

烟气轮机内催化剂颗粒碰撞模型研究进展

张笑笑, 王建军, 陈帅甫

(中国石油大学(华东)化学工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 针对烟气轮机叶片严重结垢的问题, 总结了颗粒与光滑壁面和粗糙壁面的碰撞模型研究进展、颗粒的沉积模型。并根据烟机的结垢过程, 将催化剂颗粒与烟机叶片的碰撞分为 3 种情况, 即颗粒与有涂层壁面的碰撞、颗粒与质点壁碰撞、颗粒与结垢壁面碰撞。通过对这些模型的总结发现, 当颗粒与粗糙壁面碰撞时, 正弦模型将粗糙度看作均匀分布, 虚拟壁模型只适用于入射角小于 7° 的情况, 将粗糙度角按照正态分布处理, 结果最为理想。对于颗粒与烟机叶片的碰撞中, 前 2 种碰撞可以找到合适的碰撞模型, 颗粒与结垢壁面的碰撞仍有待深入研究。

关键词: 烟气轮机; 催化剂; 颗粒碰撞; 粗糙度; 沉积

中图分类号: TQ051.1 文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2017)02-0012-08

Summary of catalyst particles collision models in flue gas turbine

ZHANG Xiaoxiao, WANG Jianjun, CHEN Shuaifu

(College of Chemical Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Aiming at the problem of serious fouling in the flue gas turbine blades, the collision model of particles with smooth wall and rough wall, the deposition model of particles were summarized. According to the fouling process of flue gas turbine, the collisions between the catalyst particles and the blades were summarized into three cases: the collision between the particles and the coating wall, the collision between the particles and the particle wall, and the collision between the particles and the scale wall. Through the summary of these models can be found that when the particles collide with the rough wall, the sinusoidal model regards roughness as a uniform distribution, The virtual wall model is only applicable to the case where the incidence angle is less than 7° , when the roughness angle is treated by normal distribution, the

result is the best. For the collision between particles and flue gas turbine blades, the first two kinds of collisions can find a suitable collision model, the collision between the particles and the fouling wall is still to be further studied.

Keywords: flue gas turbine; catalyst; particle collision; roughness; adhesion

烟气轮机是催化裂化单元能量回收系统中的核心设备, 烟气经过烟机后几乎可以回收全部的压力能以及大约 1/4 的热能^[1]。烟机的正常运行可以有效提高能量利用率, 降低催化裂化装置的能耗水平, 烟机的回收功率可以达到 130%^[2], 例如, 华北石化公司 2011 年 12 月—2012 年 4 月烟机发电 108 万 kW·h^[3]。燕山石化公司使用的 YL 18000A 型烟机, 在投入使用的一年多时间里, 累计运行 5 760 h, 每天可以节省电量 43.2×10⁴ kW·h, 按当地电价, 可以节省 5 000 多万元^[4]。烟机的工作环境非常恶劣^[5-6], 烟气在烟机入口处温度可以达到 590~690 °C, 压力达到 200~320 kPa, 而且烟机是故障率比较高的设备, 烟机机组每年因故障停机 2~3 次是很正常的现象, 有时候烟机正常运行的周期只有几天^[7-9]。中国石化集团公司运行的 39 台烟机机组, 2003 年中发生了 51 次故障, 停机时间达到 9 014 h^[10]; 榆林炼厂的烟机在 2003—2008 年中发生了 13 次故障^[11], 青岛石化的烟机机组 2005—2008 年发生了 9 次故障停机^[12], 辽河石化的烟机在 2003—2010 年中发生了 14 次停机^[13]。催化剂颗粒在叶片上的沉积结垢是烟机的主要故障原因之一^[14-16]。烟机结垢会造成转子质量不平衡, 烟机振动增大, 磨损加剧^[17-20], 同时叶片的垢层会改变流道, 叶片表面粗糙度也会增加, 造成烟机工作效率下降^[21-24]。催化剂颗粒在烟机上的沉积是结垢发生的必要条件, 所以研究颗粒与壁面的碰撞和沉积, 可以找到比较完善的物理模型来分析解决烟机的结垢问题。

颗粒与壁面碰撞的情况非常复杂, 影响因素有很多, 例如碰撞角度、颗粒的形状、壁面表面的形态、颗粒与壁面的材质等都会对碰撞过程产生影响。同时考虑各种因素的影响是非常困难的, 到现在为止还没有一种普遍适用的模型。目前, 最常用的碰撞模型是基

收稿日期: 2016-05-19, 修回日期: 2017-03-01。

基金项目: 山东省自然科学基金项目, 编号: ZR2015EM026。

第一作者简介: 张笑笑(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为多相流动分离、化工过程机械。E-mail: sydxzxx@sohu.com。

通信作者简介: 王建军(1971—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为多相流动与分离、化工过程机械。E-mail: wangjj01@upc.edu.cn。

于恢复系数的模型,通过碰撞前、后颗粒速度的变化来描述碰撞过程。在烟机中,关注的是颗粒在壁面碰撞之后的运动情况,颗粒与壁面发生碰撞后是沉积在叶片上还是继续运行。通过对不同碰撞模型的研究,找到一个适用于催化剂颗粒在烟机中的沉积模型,为研究烟机的结垢问题提供借鉴。

