

# 基于 FLUENT 的不定形耐火材料输送管内流动状态分析

张刚 谷立臣 何欣荣

西安建筑科技大学 机械电子技术研究所 陕西西安 710055

**摘要:**利用流体力学理论分析了理想情况下不定形耐火材料在管内的流动特性,应用专业流体仿真软件 FLUENT 对不定形耐火材料在实际工况下流动状态进行数值模拟与流场分析,发现了缩短不连续泵送间断时间与设计合适的管道参数对于不定形耐火材料的连续输送都有较大影响,验证了不定形耐火材料柱塞状流动这一特性,为喷嘴以及风压的设计提供了依据。

**关键词:**管道输送;质量流;压力云图;速度云图;FLUENT

中图分类号:TQ175.73

文献标识码:A

文章编号:1001-1935(2013)02-0111-04

DOI:10.3969/j.issn.1001-1935.2013.02.008

在工业窑炉内衬施工中,目前普遍采用不连续泵送不定形耐火材料进行喷涂浇注施工。该项技术解决了传统框架浇注施工方案复杂、施工周期长等问题<sup>[1]</sup>。不定形耐火材料的湿喷技术在国内外都有一定的研究,但对于耐火材料在管内流动的研究还不是很多,并且往往是在特定理想环境下的理论推导,与实际工况有一定差别,缺乏广泛应用价值,只能靠经验来设计并进行试验。同时,管道起连接泵送设备与喷嘴的作用,明确耐火材料在管内的流动状态,有利于改善泵送设备性能,并为管路的选取以及喷嘴和风压的设计提供依据,具有承上启下的作用。因此,对于耐火材料管内流动状态研究具有重要意义。

在本工作中,应用专业的流体仿真软件 FLUENT,对所研究的水平管内不定形耐火材料进行数值模拟与流场分析,以明确耐火材料在管内的流动情况,改善材料的连续输送特性<sup>[2]</sup>。

## 1 不定形耐火材料组成

在镁铝质不定形耐火材料湿式喷涂施工中,物料主要化学组成为  $Al_2O_3$ 、 $MgO$ ,其骨料的粗颗粒与中颗粒混合质量比为 3:2,临界粒度为 5 mm,水添加量约为 6.4% ( $w$ )<sup>[3]</sup>。与水搅拌后物料的密度约为  $3.2 g \cdot cm^{-3}$ ,比热容约为  $1618.5 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ,黏度约为  $0.0001 Pa \cdot s$ ,热导率约为  $6.2 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ 。

## 2 不定形耐火材料在管内流动分析

在耐火材料泵送施工中,物料是以双泵交替吸料

与喷料的方式被泵入物料输送管内。因此,管内的物料与物料之间都有着一层薄薄的空气层,物料是一段距离、一段距离地呈间歇状前移。

理论上,一般将耐火材料视为宾汉姆体,如图 1 所示,即物料在管内流动时,物料间以及物料和管壁间的剪切力  $\tau_0 \neq 0$ ,黏性系数  $\eta \neq 0$ ,且物料一直处于被压缩状态。由此可见,物料在管内的流动状况主要取决于管内的流体摩擦。为了分析管路中物料的状态,一般将物料的流动视为“层流”<sup>[4]</sup>。

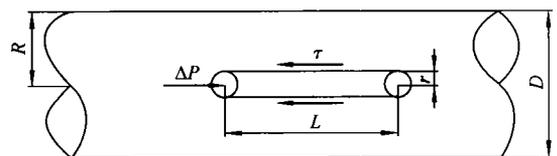


图 1 宾汉姆体管路流动

Fig. 1 Pipe flow of Bingham body

由流体力学可得式(1):

$$\tau = \Delta P \frac{r}{2l}, \quad (1)$$

式中: $\tau$  为物料间的剪切应力,Pa; $\Delta P$  为物料所受压力,Pa; $r$  为物料半径,m; $l$  为物料的位移,m。

宾汉姆体的流变方程:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dt} + \tau_0, \quad (2)$$

