

不同冷却环境下的电石温度场数值模拟

方立军¹ 杨欢¹ 赵京² 魏小林³

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院 河北 保定 071003; 2. 中国科学院大学 工程科学学院 北京 100049;
3. 中国科学院力学研究所 北京 100190)

摘要: 针对电石坨冷却速度较慢的问题,应用气固换热理论与 ANSYS 软件,建立电石在传统冷却环境和实验冷却环境下的换热模型,并对电石冷却过程进行数值模拟,得到电石从电石锅内凝固冷却到出锅后经历自然对流与辐射换热耦合或强制对流冷却方式时温度的变化规律。结果表明,模拟结果与实验结果具有良好的一致性,以此模型为基础进行数值计算,确定了电石在实验条件下的最快冷却方式,即电石在传统冷却工艺下经历 8.6 h,进入电石罩进行风冷,在电石表面平均风速为 2.85 m/s 时,继续冷却 15.23 h 后即可达到破碎要求,这使电石冷却过程较传统缩短了 12.17 h。分析不同风速下电石的冷却速度,随着风速的增加,电石冷却速度加快,当冷却风速为 10.5 m/s 时,电石整体冷却时间为 21.02 h。

关键词: 电石; 数值模拟; 区域网格; 温度场

中图分类号: TK11 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2018.11.013

Numerical Simulation on Temperature Field of Calcium Carbide under Different Cooling Conditions

FANG Li-jun¹, YANG Huan¹, ZHAO Jing², WEI Xiao-lin³

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003;
2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100049;
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing, China, Post Code: 100190)

Abstract: For the slow cooling rate of calcium carbide, a heat transfer model of calcium carbide is built based on fluid-solid heat transfer theory and ANSYS numerical simulation. The heat transfer process of calcium carbide under different cooling conditions is studied, from the solidification in pot to the forced convection cooling or coupled cooling by natural convection and radiation, and the temperature variation trend of calcium carbide is obtained. According to the field experiment in a calcium carbide factory in northwestern China, the trend of calcium carbide temperature variation is validated in the ANSYS simulation. With this validated model, the optimum cooling time can be determined by the numerical calculation. That is, after 8.6 hours of cooling time in traditional mode, the calcium carbide is delivered to the wind-cooling device. And then with 2.85 m/s of the average wind velocity on the calcium carbide surface of, and 15.23 hours of wind cooling, the calcium carbide can meet the requirement of crush. The cooling time is saved by 12.17 hours with this optimum condition, compared to the traditional method. Furthermore, the cooling rate of calcium carbide under different wind speeds is also analyzed by this model. The results show that the cooling rate of calcium carbide accelerates with wind speed. When the cooling wind speed is

收稿日期: 2017-08-09; 修订日期: 2017-12-13

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0601501)

Fund-supported Project: National Key R&D Program of China(2016YFB0601501)

作者简介: 方立军(1971-),男,河北保定人,华北电力大学副教授。

通讯作者: 魏小林(1967-),男,陕西宝鸡人,中国科学院力学研究所研究员。

10.5m/s the entire cooling time of calcium carbide is 21.02 h.

Key words: calcium carbide numerical simulation area grid temperature field

引 言

电石作为重要的化工原料,其化学性质活泼,在乙炔生产、有机物合成及钢铁脱硫等领域具有重要作用。我国电石生产引进自动控制技术,然而出炉后的电石冷却过程仍为传统的自然冷却^[1-2],这种冷却方式较大地限制了电石的生产效率。以我国西北某电石厂为例,每隔 1 h 出炉的熔融电石,进入铺有造渣料的电石锅后,需在车间铁轨上放置 3 h,电石上表面温度降为 773 K 被送至冷却区,继续冷却 33 h,电石表面温度为 323 K,再进行破碎处理。

很多科研工作者对电石的生产工艺进行了深入研究^[3-7],但对电石出炉后的冷却工艺研究在国内仍处于空白。如何提高电石冷却效果、减少冷却时间是提高生产效率的关键。由于刚进锅的电石温度高达 2 273 K,且冷却过程伴随凝固,不宜对电石内部温度进行直接测量,如何通过数值模拟的手段来研究电石的冷却过程,并结合辐射换热和对流换热特性改变现有冷却方式,对加快电石的冷却速率具有现实意义。

