

电渣重熔工艺对孪晶诱发塑性 (TWIP) 钢冶金质量的影响

郭军儒¹ 刘建华¹ 庄昌凌¹ 张庆雷² 雷冲² 张凯亮²

(1 北京科技大学冶金工程研究院,北京 100083;2 中原特钢股份有限公司技术中心,济源 454650)

摘要 根据 TWIP 钢裂纹敏感性强和高洁净度要求,通过分析和计算,采用 65CaF₂-25Al₂O₃-10CaO 渣, AOD 精炼的 2 根 0.6 m 直径 7.3 t 电极 (/%: 0.03C, 2.75Si, 25.13Mn, 0.019P, 0.002S, 2.50Al), 重熔 14 t TWIP 钢电渣锭 (/%: 0.03C, 2.88Si, 24.71Mn, 0.021P, 0.007S, 2.98Al)。检验结果表明,重熔后钢中夹杂物平均尺寸减少 36.4%, 夹杂物总量降低 46.7%;电渣时应采用氩气保护以减少钢中 Al、Mn 的烧损。

关键词 孪晶诱发塑性钢 电渣重熔 热平衡计算 冶金质量

Effect of Electroslag Remelting Process on Metallurgical Quality of Twinning Induced Plasticity (TWIP) Steel

Guo Junru¹, Liu Jianhua¹, Zhuang Changling¹, Zhang Qinglei², Lei Chong² and Zhang Kailiang²

(1 Metallurgy Engineering Research Institute, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 Technical Center, Zhongyuan Special Steel Co, Jiyuan 454650)

Abstract Based on strong crack sensitivity and requiring high cleanliness of TWIP steel, with analysis and calculation the 14 t TWIP steel ESR ingot (/%: 0.03C, 2.88Si, 24.71Mn, 0.021P, 0.007S, 2.98Al) has been remelted with 65CaF₂-25Al₂O₃-10CaO slag by AOD refined two 0.6 m diameter 7.3 t electrode (/%: 0.03C, 2.75Si, 25.13Mn, 0.019P, 0.002S, 2.50Al). Examination results show that the inclusions average size in remelted steel reduces by 36.4% and the total inclusions amount decreases by 46.7%. Argon atmosphere should be used to reduce the loss of Al and Mn in ESR process.

Material Index Twinning Induced Plasticity Steel, ESR, Thermal Equilibrium Calculation, Metallurgical Quality

由于电渣重熔钢锭具有组织致密、成分稳定、表面光洁、夹杂物细小且分布均匀、材料性能较高等优点,多年来成为生产某些特殊金属材料的重要手段^[1-2]。

用 8 t AOD + 模铸制备 2 根 7.3 t 的电极锭,通过 18 t 电渣重熔炉生产 14 t TWIP 钢电渣锭。其目标成分为 (/%) $\leq 0.04C, 2.55 \sim 3.05Si, 24.0 \sim 26.0Mn, \leq 0.025P, \leq 0.005S, 2.90 \sim 3.50Al$ 。

1 精炼渣系及渣量的确定

TWIP 钢熔点为 1 450 ℃ 左右,实验选择 65% CaF₂-25% Al₂O₃-10% CaO 的新渣系,代替 70% CaF₂-30% Al₂O₃ 三七渣系(表 1)。由表 1 可知,新渣系比三七渣系熔点低 100 ℃ 左右,有利于铸件成形,同时它还具有合适的电导率,能满足熔铸需要。

65% CaF₂-25% Al₂O₃-10% CaO 成分接近 CaF₂-3CaO·5Al₂O₃ 系的共晶点,凝固过程液析较小,用于电渣熔铸可避免渣皮内高熔点组元富集。

本项目组计划冶炼的 TWIP 钢电渣锭直径为 1 000 mm,经计算得出冶炼所需渣量为 480 kg。

表 1 ESR 熔渣的物理性能
Table 1 Physical Properties of Slag for ESR

渣系/%	熔点/ ℃	电导率 (1 800 ℃)/ (Ω·cm) ⁻¹	粘度 (1 500 ℃)/ (Pa·s)	密度 (1 650 ℃)/ (g·cm ⁻³)
70CaF ₂ - 30Al ₂ O ₃	1 320 ~ 1 340	2.6	0.03	2.8
65CaF ₂ - 25Al ₂ O ₃ - 10CaO	1 240 ~ 1 250	3.5	0.032	2.76