1 颗粒与壁面的碰撞

1.1 颗粒与光滑壁面的碰撞

颗粒与光滑壁面的碰撞情况是一种理想情况,是其他较为复杂模型的基础。如果颗粒的速度足够大,那么颗粒与壁面发生碰撞后会反弹,反弹后颗粒会损失一部分动能,颗粒速度的大小和方向都会发生变化,这些变化往往与颗粒和壁面的材质有关。碰撞后的法向速度与碰撞前的法向速度的比值称为法向反弹系数 e_n ,碰撞后的切向速度与碰撞前的切向速度的比值称为切向反弹系数 e_t 。颗粒与光滑壁面的碰撞示意图如图1所示。

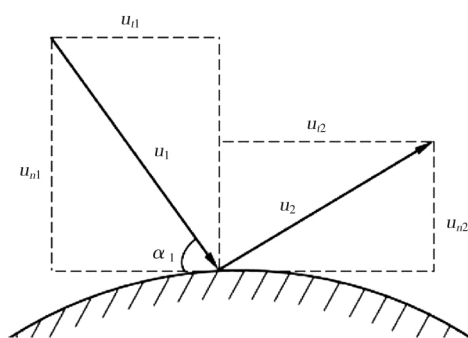


图1 颗粒与光滑壁面的碰撞示意图

Fig. 1 Configuration of a particle-wall collision

Tabakoff 等^[25]进行了大量的实验,认为碰撞的颗粒是球形时,经回归分析拟合出半经验型冲击反弹参数关系式和冲蚀率计算公式,有关冲击反弹参数关系式一般表达式为

$$\begin{aligned} e_t = u_{t2}/u_{t1} &= A_0 + A_1\alpha_1 + A_2\alpha_1^2 + A_3\alpha_1^3 + A_4\alpha_1^4, \\ e_n = u_{n2}/u_{n1} &= B_0 + B_1\alpha_1 + B_2\alpha_1^2 + B_3\alpha_1^3 + B_4\alpha_1^4. \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, B_0, B_1, B_2, B_3, B_4$ 均为试验常数; α_1 为颗粒入射角, $^\circ$; u_{t1} 和 u_{t2} 分别为颗粒碰撞前后的切向速度分量, m/s ; u_{n1} 和 u_{n2} 分别为颗粒碰撞前、后的法向速度分量, m/s 。不同材质、同种材质不同温度下,反弹公式中的系数各不相同。

根据 Tabakoff 等^[25]的试验结果,颗粒对叶轮机械的碰撞结果可以用式(2)来计算法向和切向的反弹系数:

$$\begin{aligned} e_t = u_{t2}/u_{t1} &= 1 - 2.12\alpha_1 + 3.0775\alpha_1^2 - 1.1\alpha_1^3, \\ e_n = u_{n2}/u_{n1} &= 1 - 0.4159\alpha_1 - 0.4994\alpha_1^2 + 0.292\alpha_1^3. \end{aligned} \quad (2)$$

1.2 颗粒与粗糙壁面的碰撞

完全光滑的壁面是不存在的,实际壁面往往是粗糙的。颗粒与壁面碰撞时的恢复系数与颗粒的形状和壁面粗糙度有关。表面粗糙度是微观的、随机的、不规则的,难以准确地描述。根据前人的实验研究,总结出以下4种颗粒与粗糙壁面的碰撞模型。

1.2.1 正弦函数模型

Matsumoto 等^[27]将壁面粗糙度的分布看成正弦函数,碰撞颗粒看作是球形的,图2是颗粒与正弦壁面碰撞模型。该模型假定壁面粗糙度是按照正弦函数均匀分布的,正弦函数为

$$y = A \sin\left(\frac{2\pi}{L}x + \alpha\right). \quad (3)$$

式中: A 为波的振幅,即粗糙度的最大高度, μm ; L 是粗糙度的周期长度, μm ; α 是粗糙度函数的相,是 $[0, 2\pi]$ 间均匀分布的随机数。对这种碰撞模型进行计算时,在应用脉冲方程前需要将粒子的速度坐标系与局部统计抽样的壁面对齐。

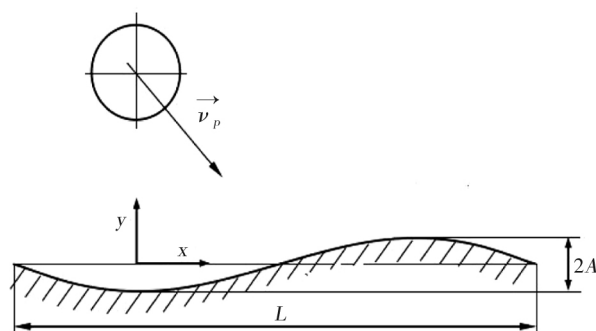


图2 颗粒与正弦壁面碰撞模型

Fig. 2 Collision model between particles and sine wall

这种模型提出的时间比较早,模型比较粗糙,模型中没有考虑不同壁面材质对碰撞的影响。应用这种模型时,将表面粗糙度看作是均匀分布的,没有考虑气相流场的影响,只是单纯地提出了颗粒与壁面的碰撞,并且需要知道 A 和 L 的值。在计算 y 值时还要先找到 x 的坐标值,应用起来需要的参数比较多,求解麻烦。

