

蜂窝体蓄热室回收转炉煤气余热可行性研究

秦 勤¹, 王奎明¹, 于庆波¹, 方 林²
(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 艾欧史密斯(中国)热水器有限公司, 江苏 南京 320100)

摘 要: 从转炉煤气点火源能量出发,研究蜂窝体蓄热室回收转炉煤气中、低温段余热的安全性.建立蜂窝体蓄热室通道物理模型,根据 JKR 碰撞理论和摩擦学理论分别计算蜂窝体蓄热室内多颗粒相潜在点火源能量.通过最小点火能测定实验台测出常温下 3 种转炉煤气的最小点火能,修正最小点火能理论计算公式,修正系数为 0.909;计算得到 3 种转炉煤气在着火点(973 K)时的最小点火能分别为 7.36×10^{-7} 、 6.26×10^{-7} 、 6.01×10^{-7} J.与潜在点火源能量对比,结果表明:孔径小于 6 mm 的蜂窝体蓄热室回收转炉煤气中、低温段余热是安全可行的.

关 键 词: 转炉煤气;点火能;蜂窝体蓄热室;碰撞理论;摩擦理论

中图分类号: X 938 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)11-1608-06

Feasibility Study on Heat Recovery of Converter Gas by Honeycomb Heat Regenerator

QIN Qin¹, WANG Kui-ming¹, YU Qing-bo¹, FANG Lin²
(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang110819, China; 2. A. O. Smith (China) Water Heater CO., Ltd., Nanjing 320100, China. Corresponding author: WANG Kui-ming, E-mail: wangkm 920807@163.com)

Abstract: Based on the ignition energy of the converter gas, the safety of waste heat recovery from converter gas at middle and low temperature in the honeycomb regenerator is analyzed. A physical model of the channel in the honeycomb regenerator is established. Potential total energy of multi-particle phase in the honeycomb regenerator is calculated by using JKR collision theory and the theory of tribology. Based on the minimum ignition energy (MIE) of converter gas through the MIE experiment platform at room temperature, the experimental correction calculation formula of MIE is revised and the modified coefficient is 0.909. The MIE in three kinds of converter gas at the ignition temperature of 973 K is 7.36×10^{-7} , 6.26×10^{-7} and 6.01×10^{-7} J, respectively. Compared with the potential ignition energy, the results show that it is safe and feasible to recover the waste heat from the converter gas at medium-low temperature in the honeycomb regenerator when the bore diameter is smaller than 6 mm.

Key words: converter gas; ignition energy; honeycomb heat regenerator; collision theory; friction theory

转炉煤气是转炉炼钢的副产品,热值为 7 536 kJ/m³,温度高达 1 400 ~ 1 600 ℃.安全高效回收转炉煤气及余热是转炉炼钢节能的首要任务.目前转炉煤气的回收方法主要有煤气湿法回收技术(OG 法)和煤气干法回收技术(LT 法),这两种方法的共同缺点是没有回收转炉煤气中、低温段(800 ℃以下)的余热,其原因是低于着火点的转炉煤气易爆.针对转炉煤气中、低温段余热回收的研究,在回收方法方面,于庆波^[1]提出了惰性气体蓄热式回收系统;刘改娟等^[2]研究了高温陶瓷除尘余热锅炉回收工艺;Maruoka 等^[3-4]评估了采用相变材料回收转炉煤气余热,为甲烷合成甲醇提供热源的可行性.在转炉煤气防爆特性方面,Grune 等^[5]研究了高温条件下 H₂/CO/N₂/H₂O/

CO₂ 混合气体的可燃极限、燃烧特性; Askari 等^[6]通过实验测定了高温高压下 CO/H₂/Air 的层流火焰传播速度和火焰稳定性; Shang 等^[7]通过数值模拟的方法研究了 N₂/CO₂ 稀释条件下 CO/H₂/Air 的层流火焰传播速度。