2 熔炼电流分析

利用热平衡关系^[3-4]计算熔炼电流 I_w , 得出输入电能和释放热量的对应的热平衡关系式为:

$$Q_E = Q_M + Q_S + Q_W + Q_R \quad (1)$$

式中: Q_E -1 h 输入电能/(kV·A·h); Q_M -1 h 合金加热,熔化及过热所需能量/(kV·A·h); Q_S -1 h 内渣熔化,过热,挥发所耗能量/(kV·A·h); Q_W -熔铸 1 h 冷却水带走能量/(kV·A·h); Q_R -熔铸 1 h 渣池表面热辐射损失/(kV·A·h)。

(1) TWIP 钢加热,熔化及过热所需能量 Q_M

$$Q_M = V_M P_M \quad (2)$$

式中: V_M - TWIP 钢目标熔化速度; P_M - 1 t 渣熔化, 过热消耗的电能, $P_M = 390 \text{ kV} \cdot \text{A} \cdot \text{h}$ 。

(2) 渣熔化、过热、挥发所耗能量 Q_S

$$Q_S = G_S \cdot V_M P_S / G_C \quad (3)$$

式中: G_S - 总渣量/t; G_C - 自耗电总重/t; P_S - 1 t 渣熔化, 过热消耗的电能, $P_S = 880 \text{ kV} \cdot \text{A} \cdot \text{h}$ 。

(3) 熔铸 1 h 冷却水带走能量 Q_W

$$Q_W = W_R (T_H - T_C) J \times 10^3 \quad (4)$$

式中: W_R - 结晶器保证紊流状态的水耗, $Re \geq 13\ 800$ 时, $W_R = 7 \text{ t/h}$; T_H - 出水水温(45 °C); T_C - 进水水温(10 °C); J - 热功当量, $J = 0.001\ 163 \text{ kW} \cdot \text{h/cal} = 0.000\ 276\ 9 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{J}$ 。

(4) 熔铸 1 h 渣池表面热辐射损失 Q_R

$$Q_R = C\Phi [(T_S/100)^4 - (T_0/100)^4] S_R J = 161.57 \text{ kV} \cdot \text{A} \cdot \text{h} \quad (5)$$

式中: C - 辐射系数(4.96); Φ - 遮掩系数(0.8); T_S - 渣池表面温度(1873 K); T_0 - 车间温度(293 K); S_R - 辐射面积, $S_R = 0.283 \text{ m}^2$ 。

根据热平衡法计算理论电流:

$$Q_E = I_W^2 R_S \times 10^{-3} \quad (6)$$

$$R_S = 1/X_S \cdot L_E/S_E \quad (7)$$

$$\text{式中: } I_W = \sqrt{\frac{(Q_M + Q_S + Q_W + Q_R) \times 10^3}{R_S}} = 19\ 821.57 \text{ A}$$

3 TWIP 钢电渣重熔生产实验

在实际冶炼时, 自耗电电极直径 0.6 m, 电渣重熔结晶器 $\Phi 1\ 080 \sim \Phi 1\ 140 \text{ mm}$, 冶炼过程中电流基本处在 19 000 ~ 21 000 A, 平均熔化率控制在 800 kg/h。

在预熔期结束后, 在渣中加入 2 kg 电解 Mn; 并在冶炼的整个过程中, 每隔 5 min 加入 200 g Al 粉, 以保证电渣锭中 Al 成分的均匀。

PID 熔速-电流反馈控制是整个系统的核心。由现场工人实时记录电极坯下降 10 cm 所用时间, 来得到电极坯下降速度, 进而推算电渣熔化率。

通过电极坯来计算电渣熔化率方法如下:

已知电极坯下降速度为 $V_{\text{自}}$ (cm/min), 当前工作区的电渣锭直径和自耗电电极(即电极坯)直径分别为 $D_{\text{锭}}$ 和 $D_{\text{自}}$, 电渣锭熔池上升速度为 $V_{\text{锭}}$ (cm/min), 由于电极坯下降的同时电渣锭熔池也在上升, 因此可得出下面的方程来求得熔化率 $V_{\text{熔}}$