1.2.2 虚拟壁模型

Tsuji 等^[26, 28]提出用虚拟壁面的概念来描述壁面粗糙度,图3为颗粒与虚拟壁碰撞模型。在这个模型中,实际的壁面被一个倾斜一定角度的虚拟壁面所替代。粒子被假定为与一个随机倾斜角为 γ 的光滑虚拟壁碰撞,虚拟壁倾角就表示粗糙角。Tsuji 等通过相关的

关系式,估计颗粒与虚拟壁碰撞的动量损失。当粒子与虚拟壁碰撞碰撞时,粒子的动量可以有效地转化为法向的动量。

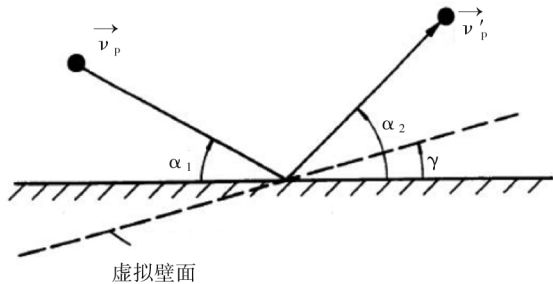


图 3 颗粒与虚拟壁碰撞模型

Fig. 3 Collision model between particles and virtual wall

Tsuji 等通过实验和模拟得到倾角 γ 的关系式为

$$\gamma = \begin{cases} \delta_0(\beta - \alpha_1) & (\alpha_1 \leq \beta) \\ 0 & (\alpha_1 > \beta) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\delta_0 = \frac{2.3}{Fr} - \frac{91}{Fr^2} + \frac{1231}{Fr^3}$,

$$\beta = 7^\circ, \quad (5)$$

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{g \cdot D}}.$$

在两相流中 u 为气相的速度, m/s; D 为管道直径或者通道高度, m; α_1 为入射角, $^\circ$; g 为重力加速度, m/s^2 。

颗粒在壁面上的弹跳过程具有随机性,为了引入一个随机角, Tsuji 将模型进行了改进,用 δ 代替上述的 δ_0 ,即

$$\delta = 5R^4\delta_0, \quad (6)$$

其中 R 是 0 和 1 之间的随机数。

上述模型的参数是通过比较模拟与实验数据根据经验确定的,其适用性没有得到充分证实。这种模型中考虑了碰撞空间和气相速度对碰撞的影响,并且在改进的模型中,首次考虑了粗糙碰撞的随机性,引入了随机角的概念,使提出的碰撞模型的准确性得到了很大的提高,但是这个模型的主要缺点是在入射角 $\alpha_1 > 7^\circ$ 时,不考虑壁面粗糙度的影响,然而不管入射角多大,粗糙度的影响总是存在的。

1.2.3 粗糙角的正态分布模型

图 4 为粗糙度的阴影效应。Sommerfeld 等^[29]发现当壁面有粗糙度存在时,由于粗糙度结构的影响,因此粒子入射角度比较小时就不会与粗糙度的背风区碰撞,这就使得粒子与背风区碰撞的概率变小,与粗糙度迎风区碰撞的概率变大,这种现象称为“阴影效应”,随着粒子粒径的增大,阴影效应的影响减小。

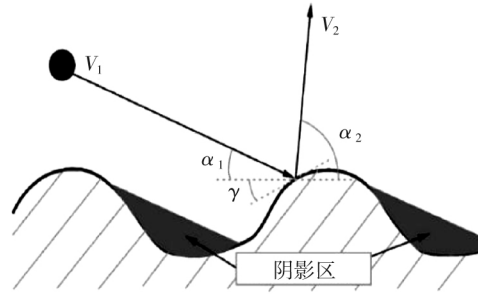


图 4 粗糙度的阴影效应

Fig. 4 Shadow zone of roughness

Sommerfeld 等通过实验发现,粗糙度的存在会使实际的碰撞角度比光滑时增加一个角度,所以为了考虑粗糙度的影响,真正的碰撞角度是由粒子与光滑壁面的碰撞角和粗糙度角组成的,表达式为

$$\alpha_2 = \alpha_1 + \Delta\gamma\xi, \quad (7)$$

式中 ξ 为服从期望是 0, 标准差是 1 的正态分布的随机变量, $\Delta\gamma$ 是与粗糙度结构和颗粒尺寸有关的参数。

碰撞角 γ 的表达式为

$$\gamma = \Delta\gamma\xi. \quad (8)$$

碰撞角服从期望为 0, 标准差为 $\Delta\gamma$ 的正态分布, 分布概率表达式为

$$P(\Delta\gamma, \gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\Delta\gamma^2}} e^{-\left(\frac{\gamma^2}{2\Delta\gamma^2}\right)}. \quad (9)$$

同时对于一些比较小的颗粒,粗糙度阴影效应的影响比较大,所以必须考虑阴影效应。由于阴影效应的存在,因此颗粒与粗糙度迎风区碰撞的概率比与背风区碰撞的概率大。图 5 为粗糙度角对阴影效应的影响。

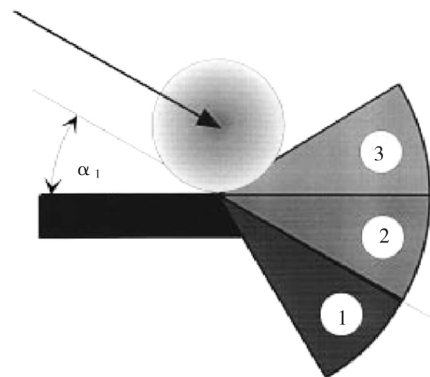


图 5 粗糙度角对阴影效应的影响

Fig. 5 Influence of wall roughness for small impact angles on shadow effect

对于给定的 α_1 和 γ 组合,将会出现 3 种情况^[29-30]:

(1) 当 γ 为负值,并且 $-\gamma > \alpha_1$ 时,由于阴影效应,因此颗粒不会与粗糙壁面发生碰撞,即

$$f(\alpha_1, \gamma) = 0. \quad (10)$$

(2) 当 γ 为负值 并且 $-\gamma > \alpha_1$ 时 由于阴影效应 颗粒与粗糙壁面发生碰撞的概率小于与光滑壁面碰撞的概率 即:

$$f(\alpha_1, \gamma) = \frac{\sin(\alpha_1 + \gamma)}{\sin \alpha_1}. \quad (11)$$

(3) 当 γ 正值时 由于阴影效应 颗粒与粗糙壁面发生碰撞的概率大于与光滑壁面碰撞的概率同式(11)。

结合粗糙度角的概率分布和颗粒与粗糙壁面碰撞的概率 颗粒与粗糙壁面碰撞时 粗糙度角有效分布概率的表达式为

$$P_e(\alpha_1, \Delta\gamma, \gamma) = P(\Delta\gamma, \gamma) f(\alpha_1, \gamma),$$

$$P_e = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta\gamma^2} e^{-\left(\frac{\gamma^2}{2\Delta\gamma^2}\right)} \frac{\sin(\alpha_1 + \gamma)}{\sin \alpha_1}, \quad (12)$$

粗糙角 γ 是符合 $P_e(\alpha_1, \Delta\gamma, \gamma)$ 分布的随机数。

Kussin 等^[31]通过实验得到了不同壁面粗糙度下, $\Delta\gamma$ 随碰撞颗粒粒径的变化规律。他们将壁面粗糙度分为 2 种情况, 一种是壁面粗糙度比较大, 另外一种为壁面粗糙度比较小 2 种情况下 $\Delta\gamma$ 的表达式:

$$\Delta\gamma_H = 3.4963 + 5.797e^{\left(\frac{D_p}{154.12}\right)},$$

$$\Delta\gamma_L = 1.551 + 3.438e^{\left(\frac{D_p}{1161.55}\right)}. \quad (13)$$

其中下标 H 表示大壁面粗糙度 L 表示小壁面粗糙度。

这种碰撞模型是到目前为止最为准确的模型。这种模型考虑了粗糙度结构和碰撞颗粒粒径的影响, 并且首次提出了阴影效应的影响, 对于粒径比较小的颗粒也是适用的。Sommerfeld 等^[29]基于上述 4 种颗粒与粗糙壁面碰撞的模型进行了实验, 发现将粗糙度角按正态分布处理时, 得到的结果最为理想。

2 颗粒与烟机动壁面的碰撞

烟气经过旋风分离器分离后可以分离出大部分粒径相对较大的颗粒, 此时催化剂的质量浓度一般不到 200 mg/m^3 , 主要是粒径小于 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒。这些颗粒随着气相在烟机内流动时, 因范德华力、静电力等粘附力比弹性力大, 并且催化剂中含有重金属, 颗粒容易沉积在壁面上, 加上高温高压的运行环境, 这些沉积的颗粒会发生反应生成垢层^[33-36]。根据烟机的结垢过程, 颗粒与烟机的碰撞主要分 3 种情况。

2.1 颗粒与带有涂层的烟机粗糙动壁面碰撞

经过机械加工的烟机叶片表面是非常光滑的, 图 6 为无涂层的烟机叶片。但是烟机在高温高压的环境

下工作, 烟气在烟机内的线速度可以达到 300 m/s 以上^[37], 再加上催化剂颗粒对叶片的冲蚀以及大量有害介质的腐蚀, 如果烟机叶片没有涂层, 一般使用 2~6 个月后, 整个叶片就被磨损掉^[38]。烟机叶片经常发生损坏, 所以需要在烟机叶片的表面喷涂防护层。目前最常用的防护涂层是长城 1 号涂层, 对于功率非常大的烟机, 采用长城 33 号的新涂层。

有涂层的烟机叶片如图 7 所示, 涂上防护层的叶片会比原来粗糙, 但是粗糙度相对来说比较均匀。根据相关取样测试^[39], 长城 1 号涂层的表面粗糙度大约在 $8.38 \sim 11.83 \text{ }\mu\text{m}$ 的范围, 平均粗糙度约为 $10.55 \text{ }\mu\text{m}$ 。长城 33 号涂层的表面粗糙度大约在 $3.03 \sim 6.06 \text{ }\mu\text{m}$ 的范围, 平均粗糙度约为 $4.65 \text{ }\mu\text{m}$ 。



图 6 无涂层烟机叶片

Fig. 6 Flue gas turbine blade without coating



图 7 有涂层的烟机叶片

Fig. 7 Flue gas turbine blade with coating

在模拟颗粒与带有涂层的烟机动叶片碰撞时, 因涂层的表面粗糙度相对比较均匀, 所以采用正弦模型和正态分布模型来描述粗糙度都比较合理, 但是正弦模型需要的参数比较多, 计算起来比较麻烦。虚拟壁模型在碰撞角大于 7° 时不考虑粗糙度, 而且虚拟壁和改进的虚拟壁模型一般适用于颗粒粒径比较大, 颗粒速度比较小的情况, 而在烟机中, 颗粒的粒径一般小于 $10 \text{ }\mu\text{m}$, 颗粒的速度最小也在 100 m/s 左右, 最大可以达到 400 m/s , 速度非常高, 所以这 2 种模型不适用于模拟颗粒与烟机内粗糙动壁面的情况。采用正态分