式中: $\eta$  为黏性系数; $\tau_0$  为屈服剪切应力,Pa。

\* 陕西省工业攻关项目(2008K05-04);陕西省教育厅产业化项目(08JC10)。

张刚:男,1987年生,硕士。

E-mail: winter19871028@126.com

收稿日期:2012-06-20

修回日期:2012-10-20

编辑:周丽红

结合式(1)和(2),并对  $r$  在  $(0, R)$  上积分,可得物料在管内的流速为:

$$v = \frac{1}{\eta} \left[ \frac{\Delta P}{4l} (R^2 - r^2) - \tau_0 (R - r) \right] \quad (3)$$

由式(3)可以看出,管内物料的流速分布如图2所示。

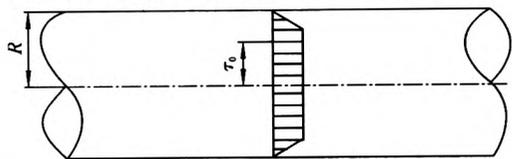


图2 物料流速分布图  
Fig.2 Map of material flow rate

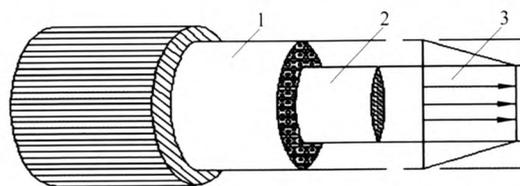
可得物料在管路中的流量为:

$$Q = \begin{cases} \frac{\Delta P \pi}{4 \eta l} r^2 (R^2 - r^2), & (r \leq r_0) \\ \frac{\Delta P \pi}{8 \eta l} R^2 \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{2\tau_0 l}{\Delta P R} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{2\tau_0 l}{\Delta P R} \right)^4 \right], & (r_0 \leq r \leq R) \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,屈服剪切应力  $\tau_0$  和黏性系数  $\eta$  对物料的流量  $Q$  都有一定影响。

由式(1)和(2)知,管路中当  $\tau \geq \tau_0$  时,管路中物料才会流动,并且在管壁附近的剪切应力最大。所

以,可得物料在管内流动的基本条件为:管壁处的剪切应力大于屈服剪切应力。对于管路内任意半径处的应力是小于屈服剪切应力的,在此半径范围内是不会产生流动的。如图3所示,管道半径内的物料是以柱塞状向前等速流动的。



1—润滑层;2—柱塞流;3—流速分布

图3 不定形耐火材料在管路中产生柱塞流示意图  
Fig.3 Plug flow principle of monolithic refractories in pipes

### 3 不定形耐火材料在管内流动建模与仿真

首先依据设计参数,管内径为 60 mm,设定长度 20 m,利用 Fluent 前处理软件 Gambit 对管内流体介质建立 3D 模型并划分网格(见图4);其次,指定边界条件类型,由于已知入口压力形式,所以设为压力入口(inlet\_pressure);而管路开口位于大气中,因此设为压力出口(outlet\_pressure),管壁设为默认(wall)。