由于转炉煤气含尘量大,当灰尘颗粒与壁面或者颗粒之间相互碰撞摩擦产生火花的能量足够大,且超过实际煤气的最小点火能时,则可能导致煤气爆炸,而在这方面的研究甚少。本文以惰性气体蓄热式回收系统为研究对象,建立蜂窝体蓄热室通道物理模型,根据碰撞能量耗散理论和摩擦热理论计算了转炉煤气余热回收过程中潜在点火源能量;搭建转炉煤气最小点火能测定实验台,通过实验修正了转炉煤气最小点火能的理论计算式;利用该式计算了转炉煤气在着火点温度时的最小点火能,与潜在的点火源能量进行了对比,确定了蜂窝体蓄热室通道的安全尺寸。

1 物理模型

从汽化冷却烟道出来的高温转炉煤气,其潜在的点火源主要是烟尘颗粒与蜂窝体壁面之间和颗粒之间相互碰撞或摩擦产生的瞬间热量。当转炉煤气流经蜂窝体蓄热室通道时,物理模型如图 1 所示。

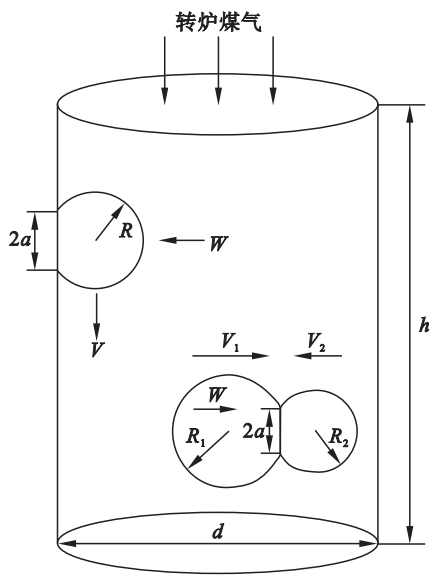


图 1 通道内颗粒碰撞与摩擦物理模型

Fig. 1 Physical model of particle collision and friction in channel

模型中: W 表示载荷, N/m²; R 表示颗粒半径, m; a 表示接触半径, m; V 表示颗粒速度, m/s。

2 计算方法

2.1 碰撞能计算

转炉煤气在蓄热室通道内的流速约为 20 m/s,则需要研究低速的颗粒之间的碰撞。目前公认的关于黏弹性碰撞理论为 JKR 理论^[8], Johnson 和 Pollock 经过理论推导得到碰撞后的能量损失 W_s 的计算公式为^[9]

$$W_s = 7.09 \left(\frac{\Gamma_{12}^5 R^{*4}}{E^{*2}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (1)$$

式中, Γ_{12} 为表面能, J/m², 其表达式为

$$\Gamma_{12} = 2 \sqrt{\Gamma_1 \times \Gamma_2}. \quad (2)$$

Γ_1, Γ_2 分别为物体 1, 2 的表面能。 R^* 表示碰撞有效半径, m; 其表达式为

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (3)$$

如图 1 所示,当颗粒与颗粒碰撞时,则 R_1, R_2 为颗粒半径;当颗粒与壁面碰撞时, R^* 为颗粒半径 R 。

E^* 为有效弹性模量, Pa; 其表达式为

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}. \quad (4)$$

当颗粒与颗粒碰撞时, ν_1, ν_2 表示颗粒 1, 2 的泊松比, E_1, E_2 表示颗粒 1, 2 的弹性模量;当颗粒与壁面碰撞时, ν_1, ν_2 表示颗粒与壁面的泊松比, E_1, E_2 表示颗粒与壁面的弹性模量。

