

TSCR 工艺均热过程 Ti(C_x, N_{1-x})回溶行为及其对晶界钉扎力和 Ti 元素固溶量的影响

张浩浩, 杨鑫华, 龙木军[✉], 艾松元, 陈登福[✉]

重庆大学材料科学与工程学院 2M 研究室, 重庆 400044

Resolution Behavior of Ti(C_x, N_{1-x}) during the TSCR Soaking Process and Its Effect on the Grain Boundary Pinning Force and the Solid Solution Amount of Ti Element

Zhang Haohao, Yang Xinhua, Long Mujun[✉], Ai Songyuan, Chen Dengfu[✉]

Laboratory of Materials and Metallurgy, College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China.

1. 前言

随着市场对超高强度钢需求的增加, 采用 TSCR 工艺生产超高强度微合金钢已成为一个重要的发展趋势^[1-2]。由于 TSCR 工艺具有连铸冷却强度高、再加热速度快和保温时间短等明显有别于传统工艺的冶金特征, 使得 TSCR 均热过程微合金元素第二相的回溶规律与传统工艺有很大的差异^[3]。而第二相粒子对铸坯乃至最终产品的质量和性能有重要的影响^[3-6]。因此, 探明 TSCR 工艺过程第二相回溶的量化演变规律对于最终产品质量和性能的调控是极其必要的。Mujun Long 等学者^[7]考虑微偏析、沉淀热力学和生长动力学, 对钛微合金钢工艺连铸过程中第二相的析出和生长行为进行了系统研究, 分析了钢种成分和连铸冷速对第二相析出和长大的影响。HanjieGuo 等人^[8]通过金相法、电解法和 RTO 技术对含钛 IF 钢 TSCR 工艺铸坯中第二相进行了表征分析, 探讨了薄板坯中第二相的形成和起源。而这些研究中 TSCR 工艺均热过程第二相回溶量以及合金元素固溶量大多是通过热力学计算得到的, 缺乏量化的实验研究结果。本研究旨在通过高温原位实验, 模拟研究 TSCR 工艺均热过程中第二相的回溶行为。讨论第二相回溶行为对 Ti 元素固溶量以及奥氏体晶界钉扎力的影响。研究结果可为超高强钢 TSCR 工艺铸坯质量的提高提供理论指导。

2. 实验研究方案

本研究以 22MnB5 钢铸坯样为研究对象, 其化学成分见表 1。铸坯厚度为 230mm, 宽度为 1720mm。取样位置为铸坯宽度方向和厚度方向的 1/4 处, 试样规格为 $\phi 7.5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 。

Table 1 Chemical composition of 22MnB5 steel (wt.%)

| C | Si | Mn | P | S | Ti | N |
|-----------|-----------|-----------|--------|--------|-----------|-------------|
| 0.20~0.25 | 0.25~0.45 | 1.10~1.50 | ≤0.015 | ≤0.005 | 0.02~0.05 | 0.002~0.005 |

通过高温共聚焦显微镜模拟了 22MnB5 钢 TSCR 工艺均热过程, 并制备了不同工艺时刻淬冷样品。通过 SEM 对每个样中的第二相颗粒进行统计分析。并将 TSCR 工艺过程第二相的析出演变特征与传统工艺进行了对比。图 1 为两种工艺的热模拟温度制度, 图中红点位置即为取样位置。

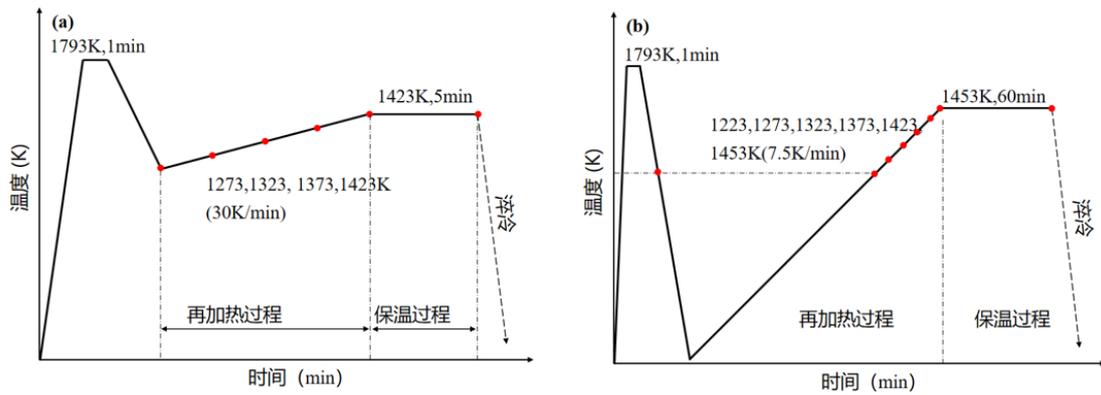


图 1. 实验温度制度: (a) TSCR 工艺; (b) 传统工艺.

Figure 1. Schematic diagram of experiments: (a) TSCR process; (b) Traditional process.