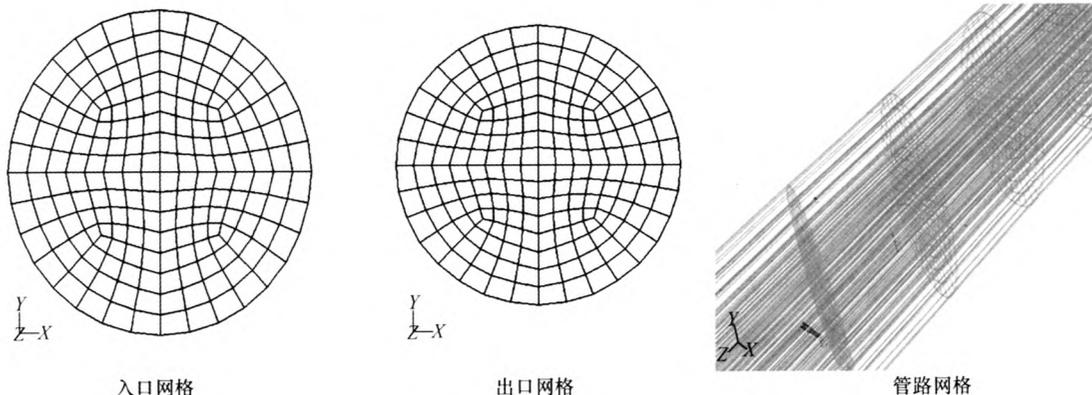


图4 管内流体介质 3D 建模  
Fig.4 3D model of fluid in pipes

打开 FIUENT 3D 解算器,根据不定形耐火材料组成,自定义材料系数。加载基于 C++ 编写的 UDF 函数定义非定常压力入口信号(见图5);模拟管路间歇

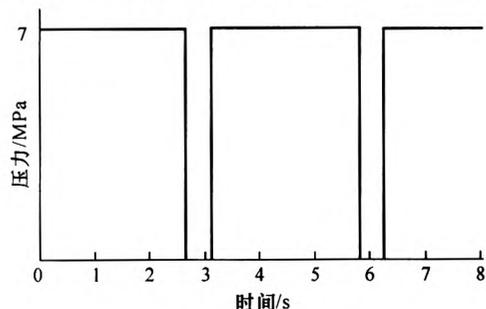


图5 非定常压力入口 UDF  
Fig.5 UDF of unsteady pressure inlet

性入口压力,定义模型,对压力入口质量进行监控,迭代计算得出入口处质量流曲线(见图6)。

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(unsteady_pressure, thread, position)
{
    real t;
    face_t f;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        real t = RP_Get_Real("flow-time");
        if(t < 2.8)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 7000000;
        else if(t > 2.8 || t < 3.1)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 0;
    }
}
```