2.2 摩擦热计算

转炉烟尘在蓄热室通道内流动时,需要考虑颗粒之间和颗粒与壁面的摩擦热。 Czichos 指出摩擦过程中最大约有 86% 的功以热的形式散失^[10],单位时间内摩擦力做功变为热量 q 的表达式为

$$q = 0.86 \mu W V. \quad (5)$$

式中, μ 为摩擦系数。

由于转炉烟尘的颗粒小于 100 μm,在 JKR 模型中,范德华力就是平均接触压力,其表达式为^[11]

$$W = \frac{3}{2} \pi R^* \Gamma_{12}. \quad (6)$$

a 表示接触半径, m; 其表达式为

$$a = \left(\frac{3WR}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (7)$$

摩擦过程中,设颗粒的接触时间为 t ,则

$$t = \frac{2a}{V}. \quad (8)$$

将式(6)~式(8)代入式(5),得到在整个摩擦过程中,摩擦力做功所产生的热量为

$$Q=2.68\mu(\pi R^*\Gamma_{12})^{\frac{4}{3}}(\frac{R}{E^*})^{\frac{1}{3}}.$$

(9)

2.3 转炉煤气多颗粒碰撞率计算

单位体积、单位时间内转炉烟尘的颗粒数 N 为

$$N=\frac{m_1}{m_0}=\frac{C_1}{\rho\cdot V_0}.$$

(10)

式中: m_1 为通道模型内含有的转炉烟尘的总质量,g; m_0 为单个转炉烟尘在平均粒径时的质量,g; C_1 为模型中烟尘的质量浓度,g/m³; ρ 为烟尘颗粒的密度,g/cm³; V_0 为单个转炉烟尘在平均粒径时的体积,m³.

针对图 1 建立的蜂窝体通道物理模型,转炉煤气内含有的烟尘颗粒数 N_0 为

$$N_0=V_1\cdot N\cdot \Delta t=\frac{1}{4}\pi d^2h\cdot N\Delta t.$$

(11)

式中: V_1 为通道模型的体积,m³; d 为物理模型的内径,m; h 为物理模型的高度,m; Δt 表示烟尘通

过模型的时间,s, Δt 表达式为

$$\Delta t=\frac{h}{v_0}.$$

(12)

通道模型内,任意一对颗粒的碰撞频率 P_0 ^[12] 为

$$P_0=\sqrt{2}\pi(r_0+r_1)^2\parallel v_0-v_1\parallel N_0.$$

(13)

式中: r_0,r_1 分别表示相互碰撞颗粒的半径,m; v_0,v_1 分别表示相互碰撞颗粒的速度,m/s. 根据统计学原理,烟尘颗粒在通道模型内的总碰撞次数 N^* 为

$$N^*=\frac{1}{2}P_0N_0.$$

(14)

3 计算结果与分析

常见的蜂窝体材质为莫来石,转炉烟尘的成分主要是 FeO. 颗粒与壁面的摩擦系数 $\mu=0.68$, 颗粒之间的摩擦系数 $\mu=0.3$. 其他相关数据的取值如表 1 所示.

表 1 相关材料的性能值
Table 1 Properties for related materials

材料	密度 g·cm ⁻³	比热容 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	导热系数 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	杨氏弹性模量 GPa	泊松比	表面能 J·m ⁻²
FeO	5.75	725	3.2	87.3	0.24	1.060
莫来石	3.03	1024	3.83	69	0.28	0.567

转炉烟尘颗粒之间或者颗粒与壁面碰撞产生的能量,根据式(1)~式(4),计算结果如图 2 所示.从图中可以看出,烟尘颗粒之间或者颗粒与蜂窝体壁面碰撞产生的能量都随着烟尘颗粒粒径的增加而增大,这是由于烟尘颗粒粒径越大,两种碰撞时的有效半径越大,产生的碰撞能量随之增加.从图中还可以看出,烟尘颗粒与蜂窝体壁面的碰撞能要大于烟尘颗粒之间的碰撞能,这是因为烟尘颗粒与蜂窝体壁面碰撞时的有效半径较大,从总体看,两种碰撞产生的碰撞能在 10⁻¹² J 数量级.