通过 FLUENT 软件^[8],以凝固及流固耦合为基础建立模型,在计算过程中通过改变网格区域,完整地模拟出电石外界环境从电石锅到电石罩的转变。通过现场实验验证,该模型能够较好地模拟出电石冷却过程中的温度变化,为工厂车间的电石冷却工艺提供理论指导。

1 实验设备与方法

将刚出锅的电石移送至电石罩内并在电石罩一端鼓风,实现电石的强制对流冷却,其风冷实验系统简图如图 1 所示。该系统包含 4 部分:电石与电石罩、5.5 kW 风机、铠装 K 型热电偶与 L 型标准皮托管、安捷伦 34972 数据采集器与 XYFS-01 型便携式风压计。

其中,电石罩内径为 1 940 mm,高 1 520 mm,

进、出风口内径均为 340 mm,长 260 mm,电石坨上底直径为 1 340 mm,下底直径为 1 020 mm,高 600 mm。电石罩内壁铺设石棉作为隔热材料。通过在电石罩入风口处加装 5.5 kW 风机,对刚出锅的电石进行鼓风冷却,热空气从电石罩上端排出。通过在电石罩上表面多处开孔,将多个 K 型铠装热电偶通至电石坨上表面进行温度测量。出口处风温由装有辐射热遮蔽罩的 K 型热电偶测量,风速采用 L 型标准皮托管进行测量。数据记录仪表为安捷伦 34972 数据采集器与 XYFS-01 型便携式风压计。

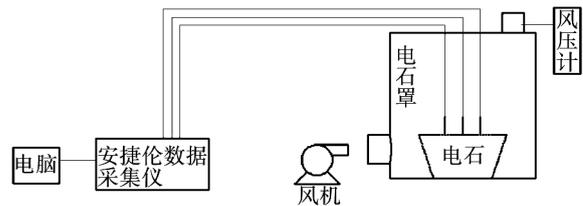


图 1 风冷实验系统

Fig. 1 Schematic diagram of air cooling experiment system

2 数值模拟

2.1 网格建立

为更好地得到电石冷却过程中表面及内部温度的变化情况,以电石锅及其外壳罩作为计算对象。应用 ICEM 软件建立网格,网格全部划分为六面体,整体网格质量在 0.45 以上,为加快计算速度,在不同区域采用不同网格密度,并经网格无关性验证,网格总数为 5.3 万,网格划分如图 2 所示。在建立网格过程中,通过定义不同区域实现数值计算过程中对不同区域网格的计算。

2.2 控制方程

气体连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \tag{1}$$

式中: ρ —流体密度, kg/m³; t —时间, s; u —速度矢量, m/s; x —坐标, 本文模型为三维 $j=1, 2, 3$ 。

气体动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \right] + g_i - f_i \quad (2)$$

式中: μ —流体粘性系数, Pa · s; g —流体在 i 方向上的体积力, N; f_i —作用在单位体积流体上的反方向阻力, N; P —流体的表面力矢量。

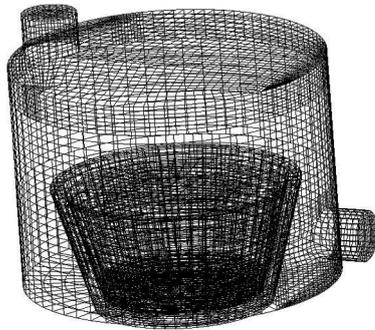


图 2 电石实验系统模型网格划分

Fig. 2 Grid division of calcium carbide experiment system

流体换热能量方程:

$$(\rho c_p)_f u \nabla T_f = h_v (T_s - T_f) \quad (3)$$

固体换热能量方程:

$$(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T) + q_s + h_v (T_s - T_f) \quad (4)$$

式中: T —温度, K; c —固体比热, J/(kg · K); c_p —气体定压比热, J/(kg · K); λ —固体导热系数, W/(m · K); q_s —固体热源, W; h_v —气固两相间的对流换热系数, W/(m² · K); ∇ —拉普拉斯算子; 下角标 s —固体; f —流体。

