max} - u(r, \theta)}{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}} = \frac{1}{a'} \ln \frac{l}{l - r} \quad (5)$$

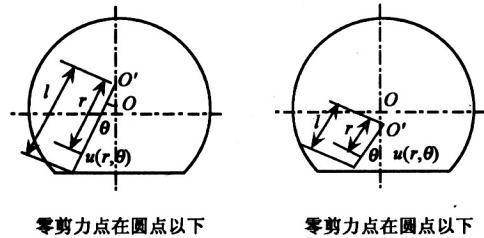


图 2 极坐标形式

Fig.2 Polar coordinates expression

## 2 渗流断面速度分布

液体在土壤和岩石等孔隙介质中的流动称为渗流。实际土壤的颗粒、形状和大小差别较大，颗粒间孔隙的形状、大小和分布也极不规则，因此，实际渗流运动相当复杂。通过理论分析或实验均难以确定某一具体位置的实际渗流速度，从工程应用的角度来说也没有必要。工程上引用统计方法，以平均值描述渗流运动，即用理想化的渗流模型来简化实际渗流。渗流模型不考虑渗流路径的迂回曲折，只考虑主要流向，且忽略土壤颗粒的存在，假设渗流是充满整个孔隙介质的连续水流。其实质是将未充满全部空间的渗流视为连续空间的连续介质运动。为解决生产实践中渗流的基本问题，1852~1855年法国工程师达西（H.Darcy）通过实验研究，总结得出达西定律。后来的学者把它推广到整个渗流计算中，成为最基本最重要的渗流公式<sup>[5]</sup>。

达西公式为

$$u = kJ \quad (6)$$

式中  $k$  为渗透系数，反映孔隙介质的透水性的系数，具有流速的量纲。

将公式（4）代入公式（6）得

$$u = k \frac{2r_0 \left[ \tau_w \left[ \pi - \arcsin \left[ \frac{\sqrt{2r_0(b-d_e) - (b-d_e)^2}}{r_0} \right] \right] + \tau_b \frac{\sqrt{2r_0(b-d_e) - (b-d_e)^2}}{r_0} \right]}{\gamma \left[ r_0^2 \left[ \pi - \arcsin \left[ \frac{\sqrt{2r_0(b-d_e) - (b-d_e)^2}}{r_0} \right] \right] + (r_0 - (b-d_e)) \sqrt{2r_0(b-d_e) - (b-d_e)^2} \right]} \quad (7)$$

### 3 全断面的速度及计算流程图

#### 3.1 全断面的速度

弓形圆弧断面的速度分布由公式(5)得到,但它的圆周边界速度为零,底部边界速度为渗流断面的速度;渗流断面的速度分布由公式(7)得到,但它的圆周边界速度为零。这样,就得到了水平管道部分淤积断面的紊流速度分布。本文将水平管道部分淤积断面的紊流速度分布公式结合边界条件用数值方法求解并用程序加以实现。

#### 3.2 计算流程

计算水平管道部分淤积断面的紊流速度分布需要以下几个步骤:

1) 求弓形圆弧断面的紊流速度分布 a. 利用已知条件用公式(1)、公式(2)计算出边界剪应

力  $\tau_w$ ,  $\tau_b$ ; b. 确定边界剪应力后,根据判断零剪力点的准则求出零剪力点; c. 利用公式(5)求出断面内任一点的  $u_{\max} - u(r, \theta)$ 。

2) 求渗流断面的速度分布 a. 利用已知条件求出实际雷诺数; b. 用实际雷诺数与临界雷诺数相比,确定渗流速度公式。

3) 求全断面的速度分布 a. 根据边界条件确定边界速度; b. 由已知平均速度  $U$  算出  $u_{\max}$ ,再由  $u_{\max} - u(r, \theta)$  求出弓形圆弧断面内任一点的速度值; c. 求得的渗流速度即为渗流断面速度。