布模型时,因为与烟机壁面碰撞的粒子粒径较小,所以必须考虑阴影效应的影响。

Tabakoff 等^[40]基于反弹模型的半经验公式,在实验的基础上提出对于铂钨化合物涂层,其反弹公式为

$$\begin{aligned} e_t = u_{t2}/u_{t1} &= 1.0 + 8.164 \times 10^{-4} \alpha_1 - 5.981 \times 10^{-4} \alpha_1^2 + \\ & 1.2835 \times 10^{-5} \alpha_1^3 - 7.2016 \times 10^{-8} \alpha_1^4, \\ e_n = u_{n2}/u_{n1} &= 1.0 - 0.025 \alpha_1 + 4.9815 \times 10^{-4} \alpha_1^2 - \\ & 3.5967 \times 10^{-6} \alpha_1^3. \end{aligned} \quad (14)$$

2.2 颗粒与烟机动壁面上的质点壁碰撞

随着烟机设备的运行,一些颗粒会沉积在烟机的壁面上,运行一定时间后,会形成一层由颗粒组成的质点壁,由于运行时间不长,沉积的颗粒比较少,此时这些沉积的颗粒还没有形成垢层,之后颗粒再与壁面碰撞时不是直接撞击在壁面上,而是与质点壁发生碰撞,含有质点壁的烟机叶片如图 8 所示。

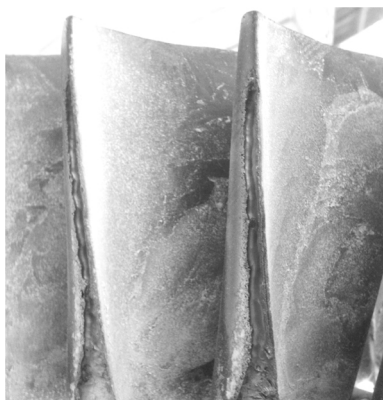


图 8 含有质点壁的烟机叶片

Fig. 8 Flue gas turbine blade with particle wall

岑可法等^[41-42]详细分析了颗粒与质点壁的碰撞情况,反弹系数除了与颗粒、壁面的材质等因素有关外,还与入射颗粒的质量和质点壁的质量有关,定义综合系数为

$$C = (1+e) \frac{M_0}{m_p + M_0}, \quad (15)$$

式中 e 为速度的恢复系数; m_p 为颗粒的质量/kg; M_0 为被打击部分的质点壁的质量/kg。目前尚无这方面的详细实验数据。

White 等^[43]提出当质点壁由相同颗粒组成,并且颗粒是光滑球形,颗粒间没有内聚力时,可以有一种简化处理方法。图 9 为颗粒与质点壁碰撞示意图。

颗粒与质点壁碰撞的公式为

$$\nu_1 = 80 \left[1 - e^{\left(-\frac{1}{80} \nu \right)} \right], \quad (16)$$

$$\alpha_1 = 21.8 \alpha^{0.316}. \quad (17)$$

式中 ν, ν_1 分别指颗粒与质点壁碰撞前后的速度/m/s; α 和 α_1 分别指颗粒与质点壁碰撞时的入射角和反射角/°。

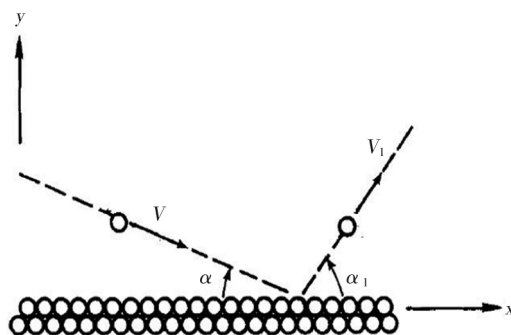


图 9 颗粒与质点壁碰撞示意图

Fig. 9 Collision between particle and particle wall

根据上述分析,采用正态分布模型来描述粗糙度时,最符合实验结果。当颗粒与粗糙质点壁发生碰撞时,不考虑旋转速度,实际的碰撞角为

$$\alpha_1 = \alpha + \gamma, \quad (18)$$

其中 γ 是符合 $P(\Delta\gamma, \gamma)$ 的随机数,因为与烟机碰撞的颗粒比较小,需要考虑阴影效应的影响。根据 γ 值的大小,判定阴影效应的影响,如果发生碰撞,则有效粗糙角为满足 $P_c(\alpha_1, \Delta\gamma, \gamma)$ 概率分布的随机数。

发生碰撞后的速度同式(16)。反射角为

$$\alpha_1 = 21.8 \alpha^{0.316}. \quad (19)$$

2.3 颗粒与结垢烟机动壁面的碰撞

烟机叶片结垢后,表面非常不平整,用肉眼就可以观察到,结垢叶片如图 10 所示。此时,颗粒与烟机动壁面发生碰撞时,是与垢层发生碰撞。图 11 为烟机静叶垢样,图 12 为烟机动叶垢样。从图中可以看出,垢层表面形态差别很大,不同叶片的垢层表面也不相同。



