

辐射对气淬渣滴冷却换热的影响

卢宏伟 李俊国 张玉柱

(河北联合大学河北省现代冶金技术重点实验室,唐山 063009)

摘要 液态钢渣气淬粒化成功的关键在于粒化后液滴的快速冷却固化,渣滴冷却过程的传热方式主要为对流和辐射。在构建的渣滴冷却过程数学模型的基础上,利用 4 阶 Runge-Kutta 方法重点研究了辐射对渣滴冷却过程的影响规律。结果表明,渣滴冷却经历液相冷却成核、潜热释放和固相冷却 3 个阶段;在没有考虑辐射换热情况下,渣滴(质量分数: 29.94FeO、2.05Fe₂O₃、42.18CaO、9.33MgO、15.92SiO₂、2.09MnO、1.25Al₂O₃、2.24P₂O₅)在 293 K 氮气中由 1 723 K 降温至 1 073 K 需要 606 ms,比综合考虑对流和辐射时的冷却时间延长了 17.2%,说明在计算渣滴降温速率时辐射换热的影响不容忽视。

关键词 辐射 对流 气淬 渣滴 Runge-Kutta 法 数值求解

Effect of Radiation on Heat Exchange between Slag Droplet and Quenching Gas

Lu Hongwei, Li Junguo and Zhang Yuzhu

(Hebei Key Laboratory of Modern Metallurgy Technology, Hebei United University, Tangshan 063009)

Abstract The key step to cause the granulation of gas quenching molten slag is the granulated liquid slag droplet quick cooling and solidifying, and during slag droplet cooling process the main manners of heat transfer are convection and radiation. Based on established mathematical model for slag droplet cooling process, the rule of effect of radiation on slag droplet cooling process is emphasized studied by 4th order Runge-Kutta method. Results show that the slag droplets cooling are undergoing three phases including liquid phase cooling and nucleating, release of latent heat, and solid phase cooling; as the heat transfer through radiation is ignored, it takes 606 ms for temperature of slag droplet (mass fraction: 29.94FeO, 2.05Fe₂O₃, 42.18CaO, 9.33MgO, 15.92SiO₂, 2.09MnO, 1.25Al₂O₃, 2.24P₂O₅) in nitrogen at 293 K decreasing from 1 723 K to 1 073 K, as compared with that considering the cooling time simultaneously by convection and radiation, it increases by 17.2%. The results indicate that in calculating cooling rate of slag droplet the heat transfer through radiation can not be ignored.

Material Index Radiation, Convection, Gas Quenching, Slag Droplet, Runge-Kutta Method, Numerical Solution

现代钢铁企业的余热回收工艺日趋完善,而冶金渣余热是目前钢铁企业唯一没有进行回收利用的二次能源。液态钢渣显热丰富,其回收利用主要采用干法粒化方式^[1]。目前,对气淬粒化冷却过程的研究越来越多^[2,3],液态钢渣气淬后形成粒径较小的渣滴,高温液态渣滴与换热气体之间将通过辐射和对流两种方式进行热量交换,因此研究液态渣滴的换热过程对于熔渣气淬工艺的开发具有重要的理论价值^[4]。

在高速氮气气流作用下,液态渣滴的冷却过程包括液相冷却、潜热控制的形核再辉和固相冷却 3 个阶段。在每个冷却阶段,尤其是仍然处于高温的液相冷却和潜热释放阶段,对流和辐射两种换热方式都可能对渣滴与冷却气体间的换热起着重要作用。

目前,在分析温度较低熔滴冷却过程中,辐射换热是否在整个换热过程中占有一定的比例尚存在争议。例如,秦国义等^[5]认为银合金熔滴的冷却过程中,辐射换热量占总换热量的比例要小于 5%,可以忽略不计;而 Clyne 等^[6]则认为辐射换热占有率大于 5%时,换热过程为非牛顿换热,辐射换热对整个换热过程的影响不容忽视。

针对液态钢渣气淬形成的渣滴冷却过程,本文结合传热理论对气-液、气-固等冷却过程建立了数学模型,在对冷却凝固过程的进行常微分方程数学描述和简化的基础上,通过确定其初值,利用 4 阶 Runge-Kutta 方法,在 Matlab 中实现了常微分方程的数值求解,确定了液态渣滴温度随冷却时间的变化规律,重点分析了辐射换热量在总换热量中所占的比例,为冶金渣气淬工艺的开发提供参考。