### 4 实验结论

为了验证上述理论的正确性,采用一组实验进行检验。图3是实验数据值与计算值的比较,图中的圆点是实验数据值,实线是计算值。

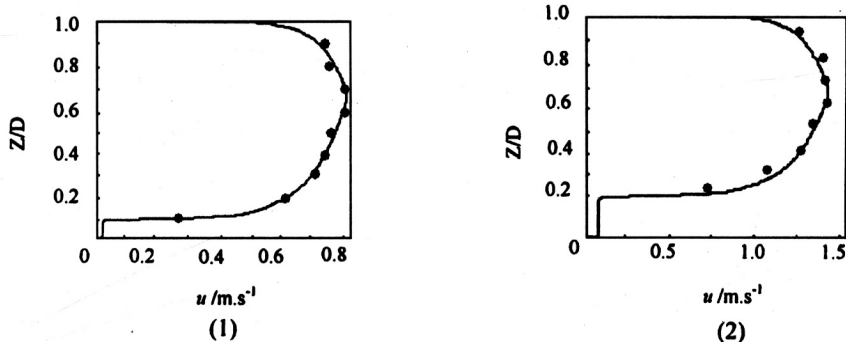


图3 数据结果对比

Fig.3 Comparison of the result data

通过实验与计算比较,计算值与实验值较好地吻合,最大相对误差不大于5%。通过程序计算得到图3(1)的最大速度点在圆点上方0.0318 m处,最大速度值为0.8375 m/s;图3(2)的最大速度点在圆点上方0.0307 m处,最大速度值为1.4356 m/s。分析认为:

- 1) 最大流速点由边界剪切力决定;
- 2) 管道内堆积层材料不变,最大流速点不随着弓形圆弧断面平均速度的改变而改变;
- 3) 构成管道堆积层的颗粒粒径越大,则随着弓

形圆弧断面平均速度增加的最大流速点越向上移动;

- 4) 堆积层越厚,最大流速点越靠近管道中心;
- 5) 构成堆积层的固定颗粒粒径越大,最大流速点越向上移动。

#### 参考文献

- [1] 瓦斯普 E.J. 固体物料的浆体管道输送 [M]. 黄河水利委员会科研所《固体物料的浆体管道输送》翻译组译,北京:水利电力出版社,1984. 12~19
- [2] 费祥俊. 浆体与粒状物料输送水力学 [M]. 北京:清华大学出版社,1994. 120~136 (下转第80页)

## Damage Tolerance Approach in Life Management of Helicopter Dynamic Components

Liu Wenlin<sup>1,2</sup>, Mu Zhitao<sup>2</sup>, Duan Chengmei<sup>2</sup>

(1. *Postgraduate team of Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai, Shandong 264001, China*;  
2. *Naval Aeronautical Engineering Academy Qingdao Branch, Qingdao, Shandong 266041, China*)

**[Abstract]** Several life management methods of helicopter dynamic components were discussed, such as safe-life method, flaw-tolerance method, damage-tolerance method and fault-tolerance method. The origin and the current status about damage-tolerance method in life management both at home and abroad were presented. In comparison with the fixed wing aircraft, three main aspects, which can make the damage tolerance approach very difficult to apply in practice to every helicopter dynamic components, were discussed. Several key technical settlements when damage tolerance method was put in practice in life management of helicopter dynamic components were expounded emphatically. Finally, future needs for research were highlighted.

**[Key words]** helicopter; damage tolerance; life management; nondestructive inspection

(上接第 68 页)

- |   |  |
|---|--|
| <p>[3] Morris, Andros. A model for the calculation of hold-up in turbulent solid-liquid flow [J]. <i>Journal of Pipelines</i>, Amsterdam, 1984, (4): 177~183</p> <p>[4] 佐藤 博. スラリ-輸送工学 [M]. 東京: 技術書院, 昭和 63 年 9 月. 103~147</p> <p>[5] 于 布. 水力学 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001. 108~135</p> <p>[6] 鮎川恭三. 浮游状態での固体粒子群の水平管水力輸送 [C]. 日本機械學會論文集 (第二部), 1972, 38 (315). 2863~2872</p> | <p>[7] 倪晋仁, 王光谦, 张红武. 固液两相流基本理论及其最新应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1991. 108~127</p> <p>[8] 胡春宏, 倪晋仁. 矩形明槽中断面紊流的流速分布 [J]. <i>水利水运科学研究</i>, 1988, (5): 23~30</p> <p>[9] 倪晋仁. 关于悬沙浓度与浑水流速垂线分布规律的研究 [D]. 北京: 清华大学硕士学位论文, 1985. 34~45</p> |
|---|--|

## Research on Water Velocity in Filling up Section of Horizontal Pipe

Wang Dongmei<sup>1</sup>, Zhang Shilin<sup>2</sup>

(1. *School of Resource and Environment, Liaoning University of Technology, Fuxin, Liaoning 123000, China*; 2. *School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China*)

**[Abstract]** The article divides the whole section into two sections. One is arcuate section. The other is seepage section. Water velocity distribution in circular section of pipe has been studied for a long time, and advanced theories were achieved. Based on fore theory and some tentatives, theory about distribution of water velocity in pipe of arcuate section is researched. Research of seepage section is based on seeping theory. Many experiments proved that the theory and program of this article are correct.

**[Key words]** arcuate section; filling up bed; water velocity; zero shear point; water-power gradient