图 10 结垢叶片

Fig. 10 Flue gas turbine fouling blade

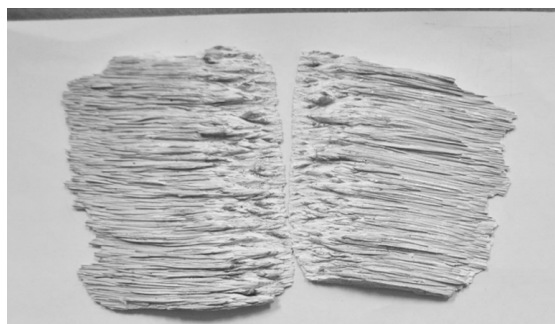


图11 烟机静叶垢样

Fig. 11 Scale of stator vane



图12 烟机动叶垢样

Fig. 12 Scale of rotor blade

颗粒与烟机结垢动壁面碰撞时,结垢动壁面表面形态比较复杂,粗糙度变化比较大。正弦函数模型是假设粗糙度是均匀分布的,这与结垢的动壁面明显不相符,虚拟壁及改进的虚拟壁模型不适合烟机内的高速小粒子,所以描述结垢烟机叶片表面的粗糙度,较为理想的模型还是正态分布模型。

对于颗粒与结垢的烟机叶片碰撞,碰撞之后颗粒的反弹速度仍可基于 Tabakoff 提出的半经验的反弹公式,此时公式中的反弹角要在原来入射角的基础上,加上用正态分布模型描述的粗糙角,但是对于公式中的 $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, B_0, B_1, B_2, B_3, B_4$ 系数,目前并没有相关的实验数据。

3 颗粒在壁面的粘附

Brach 等^[44]提出临界速度的概念。在碰撞逼近段,根据牛顿定律,

$$-mv_n = P_D^A + P_E^A, \quad (20)$$

式中 v_n 是颗粒的初始法向速度, m/s; m 是碰撞颗粒的质量, kg; P_D^A 是碰撞逼近阶段颗粒和壁面变形脉冲力, N·s; P_E^A 是碰撞逼近阶段所有外力的脉冲力, N·s。

在反弹阶段:

$$mV_n = P_D^R + P_E^R - P_A. \quad (21)$$

式中 V_n 是颗粒碰撞最后的法向速度, m/s; P_D^R 是反弹阶段颗粒和壁面变形脉冲力, N·s; P_E^R 是反弹阶段所有外力的脉冲力, N·s; P_A 是粘附脉冲力, N·s。对于整个接触时间内,

$$mV_n - mv_n - P_n = P_D + P_E - P_A, \quad (22)$$

P_n 是法向的合成脉冲力, N·s。

恢复系数有不同的表达形式,其中运动学上的一种形式为

$$R = P_D^R / P_E^R. \quad (23)$$

一个脉冲力所做的功等于该脉冲力与其方向上平均速度的乘积。对于合成脉冲力 P_n ,其所做的脉冲功为

$$W_n = P(v_n + V_n)/2. \quad (24)$$

结合公式(20)~(24),忽略外力的作用,考虑因为变形而产生的损失 $(1-R^2)mv_n^2/2$,克服粘性力而做的功 W_A , P_A 的表达式为

$$P_A = -mRv_n \times [1 - (1 + 2W_A/R^2mv_n^2)^{1/2}]. \quad (25)$$

从而可以得到最后法向反弹速度为

$$V_n = -Rv_n(1 + 2W_A/R^2mv_n^2)^{1/2}, \quad (26)$$

克服粘性力所做的功 W_A 为:

$$W_A = -\left[\frac{5}{4}\rho\pi^{9/2}(k_1+k_2)\right]^{2/5} r^2 |v_n|^{13/10}. \quad (27)$$

式中 ρ 为颗粒密度, kg/m³; k_1 和 k_2 是与材料和几何形状有关的常数; r 表示粒子的半径, m。

临界速度就是碰撞后的速度 $V_n^2 + V_t^2 = 0$ 。当颗粒与壁面碰撞的速度大于临界速度时,与壁面碰撞后,颗粒获得新的速度。当颗粒与壁面碰撞的速度小于临界速度时,颗粒会沉积在壁面上,临界速度的表达式为

$$v_c = \left[\frac{H(1+\eta^2)}{rR^2}\right]^{10/7}, \quad (28)$$

式中 H 是与材料有关的函数,表达式为

$$H = 0.51 [5\pi^2(k_1+k_2)/4\rho^{3/2}]^{2/5}, \quad (29)$$

式中 $\eta = v_t/v_n$, v_t 和 v_n 分别表示颗粒的初始切向速度分量和法向速度分量, m/s; R 表示恢复系数。

EI-Batsh 等^[45-46]在临界速度的基础上,提出了粒子的粘附模型。如果颗粒与壁面碰撞时的法向速度小于临界捕获速度,那么颗粒会粘附在壁面上,反之,颗粒会在壁面上反弹获得新的速度。颗粒的临界捕获速度为