(kg/h):

$$\begin{cases} \rho_{\text{锭}} \times \pi D_{\text{锭}}^2 / 4 \times V_{\text{锭}} = V_{\text{熔}} \\ \rho_{\text{自}} \times \pi D_{\text{自}}^2 / 4 \times (V_{\text{锭}} + V_{\text{自}}) = V_{\text{熔}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\rho_{\text{自}}$ - 电极坯密度; $\rho_{\text{锭}}$ - 电渣锭密度; $D_{\text{自}}$ - 电极坯直径; $D_{\text{锭}}$ - 电渣锭直径。解得:

$$V_{\text{熔}} = \frac{\pi(1/\rho_{\text{自}} D_{\text{自}}^2 - 1/\rho_{\text{锭}} D_{\text{锭}}^2)/V_{\text{自}}}{4} \quad (9)$$

对于锻造的自耗电电极 $\rho_{\text{自}} = \rho_{\text{锭}}$, 结合钢厂的 PID 系统所记录自耗电电极下降速度 $V_{\text{自}}$, 根据上述公式, 得出 $V_{\text{锭}}$, 进而可求得冶炼时的熔速 $V_{\text{熔}}$, 再根据熔速来调节冶炼的电流。

整个电渣冶炼时间约为 17 h。

4 结果分析

4.1 成分

表 2 是自耗电电极和电渣锭的化学成分检测结果。由表 2 可知:

(1) 电渣重熔过程存在较大的 Al 烧损。应使用氩气保护, 并在重熔时不断加入 Al。

(2) 电渣过程有一定的 Mn 烧损。Mn 的低价氧化物, 在渣面上吸收大气中的氧形成高价氧化物, 然后过渡到金属熔池与渣界面后放出氧, 再次形成低价氧化物, 而进入金属熔池中的氧会和 Mn 结合。

(3) 电渣重熔后钢中 S 含量有所增加, 因此在 AOD 冶炼时, 要控制自耗电电极中的 S 含量。

4.2 夹杂物

分别取钢厂生产的自耗电电极样和电渣锭样, 从纵截面沿半径方面截取 10 mm × 10 mm 小样。利用扫描电镜的 FEATURE 软件, 在 500 倍下分别随机选取 150、100 个视场进行扫描统计。

4.2.1 夹杂物尺寸与形貌

扫描电镜分析结果表明, TWIP 钢中夹杂物主要为 AlN 夹杂与 Al₂O₃ 夹杂。由图 1(a, b) 可知, 电极坯中 AlN 夹杂物尺寸为 4 ~ 5 μm, 形状是不规则

表 2 TWIP 钢电极与电渣锭的化学成分 / %

Table 2 Analysis of electrode and ESR ingot of TWIP steel / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Al
成分控制要求	≤ 0.04	2.55 ~ 3.05	24.00 ~ 26.00	≤ 0.025	≤ 0.005	2.90 ~ 3.50
自耗电电极成分	0.03	2.75	25.13	0.019	0.002	3.50
电渣锭成分	0.03	2.88	24.71	0.021	0.007	2.98

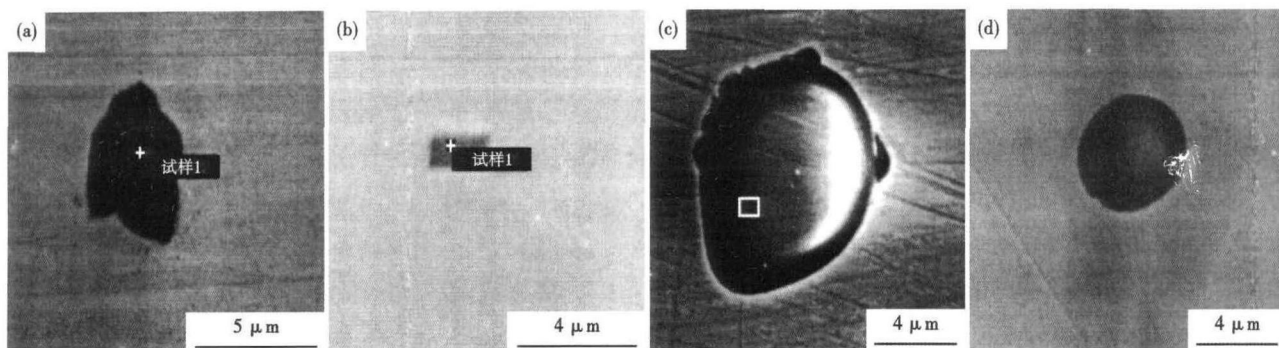


图 1 TWIP 钢电极(a)(c)与电渣锭(b)(d)中 AlN(a)(b)和 Al₂O₃(c)(d)夹杂物形貌

Fig.1 Morphology of inclusion of AlN (a) (b) and Al₂O₃(c) (d) in electrode (a) (c) and in ESR ingot (b) (d) of TWIP steel