2.3 物性参数

在电石冷却过程中, 电石物性参数随温度发生变化, 为准确地模拟出电石的冷却过程, 需要对电石的相关物性参数与温度的函数关系进行编程。

空气粘度与温度的函数关系为:

$$u = -1.0118 \times 10^{-5} + 6.5701 \times 10^{-8} \times T + 6.4436 \times 10^{-11} \times T^2 + 2.2333 \times 10^{-17} \times T^3 \quad (5)$$

空气导热系数与温度的函数关系为:

$$\lambda_{air} = 2.2649 \times 10^{-3} + 8.85021 \times 10^{-5} \times T -$$

$$2.1528 \times 10^{-8} \times T^2 - 1.5567 \times 10^{-14} \times T^3 - 8.29 \times 10^{-18} \times T^4 \quad (6)$$

空气定压比热容与温度的函数关系为:

$$c_{p,air} = 955 + 0.14387 \times T + 3.8525 \times 10^{-5} \times T^2 + 2.1036 \times 10^{-10} \times T^3 + 1.2052 \times 10^{-13} \times T^4 \quad (7)$$

电石在锅内冷却过程中, 与外界环境的换热为自然对流和辐射换热, 其表面复合传热系数与温度的函数关系^[9]:

$$h_r = \varepsilon \sigma (T^2 + T_e^2) (T + T_e) + 1.24 (T - T_e)^{0.33} \quad (8)$$

式中: ε —外表面发射率, 电石外表面发射率取 0.85, 电石锅外表面发射率取 0.65; T —外表面温度, K; T_e —环境温度, K; σ —黑体辐射常数, 5.67×10^{-8} W/(m² · K⁴)。

电石锅为耐热铸钢, 其导热系数与温度的拟合函数为:

$$\lambda = 35.42577 + 0.00901 \times T - 1.53309 \times 10^{-5} \times T^2 + 2.68785 \times 10^{-10} \times T^3 \quad (9)$$

碳化钙定压比热容与温度的函数关系为^[10]:

$$c_{p,CaC_2} = 1070.48 + 185.38 \times 10^{-3} \times T - 135.117 \times 10^5 \times T^{-2} \quad 298 \text{ K} < T < 720 \text{ K} \quad (10)$$

$$c_{p,CaC_2} = 1005.21 + 130.55 \times 10^{-3} \times T \quad 720 \text{ K} < T < 2400 \text{ K} \quad (11)$$

碳化钙导热系数随温度的变化^[11]如表 1 所示。碳化钙其他参数如表 2 所示。

表 1 碳化钙导热系数随温度变化

Tab. 1 Thermal conductivity variation with temperature

温度/K	导热系数/W · (m · K) ⁻¹
298	19
773	21.5
1 273	5
1 773	8.9
2 273	12.9

表 2 碳化钙其他主要参数

Tab. 2 Other main parameters of calcium carbide

密度/kg · m ⁻³	熔点/K	凝固潜热/kJ · kg
2 220	2 273	503.63

3 结果与讨论

3.1 模型验证

利用该模型对传统冷却过程进行模拟,锅内电石初始温度设为 2 300 K,呈熔融态,电石锅和造渣料初始温度设为 320 K,环境为 300 K,模拟 3 h 的冷却过程,停止电石锅和造渣料区域温度场计算,同时改变电石坨边界条件,电石上表面和侧面与外界以自然对流和辐射换热耦合方式换热,底面绝热,继续进行电石散热计算。模拟计算数据与厂家数据对比如图 3 所示,得到的电石上表面温度变化与厂家数据基本一致,最大误差为 1.51%。

