



电渣重熔 9CrMoCoB 钢过程电极表面 氧化行为及脱氧制度

彭雷朕^{1,2,3}, 姜周华³, 沈国劬¹, 耿鑫³, 邱国兴⁴, 王承¹

(1 二重(德阳)重型装备有限公司, 德阳 618000; 2 中国第二重型机械集团有限公司, 德阳 618000;

3 东北大学, 沈阳 110000; 4 西安建筑科技大学, 西安 710000)

摘要: 非保护气氛电渣重熔 9CrMoCoB 钢过程中, 电极表面氧化生成的氧化铁皮进入渣池, 导致渣池氧势升高, 造成金属熔池中易氧化元素发生严重烧损。为降低渣池氧势以提高易氧化元素收得率, 冶炼过程中需向钢中加入适量脱氧剂。首先利用热重分析仪研究了不同温度下 9CrMoCoB 钢高温氧化行为, 建立相应氧化动力学; 其次对试样氧化皮进行 XRD 和 SEM-EDS 分析; 最后基于上述实验和非保护气氛电渣重熔过程中电极表面温度分布, 提出较优脱氧制度。结果表明, 低温(500~700 °C) 9CrMoCoB 钢氧化增重量可忽略; 中温(900~1 000 °C) 氧化增重由快速氧化期的直线规律阶段和扩散控制的抛物线规律阶段两段组成; 高温(1 100~1 200 °C) 氧化增重呈抛物线规律。不同温度下, 9CrMoCoB 钢高温氧化速率 $k = \exp(44.1317 - \frac{40163.707}{46^{(h+0.33)} + 723.15})$; 氧化皮呈复层结构, 外层为铁的氧化物和内层为铁铬复合氧化物相; 冶炼过程中, 9CrMoCoB 电极(直径 75 mm) 每 5 min 带入渣池 FeO 为 9.02 g, 为完全还原带入的 FeO, 加入纯 Si 为 1.75 g, 可避免易氧化元素烧损, 可得到化学成分合格的电渣锭。

关键词: 非保护气氛电渣重熔; 电极氧化; 氧化皮; 脱氧工艺; 9CrMoCoB 钢

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00086 中图分类号:TF744

Oxidation Behavior of Electrode Surface and Deoxidation System During Electroslag Remelting 9CrMoCoB Steel

Peng Leizhen^{1,2,3}, Jiang Zhouhua³, Shen Guoqu¹, Geng Xin³, Qiu Guoxing⁴, Wang Cheng¹

(1 Erzong (Deyang) Heavy Equipment Co., Ltd., Deyang 618000, China; 2 China National Erzong Group Co., Ltd., Deyang 618000, China; 3 Northeastern University, Shenyang 110000, China; 4 Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: During the process of non-protective atmosphere electroslag remelting of 9CrMoCoB steel, Iron oxide scale generated from the oxidation of the electrode surface are introduced into the slag pool, as a result the oxygen potential of the slag pool increases and easily oxidized elements in the metal melt pool burns seriously. In order to reduce the oxygen potential of the slag pool and improve the yield rate of easily oxidized elements, appropriate deoxygenation agent should be added to the steel during the smelting process. Firstly, the high-temperature oxidation behavior of 9CrMoCoB steel at different temperatures was studied by using a thermogravimetric analyzer, and corresponding oxidation kinetics were established; Secondly, XRD and SEM-EDS analyses were conducted on the oxide scale of the sample; Finally, based on the above experiments and the temperature distribution on the electrode surface in the process of ESR in non protective atmosphere, a better deoxidation system was proposed. The results indicate that the weight gain at low-temperature oxidation (500-700 °C) can be ignored; The weight gain at medium temperature oxidation (900-1 000 °C) consists of two stages: the linear law stage of rapid oxidation period and the parabolic law stage of diffusion control; The weight gain during oxidation at high temperatures (1 100-1 200 °C) follows a parabolic pattern. At different temperatures, the high-temperature oxidation rate of 9CrMoCoB steel is $k = \exp(44.1317 - \frac{40163.707}{46^{(h+0.33)} + 723.15})$. The oxide skin has a layered structure, with an outer layer of iron oxide and an inner layer of iron chromium composite oxide phase. During the smelting process, the 9CrMoCoB electrode (diameter 75 mm) is introduced into the slag pool with a FeO content of 9.02 g every 5 minutes. To completely reduce the introduced FeO, the addition of pure Si is 1.75 g, which can avoid readily oxidizing elements burning and obtain qualified chemical composition of the electric slag ingots.

Key Words: Non Protective Atmosphere Electroslag Remelting; Electrode Oxidation; Oxide Scale; Deoxidation Process; 9CrMoCoB Steel

基金项目: 德阳市科技计划(2022GZ004)

作者简介: 彭雷朕(1990—),男,博士研究生,高级工程师;

E-mail: neuwindqishi@163.com;

收稿日期: 2023-05-22

非保护气氛电渣重熔9CrMoCoB钢,电极表面高温氧化生成的氧化铁皮会随电极熔化进入渣池,导致渣池中FeO升高,同时空气中O₂也会通过熔渣中不稳定氧化物(FeO)作为媒介进入渣池,使渣池氧势升高^[1-2]。在严格控制电极O及熔渣中不稳定氧化物含量后,非保护气氛电渣重熔过程中,渣池氧势的升高主要由电极表面高温氧化生成的氧化铁皮引起^[3-4]。高温下金属的氧化是一个非常复杂的过程,可通过测量金属在相同温度下不同氧化时间,或不同温度下相同氧化时间后单位面积氧化增重量,来衡量金属氧化速率快慢^[5-6]。一般在氧化初期,氧化膜还未完全覆盖金属基体时,单位面积氧化增重量与时间呈直线规律^[7],此时,氧化增重的限制环节为空气中O₂与金属基体表面的化学反应速率。氧化膜完全覆盖金属基体表面,氧化增重限制环节是O₂或金属离子在氧化层中的扩散,此时,单位面积氧化增重量与时间为抛物线规律^[7]。鉴于国内电渣炉多为非保护气氛电渣炉,且前人尚未对非保护气氛电渣重熔过程脱氧制度进行理论研究,因此,本文拟首先对9CrMoCoB钢的高温氧化行为进行研究,以确定非保护气氛电渣重熔9CrMoCoB钢时带入渣池中FeO,最终制定合适的脱氧制度,为电渣重熔9CrMoCoB钢实践提供理论参考。