烟尘颗粒之间的摩擦及烟尘颗粒与蜂窝体壁面之间的摩擦产生的热量,根据式(5)~式(9),计算结果如图 3 所示.从图中可以看出,颗粒与壁面的摩擦或者颗粒之间的相互摩擦产生的热量,都随着颗粒粒径的增加而增大,其原因是烟尘颗粒粒径越大,两种摩擦的有效半径就越大,摩擦产

生的热量增加.另外,颗粒与壁面的摩擦产生的热量比颗粒之间的摩擦产生的热量要大,这与颗粒与壁面摩擦的有效半径相对较大有关.但是从总体看,两种摩擦产生的能量在 10⁻¹⁰ J 数量级.

汽化冷却烟道出来的转炉煤气中烟尘的质量浓度一般为 70~150 g/m³.重庆大学肖丽^[13]测定了转炉烟尘颗粒平均粒径 $d_0=32.15\text{ }\mu\text{m}$.选取粒径 $d_0=32.15\text{ }\mu\text{m}$,烟尘质量浓度 $C_1=150\text{ g/m}^3$,现假设蜂窝体通道模型的高度 $h=1\text{ m}$,烟尘的速度 $v_0=20\text{ m/s}$.将上述数据代入式(10)~式(14),得到多颗粒碰撞能量和摩擦热量随蜂窝体孔径变化规律,如图 4 所示.从图中可以看出,碰撞能量和摩擦热量随蜂窝体孔径的增加而增加,这是因为随着孔径增加,通道模型内的转炉烟尘颗粒总数增加,碰撞频率也随之增加.从总体看,摩擦热量远大于碰撞能量,且颗粒与壁面的摩擦热量大于颗粒与颗粒之间的摩擦热量.

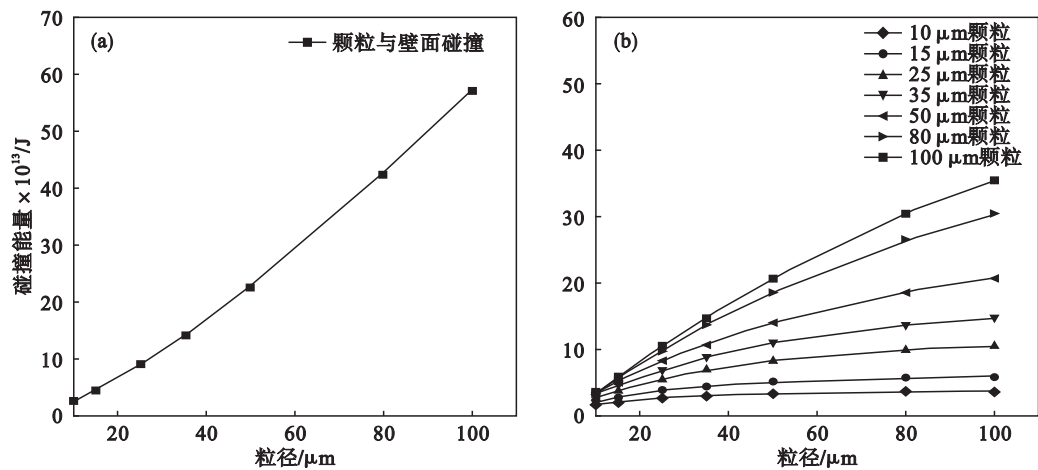


图 2 碰撞能量理论值
Fig. 2 Theoretical values of impact energy
(a)—颗粒与壁面碰撞；(b)—颗粒与颗粒碰撞.