3. 结果分析讨论

3.1. TSCR 工艺均热过程 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 回溶行为的定量研究

TSCR 工艺再加热阶段, $Ti(C_x, N_{1-x})$ 颗粒数量和体积分数随温度升高而减小, 表明先前析出的 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 相又部分回溶于钢基体中, 有部分第二相颗粒消失。在保温阶段, $Ti(C_x, N_{1-x})$ 颗粒数量和体积分数仍随时间缓慢减小, 表明在 TSCR 工艺保温阶段 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 相仍在继续回溶, 并未达到溶解平衡状态。经计算, TSCR 工艺均热过程的回溶量占连铸过程析出量的 15.96%。再加热过程中, 随着温度升高 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 最大颗粒尺寸不断减小, 而 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 平均颗粒尺寸不断增大。由于再加热过程有大量的细小 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 颗粒回溶消失, 使得 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 的平均颗粒尺寸增大。在保温阶段, 细小 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 不断溶解消失, 大尺寸 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 颗粒不断粗化, $Ti(C_x, N_{1-x})$ 的平均颗粒增大。此外, TSCR 工艺均热过程结束时 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 的最大颗粒尺寸减小了 42.34%, TSCR 工艺均热过程对大尺寸 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 颗粒有一定的细化作用。

传统工艺过程铸坯中 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 颗粒数目较 TSCR 工艺少, $Ti(C_x, N_{1-x})$ 体积分数较 TSCR 工艺大, $Ti(C_x, N_{1-x})$ 最大颗粒尺寸和平均颗粒尺寸也明显大于 TSCR 工艺。此外, TSCR 工艺均热过程对大尺寸 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 颗粒有一定的细化作用, 而在传统工艺中则相反。经计算传统工艺均热结束时 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 的最大颗粒尺寸较连铸结束时增大了 8.02%。两种工艺均热参数的差异可能是这种差异产生的主要原因。相较于传统工艺, TSCR 工艺均热过程升温速率快且保温时间极短, 在其均热结束时 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 仍未达到溶解平衡, $Ti(C_x, N_{1-x})$ 粗化行为的影响很弱。而传统工艺的升温速率小, 铸坯中 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 较 TSCR 工艺更接近溶解平衡。而且其保温时间远远大于 TSCR 工艺, 这导致 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 粗化现象明显。此外, 传统工艺均热过程 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 回溶了 24.25%, 高于 TSCR 工艺的 15.96%。

3.2. $Ti(C_x, N_{1-x})$ 回溶行为对奥氏体晶界的钉扎力的影响

学者们的研究表明第二相粒子对奥氏体晶界的钉扎力与第二相粒子的平均尺寸和体积分数有关^[9]。因此 TSCR 工艺流程中 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 相的平均颗粒尺寸和体积分数的变化势必会导致其对奥氏体晶界的钉扎力发生变化。第二相对奥氏体晶界的钉扎力与第二相的平均尺寸和体积分数的关系为^[10]:

$$P_p = k \frac{\sigma f}{r} \quad (1)$$

其中, P_p 为 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 对奥氏体晶界的钉扎力, $KJ \cdot m^{-3}$; σ 为晶界面能, 为 $0.79J \cdot m^{-2}$; f 表示 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 粒子的体积分数; r 为 $Ti(C_x, N_{1-x})$ 粒子的平均半径; k 为一个常数, 通常为 1.33。

Ti(C_x, N_{1-x})颗粒对奥氏体晶界的钉扎力在连铸冷却过程逐渐增大, 在再加热过程中迅速减小, 在保温过程中缓慢降低, 于连铸结束时达到最大值 1723.53KJ·m⁻³。连铸过程中 Ti(C_x, N_{1-x})体积分数逐渐增大, 而且 Ti(C_x, N_{1-x})颗粒平均尺寸减小, 导致钉扎力迅速增大。再加热过程中则相反, Ti(C_x, N_{1-x})体积分数减小, Ti(C_x, N_{1-x})颗粒平均尺寸增大, 导致钉扎力迅速减小。而在保温阶段, Ti(C_x, N_{1-x})体积分数略有减小, 钉扎力的减小主要是由于 Ti(C_x, N_{1-x})颗粒平均尺寸的增大引起的。

3.3. Ti(C_x, N_{1-x})回溶行为对铸坯中 Ti 元素固溶量的影响

一些学者认为相较于传统工艺, TSCR 工艺具有固溶优势^[11]。即在轧制前 TSCR 工艺铸坯中固溶的合金元素要高于传统工艺, 从而在后续的轧制过程中析出更多的 TiC 颗粒。钢中析出 Ti(C_x, N_{1-x})的质量分数为:

$$w_{Ti(C_x N_{1-x})} = \frac{m_{Ti(C_x N_{1-x})}}{m_{steel}} = \frac{\rho_{Ti(C_x N_{1-x})} V_{Ti(C_x N_{1-x})}}{\rho_{steel} V_{steel}} = \frac{\rho_{Ti(C_x N_{1-x})}}{\rho_{steel}} f \quad (2)$$