```

else
t = 0; }
end_f_loop(f, loop)
}
    
```

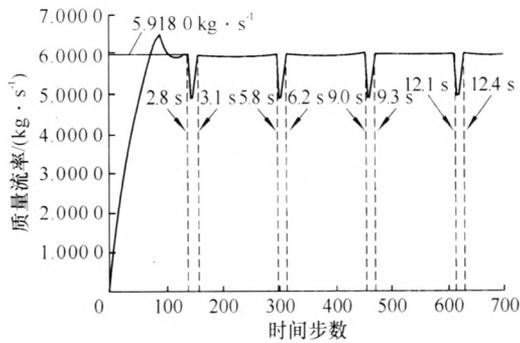


图6 压力入口质量流监控曲线

Fig. 6 Monitoring curve of mass flow rate of pressure inlet

计算得出口质量流率 =  $5.917\ 962\ 6\ \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , 出口质量流率 =  $-5.917\ 966\ 4\ \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , 误差率为  $3.814\ 697 \times 10^{-6}$ , 小于1%, 满足要求。

同时,得到入口、出口以及流场横截面压力分布云图见图7、8、9;速度分布云图见图10、11、12。

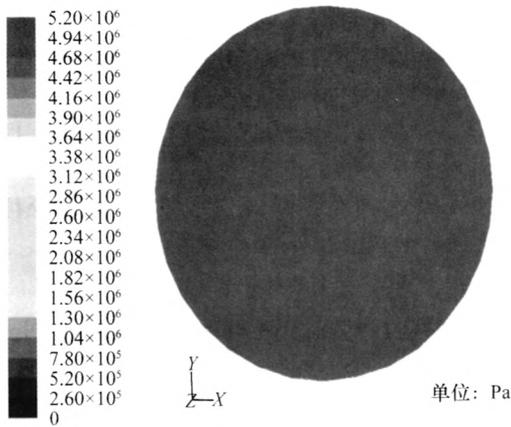


图7 入口压力分布云图  
Fig. 7 Contours of pressure inlet

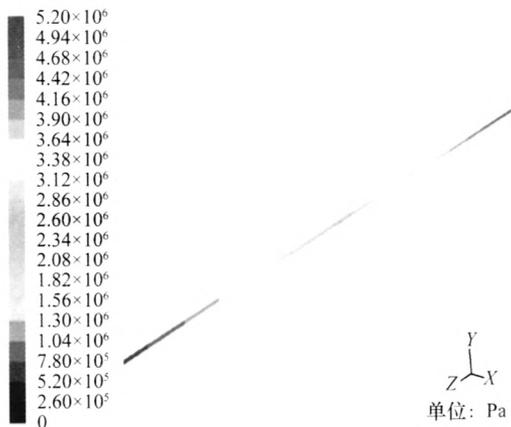


图8 横截面压力分布云图  
Fig. 8 Contours of pressure cross-section

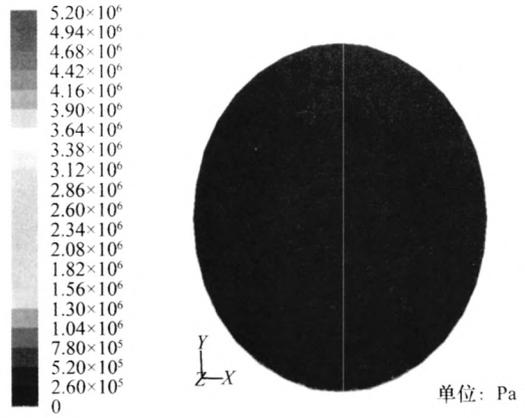


图9 出口压力分布云图  
Fig. 9 Contours of pressure outlet

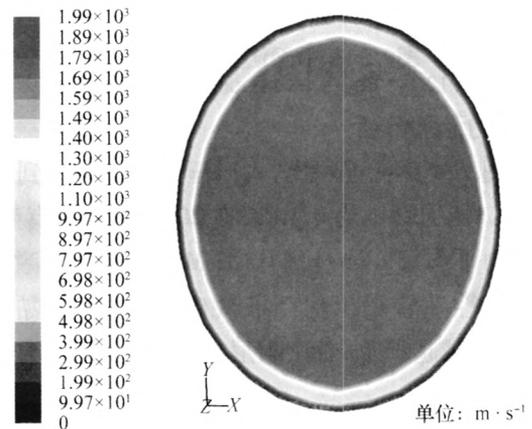


图10 入口速度分布云图  
Fig. 10 Contours of velocity inlet

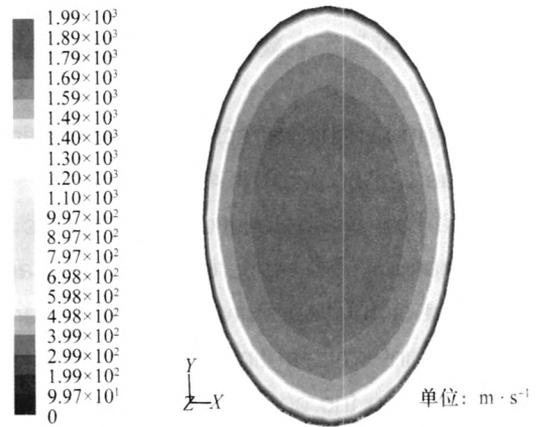


图11 出口速度分布云图  
Fig. 11 Contours of velocity outlet

## 4 仿真结果分析

### 4.1 质量流曲线分析

从图5、6可以看出,非定常的压力入口,导致物料的不连续输送。但由于间断时间短以及管壁对物料的黏性阻力,使得后入物料追上前方物料,减小了物料间间隙,与压力信号基本吻合。因此,加快物料

泵送频率以及选取合适的管道,有利于保证物料连续稳定输送。

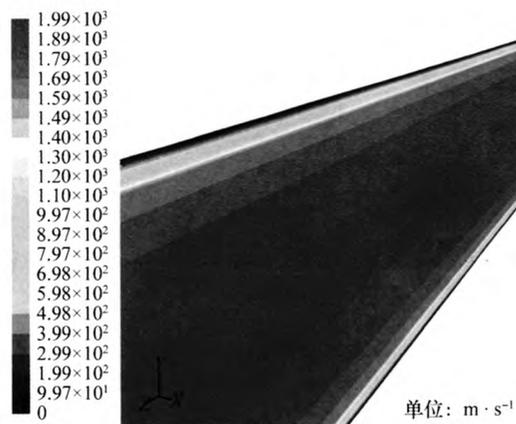


图 12 横截面速度分布云图

Fig. 12 Contours of velocity cross-section

#### 4.2 压力云图分析

从图 7、8、9 可以看出,入口压力最高可达到 5.26 MPa,出口压力基本为 0 MPa,在 20 m 的流体模型中,沿程压力平均每 1 m 衰减 0.26 MPa。这是由耐火材料本身特性及管壁阻尼系数决定的,物料的黏性越大,压力衰减越严重;管壁阻尼系数越大,压力衰减亦越严重。

#### 4.3 速度云图分析

从图 10、11、12 可以看出,由于切应力的作用,流体成柱塞状等速向前流动,与理论分析相吻合。速度由流体中部向管壁逐渐衰减,入口处高速物料占较大

比例,最高速度可达  $1.99 \times 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,边界处为 0,但随着沿程的压力损失,切应力变化,高速物料比例逐渐减少,以柱塞状喷出。

## 5 结论

以耐火材料在水平管内流动状态为研究对象,理论分析了其流动状态,利用专业的流体仿真软件 FLUENT,建立了流体 3D 模型并进行仿真分析,可以得到如下结论:

(1) 运用 FLUENT 仿真的方法对不定形耐火材料进行流场仿真分析是完全可行的,并可应用到其他物料的流场分析中。