$$V_{cr} = \left(\frac{2E}{D_p}\right)^{10/7}, \quad (30)$$

$$E=0.51-\left[\frac{5\pi^2(k_1+k_2)}{4\rho_p^{3/2}}\right]^{2/5}, \quad (31)$$

$$k_1=\frac{1-v_s}{\pi E_s}, \quad (32)$$

$$k_2=\frac{1-v_p}{\pi E_p}. \quad (33)$$

式中 ρ_p 表示粒子的密度 kg/m^3 , E_p 和 E_s 分别为颗粒和壁面材料的杨氏模量 Pa , ν_p 和 ν_s 分别为颗粒与壁面材料的泊松比。Brach 等^[44]对不同材质的颗粒进行弹性性能的研究,发现尽管这些材料的杨氏模量相差几个数量级,但泊松比都在 0.27~0.33 范围内。不同材料,同种材料、不同温度下杨氏模量不同, Ai 等^[47]将煤灰不同温度下的杨氏模量值进行拟合,得到

$$E_p=3\times 10^{20}e^{(-0.023\ 657T)}, \quad (33)$$

其中 T 是指碰撞壁面附近烟气的平均热力学温度 K 。

4 结语

烟气轮机的结垢问题越来越不容忽视,在前人的基础上总结了颗粒分别与光滑壁面、粗糙壁面和质点壁的碰撞模型,以及一种基于临界速度原理的颗粒在壁面上的沉积模型。正弦模型将粗糙度看作是均匀分布,模型中没有考虑不同壁面材质对碰撞的影响,所需参数较多。虚拟壁模型只适用于入射角 $\alpha_i < 7^\circ$ 的情况。正态分布模型与实验结果最为相符,是目前为止最为准确的模型。

催化剂颗粒与烟机粗糙动壁面的碰撞主要分为 3 种情况,分别是颗粒与有涂层的壁面碰撞、颗粒与质点壁碰撞、颗粒与结垢壁面碰撞。前 2 种情况可以找到合适的碰撞模型,对于颗粒与垢层的碰撞需要进一步研究。这些模型可以应用到实验研究和数值计算上,对分析烟机内粗糙壁面对颗粒沉积的影响有重要意义,为进一步研究烟机结垢机理提供理论基础。

参考文献(References):

- [1] 卢鹏飞,冀江,杨龙文. 中国催化裂化烟气轮机自主创新三十年的回顾[J]. 中外能源, 2008, 13(S1):8-10.
- [2] 陈俊武. 催化裂化工艺与工程 [M]. 2 版. 北京: 中国石化出版社, 2005:89-90.
- [3] 赵志飞,武立业,张连营,等. 催化裂化装置烟气轮机组的改造[J]. 石油化工设备技术, 2013, 34(1):47-50.
- [4] 方文. YL 型烟气轮机的开发和应用[J]. 石油化工设备技术, 2000, 21(2):30-33.
- [5] 吴伟. 大型烟气轮机故障机理及故障模式的研究[D]. 北京:北京信息科技大学机械电子工程系, 2008.
- [6] 袁健. 催化剂颗粒撞击构件壁面的数值模拟研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械电子工程系, 2012.
- [7] 申健,周复昌,于萍,等. 流化催化裂化装置烟机结垢原因分析[J]. 石油炼制与化工, 2014, 45(2):13-17.

- [8] 李双平. 催化裂化烟机结垢原因分析及对策[J]. 炼油技术与工程, 2012, 42(10):41-44.
- [9] 张鹏. 催化裂化装置烟气轮机长周期安全运行措施探讨[J]. 石油化工设备技术, 2015, 36(1):22-24.
- [10] 王建军. 催化裂化装置烟机机组 2003 年停机故障分析与改进措施[J]. 石油化工设备技术, 2004, 25(2):24-26.
- [11] 郭保宏,张玉宝,康钰海. 严细管理 精心维护——不断技改、努力提高烟气轮机组运行水平[J]. 化学工程与装备, 2012(6):146-149.
- [12] 姜世庆. 青岛石化 YL-10000E 烟气轮机运行技术总结[J]. 中外能源, 2008, 13(S1):100-103.
- [13] 吕大成. 重油催化裂化四机组长周期运行研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东)机械工程系, 2012.
- [14] 丁振海. 催化裂化 YL 型烟气轮机结垢浅析[J]. 辽宁工业大学学报:自然科学版, 2015, 35(1):54-56.
- [15] 吴宇,刘强,于婴,等. 催化裂化装置烟机结垢问题的原因与防范措施[J]. 石油炼制与化工, 2011, 42(3):24-28.
- [16] 吴科. 催化烟机长周期运行的影响因素及相应对策[J]. 中国化工贸易, 2014(9):94.
- [17] 尚三锋. 催化烟机振动大原因分析及应对措施[J]. 化学工程与装备, 2014(3):50-53.
- [18] 申大勇. 烟气轮机振动故障的诊断及处理[J]. 中国设备工程, 2010(12):57-58.
- [19] 李希斌. 烟气轮机振动波动诊断及处理[J]. 石油化工设备技术, 2011, 32(6):22-24.
- [20] 徐瑛,李强,张晓军. 减少烟气轮机结垢的处理措施[J]. 广州化工, 2012, 40(15):202-203.
- [21] ALDI N, MORINI M, PINELLI M, et al. Performance evaluation of non-uniformly fouled axial compressor stages by means of computational fluid dynamic analyses[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 136(2):1152-1162.
- [22] MORINI M, PINELLI M, SPINA P R, et al. Numerical analysis of the effects of non-uniform surface roughness on compressor stage performance[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2010, 133(7):745-753.
- [23] AI W, MURRAY N, FLETCHER T H, et al. Deposition near film cooling holes on a high pressure turbine vane[J]. Journal of Turbomachinery, 2008, 134(4):825-835.
- [24] ASME T, MELINO F, MORINI M, et al. Compressor fouling modeling: relationship between computational roughness and gas turbine operation time[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2011, 134(5):1011-1019.
- [25] TABAKOFF W, KOTWAL R, HAMED A. Erosion study of different materials affected by coal ash particles [J]. Wear, 1979, 52(1):161-173.
- [26] KONAN N A, KANNENGIESER O, SIMONIN O. Stochastic modeling of the multiple rebound effects for particle-rough wall collisions[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2009, 35(10):933-945.
- [27] MATSUMOTO S, SAITO S. Monte carlo simulation of horizontal pneumatic conveying based on the rough wall model[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1970, 3(2):223-230.
- [28] TSUJI Y, MORIKAWA Y, TANAKA T, et al. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow in a two-dimensional horizontal channel [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1987, 13(5):671-684.
- [29] SOMMERFELD M, HUBER N. Experimental analysis and modelling