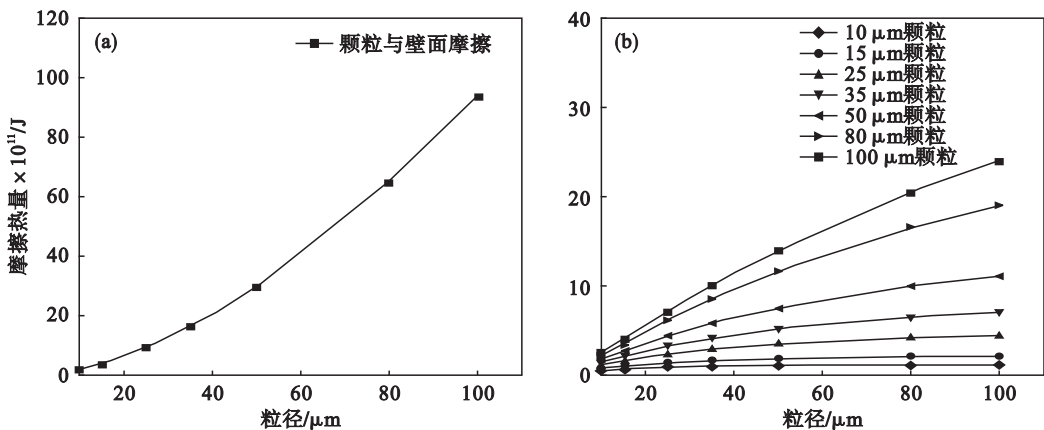


图 3 摩擦热量理论值
Fig. 3 Theoretical values of friction heat
(a)—颗粒与壁面摩擦；(b)—颗粒与颗粒摩擦.

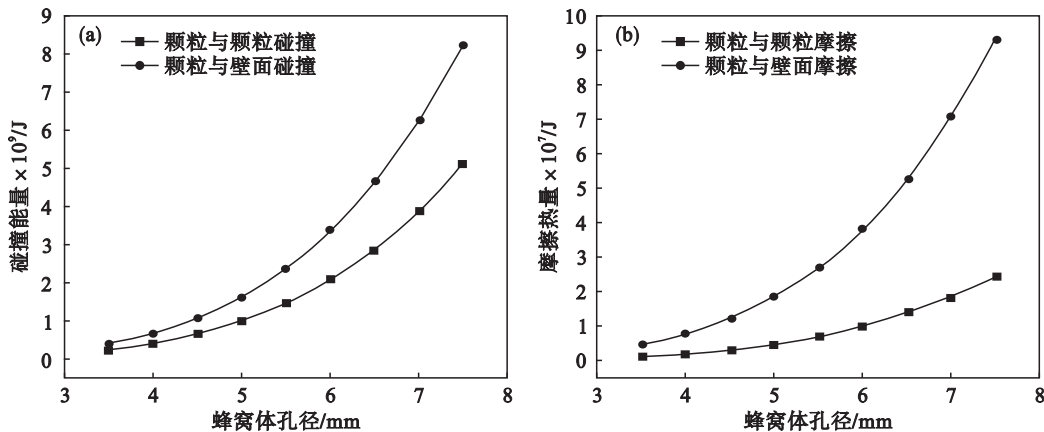


图 4 多颗粒相潜在点火源能量
Fig. 4 Potential ignition energy of multi-particle phase
(a)—多颗粒相碰撞能量；(b)—多颗粒相摩擦热量.

4 实验测定

利用自行搭建的最小点火能测量系统测定 (298 K, 1.01×10^5 Pa) 转炉煤气的最小点火能.

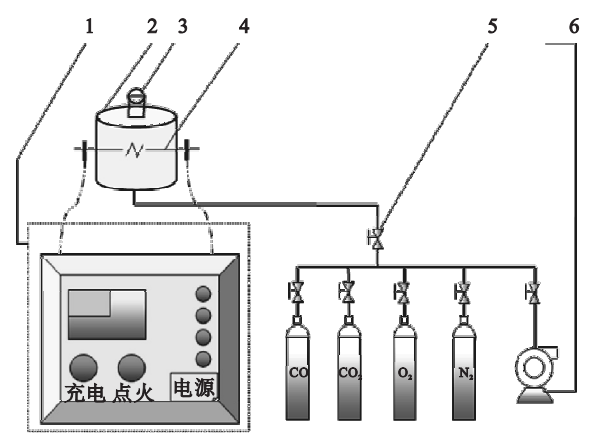
实验系统如图 5 所示. 实验系统主要由进气系统、点火系统和反应容器三大部分构成.