其中, $w_{Ti(C_x, N_{1-x})}$ 为析出 Ti(C_x, N_{1-x})的质量分数; $m_{Ti(C_x, N_{1-x})}$ 为析出 Ti(C_x, N_{1-x})的质量, g; m_{steel} 为钢的质量, g; $\rho_{Ti(C_x, N_{1-x})}$ 为 Ti(C_x, N_{1-x})的密度, 5.08g·cm⁻³; m_{steel} 为钢的密度, 7.82g·cm⁻³; $V_{Ti(C_x, N_{1-x})}$ 为析出 Ti(C_x, N_{1-x})的体积, cm³; V_{steel} 为钢的体积, cm³。

随 Ti(C_x, N_{1-x})析出的 Ti 元素的质量分数为

$$w_{Ti} = \frac{M_{Ti}}{M_{Ti} + xM_C + (1-x)M_N} w_{Ti(C_x N_{1-x})} \quad (3)$$

w_{Ti} 为随 Ti(C_x, N_{1-x})析出的 Ti 元素质量分数, wt.%; M_{Ti} 、 M_C 、 M_N 分别为 Ti、C、N 元素的原子量。

因此, 22MnB5 钢中固溶的 Ti 元素质量分数为:

$$w_{[Ti]} = 0.033 - w_{Ti} \quad (4)$$

相较于传统工艺, TSCR 工艺具有明显的固溶优势。而且该固溶优势在连铸过程中不断变大, 在均热过程逐渐减小。这与两种工艺的工艺特点有直接的关系。TSCR 工艺连铸冷速大, 抑制了微合金元素的析出, 使更多的钛元素固溶在钢基体中。而 TSCR 工艺均热过程具有升温速率快且保温时间极短的特点, 使得在均热过程中 Ti(C_x, N_{1-x})的回溶量要小于传统工艺。TSCR 均热过程中 Ti(C_x, N_{1-x})仅回溶了 15.96%, 而传统均热过程中 Ti(C_x, N_{1-x})回溶了 24.25%。

4. 结论

针对钛微合金化 22MnB5 钢, 采用实验模拟及表征手段, 对 TSCR 工艺均热过程铸坯中 Ti(C_x, N_{1-x})相的回溶及粗化行为进行了量化研究, 主要结论如下:

(1) TSCR 工艺再加热过程中 Ti(C_x, N_{1-x})回溶了 15.96%; 保温过程中 Ti(C_x, N_{1-x})颗粒的最大尺寸粗化了 6.67%。

(2) TSCR 工艺 Ti(C_x, N_{1-x})颗粒的最大尺寸在均热过程前后减小了 42.34%, 而传统工艺增大了 8.02%。

(3) TSCR 工艺中 Ti(C_x, N_{1-x})对奥氏体晶界的钉扎力始终低于传统工艺; 钉扎力在连铸结束时达到最大, TSCR 工艺为 1723.53KJ·m⁻³, 传统工艺为 2155.48 KJ·m⁻³。

(4) 轧前 TSCR 工艺铸坯中 Ti 元素的固溶量是传统工艺的 1.26 倍, 具有显著的固溶优势。

致谢

感谢国家自然科学基金项目（U1960113、52274321）的支持。

参考文献

- [1] Muntin A V. Advanced technology of combined thin slab continuous casting and steel strip hot rolling[J]. *Metallurgist*, 2019, 62(9-10): 900-910.
- [2] 杨利彬.“十三五”中国炼钢关键技术进步及思考[J].*钢铁*, 2022, 57(08):1-10.
- [3] Mao X, Chen Q, Sun X. Metallurgical interpretation on grain refinement and synergistic effect of Mn and Ti in Ti-microalloyed strip produced by TSCR[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2014, 21(1): 30-40.
- [4] Wang S, Gao Z, Wu G, et al. Titanium microalloying of steel: A review of its effects on processing, microstructure and mechanical properties[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2022, 29(4): 645-661.
- [5] Liu T, Long M, Chen D, et al. Effect of coarse TiN inclusions and microstructure on impact toughness fluctuation in Ti micro-alloyed steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2018, 25: 1043-
- [6] Gui L, Long M, Zhang H, et al. Study on the precipitation and coarsening of TiN inclusions in Ti-microalloyed steel by a modified coupling model[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(3): 5499-5514.
- [7] Zhang H, Wu J, Guo W, et al. Grain Precipitation and Growth Model of TiN Inclusions in 22MnB5 Steel[C]//TMS 2022 151st Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. Cham: Springer International Publishing, 2022: 927-940.
- [8] Guo J, Cheng S, Guo H, et al. Determination of non-metallic inclusions in a continuous casting slab of ultra-low carbon interstitial free steel by applying of metallographic method, electrolytic method and RTO technique[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 2929.
- [9] Peng H R, Liu W, Hou H Y, et al. Pinning effect of coherent particles on moving planar grain boundary: Theoretical models and molecular dynamics simulations[J]. *Materialia*, 2019, 5: 100225.
- [10] An J, Cai Z, Zhu M. Effect of titanium content on the refinement of coarse columnar austenite grains during the solidification of peritectic steel[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2022, 29(12): 2172-2180.
- [11] Bai M, Liu D, Lou Y, et al. Effects of Ti addition on low carbon hot strips produced by CSP process[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, 2006, 13(3): 230-234.