1 实验材料及方法

利用高温热重分析仪NETZSCH Instrument TG (STA409CD, NETZSCH-Gerätebau GmbH, Germany)进行9CrMoCoB钢高温氧化实验。实验钢化学成分见表1。高温氧化实验用钢样尺寸为 $\phi 2\text{ mm}\times 3\text{ mm}$,待热重分析仪称重系统稳定后,以10 °C/min升温至设定温度,升温全程以50 mL/min通入高纯氩气(纯度为99.999%)进行气体保护,升温至设定温度后恒温5 min,通入50 mL/min合成干燥空气,进行高温氧化实验。实验过程中,实时记录钢样质量随时间的变化。恒温实验结束后,再次向加热炉内通入50 mL/min高纯氩气,炉温降低至350 °C后,关闭电源和气体保护,开启炉盖,取出样品。

按照上述实验方法,分别进行500、700、900、1 000、1 100、1 200 °C干燥空气条件下连续氧化增重

实验。样品氧化前质量记为 m_0 , mg;样品表面积记为 A , cm²;某一温度、某一氧化时间下样品质量为 m , mg,则氧化增重量 ΔW 为 $(m-m_0)$, mg;单位面积氧化增重量($\Delta W/A$)为 $[(m-m_0)/A]$, mg/cm²。

2 实验结果与分析

2.1 9CrMoCoB钢氧化增重

9CrMoCoB钢在不同温度条件下的单位面积氧化增重与氧化时间的关系,如图1所示。

由图1看出,当 $T\leq 700\text{ °C}$,9CrMoCoB钢氧化120 h,氧化增重约0.23 mg/cm²(500 °C为0.233 mg/cm²、700 °C为0.235 mg/cm²)。随氧化时间增加,氧化增重量逐渐稳定。因此,当 $T\leq 700\text{ °C}$ 时,电极表面氧化增重量可忽略。

当 $T\geq 900\text{ °C}$ 时,9CrMoCoB钢高温氧化增重量初期快速增加,在氧化后期氧化增重量持续增加。900、1 000 °C高温氧化实验钢单位面积氧化增重量随时间可分为两个阶段,即快速氧化期的直线规律阶段和扩散控制的抛物线规律阶段;1 100、1 200 °C高温氧化实验钢单位面积氧化增重量与时间呈抛物线规律。

2.2 9CrMoCoB钢的高温氧化动力学

9CrMoCoB钢在900、1 000 °C快速氧化阶段的氧化增重量较少,因此,在高温氧化动力学分析时,仅分析抛物线规律阶段。对上述900、1 000、1 100和1 200 °C条件下,抛物线规律段 $(\Delta W/A)^2$ 与氧化时间 t 作图,并进行拟合,如图2所示。

由图2可看出,实验点呈较好的线性关系,相关系数 $R^2\geq 0.97$ 。氧化速率 k 在某一温度下是常数,但在不同温度条件下,氧化速率常数与温度有关。氧化速率 k 与温度关系符合Arrhenius方程^[8-9],如式(1)所示。

$$k = k_0 \times \exp\left(\frac{-\Delta E_a}{R \times T}\right) \quad (1)$$

式中: k_0 为指前系数; R 为标准摩尔气体常数,8.314 J·mol⁻¹·K⁻¹; T 为开尔文温度,K; ΔE_a 为活化能,J/mol。其中 ΔE_a 可通过拟合 $\ln k$ 与 $1/T$ 间关系,如图3所示。

由图3可看出,实验点呈现良好的线性关系($R^2=0.97$),拟合直线为: $\ln k = -40\ 163.707 \times 1/T + 44.131\ 7$,

表1 9CrMoCoB钢化学成分(质量分数)

Table 1 The chemical composition of 9CrMoCoB steel

Table 1 The chemical composition of 9CrMoCoB steel													%
C	Si	Mn	B	Al	Cr	Mo	Co	O	Ni	Nb	N	V	Fe
0.125	0.049	0.35	0.009 2	0.003	9.5	1.5	1.27	0.002 8	0.15	0.06	0.022	0.2	Bal.

