

## 冷却速率对2507超级双相不锈钢 $\sigma$ 相析出的影响

易忠烈, 陈兴润, 魏海霞, 钱张信, 赵得江

(酒泉钢铁集团宏兴钢铁股份有限公司, 嘉峪关 735100)

**摘要:** 采用 Gleeble 3500-GTC 对  $\Phi 10$  mm 2507 超级双相不锈钢(质量分数: 0.017C, 6.22Ni, 25.73Cr, 3.39Mo, 0.27N) 进行 1340 °C 至室温以冷速 1~500 °C/min 连续冷却实验, 并通过 EPMA(电子探针)、EBSD(电子背散射衍射)和热力学计算分析冷却速率对超级双相不锈钢 $\sigma$ 相析出的影响。结果表明: 2507 超级双相不锈钢在 1 °C/min 的冷却速率下, 组织中存在 $\sigma$ 相,  $\sigma$ 相的面积百分比为 2.67%。当冷却速率 $\geq 10$  °C/min, 组织只有奥氏体和铁素体两相组成。热力学计算结果表明, 冷却速率越小,  $\sigma$ 相析出越容易。

**关键词:** 2507 超级双相不锈钢; 冷却速率;  $\sigma$ 相; 热力学计算

## Influence of Cooling Rates on Precipitated $\sigma$ Phase of 2507 Super Duplex Stainless Steel

Yi Zhonglie, Chen Xingrun, Wei Haixia, Qian Zhangxin, Zhao Dejiang

(Hongxing Iron & Steel Co., Ltd., Jiuquan Iron and Steel Group Corporation, Jiayuguan 735100)

**Abstract:** Continuous cooling test of 2507 super duplex stainless steel (mass fraction: 0.017C, 6.22Ni, 25.73Cr, 3.39Mo, 0.27N) from 1340 °C to room temperature by cooling rate 1-500 °C/min has been carried out by using Gleeble 3500-GTC. The influence of cooling rate on precipitated  $\sigma$  phase was analyzed by combining with EPMA (electro-probe macroanalyser) observation, EBSD (electron backscattering diffraction) phase analysis and thermodynamic calculation. The results show that the  $\sigma$  phase exists in the structure of 2507 super duplex stainless steel under the cooling rate of 1 °C/min, and the area percentage of  $\sigma$  phase is 2.67%. When the cooling rate is faster than 10 °C/min, the solidification structure is only composed of austenite and ferrite. The thermodynamic calculation results show that the smaller the cooling rate is, the easier the  $\sigma$  phase precipitates is.

**Key Words:** 2507 Super Duplex Stainless Steel; Cooling Rate;  $\sigma$  Phase; Thermodynamic Calculation

$\sigma$ 相是双相不锈钢中危害最大的析出相, 晶体结构为体心四方(BCT), 为富铬和钼的一种相。 $\sigma$ 相的析出会使其塑性严重下降, 降低抗晶间腐蚀和应力腐蚀性能<sup>[1-7]</sup>。因此, 在2507超级双相不锈钢的生产中(包括连铸、热轧和冷轧),  $\sigma$ 相的控制至关重要。针对 $\sigma$ 相析出的影响因素, 国内外的科研工作者进行了大量的研究<sup>[8-14]</sup>。Cronemberger等人<sup>[7]</sup>指出低的冷却速率有利于 $\sigma$ 相的析出, 导致铁素体晶粒内部和铁素体/奥氏体界面处的Cr贫化程度显著增加。高祥明等人<sup>[9]</sup>指出2507超级双相不锈钢冷轧加工随着总压下率的增大, 相同退火时间内, 析出相增多, 当总压下率大于50%时铁素体相几乎全部被析出相覆盖, 析出相以 $\sigma$ 相为主。Jang等人<sup>[11]</sup>研究了冷却速率对超级双相不锈钢中析出行为的影响, 研究表明, 当冷却速率低于0.22 K/s时, 铁素体( $\delta$ )、奥氏体( $\gamma$ )、 $\sigma$ 和 $\chi$ 相析出; 当冷却