(2) 通过仿真分析,模拟了不连续泵送物料工况,明确了管内耐火材料的压力,速度分布情况,验证了理论分析的正确性,为改善泵送设备性能、管路的选取及出口喷嘴和风压的设计提供参考依据。

## 参考文献

- [1] 李再耕. 不定形耐火材料的制备技术与应用技术走向[J]. 洛阳工业高等专科学校学报, 2002, 12(1): 1-2.
- [2] 王福军. 计算液体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 56-59.
- [3] 徐健, 赵怀振. 钢包用不定形耐火材料的湿式喷补方法[J]. 国外耐火材料, 1999(4): 62-63.
- [4] 瓦斯普. 固体物料浆体管道输送[M]. 黄河水利委员会科研所, 译. 北京: 水利出版社, 1980: 101-145.

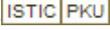
Flow state of monolithic refractories in conveying pipes based on FLUENT/Zhang Gang, Gu Lichen, He Xinrong//Naihuo Cailiao. -2013, 47(2): 111

**Abstract:** The flow characteristics of monolithic refractories in pipes in ideal conditions were analyzed based on hydrodynamics. The numerical simulation and analysis of the flow field were carried out using the professional fluid simulation software FLUENT for monolithic refractories in actual conditions. It is found that shortening the intermittent time of discontinuous pumping and designing appropriate pipe parameters have obvious effects on the continuous conveying of monolithic refractories, which proves the plug flow characteristics of monolithic refractories, and provides the basis for the design of nozzle and air pressure.

**Key words:** pipe conveying; mass flow; pressure contours; speed contours; FLUENT

**First author's address:** Mechatronics Technology Institute, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China

## 基于FLUENT的不定形耐火材料输送管内流动状态分析

作者: [张刚](#), [谷立臣](#), [何欣荣](#), [Zhang Gang](#), [Gu Lichen](#), [He Xinrong](#)  
作者单位: [西安建筑科技大学机械电子技术研究所 陕西西安710055](#)  
刊名: [耐火材料](#)   
英文刊名: [Refractories](#)  
年, 卷(期): 2013, 47(2)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_nhcl201302008.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_nhcl201302008.aspx)