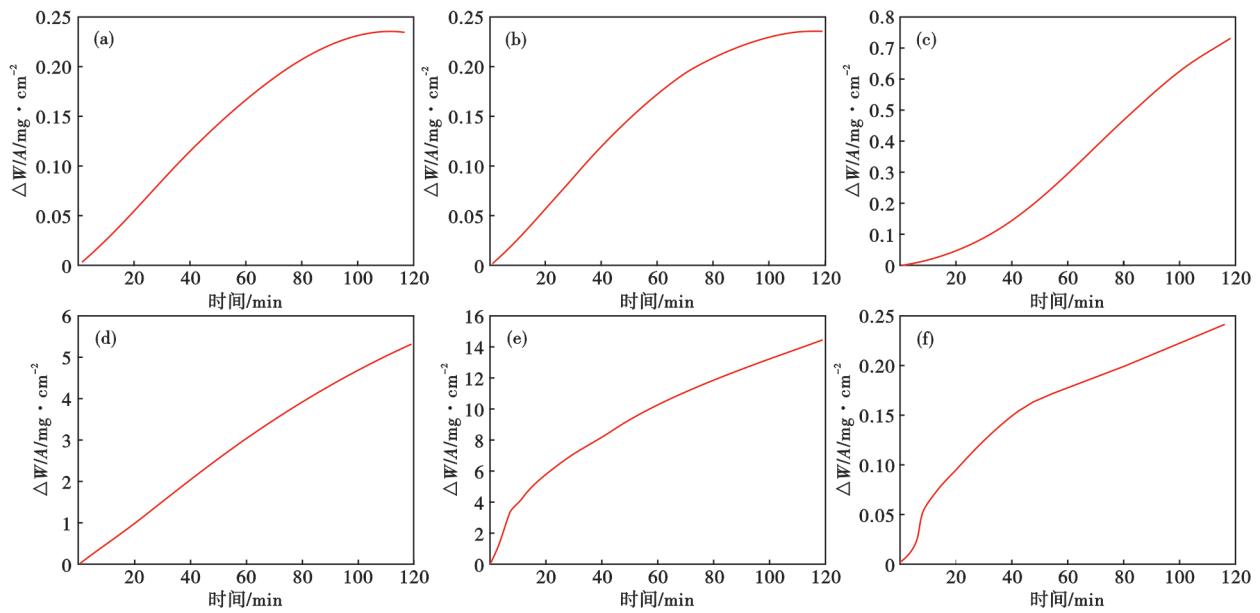


图 1 不同温度条件下干燥空气中的 9CrMoCoB 钢氧化曲线:(a) 500 °C, (b) 700 °C, (c) 900 °C, (d) 1 000 °C, (e) 1 100 °C, (f) 1 200 °C

Fig. 1 Oxidation curves of the 9CrMoCoB steel in dry air atmosphere at different temperatures : (a) 500 °C , (b) 700 °C , (c) 900 °C , (d) 1 000 °C , (e) 1 100 °C , (f) 1 200 °C

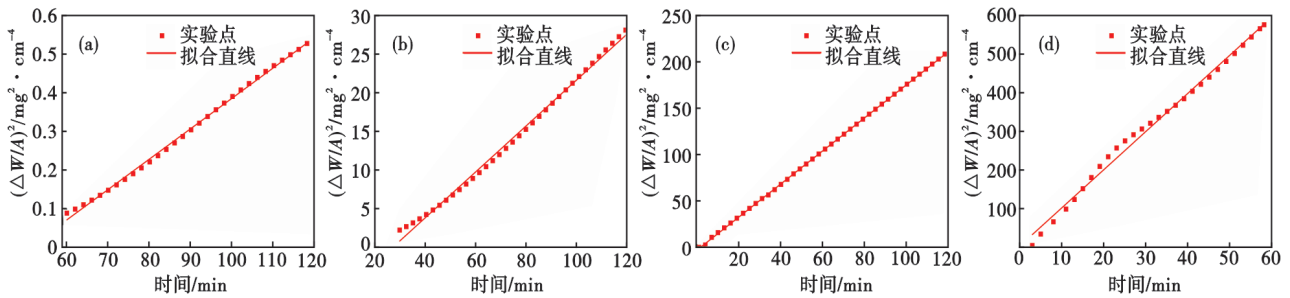


图 2 900 ~ 1 200 °C 条件下 9CrMoCoB 钢的高温氧化动力学分析:(a) 900 °C, (b) 1 000 °C, (c) 1 100 °C, (d) 1 200 °C

Fig. 2 High temperature oxidation kinetics analysis of the 9CrMoCoB steel at 900 ~ 1 200 °C : (a) 900 °C , (b) 1 000 °C , (c) 1 100 °C , (d) 1 200 °C

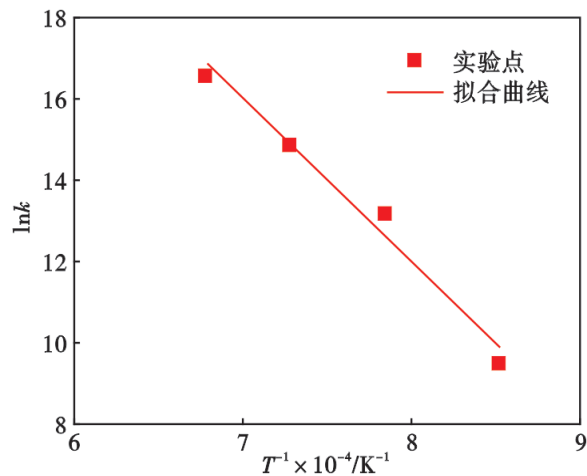


图 3 9CrMoCoB 钢的不同温度下的氧化活化能拟合曲线

Fig. 3 Fitting line of the activation energy of the 9CrMoCoB steel at different temperatures

不同温度下 9CrMoCoB 钢的氧化速率 k 如式(2)。

$$k = \exp\left(44.1317 - \frac{40163.707}{T}\right) \quad (2)$$

2.3 电渣重熔过程中 9CrMoCoB 钢氧化增重计算

电渣重熔过程中,由于电极自身热导率及熔渣表面热辐射等,距离渣液面不同高度位置处电极表面的温度不同,距离渣液面越远,电极温度越低^[10]。根据前人对电极表面温度分布研究^[11],电极表面温度可表示为式(3),其表面温度分布如图 4 所示。

$$T = 46^{(h + 0.33)} + 723.15 \quad (3)$$

式中: T 为距离渣液面某一高度处电极表面的温度, K; h 为电极某一位置距离电极表面温度 723.15 K 处(参考温度面)的距离, m。

由图 4 可看出,电极距离渣液面较远时,表面温

度较低;随电极下降,温度变化平缓。距离渣液面较近时,电极表面温度较高;随自耗电极下降,表面温度快速升高。一般认为,电极插入渣池的电极端部温度比自耗电极液相线温度高20~30℃^[12]。9CrMoCoB钢液相线温度为1498℃,因此,插入渣池的电极端部温度约为1530℃。