1) 进气系统. 进气系统主要包括 CO , CO_2 , N_2 , O_2 储气瓶和真空泵, 4 种气体的体积分数均为 99.99%, 进气速率采用针阀调节, 待气体配置

完成之后,静止 5 min,使气体混合均匀.回收期的转炉煤气中含有体积分数 60% ~ 80% 的 CO,实验工况需配置 3 种典型的转炉煤气,其成分如表 2 所示.

2) 电点火系统.电火花发生器是电点火系统的核心部件,通过储能电容在电极的两端进行放电,产生不同能量的静电火花.

3) 反应器.反应器用有机玻璃制成,容积为 0.3 L,在其两侧装入电极,其上部装有安全阀.



1-充电点火设备;2-反应器;3-安全阀;4-电极;5-阀门;6-真空

图 5 最小点火能测定系统图

Fig. 5 Diagram of MIE measuring

表 2 测定转炉煤气点火能实验工况 (体积分数)				
Table 2 Experimental conditions of MIE of converter gas (volume fraction)				
%				
编号	CO	CO ₂	N ₂	O ₂
1	62.8	24.3	12.6	0.32
2	69.6	23.3	6.9	0.2
3	78.0	17.2	4.6	0.2

Williams 根据能量守恒定律,通过判断着火的内在依据,推导出最小点火能的理论计算公式为^[14]

$$E_{\min} = \alpha \frac{d^2 \lambda_{\text{av}} (T_{\infty} - T_0)}{S_0}.$$

(15)

其中: α 表示经验修正系数,因为电火花提供的最小点火能 E_{\min} 不一定恰好使转炉煤气升高到绝热火焰温度 T_{∞} ,而是往往比 T_{∞} 高,所以用 α 修正; λ_{av} 为平均导热系数, $\text{W/m}\cdot\text{K}$; T_0 为转炉煤气的初始温度, K ; S_0 表示转炉煤气层流火焰传播速度, m/s ; T_{∞} 及 S_0 均使用 CHEMKIN 软件计算; d 为冷熄距离, m ,其表达式为

$$d = \frac{a \lambda_{\text{av}}}{c_p \rho_0 S_0}.$$

(16)

式中: a (近似为 40) 为不强烈依赖于系统的倍数因子; c_p 是转炉煤气的定压比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; ρ_0 是转炉煤气的密度, g/cm^3 .

通过实验值与理论值的对比,并拟合数据,得到公式修正系数 α 为 0.909. 图 6 表示经过修正之后使用理论公式计算得到的 3 种转炉煤气最小点火能与实验测定值的对比曲线,从图中可以看出,3 种转炉煤气的最小点火能都随着化学当量比 Φ_{CO} 的增加呈现先下降后上升的趋势,且最小点火能均出现在化学当量比为 1.5 左右.这是因为点火能的大小与燃料发热量有关,当化学当量比较小时,燃料中含有的惰性气体成分较多,导致燃烧过程中产生的热量较少,而火焰核传播过程中会因传热和辐射造成能量损失,当能量损失大于燃烧产热时,火焰无法持续,因而随化学当量比降低,点火能量增加.随着化学当量比继续增加,达到富燃时,转炉煤气最小点火能量呈上升趋势.这是因为火焰核持续膨胀过程中遇到局部化学当量比超过富可燃极限,导致最小点火能增加.从图中可以看出,3 种转炉煤气最小点火能的实验值与理论修正值吻合得很好,相对误差小于 10%,在工业允许误差范围之内,所以经过修正的理论公式可用于转炉煤气最小点火能的计算.