1 液态渣滴冷却过程分析

1.1 气-液换热控制的液相冷却

假设高温渣滴以辐射和对流两种方式向冷却气体释放热量,根据斯蒂芬-波尔茨曼定律和牛顿冷却定律,可确定飞行过程中高温渣滴与冷却气体间的传热量,可用(1)式表示^[5]。

$$\rho V c_{pl} (dT_p/dt) = -\alpha A (T_p - T_g) - \sigma \varepsilon_e A (T_p^4 - T_g^4) \quad (1)$$

式中: V - 钢渣熔滴体积/ m^3 ; A - 钢渣熔滴表面积/ m^2 ; ε_e - 合金全发射率; σ - 黑体辐射系数/ $[W \cdot (m^2 \cdot K^4)^{-1}]$; ρ - 钢渣熔滴密度/ $(kg \cdot m^{-3})$; c_{pl} - 液态钢渣比热容/ $[J \cdot (kg \cdot K)^{-1}]$; α - 界面对流换热系数^[7]/ $[W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}]$; T_p - 钢渣熔滴温度/ K ; T_g - 环境气体温度/ K 。

将钢渣熔滴视为球形,(1)式可转换成(2)式^[8]:

$$\frac{dT_p}{dt} = -\frac{6[\alpha(T_p - T_g) + \sigma \varepsilon_e (T_p^4 - T_g^4)]}{\rho c_{pl} d_p} \quad (2)$$

式中: d - 渣滴直径/ m 。

(2)式表示了综合考虑对流和辐射换热两种方式的情况下,高温渣滴在冷却过程中的温降速率。假设不考虑辐射换热方式,渣滴温降速率可简化为(3)式。

$$\frac{dT_p}{dt} = -\frac{6\alpha(T_p - T_g)}{\rho c_{pl} d_p} \quad (3)$$

1.2 潜热释放影响的形核和再辉过程

在熔滴温度冷却到液相线温度并达到一定过冷度后,熔滴逐渐形核并开始凝固,形成固液两相。在渣滴中形核并开始有固相生成过程中,熔渣潜热将释放,从而降低了渣滴的冷却速率。假设同时考虑对流和辐射两种方式,熔滴的温降速率可由(4)式表示。

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{\Delta H_f}{c_{pls}} \frac{df}{dt} - \frac{6[\alpha(T_p - T_g) + \sigma \varepsilon_e (T_p^4 - T_g^4)]}{\rho c_{pls} d_p} \quad (4)$$

式中: ΔH_f - 融化潜热/ $(J \cdot m^{-3})$; c_{pls} - 固液混合体的比热容/ $[J \cdot (kg \cdot K)^{-1}]$; f - 固相分数。

(4)式右侧第1项为释放潜热引起的渣滴温度变化率;第2项为渣滴向环境释放热量引起的渣滴温度变化率。假设不考虑辐射换热,(4)式右侧第2项将简化,渣滴温降速率可以简化为(5)式。

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{\Delta H_f}{c_{pls}} \frac{df}{dt} - \frac{6\alpha(T_p - T_g)}{\rho c_{pls} d_p} \quad (5)$$

1.3 气-固换热控制的固相冷却过程

渣滴完全凝固成固相后,渣滴转变为渣粒,假设高温渣粒仍将以辐射和对流两种方式向冷却气体释放热量,熔粒的冷却速率可由(6)式计算。

$$\frac{dT_p}{dt} = -\frac{6[\alpha(T_p - T_g) + \sigma \varepsilon_e (T_p^4 - T_g^4)]}{\rho c_{ps} d_p} \quad (6)$$

式中: c_{ps} - 固态钢渣比热/ $[J \cdot (kg \cdot K)^{-1}]$;

假设不考虑辐射换热,渣粒的冷却速率可简化为(7)式。

$$\frac{dT_p}{dt} = -\frac{6\alpha(T_p - T_g)}{\rho c_{ps} d_p} \quad (7)$$

2 物性参数的确定

2.1 氮气物性参数

氮气导热系数 $k_g = 0.016 W/(m \cdot K)$; 氮气比热容 $c_{pg} = 1.0455 kJ/(kg \cdot K)$; 氮气运动粘度 $\mu_g = 11.42 \times 10^{-6} Pa \cdot s$; 氮气密度 $\rho_g = 1.9784 kg/m^3$; 进行数值计算时,冷却气体氮气的初始温度初定为 $T_g = 293 K$, 计算考虑渣滴在粒化过程中将在氮气中飞行,二者的相对速度选为 $u = 50 m/s$ 。