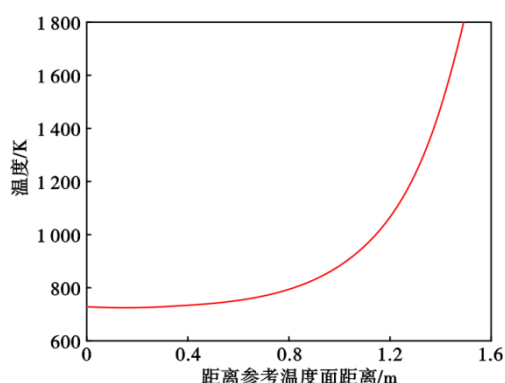


图4 电渣重熔过程中电极表面温度分布

Fig. 4 Distribution of the temperature of the electrode during the ESR process

电渣重熔过程中,随电极不断熔化,电极某一位置距离渣液面距离越来越远,此位置电极表面温度越来越高。但在某一时刻可认为某一高度电极表面温度恒定,整个电极可看作是若干微小温度梯度叠加而成,连续变化温度区间内电极的氧化可分解为若干微小单元氧化增重的叠加,即:

$$\Delta W_i^2 = \Delta W_{i-1}^2 + k^i \times \delta t_i \quad (4)$$

式中: k^i 为电渣重熔温度*i*时氧化速率常数; δt_i 为温度*i*时的时间段; ΔW_{i-1} 为温度*i*之前氧化增重量。将式(4)展开可得式(5):

$$\begin{aligned} \Delta W_i^2 &= \Delta W_0^2 + k^1 \times \delta t_1 + k^2 \times \delta t_2 + \dots + k^i \times \delta t_i = \\ &= \Delta W_0^2 + \sum_{i=1}^i k^i \times \delta t_i \end{aligned} \quad (5)$$

温度较低时,9CrMoCoB钢的氧化速率很慢,可认为 $\Delta W_0=0$ 。

由图1可知,当 $T < 900$ ℃时,电极表面氧化速率很小,且电渣重熔过程中电极氧化时间较短。因此,在计算电极表面氧化增重时,仅考虑 $T \geq 900$ ℃电极表面的氧化。由式(3)可看出,电极温度为900℃的位置到插入渣池的电极端部的距离*b*为0.229 m。以该段电极为研究对象,实验室电渣炉结晶器上口直径 D_U 为125 mm,下口直径 D_D 为139 mm,结晶器高度 H_M 为800 mm,电极直径 D_E 为75 mm,电极下降速率 ν 为 5.81×10^{-4} m/s,电极插入渣池深度

*a*为10 mm。因此,900℃位置处到渣液面的时间*t*为 $(b-a)/\nu$ 。

在该温度区间内电极不同高度位置处,微元电极的高温氧化速率常数*k*可表示为式(6)。

$$k = \exp\left(44.1317 - \frac{40163.707}{46^{(h+0.33)} + 723.15}\right) \quad (6)$$

因此,随电极熔化,某一高度*h*处($T \geq 900$ ℃)的微元从*t=0*时刻到进入渣中的氧化增重量 ΔW_i 可表示为式(7)。

$$\Delta W_i^2 = \int_0^{\frac{h-a}{\nu}} k dt = \int_a^h \frac{\exp\left(44.1317 - \frac{40163.707}{46^{(h+0.33)} + 723.15}\right)}{\nu} dh \quad (7)$$

对电极的高度方向上的微元进行积分,得到整个高度方向上的氧化增重量为:

$$\Delta W = \int_a^b \left[\int_a^h \frac{\exp\left(44.1317 - \frac{40163.707}{46^{(h+0.33)} + 723.15}\right)}{\nu} dh \right]^{1/2} dh \quad (8)$$

$$\text{令 } f(h) = \frac{\exp\left(44.1317 - \frac{40163.707}{46^{(h+0.33)} + 723.15}\right)}{\nu}$$

使用Simpson近似处理式,可得式(9)。

$$\Delta W \approx \int_a^b \left\{ \frac{h-a}{6} \left[f(h) + 4f\left(\frac{a+h}{2}\right) + f(a) \right] \right\}^{1/2} dh \quad (9)$$

$$\text{令 } G(h) = \left\{ \frac{h-a}{6} \left[f(h) + 4f\left(\frac{a+h}{2}\right) + f(a) \right] \right\}^{1/2}$$

则最终可近似处理为式(10)。

$$\Delta W \approx \frac{b-a}{6} \left[G(a) + 4G\left(\frac{a+b}{2}\right) + G(b) \right] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta W &= \sqrt{\frac{1}{54}} \times (b-a)^{3/2} \times \\ &\left[2f\left(\frac{a+b}{2}\right) + 8f\left(\frac{3a+b}{4}\right) + 2f(a) \right]^{1/2} + \\ &\left[\frac{1}{4}f(b) + f\left(\frac{a+b}{2}\right) + \frac{1}{4}f(a) \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (11)$$

实验室非保护气氛电渣重熔9CrMoCoB钢,因电极表面氧化而随电极熔化带入到渣池中的FeO重量 Δw 为:

$$\Delta w = \Delta W \times C \times \nu \quad (12)$$

式中: C 为电极周长,m; Δw 为单位时间氧化增重量,mg/s。

代入数据可得: $\Delta w = 6.68$ mg/s。

2.4 9CrMoCoB 钢高温氧化层分析

对不同温度条件下 9CrMoCoB 钢高温氧化终点试样的氧化层表面进行 SEM-EDS (Care Zeiss Ultra Plus) 分析, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 氧化温度较低时 (500、700 °C), 9CrMoCoB 钢的表面氧化层较薄。氧化温度升高至 900 °C 时, 9CrMoCoB 钢氧化层厚度迅速增加, 但未形成连续结构。氧化温度为 1 000、1 100 °C 时, 9CrMoCoB 钢的表面氧化层开始形成连续结构, 完全覆盖在金属基体表面。氧化温度为 1 200 °C 时, 氧化层表面的氧化产物颗粒尺寸增大, 且氧化层出现裂纹。温度较低 (500、700 °C) 时, 9CrMoCoB 钢高温氧化生成的氧化铁皮较薄, EDS 分析结果出现基体 Cr 峰, 氧化层为铁的氧化物。氧化温度为 900、1 000、1 100、1 200 °C 时, EDS 分析结果不再出现 Cr 峰, 高温氧化产物为铁的氧化物。