速率 $\geq 0.22$  K/s时,  $\sigma$ 和 $\chi$ 相不析出。

2507超级双相不锈钢板坯中存在大量的 $\sigma$ 相, 会导致板坯塑性大幅度降低, 因此, 有必要研究不同冷却速率对 $\sigma$ 相析出的影响。Gleeble 3500-GTC热力学模拟实验机具有对试样进行快速加热和冷却的能力。本文采用Gleeble 3500-GTC热力学模拟实验机、OXFORD NordlysMax2 EBSD(电子背散射衍射)系统、EPMA(电子探针)和Thermo-calc热力学计算软件对2507超级双相不锈钢不同冷却速率下 $\sigma$ 相的析出进行研究, 以期为2507超级双相不锈钢连铸工艺参数的制定提供参考。

### 1 实验

#### 1.1 实验材料

2507超级双相不锈钢板坯采用“100 t电弧炉-110 t AOD-110 t LF-连铸”工艺进行生产。板坯尺

表 1 2507 超级双相不锈钢化学成分/%

Table1 Chemical composition of 2507 super duplex stainless steel/%

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	N
0.017	0.40	0.63	0.022	0.001	6.22	25.73	0.04	3.39	0.27

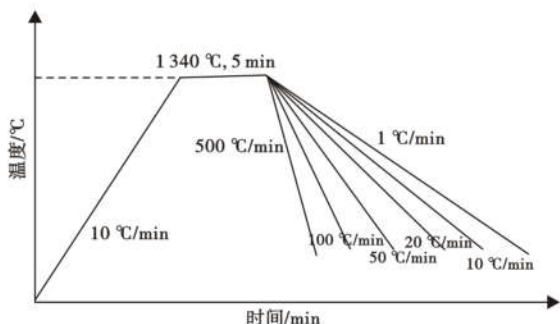


图 1 实验过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of test process

寸为 220 mm × 1 540 mm × 8 000 mm, 化学成分见表 1。

1.2 实验方法

在 2507 不锈钢板坯柱状晶区取样, 加工成 Φ10 mm × 87 mm 圆柱试样。采用 Gleeble 3500-GTC 研究不同冷却速率对 σ 相析出的影响。试样按照 10 °C/min 升温至 1 340 °C 保温 5 min, 然后以 1、10、20、50、100、500 °C/min 的冷却速率, 冷却至室温, 具体的实验过程如图 1 所示。实验后, 取 Φ10 mm × 10 mm 的试样, 采用电子探针和 EBSD 进

行组织和相分析。

电子探针检测: 脆断样品经过镶嵌、研磨和抛光后, 采用 JXA8230 电子探针对微观组织进行观察。

EBSD 检测: 对脆断样品的纵截面进行机械研磨和电解抛光, 电解抛光液为 78 mL 高氯酸, 电流 0.16A, 时间 55 s。样品加工完毕后进行相分析。采用 Zeiss Merlin Compact 扫描电镜 (SEM) 上配备的 OXFORD Nordlys Max2 EBSD 系统进行花样采集, 步长 0.5 μm。

2 实验结果

2.1 不同冷却速率下 EBSD 观察的相分布图

Gleeble 实验后, 采用 EBSD 对不同冷却速率下 2507 钢试样中的组织进行观察, 如图 2 所示。图 2 中蓝色为铁素体, 黄色为奥氏体, 红色为 σ 相。从图 2(a) 中可以看出, 在 1 °C/min 的冷却速率下, 组织中存在 σ 相, σ 相的面积百分比为 2.67%。奥氏体以条状或者块状分布, σ 相在奥氏体和铁素体的相界产生并向铁素体内部延伸。在 10 °C/min 的冷却速率下, 其凝固组织只有奥氏体和铁素体两相组成。随着冷却速率继续增大, 凝固组织中也只有奥氏体和铁素体两相组成, 具体如图 2(c ~ f)。冷却速率越大, 奥氏体相的晶粒尺寸越细小。