2.2 熔渣物性参数

2.2.1 钢渣熔滴的相关参数

液态钢渣参数确定过程中需要利用实验用钢渣成分,通过成分分析可知气淬钢渣成分如表1所示。

表1 实验钢渣成分/%
Table 1 Ingredient of test slag /%

FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	MnO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅
24.94	2.05	42.18	9.33	15.92	2.09	1.25	2.24

根据熔渣的实际情况,在数值计算过程中初定各参数为:熔渣密度 $\rho = 3272.02 kg/m^3$; 钢渣的动力粘度 $\mu = 0.5 Pa \cdot s$; 黑度 $\varepsilon = 0.9$; 钢渣液相线温度初定为 $T_m = 1300 \text{ }^\circ\text{C} = 1573 K$; 熔化潜热 $\Delta H_{f,m} = 209.20 kJ/kg$; 钢渣组分的扩散系数 $D_0 = 1 \times 10^{-10} m^2/s$; 原子跃迁穿过固液界面的激活能 $\Delta G_{am} = 3.65 \times 10^{-20} J/mole$; 分子体积 $V_m = 17.4404 \times 10^{-29} m^3/mole$; 分子有效直径 $d_m = 5.5 \times 10^{-9} m$; 为简化计算将钢渣液态、固态、固液混合比热容初定为 $c_{pl} = c_{ps} = c_{pls} = 1.247 kJ/(kg \cdot K)$ 。

2.2.2 其它相关参数

熔渣初始温度初定为 $T_p = 1723 K$; 熔渣形核温度 $T_n = 1623 K$; 凝固时的过冷度取为 $0.18 T_m$ ^[9,10],

即过冷度 $\Delta T = 0.18 \times T_m = 283.14$ K; 根据液态钢渣气淬粒化热态试验结果, 渣滴直径取热态试验的统计平均值 $d_p = 0.8 \times 10^{-3}$ m。

Stefan-Boltzmann 常数 $\sigma = 5.669 \times 10^{-8}$ W/(m² · K⁴); Boltzmann 常数 $k_b = 1.3806505 \times 10^{-23}$ J/K。

3 数学模型的建立

将氮气、熔渣和其它相关参数代入(2)式至(7)式, 可分别确定不同冷却阶段渣滴或渣粒的冷却速率方程。令 $x = t, y = T$, 得 $y' = \frac{dT}{dt}$, 可将

综合考虑对流和辐射两种换热方式下的传热方程(2)、(4)和(6)式分别转化为描述渣滴冷却过程的数学模型, 如(8)和(9)式所示。

$$y' = -0.9589 \times 10^{-10} y^4 - 1.7801y + 522.2667 \quad (8)$$

$$y' = 22876.722 \times \left[\exp\left(\frac{-2643.6814}{y}\right) - \exp\left(\frac{-4165.8293}{y}\right) \right] + 522.2667 - 1.7801y - 0.9589 \times 10^{-10} y^4 \quad (9)$$

假设不考虑辐射换热方式, 传热方程(8)和(9)式可转化为(10)和(11)式。

$$y' = -1.7801y + 522.2667 \quad (10)$$

$$y' = 22876.722 \times \left[\exp\left(\frac{-2643.6814}{y}\right) - \exp\left(\frac{-4165.8293}{y}\right) \right] + 522.2667 - 1.7801y \quad (11)$$

4 数值求解

(8)式至(11)式为非线性常微分方程, 利用 Matlab 软件, 采用 4 阶 Runge-Kutta 法可进行数值求解, 从而确定渣滴的温降速率。由于渣滴冷却过程中, 液相冷却、形核与再辉(潜热释放阶段)和固相冷却为连续过程, 因此将(8)至(11)式求解的结果分别进行合并, 采用 Origin 软件, 确定出综合考虑辐射和对流两种换热方式下、不考虑辐射换热方式下的渣滴温度随冷却时间的变化规律, 及渣滴冷却速率曲线, 如图 1 所示。