对不同氧化温度下终点试样氧化层表面进行 XRD 分析, 结果如图 6 所示。由图 6 可知, 低温氧化 (500、700 和 900 °C) 时, 氧化层较薄, 主要是 Fe₂O₃, 并检测到金属基体峰。氧化温度升高至 1 000、1 100 °C 时, 氧化层增厚, XRD 只检测到 Fe₂O₃。氧化温度为 1 200 °C 时, 9CrMoCoB 钢高温氧化生成的氧化层较厚, 且出现裂纹, 导致冷却后表层氧化物脱落。将外侧氧化层去除, XRD 分析结果表明内侧氧化层主要产物是 Fe₂O₃ 和 Fe₃O₄。

对不同氧化温度终点试样氧化层截面进行 SEM

分析, 结果如图 7 所示, EDS 分析结果如图 8 所示。

由图 7 可看出, 氧化温度较低 (500、700、900 °C) 时, 氧化层较薄, 氧化层与基体结合紧密且氧化层无明显分层, 如图 7(a) ~ (c) 所示。氧化温度升高至 1 000 °C, 氧化层厚度增加且比较致密, 冷却后由于氧化层与金属基体热胀系数不一样导致氧化层与金属基体分开, 存在明显裂缝, 如图 7(d) 所示。氧化温度为 1 100 °C 时, 氧化层开始分层, 如图 7(e) 所示。氧化温度为 1 200 °C 时, 氧化层与基体结合不紧密, 冷却后与基体脱离产生裂纹, 对基体的抗高温氧化防护效果减弱, 基体呈现出明显的内氧化特征, 如图 7(f) 所示。

9CrMoCoB 钢高温氧化层截面 EDS 分析结果如图 8 所示。可看出, 低温氧化 (500、700、900 °C) 时, 氧化产物为铁的氧化物, 结合图 6 可知, 主要为 Fe₂O₃。氧化温度为 1 000 °C 时, 9CrMoCoB 钢高温氧化分层不明显, 结合图 6, 氧化层主要为 Fe₂O₃ 和内层少量富铁的铁铬尖晶石相, 尖晶石相的量较少, 分层不明显。氧化温度为 1 100 °C 时, 氧化产物明显分层, 内层为富铁的铁铬尖晶石相, 外层为 Fe₂O₃ 相。氧化温度为 1 200 °C 时, 外层氧化层在冷却过程中脱落, 内侧氧化层表面为 Fe₂O₃ 和 Fe₃O₄, 内侧为铁铬复合相。不同温度条件下, 9CrMoCoB 钢的高温氧化产物主要是外层的铁的氧化物和内层的铁铬复合氧化物相。

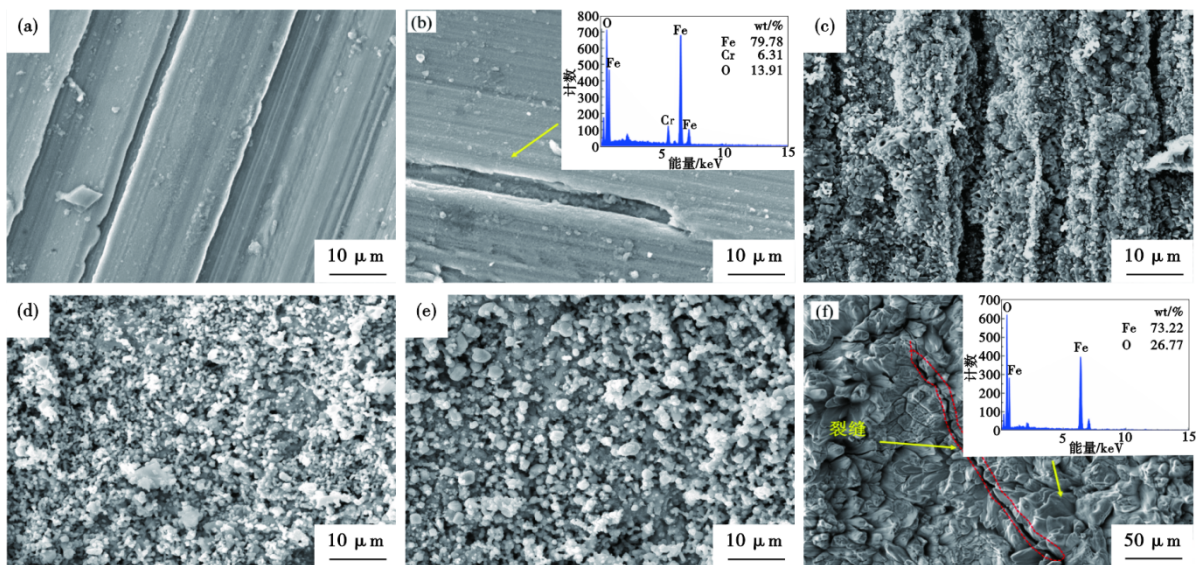


图 5 不同温度氧化后氧化层的 SEM 图: (a) 500 °C, (b) 700 °C, (c) 900 °C, (d) 1 000 °C, (e) 1 100 °C, (f) 1 200 °C

Fig. 5 The SEM images of the surface oxidation layer at different temperatures : (a) 500 °C , (b) 700 °C , (c) 900 °C , (d) 1 000 °C , (e) 1 100 °C , (f) 1 200 °C