of particle-wall collisions[J]. International Journal of Multiphase Flow , 1999 , 25(6):1457-1489.

[30] 吴铁鹰, 赵梦熊. 颗粒-壁面碰撞建模与数据处理[J]. 振动工程学报 , 2014 , 27(4): 589-597.

[31] KUSSIN J , SOMMERFELD M. Experimental studies on particle behaviour and turbulence modification in horizontal channel flow with different wall roughness[J]. Experiments in Fluids , 2002 , 33(1):143-159.

[32] SOMMERFELD M. Analysis of collision effects for turbulent gas-particle flow in a horizontal channel: Part I. Particle transport [J]. International Journal of Multiphase Flow , 2003 , 29(4):675-699.

[33] 费达, 侯峰, 陈辉, 等. 催化裂化装置烟气轮机积垢及其增厚机理[J]. 化工学报 , 2015 , 66(1):79-85.

[34] 赵铁锋. 烟气轮机结垢及磨损原因分析和对策[J]. 石油和化工设备 , 2013 , 16(12):54-56.

[35] 谭争国, 高雄厚, 李荻, 等. 催化裂化装置中旋风分离器和烟气轮机催化剂粘连结垢原因分析[J]. 石油炼制与化工 , 2010 , 41(4): 40-43.

[36] 邢东, 隋志国, 徐惠丽, 等. 烟气轮机结垢原因分析及预防措施[J]. 化工科技 , 2014 , 22(6):54-58.

[37] 季丽文. 烟气轮机监测技术改进及应用[J]. 石油化工设备 , 2015 , 44(4):102-105.

[38] 夏光明, 闵小兵, 周建桥, 等. 热喷涂技术制备耐蚀涂层在炼油装备中的应用及发展前景 [J]. 金属材料与冶金工程 , 2012 , 40(4): 59-63.

[39] 闵小兵, 夏光明, 严淑群, 等. 30 000 kW 级特大功率烟气轮机叶片防护涂层的研究[J]. 湖南冶金 , 2005 , 33(1):3-8.

[40] TABAKOFF W , METWALLY M. Coating effect on particle trajectories and turbine blade erosion[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power , 1992 , 114(2):250-257.

[41] 岑可法, 樊建人. 工程气固多相流动的理论及计算[M]. 杭州: 浙江大学出版社 , 1990:362-366.

[42] 岑可法. 气固分离理论及技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社 , 1999: 131.

[43] WHITE B R , SCHULZ J C. Magnus effect in saltation [J]. Journal of Fluid Mechanics , 1977 , 81(03):497-512.

[44] BRACH R M , DUNN P F. A mathematical model of the impact and adhesion of microspheres[J]. Aerosol Science and Technology , 1992 , 16(1):51-64.

[45] EL-BATSH H , HASELBACHER H. Numerical investigation of the effect of ash particle deposition on the flow field through turbine cascades [C]//ASME Turbo Expo 2002: Power for Land , Sea , and Air. American Society of Mechanical Engineers , 2002:1035-1043.

[46] 周君辉, 张靖周. 涡轮叶栅内粒子沉积特性的数值研究[J]. 航空学报 , 2013 , 34(11):2492-2499.

[47] AI W , FLETCHER T H. Computational analysis of conjugate heat transfer and particulate deposition on a high pressure turbine vane[J]. Journal of Turbomachinery , 2009 , 134(134):74-89.

•
流
态
化
•

本期广告目次

彩色	插七 河南黎明重工科技股份有限公司
封面 珠海欧美克仪器有限公司	插八 成都精新粉体测试设备有限公司
封二 合肥中亚建材装备有限责任公司	
封三 福建龙岩市亿丰粉碎机械有限公司	单色
封四 丹东百特仪器有限公司	插一 浙江力普粉碎设备有限公司
插一 浙江丰利粉碎设备有限公司	插二 沈阳飞机研究所粉体公司
插二 济南微纳颗粒仪器股份有限公司	插三 南通富莱克流体装备有限公司
插三 山东·章丘大成机械有限公司	插四 宜兴市东山新型材料有限公司
插四 2017 年新疆—中亚矿业发展大会	山东恒拓科技发展有限公司
插五 江阴市启泰非金属工程有限公司	插五 南京南大有限公司
插六 山东华特磁电科技股份有限公司	插六 上海细创粉体装备有限公司