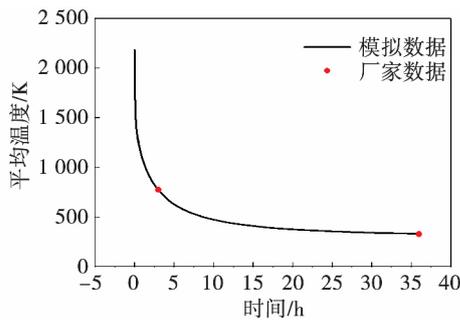


图 3 厂家数据与模拟数据对比

Fig. 3 Comparison of factory data and simulated data

利用模型对实验过程进行模拟,初始条件不变,模拟 3 h 的锅内冷却过程,改变网格计算区域,去除电石锅和造渣料区域网格,激活空气流域网格。计算冷却时间为 3 h 时,网格计算区域改变前后,电石及环境温度场变化如图 4 所示。为和实验测量时空气流场接近,空气入口温度设为 283 K,入口速度设为 8.5 m/s,出口边界设为压力出口,壁面绝热。

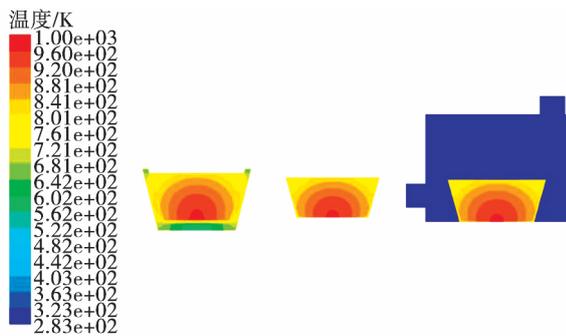


图 4 电石散热环境变化过程中温度分布

Fig. 4 Distribution of temperature field in the process of calcium carbide cooling

图 5、图 6 分别为 400 min 内通过模型计算得到的电石上表面平均温度和电石罩出口处风温与现场实验测得温度的对比。可以看出,计算结果与现场实验得到的温度变化趋势基本一致,很好地反映电石的冷却过程。为简化计算,模拟计算的出口处风速与实际出口处风速平均值相等,如图 7 所示。

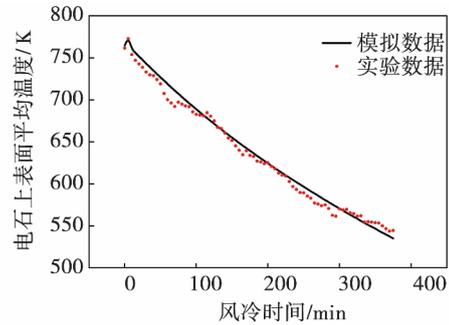


图 5 电石上表面平均温度变化

Fig. 5 Variation of mean temperature at the upper surface of calcium carbide

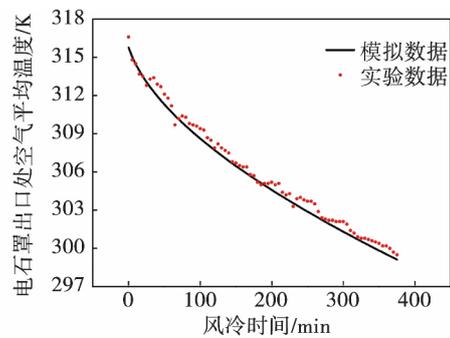


图 6 出口处空气温度变化

Fig. 6 Variation of mean air temperature at the outlet

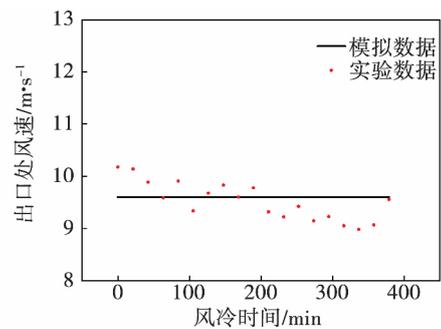


图 7 电石罩出口处平均风速变化

Fig. 7 Variation of mean air velocity at the outlet

3.2 结果分析

由图 3 可知,电石上表面温度下降速度随时间逐渐减慢,电石上表面温度从 384 K 降到 329 K 所用时间为 18 h,占全部冷却时间的 50%。由图 5 可知 3 h 后电石进入电石罩,其温度变化趋势也发生改变,实验测得的电石上表面温度在几分钟内先升高再降低,这是由于外界热阻增大,电石的散热量相对减少,随着冷却过程的深入,电石上表面温度继续降低;在电石罩内空气流场稳定后,电石上表面的温度变化趋势也趋于稳定,温度下降速率为 0.612 K/min。相对于自然对流和辐射换热耦合,温差的变化对强制对流换热系数的影响较小。空气被加热后最高温度为 316 K,这是由于空气流速较高,空气与电石间的换热面积较小。部分被加热的空气可被用于预热,进入电石炉前的反应物料。