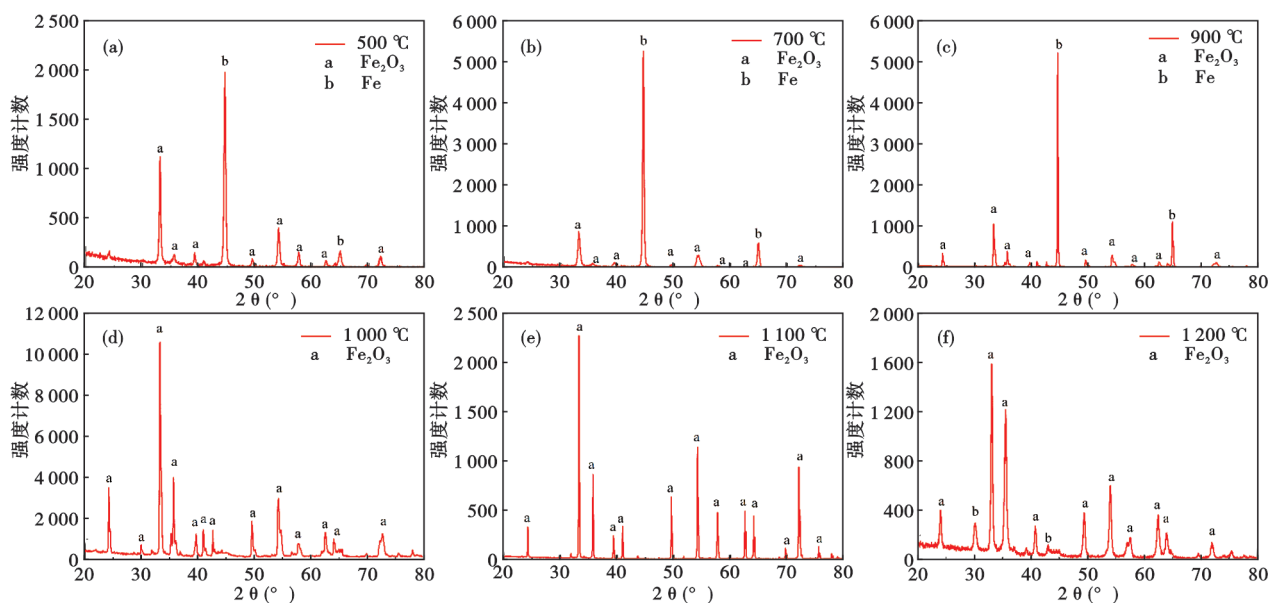


图 6 不同温度条件下的氧化层的 XRD 分析:(a)500 °C,(b)700 °C,(c)900 °C,(d)1 000 °C,(e)1 100 °C,(f)1 200 °C

Fig. 6 The results of the XRD analysis of the oxide layer at different temperatures : (a) 500 °C , (b) 700 °C , (c) 900 °C , (d) 1 000 °C , (e) 1 100 °C , (f) 1 200 °C

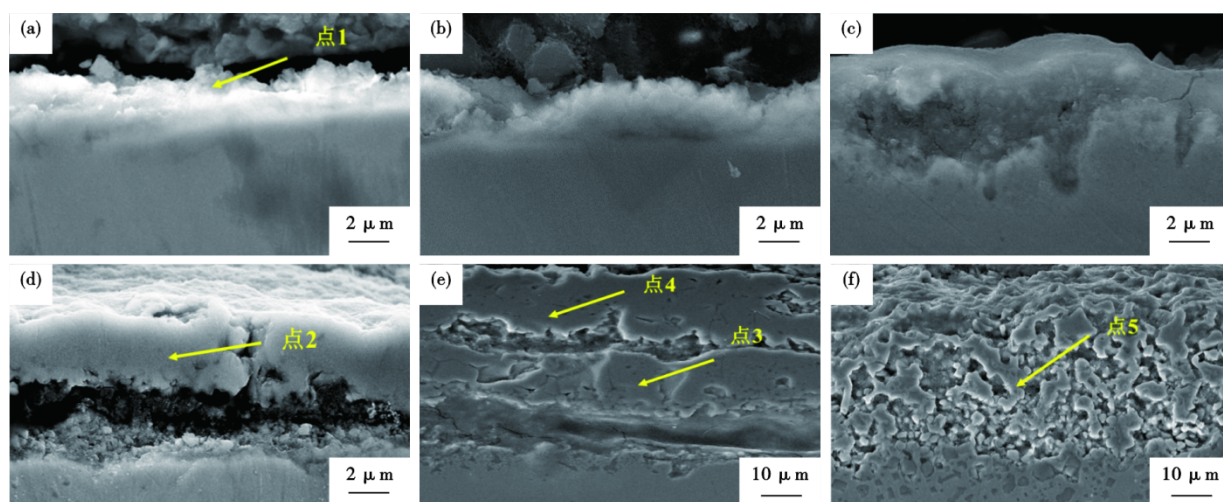


图 7 不同氧化温度条件下 9CrMoCoB 钢高温氧化层截面 SEM 分析:(a)500 °C ,(b)700 °C(c)900 °C,(d)1 000 °C,(e)1 100 °C ,(f)1 200 °C

Fig. 7 SEM analysis of the cross-section of the oxide layer of the 9CrMoCoB steel after oxidation : (a) 500 °C , (b) 700 °C , (c) 900 °C , (d) 1 000 °C , (e) 1 100 °C , (f) 1 200 °C

2.5 非保护气氛电渣重熔 9CrMoCoB 钢的脱氧制度

由图 5 和图 8 可以看出,不同温度条件下,9CrMoCoB 钢高温氧化产物主要是铁的氧化物和部分铁铬复合氧化物。为便于计算,可认为氧化层主要是铁的氧化物。铁的氧化物主要有 FeO、Fe₂O₃ 和 Fe₃O₄,但不论哪种氧化物,进入渣池后均会提高渣池氧势,以 FeO 的形式与金属液中易氧化元素发生反应^[13-14]。为简化计算,将整个氧化层简化为 FeO 单一组分,则所增加 FeO 质量 m 为:

$$m = \frac{M(\text{FeO})}{1\,000 \times M(\text{O})} \times \Delta w \quad (13)$$

式中, $M(\text{FeO})$ 为 FeO 摩尔质量, 72 g/mol; $M(\text{O})$ 为 O 的摩尔质量, 16 g/mol; Δw 为实验室非保护气氛电渣重熔 9CrMoCoB 钢条件下,单位时间氧化增重量, mg/s; m 为氧化产物换算为 FeO 后的 FeO 总质量, g/s。