如图 1 可见, 在考虑辐射和没有考虑辐射的条件下, 渣滴冷却趋势表现的非常一致。如在数值计算初始条件设定中, 钢渣液相线温度初定为 1 573

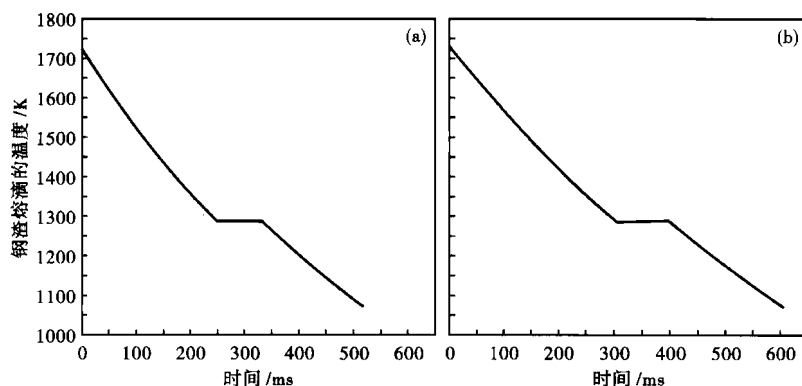


图 1 综合考虑辐射和对流换热(a)以及只考虑对流(b)时渣滴的冷却曲线
Fig. 1 Curves of slag droplet cooling with simultaneously considering radiation and convection heat transfer (a) and with only considering convection (b)

K, 凝固时的过冷度取 283.14 K, 因此无论是否考虑渣滴冷却过程中的辐射换热影响, 渣滴在冷却至约 1 290 K 时冷却曲线出现平台, 这意味着渣滴冷却至 1 290 K 时开始进入潜热释放控制的形核和再辉阶段。如果渣滴潜热释放的热量 Q_1 与渣滴向外释放的热量 Q_2 近于相等, 渣滴温度即趋于形成一条水平直线。

由于钢渣导热能力较低, 液态渣、固相的热导率分别只有 0.1 ~ 0.3 W/(m · K) 和 1 ~ 7 W/(m · K)^[11], 因此渣滴凝固形核速率相对较慢, 单位时间释放的潜热相对较少, 因此渣滴冷却曲线并未表现出液态金属冷却过程所表现出的显著的再辉现象^[8]。在潜热释放阶段, 渣滴温度也没有呈现上升的趋势。

为了比较辐射换热对渣滴冷却过程的影响规律, 对两种条件下渣滴不同冷却阶段所需要的冷却时间进行统计, 如表 2 所示。

表 2 渣滴不同冷却阶段所需时间
Table 2 Cooling time of slag droplet in different phase

项目	液相冷却	形核再辉	固相冷却	冷却时间
不考虑辐射换热/ms	306	93	207	606
综合考虑对流和辐射换热/ms	249	83	185	517
二者偏差/%	22.9	12.0	11.9	17.2

注: 冷却时间为 1 723 K 渣滴冷却至 1 023 K 的渣粒所需总时间。

由表 2 可以看出, 与综合考虑对流和辐射两种换热方式相比, 只考虑对流换热情况下, 液相冷却、潜热释放的形核和再辉、固相冷却阶段需要的时间分别延长了 22.9%、12.0% 和 11.9%, 呈现出温度越高, 该阶段辐射换热所占的比重越大的趋势, 这与

斯蒂芬-波尔茨曼定律给出的辐射换热与温度的四次方相关是一致的。综合来看,1 723 K 渣滴冷却至 1 023 K 成为固态渣粒的过程中,如果不考虑辐射换热的影响,渣滴的冷却时间将延长至 606 ms,比综合考虑对流和辐射换热的冷却时间延长了 17.2%。这说明在研究 1 723 K 渣滴冷却过程时,由于温度较高,辐射换热不容忽视,这与梁红玉等^[12]和秦国义等^[5]研究的对象不同,忽略辐射换热后对整个换热过程影响较小有较大区别。Clyne 等^[6]曾提出采用辐射换热占有率 Bi 作为辐射换热在整个换热过程中是否具有重要影响的判据,根据本文给出的初始条件和边界条件,在 1 723 K 渣滴冷却过程中,辐射换热占有率 Bi 为:

$$Bi = \frac{\varepsilon\sigma(T_p^4 - T_g^4)}{\alpha(T_p - T_g)} = \frac{5.669 \times 10^{-8} \times 0.9 \times (1723^4 - 293^4)}{947.0911 \times (1723 - 293)} = 33.17\%$$