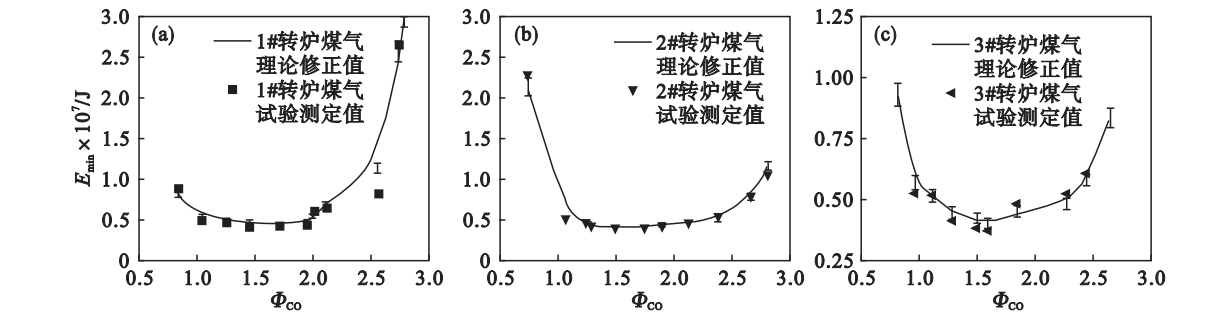


图 6 转炉煤气理论修正值与实验值对比

Fig. 6 Comparison of theoretical and experimental values of MIE of converter gas

(a)—1#转炉煤气最小点火能; (b)—2#转炉煤气最小点火能; (c)—3#转炉煤气最小点火能.

图 7 是利用式(15)计算得到的 3 种转炉煤气在着火点(973 K)时的最小点火能与 CO 化学当量比的关系。从图中可以看出高温下 3 种转炉煤气的最小点火能与常温条件下变化趋势是一样的。但随着温度的增加转炉煤气最小点火能降低, $T=973\text{ K}$ 时数量级为 10^{-7} J 。3 种转炉煤气的最小点火能分别为: 7.36×10^{-7} , 6.26×10^{-7} , $6.01 \times 10^{-7}\text{ J}$ 。考虑蜂窝体蓄热室回收转炉煤气的安全性,蜂窝体内的潜在点火源能量(图 4)要小于转炉煤气的最小点火能。与图 4 对比可得,孔径小于 6 mm 的蜂窝体蓄热室是安全可行的。

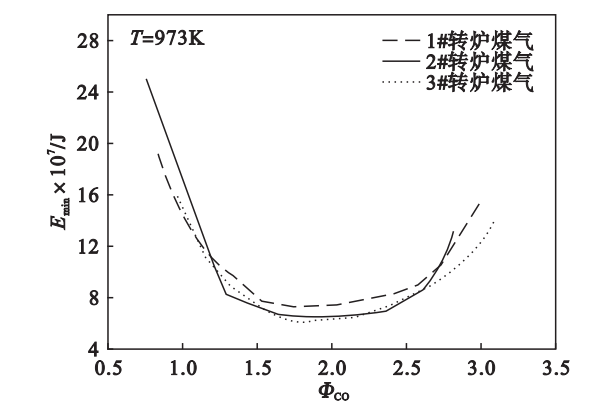


图 7 $T=973\text{ K}$ 3 种转炉煤气最小点火能理论值
Fig. 7 Theoretical values of MIE in three kinds of converter gas at 973 K