代入数据可知, $m = 0.030$ 1 g/s。

渣中增加 FeO 的质量分数 l 为:

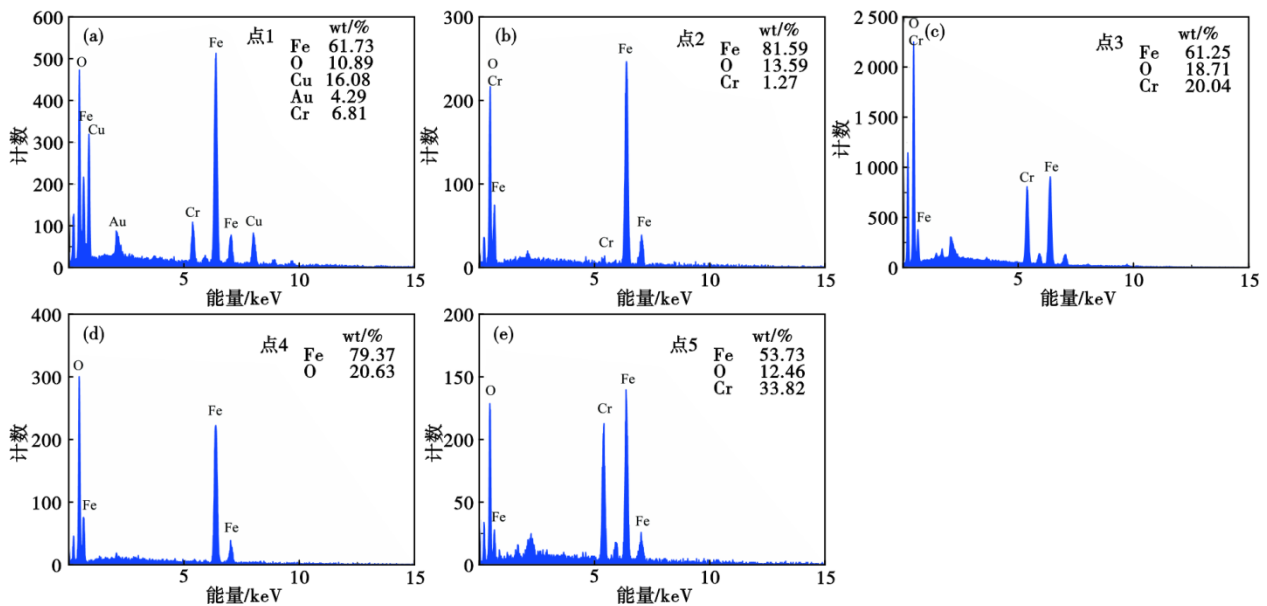


图 8 9CrMoCoB 钢在不同温度条件下氧化终点试样的氧化层截面 EDS 分析: (a) 500 °C 点 1, (b) 1 000 °C 点 2, (c) 1 100 °C 点 3, (d) 1 100 °C 点 4, (e) 1 200 °C 点 5

Fig. 8 EDS analysis of the cross-section of the oxide layer of the 9CrMoCoB steel after oxidation : (a) 500 °C spot 1 , (b) 1 000 °C spot 2 , (c) 1 100 °C spot 3 , (d) 1 100 °C spot 4 , (e) 1 200 °C spot 5

$$l = \frac{m}{1\,000 \times Q} \quad (14)$$

式中: Q 为所用渣的总质量, kg。

非保护气氛电渣重熔 9CrMoCoB 钢, 选择纯 Si ($w[\text{Si}] \geq 99\%$) 作为脱氧剂, 脱氧剂加入时间间隔为 5 min。脱氧剂 Si 主要与熔渣中的 FeO 反应^[15], 如式 (15) 所示。



为控制非保护气氛电渣重熔生产 9CrMoCoB 钢铸锭中 B、Si 和 Al 均在目标范围内, 需将随电极熔化带入渣池中的 FeO 完全消耗。由式 (15) 可知, 在该时间内电极表面高温氧化生成的氧化铁皮随电极熔化带入渣池中的 FeO 质量为 9.02 g, 因此, 需加入纯 Si 脱氧剂质量为 1.75 g。

参考文献

- [1] 周德光, 徐卫国, 王平, 等. 轴承钢电渣重熔过程中氧的控制及作用研究[J]. 钢铁, 1998, 33(3): 13-17.
- [2] 高建军, 巴钧涛, 唐作滨, 等. 12%Cr 超超临界转子电渣重熔工艺中试研究[J]. 大型铸锻件, 2013(3): 4-7.
- [3] Kim D S, Lee G J, Lee M B, et al. Manufacturing of 9CrMoCoB steel of large ingot with homogeneity by ESR process[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 143 (1): 012002.
- [4] 姜周华. 电渣冶金物理化学及传输现象[M]. 沈阳: 东北大

3 结论

(1) 9CrMoCoB 钢低温 (500 ~ 700 °C) 氧化时, 氧化产物主要是 Fe_2O_3 , 单位面积氧化增重量较小, 可忽略。当 $T \geq 900$ °C 氧化时, 氧化产物主要是铁的氧化物和少量铁铬复合相, 氧化处于扩散控制阶段, 单位面积氧化增重量与时间呈抛物线规律。

(2) 实验室非保护气氛电渣重熔 9CrMoCoB 钢 ($\phi 75$ mm), 因电极表面的高温氧化, 随电极熔化带入到渣池中的氧化增重约为 6.68 mg/s。

(3) 冶炼条件下, 9CrMoCoB 钢 ($\phi 75$ mm) 因高温氧化每 5 min 带入 FeO 约为 9.02 g, 加 1.75 g 纯 Si 脱氧, 理论上可在非保护气氛电渣重熔条件下, 冶炼出化学成分符合 9CrMoCoB 钢要求的铸锭。

学出版社, 2000: 134-143.