3.3 风冷时间对冷却的影响

在进入电石罩之前,由于自然对流和热辐射作用,电石冷却速度较快,但随着冷却的深入,电石表面温度降低,使得电石与环境的换热量减少,使电石温度下降速率减少。在电石罩中,由于强制对流作用,电石表面冷却速率较为稳定。为得到电石风冷的最佳时间,通过计算得到了电石在传统冷却工况和实验冷却工况下、换热表面平均温度相同时,自然对流和辐射换热耦合的复合对流与强制对流两种冷却方式下平均换热系数,如图 8 所示。

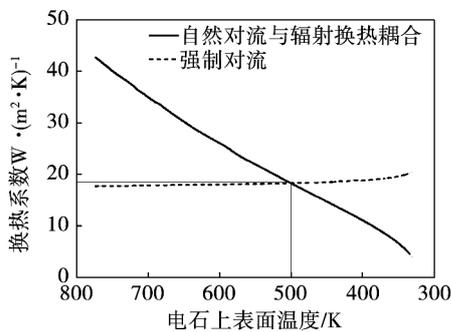


图 8 平均换热系数随温度变化

Fig. 8 Variation of mean heat transfer coefficient with temperature

由图 8 可知,当电石换热表面平均温度下降到 500 K 时,强制对流换热系数高于自然对流和辐射换热耦合的复合换热系数,因此相对于自然对流和

辐射换热耦合的换热方式,强制对流方式换热效果在电石表面平均温度下降到 500 K 时更加明显,而计算传统冷却过程到达此温度的时间为 8.6 h。为得到电石最快冷却方式,以 8.2、8.4、8.6 和 8.8 h 分别作为风冷开始时间,对冷却过程进行计算,得到电石整体冷却时间随风冷起始时间变化,如图 9 所示。由图 8、图 9 可知,风冷起始时间为 8.6 h 的工况,冷却效果最好,总冷却时间为 23.83 h,较传统冷却工艺下的 36 h,冷却过程减少了 12.17 h。

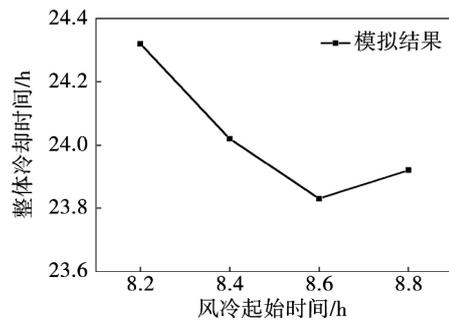


图 9 不同风冷时间对电石冷却的影响

Fig. 9 Influence of different air cooling time on the cooling of calcium carbide

3.4 风速对冷却的影响

为得到不同风速下的冷却效果,将电石罩入口边界速度设为 7.5、9.5 和 10.5 m/s,计算得到了电石在传统冷却工况和模拟冷却工况下、换热表面平均温度相同时,自然对流和辐射换热耦合的复合对流与强制对流两种冷却方式下电石散热表面平均换热系数,如图 10 所示。