表 3 TWIP 钢电极与电渣锭中平均夹杂物尺寸

Table 3 Average inclusions size of electrode and ESR ingot of TWIP steel

项目	平均尺寸/ μm	平均面积/ μm ²	每 mm ² 夹杂物 面积/μm ²
电极	4.59	16.91	355.11
电渣锭	2.92	6.38	165.88

表 4 TWIP 钢电极与电渣锭每 mm² 夹杂物数量/个

Table 4 Number of inclusions per mm² in electrode and ESR ingot of TWIP steel /No

项目	夹杂物直径/μm					总数
	1~3	3~5	5~7	7~10	>10	
电极	8	7	2	3	1	21
电渣锭	15	10	1	0	0	26

的多边形。而电渣锭中 AlN 尺寸约为 2 μm, 形状类似长方形。电渣后 AlN 夹杂物尺寸明显减小, 形状由不规则多边形向规则形状转变。

由图 1(c, d) 可知, 电极坯中 Al₂O₃ 夹杂物尺寸为 8~9 μm, 而电渣锭中 Al₂O₃ 尺寸约为 3 μm。电渣前后, Al₂O₃ 夹杂物均呈椭圆形, 但电渣后 Al₂O₃ 夹杂物尺寸明显减小。

由表 3 可知, 电渣后, 夹杂物平均尺寸减少 36.4%, 夹杂物总量减少 46.7%。电渣重熔可有效减少钢锭中的夹杂物。并且电渣前, 150 个视场内出现了尺寸 41.0, 23.6, 21.9, 17.6 μm 的大型夹杂, 而电渣后 100 个视场内最大的夹杂尺寸是 8.2 μm, 且只有 5 个尺寸大于 5 μm 的夹杂。表明电渣重熔对去除大型夹杂效果显著, 这主要是因为熔滴自电极末端向金属熔池过渡过程的渣洗作用, 在此过程中, 大型夹杂物重新熔化, 一部分被渣池吸收, 另一部分在熔池中重新形成新的夹杂物。

4.2.2 夹杂物数量

通过对比分析可知, 电渣重熔后, 每平方毫米夹杂物数量增多 5 个, 但电渣重熔后夹杂物尺寸明显

变小(表 4)。由于夹杂物在自耗电电极熔化的同时, 在渣池中重新生成。而在接下去的冷却过程中被强制冷却, 冷却速度较快, 夹杂物没有足够的时间长大就已经凝固完成, 因此电渣重熔后夹杂物数量有所增加而尺寸却相对较少。

5 结论

(1) 依据 TWIP 钢特点, 实验采用低熔速、低电流的冶炼方式, 并最终在钢厂成功冶炼出符合质量要求的 TWIP 钢。

(2) 在冶炼时出现 Al、Mn 烧损, 电渣时应采用氩气保护措施, 并往电渣炉中定时加 Al 和 Mn 来解决。本次电渣后 S 含量有所增加, 因此要求自耗电电极含 S 量比最终成品少。

(3) 夹杂物平均尺寸减少 36.4%, 夹杂物总量减少 46.7%。由于熔滴自电极末端向金属熔池过渡过程的渣洗作用, 电渣重熔对减小夹杂物尺寸及去除大型夹杂物效果非常明显。

国家自然科学基金项目资助(51374023)

参考文献

- [1] 李正邦. 电渣熔铸[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 17-24.
- [2] 姜周华. 电渣冶金物理化学及传输现象[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000: 8-15.
- [3] 殷秀文. 电渣重熔热平衡计算及电渣降耗[J]. 特钢技术, 2001(4): 72-75.
- [4] 李正邦. 电渣冶金原理及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 166-167.

郭军儒(1989-), 男, 硕士研究生(北京科技大学), 2011 年北京科技大学(本科)毕业, TWIP 钢和电渣重熔研究。
E-mail: yguoyangyang@126.com

收稿日期: 2013-12-09