- [5] 李铁藩. 金属高温氧化和热腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 19-29.
- [6] Gao W, Li Z W, Pieraggi B, et al. Developments in High Temperature Corrosion and Protection of Materials[M]. Woodhead Publishing, 2008.
- [7] Lai G Y. High-temperature corrosion and materials applications [M]. Materials Park, Ohio: ASM International, 2007: 250-289.
- [8] Roy S K, Auddya A, Bose S K. Non-isothermal oxidation kinetics

- of iron and iron-chromium alloys[J]. Reactivity of Solids, 1989, 6(4): 301-320.
- [9] Bagchi T P, Sen P K. Combined differential and integral method for analysis of non-isothermal kinetic data [J]. Thermochemical Acta, 1981, 51(2-3): 175-189.
- [10] Mitchell A, Joshi S, Cameron J. Electrode temperature gradients in the electroslag process[J]. Metallurgical Transactions, 1971, 2(2): 561-567.
- [11] Dong Y W, Jiang Z H, Li Z B. Mathematical model for electroslag remelting process[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2007, 14(5): 7-30.
- [12] Mitchell A, Joshi S. The thermal characteristics of the electroslag process[J]. Metallurgical Transactions, 1973, 4(3): 631-642.
- [13] 王仲亮,包燕平,顾超,等. 基于非铝脱氧工艺的GCr15轴承钢中Ds类夹杂物控制[J]. 特殊钢, 2022, 43(6): 8-12.
- [14] 蒋鲤平,徐建飞,王昆鹏,等. 高碳铬GCr15轴承钢中镁铝夹杂物形成与控制工艺实践[J]. 特殊钢, 2022, 43(4): 41-45.
- [15] 崔利民,王忠鑫,罗保帅,等. GH2132合金2 t电渣锭重熔工艺改进[J]. 特殊钢, 2022, 43(3): 43-46.

投稿方法及注意事项

为推进《特殊钢》期刊信息化,便于作者投稿查稿/专家审稿,由中信泰富特钢集团股份有限公司主管,大冶特殊钢有限公司主办的《特殊钢》杂志,实行作者网上投稿查稿、专家网上审稿的办刊模式。

1. 投稿注意事项

- 1.1 投稿前需按照本刊下载中心“杂志投稿模板及要求”对文稿进行修改。不尽之处可参考近期出版的《特殊钢》论文;
- 1.2 应在网络投稿时,准确、完整地填写所有署名作者的信息(姓名、单位(包括二级单位)应写全称、城市及邮编);无高级职称在读硕士研究生的文章需注明导师姓名,提供本人及导师的信息:姓名-出生年-性别-学历-职称--邮箱;
- 1.3 请填写中图分类号TF或TG类,中国图书馆分类号链接:<http://www.ztflh.com/>,通常在“工业技术”中的“TF—冶金工业”或“TG—金属学与金属工艺”栏目;
- 1.4 原稿必须是未在中外文正式刊物上发表的论文。本刊严禁一稿多投、重复内容多次投稿、不同文种重复投稿。一旦发现上述情况,稿件将按退稿处理,并将通知作者单位及材料冶金领域有关期刊。作者本人的稿件今后将不被录用;
- 1.5 来稿文责自负,编辑部有权对稿件做技术性、文字性修改,在征得作者同意后可以进行实质内容的修改。

2. 投稿方法

- 2.1 搜索《特殊钢》杂志官网或输入网站域名<http://www.specialsteeljournal.com>,登录“特殊钢”网站。点击“作者登录”,进入“作者工作桌面”。
- 2.2 第一次在线投稿的作者需要先注册,取得用户名和登录密码。系统会自动将注册成功的信息发送至您提供的E-mail地址。以后投稿或查询稿件时均用此用户名和登录密码登录(登录后可修改用户名和登录密码)。如果忘记用户名和登录密码,可与编辑部联系,进行查询。投稿时登录或注册的作者被系统视为通信作者,有关稿件的事宜将与该人联系。此通信作者和论文第一页页脚备注的通信作者可以不同。
- 2.3 网上投稿前最好预先打开欲投稿件的电子文档,以便填写稿件信息时将文章标题、摘要、关键词等内容复制并粘贴到投稿系统中,减少录入的工作量。
- 2.4 用鼠标左键单击“投新稿件”的“向导式投稿(建议)”或者“列表式投稿”按钮,进入本刊的投稿系统。阅读“投稿确认书”并同意签署“著作权转让协议”后逐项填写稿件信息,然后上传稿件的电子文档(Word或PDF格式)。对稿件信息进行核实,确认无误后点击“立即投稿”,此时系统会出现“投稿成功”的界面。随后,系统会自动发送收稿通知至您在注册时提供的E-mail地址,告知您的稿件编号等信息。

3. 网上查稿

- 3.1 稿件审查结果在2个月内通知作者,在此其间,作者不得将稿件投往他处。个别稿件可能送审时间较长,如果作者决定改投他刊或退稿,请通知编辑部后,再进行处理。编辑部决定录用稿件后,会及时通知作者;
- 3.2 搜索《特殊钢》杂志官网,或输入网站域名<http://www.specialsteeljournal.com>,登录“特殊钢”网站。用鼠标点击“作者登录”,进入“作者中心”。
- 3.3 用鼠标点击“我的稿件”下面的不同按钮,即可看到您所投稿件的基本信息和目前的处理状态。

4. 稿件网上退修

- 4.1 编辑部收到作者的稿件入库后要经过三审,审稿过程中责任编辑会将稿件退修要求通过本刊网站向作者反馈,同时会发送提醒邮件至您提供的E-mail地址,请作者及时按要求修稿并重新提交修改稿。
- 4.2 修改稿请注明稿件编号,同时说明进行了哪些修改。每次修改的说明和修改稿都应留备份,以防丢失。修改稿需待编辑部讨论后,方能确定是否刊用。
- 4.3 退修稿件的修改时限为10日,编辑部将以作者返回修改稿日期作为投稿日期。如果需延期请事先联系编辑部,否则,超过30日,编辑部有权对稿件做出退稿处理。