2.2 不同冷却速率下 EPMA 观察的组织

采用 EPMA 对 1 °C/min 和 10 °C/min 冷却速率

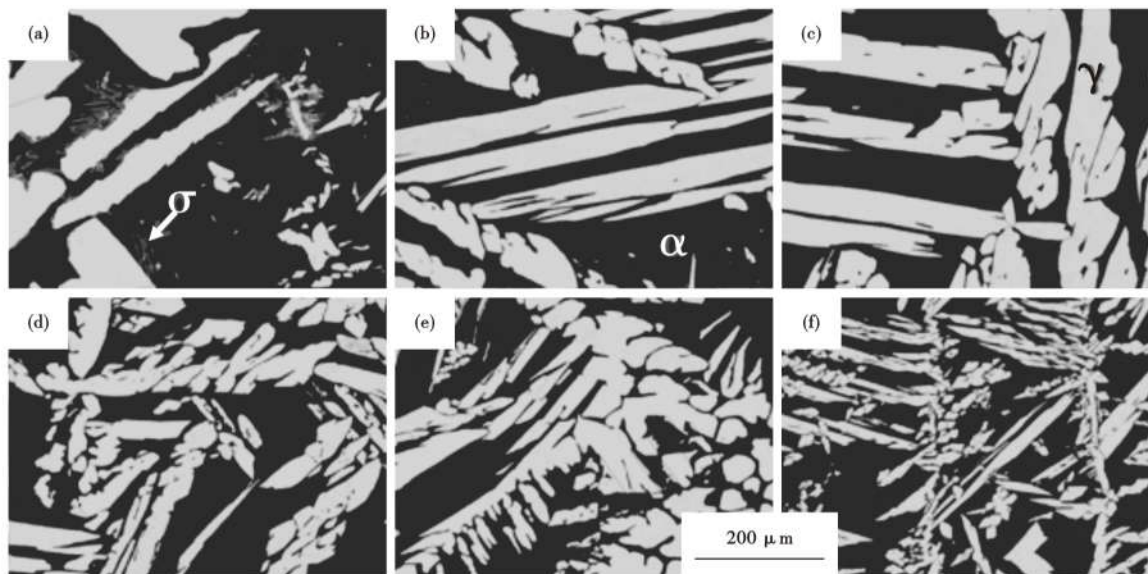


图 2 冷却速率(°C · min<sup>-1</sup>)为:(a)1,(b)10,(c)20,(d)50,(e)100,(f)500 时, EBSD(电子背散射衍射)观察 2507 钢的相分布图

Fig.2 Observe micro-graph distribution diagram of 2507 steel by EBSD (electro backscattering diffraction) at cooling rates (°C · min<sup>-1</sup>): (a)1, (b)10, (c)20, (d)50, (e)100 and (f) 500

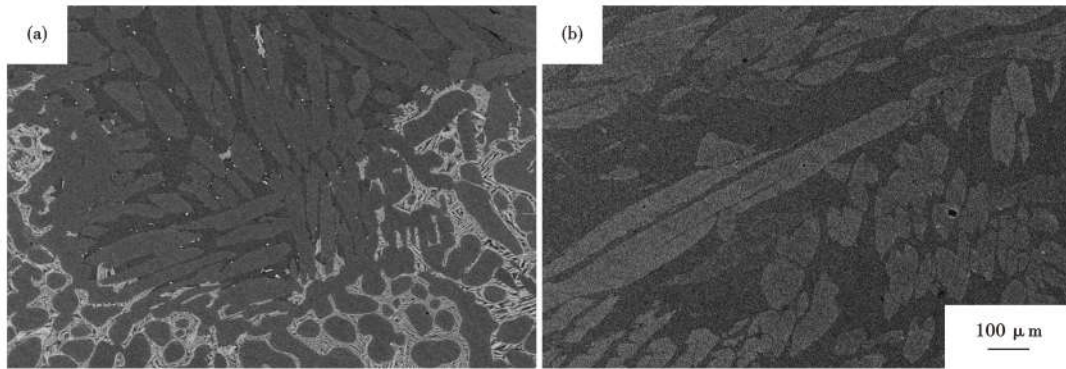


图3 冷却速率(a)1 °C/min 和(b)10 °C/min 时,2507 钢 EPMA 观察的相分布图

Fig.3 EPMA micro-graph of phase distribution in 2507 steel samples cooled at cooling rates: (a)1 °C/min and (b) 10 °C/min

下2507钢试样的组织进行观察,结果如图3所示。图3中基体为铁素体,灰色条状为奥氏体组织,发亮的为 $\sigma$ 相。从图3中可以看出,EPMA和EBSD观察到的结果是一致的,在冷却速率为10 °C/min时,组织中只有奥氏体和铁素体相。随着冷却速率减小到1 °C/min时,凝固组织中存在 $\sigma$ 相。