5 结 论

- 1) 在蜂窝体蓄热室通道内,转炉烟尘颗粒与壁面及颗粒之间的碰撞能、摩擦热量都随着烟尘粒径的增大而增大,碰撞能在 10^{-12} J 数量级;摩擦热量在 10^{-10} J 数量级。
- 2) 蜂窝体通道内多颗粒烟尘潜在点火源能量随蜂窝体孔径的增大而增大,摩擦热量远大于碰撞能量,且颗粒与壁面的摩擦热量大于颗粒之间的摩擦热量。
- 3) 转炉煤气的最小点火能随着 CO 化学当量比的增大先减小后增加,最小值在当量比为 1.5 左右;最小点火能理论计算式的修正系数为 0.909,修正后的理论公式可用于转炉煤气最小点火能的计算。
- 4) 计算转炉煤气在着火点温度(973 K)时,3 种转炉煤气最小点火能分别为 7.36×10^{-7} , 6.26×10^{-7} , $6.01 \times 10^{-7}\text{ J}$,与蜂窝体蓄热室中潜在的点火源能量比较得出,孔径小于 6 mm 的蜂窝体蓄热室是安全可行的。

参考文献:

[1] 于庆波,胡贤忠,刘军祥,等. 转炉煤气中温段干法净化和余热回收方法及系统:中国,201210127933.8[P]. 2012-08-22.
(Yu Qing-bo, Hu Xian-zhong, Liu Jun-xiang, et al. Method and system for dry purification and waste heat recovery of middle temperature section of converter gas; China, 201210127933.8[P]. 2012-08-22.)

[2] 刘改娟,吴仕明. 转炉炼钢余热回收技术及工艺方案研究[C] //冶金循环经济发展论坛论文集. 北京:冶金工业出版社,2008:248-249.
(Liu Gai-juan, Wu Shi-ming. Research for the processing plan of waste heat recovery in converter of steelmaking[C] //Proceedings for the Development of Metallurgical Recycling Economy. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008:248-249.)

[3] Maruoka N, Akiyama T. Exergy recovery from steelmaking off-gas by latent heat storage for methanol production[J]. *Energy*, 2006, 31(10):1632-1642.

[4] Maruoka N, Mizuochi T, Purwanto H, et al. Study for recovering waste heat in the steel making industry using a chemical recuperator[J]. *The Iron and Steel Institute of Japan International*, 2004, 44(2):257-262.

[5] Grune J, Breitung W, Kuznetsov M, et al. Flammability limits and burning characteristics of $\text{CO-H}_2\text{-H}_2\text{O-CO}_2\text{-N}_2$ mixtures at elevated temperatures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(31):9838-9846.

[6] Askari O, Moghaddas A, Alholm A, et al. Laminar burning speed measurement and flame instability study of $\text{H}_2\text{/CO/air}$ mixtures at high temperatures and pressures using a novel multi-shell model[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 168: 20-31.

[7] Shang R X, Zhang Y, Zhu M M, et al. Laminar flame speed of CO_2 and N_2 diluted $\text{H}_2\text{/CO/air}$ flames[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(33):15056-15067.

[8] Johnson K L, Kendall K, Roberts A D. Surface energy and the contact of elastic solids[J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 1971, 324(1558):301-313.

[9] Thornton C, Ning Z. Theoretical model for the stick/bounce behaviour of adhesive, latic plastic spheres[J]. *Powder Technology*, 1998, 99(2):154-162.

[10] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2008:336-354.
(Wen Shi-zhu, Huang Ping. Principles of tribology[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2008:336-354.)

[11] Valentin L. Popov. contact mechanics and friction: physical principles and applications[M]. Heidelberg: Springer, 2010: 133-154.

[12] Oesterle B, Petitjean A. Simulation of particle-to-particle interactions in gas-solid flows[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1993, 9(1):199-211.

[13] 肖丽. 转炉烟尘污泥再利用的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2001.
(Xiao Li. Study on reutilization of converter dust and sludge[D]. Chongqing: Chongqing University, 2001.)

[14] Williams F A. Combustion theory[M]. New York: The Benjamin/Cummings Publishing Company, 1985:265-284.