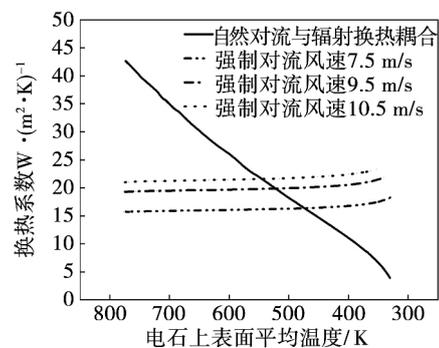


图 10 不同风速下平均换热系数随温度变化

Fig. 10 Average heat transfer coefficient variation under different wind speed

由图 10 可知,不同风速下,当对应电石换热表面平均温度下降到 476、520 和 543 K 时,强制对流换热系数高于自然对流和辐射换热耦合的复合换热系数,因此相对于自然对流和辐射换热耦合的换热方式,强制对流方式换热效果更加明显,而计算传统冷却过程到达此温度的时间为 9.77、7.84 和 7.04 h。以此时刻作为对应入口风速下的风冷时间,进行模拟计算,得到总冷却时间分别为 25、22.13 和 21.02 h。由此可知,随着风速的增加,电石冷却时间减少,当风速为 10.5 m/s 时,电石总冷却时间为 21.02 h。

4 结 论

(1) 以凝固、流固耦合换热模型为基础,通过改变网格区域,完整地模拟出电石传统的冷却过程及实验过程中外界环境从电石锅到电石罩的转变冷却过程,得到了电石温度场的变化规律。

(2) 以此模型为基础,提出了一种现有实验条件下的电石快速冷却方法即电石出锅,继续自然冷却 5.6 h,进入电石罩进行风冷,电石表面风速为 2.85 m/s。此方法使电石冷却过程缩短为 23.83 h。通过改变电石罩入口风速,电石冷却时间减少,当入口风速为 10.5 m/s 时,整体冷却时间为 21.02 h。此方法可以有效提高电石生产效率,减小电石场地占用空间,有助于改善工作环境。

参考文献:

- [1] 熊谟远. 电石生产及其深加工产品[M]. 北京: 化学工业出版社, 1989: 30-34.
XIONG Mo-yuan. Calcium carbide production and deep processing of products[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1989: 30-34.
- [2] 冯召海. 电石生产节能技术与工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 16-19.
FENG Shao-hai. Calcium carbide production and energy saving measures[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014: 16-19.
- [3] 王仁醒, 季雷鸣, 刘清雅, 等. 氧热法电石生产技术研发进展[J]. 化工学报, 2014, 65(7): 2417-2425.
WANG Ren-xing, JI Lei-ming, LIU Qing-ya, et al. Progress in research and development of calcium carbide production by oxygen heat method[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2014, 65(7): 2417-2425.
- [4] 辛彩芬, 钱新荣. 电石乙炔制化工产品路线评述[J]. 化学进展, 1994, (60): 80-81.
XIN Cai-fen, QIAN Xin-rong. The review of the chemical product route of calcium carbide acetylene[J]. Progress in Chemistry, 1994, (60): 80-81.
- [5] MULLER M B. Structure, properties and reactions of CaO in burnt lime. Part I: design of a new model of burnt lime[J]. Scand. J. Metall., 1990, 19: 64-70.
- [6] 李国栋. 焦炭和粉状氧化钙制备碳化钙新工艺的基础研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
LI Guo-dong. Fundamental study on a novel technology of CaC₂ production from fine coke and fine CaO[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011.
- [7] 刘振宇, 刘清雅, 李国栋, 等. 一种电石生产方法: CN101327928[P]. 2008-08-01.
LIU Zhen-yu, LIU Qing-ya, LI Guo-dong, et al. A method of calcium carbide production: CN101327928[P]. 2008-08-01.
- [8] FLETCHER C A J. Computational fluid dynamics: an introduction[M]. Germany: Springer, 2009.
- [9] 刘庄, 赵勇, 张沅, 等. 大钢锭凝固过称的温度场计算及缩孔预测[J]. 钢铁研究学报, 1993(1): 23-32.
LIU Zhuang, ZHAO Yong, ZHANG Yuan, et al. Calculation of temperature field and prediction of shrinkage cavity for large steel nails[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1993(1): 23-32.
- [10] Dean J A. 兰氏化学手册(中文版)[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 213-214.
DEAN J A. Lange's Handbook of Chemistry (Chinese version)[M]. Beijing: Science Press, 1991: 213-214.
- [11] 王彦龙. 电石导热系数反演及冷却过程仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
WANG Yan-long. Thermal conductivity inversion of carbide and simulation study of cooling process[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.

(王治红 编辑)