由此可见,1 723 K 渣滴冷却过程中, Bi 远远大于 5%,说明熔渣与冷却气体间的换热为非牛顿换

热,辐射换热所占的比例不容忽视,其判断结果与本文数值计算结果一致。因此,可以确定辐射换热在高温渣滴冷却过程中占有重要的地位,计算其温降速率时不能省略。

5 结论和分析

(1)渣滴凝固形核速率相对较慢,单位时间释放的潜热相对较少,渣滴冷却曲线并未出现显著的再辉现象。

(2)随着渣滴温度降低,辐射换热在渣滴换热过程中的影响逐渐降低,在液相冷却、形核再辉和固相冷却阶段,辐射换热分别占整个换热量的 22.9%、12.0% 和 11.9%。

(3)由于渣滴温度较高,在计算渣滴温降速率时辐射换热的影响不容忽视,渣滴由 1 723 K 降温至 1 073 K 形成渣粒的过程中,辐射换热占整个换热量的 17.2%。

973 专项资助项目(2008CB617602),国家科技支撑计划资助项目(2008BAE67B00)

参考文献

- 李伟峰. 转炉钢渣的理化性质及资源化研究:[硕士论文]. 北京:北京化工大学,2008
- 龙跃,魏航宇,王少宁,等. 液态钢渣处理工艺选择的模拟研究. 冶金能源,2010,29(1):37
- 王晓娣,邢宏伟,张玉柱. 钢渣处理方法及热能回收技术. 河北理工大学学报,2009,31(1):115
- Li Junguo, Lu Hongwei, Zhang Yuzhu. Cooling Mechanism of the Steel Slag Droplet Granulated by Gas Quenching Method. Advanced Materials Research,2011,233-235:870
- 秦国义,赵怀志,宁远涛. 超音速电弧喷射雾化银合金熔滴的传热与冷却. 贵金属,2008,29(2):1
- Clyne T W. Numerical Treatment of Rapid Solidification. Metall Trans B,1984,15:369
- 傅晓伟,张济山,孙祖庆. 喷射沉积过程的计算模型及优化软件. 金属学报,1999,35(2):147
- 李会平, Tsakirooulos P. 旋转盘离心雾化熔滴飞行动力学与凝固进程. 中国有色金属学报,2006,16(5):793
- 高玉来,官万兵,翟启杰,等. 金属微滴快速凝固的过冷度研究. 中国科学 E 辑. 技术科学,2006,36(1):24
- 梁国宪,王尔德,霍文灿. 金属凝固过冷度与热物性参数的关系. 材料科学进展,1991,5(4):276
- Bisio G. Energy Recovery From Molten Slag and Exploitation of the Recovery Energy. Energy,1997,22(5):501
- 梁红玉,毛协民,胡志恒. 雾化 Al-Si 合金液滴冷却凝固过程模拟. 铸造技术,2007,28(3):367

卢宏伟(1984-),男,硕士研究生,2012年河北联合大学毕业,炼钢新工艺研究。

收稿日期:2011-11-16

下期要目

- | | |
|---|------|
| 渣中游离氧化钙碳酸化反应的数值模拟 | 刘坤等 |
| 120 t 钢包底吹氩工艺水模型研究 | 周俐等 |
| 渣成分对冶炼 28MnCr5 齿轮钢时 CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -MgO 精炼渣系熔点的影响 | 梁娜等 |
| 五流大方坯中间包控流装置优化的数值和物理模拟 | 罗荣华等 |
| 二辊斜轧延伸 9Cr-1Mo 钢厚壁管内表裂纹形成倾向性模拟研究 | 尹元德等 |
| 非金属夹杂物对无取向硅钢磁性能的影响 | 张峰等 |
| 钢包自开率的影响因素及改善措施 | 苏春阳等 |
| 提高 80 t 钢包自动引流率的工艺实践 | 周国子 |
| 650 轧机新型导轮用钢 Cr12MoV 的研制与应用 | 吴玉峰等 |