### 3 热力学计算

采用Thermo-calc 2022a热力学软件对2507超级双相不锈钢平衡凝固相图进行计算。计算表1成分的2507双相不锈钢从1800 °C的高温液相冷却至200 °C的平衡相组成,计算结果如图4所示。从图4中可以看出,随着温度降低,在1470 °C时液相中首先析出高温铁素体,在1415 °C时液相完全消失。随着温度继续降低,在1306 °C时高温铁素体通过 $\delta \rightarrow \gamma$ 反应不断转变为奥氏体。在1003 °C时, $\sigma$ 相通过共析反应 $\delta \rightarrow \gamma_2 + \sigma$ 产生。415 ~ 1003 °C都是 $\sigma$ 相的析出区间, $\sigma$ 相在平衡状态下最大析出量可以达到43%。其他相析出量很少,基本在0.2%以内。通过热力学计算结果可以看出,2507超级双相不锈钢在凝固过程中,只要经过 $\sigma$ 相的析出区间,凝固组织中就会有 $\sigma$ 相存在。冷却速率快,在 $\sigma$ 相的析出区间停留的时间就短,共析反应 $\delta \rightarrow \gamma_2 + \sigma$ 来不及发生,凝固组织中就不会有 $\sigma$ 相的存在。冷却速率慢,在 $\sigma$ 相的析出区间停留的时间就长,共析反应 $\delta \rightarrow \gamma_2 + \sigma$ 就有足够的时间发生,停留时间越长,反应发生就越完全,金相组织中就会有

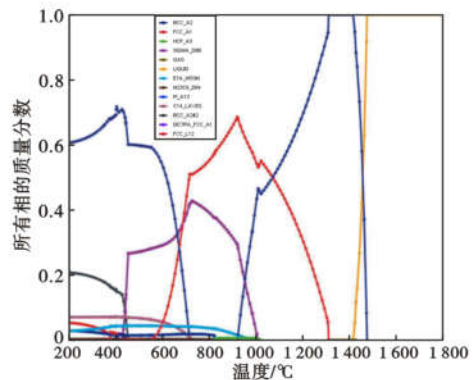


图4 2507 双相不锈钢凝固相图

Fig.4 Phase diagram of 2507 duplex stainless steel solidification

大量 $\sigma$ 相存在。

### 4 结论

(1)2507超级双相不锈钢在1 °C/min的冷却速率下,组织中存在 $\sigma$ 相, $\sigma$ 相的面积百分比为2.67%。当冷却速率 $\geq 10$  °C/min,凝固组织只有奥氏体和铁素体两相组成,最佳冷却速率为10 °C/min。

(2)2507超级双相不锈钢凝固组织中 $\sigma$ 相在奥氏体和铁素体的相界产生并向铁素体内部延伸。

(3)热力学计算结果表明,在平衡凝固过程中 $\sigma$ 相在1003 °C时产生。415 ~ 1003 °C都是 $\sigma$ 相的析出区间, $\sigma$ 相在平衡状态下最大析出量可以达到43%。冷却速率越小, $\sigma$ 相析出越容易。

### 参考文献

[1]沈伟,孙丽娟,李长荣,等.固溶处理对S32707特超级双相不锈钢析出相、组织及性能影响[J].工程科学学报,2021,43(10):1339-1345.  
[2]沈楚,邹德宁,赵洁,等.凝固冷却速率对2507超级双相不锈钢微观组织的演变及耐蚀性能的影响[J].材料保护,2021,54

(4):74-79.

[3]向红亮,何福善,刘东.时效温度对铸造超级双相不锈钢析出相的影响[J].金属学报,2009,45(12):1456-1460.  
[4]向红亮,刘东,阮方如,等.时效析出相对铸造2507超级双相不锈钢力学及耐蚀性能的影响[J].金属学报,2010,46(8):941-

945.

[5] Badji R, Kherrouba N, Mehdi B, et al. Precipitation kinetics and mechanical behavior in a solution treated and aged dual phase stainless steel[J]. *Materials Chemistry & Physics*, 2014, 148(3): 664-672.

[6] Yan Z, Yuan W, Shuai T, et al. Edge cracking prevention in 2507 super duplex stainless steel by twin-roll strip casting and its microstructure and properties[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 266: 246-254.

[7] Maria Eurenice Rocha Cronemberger, Sandra Nakamatsu, Carlos Alberto Della Rovere, et al. Effect of cooling rate on the corrosion behavior of as-cast SAF 2205 duplex stainless steel after solution annealing treatment[J]. *Materials Research*, 2015, 18(Suppl 2): 138-142.

[8] 逢旭光,刘润青,王文涛,等.时效温度对 S32750 超级双相不锈钢组织和抗氢氟酸腐蚀性能的影响[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2017, 37(6): 519-525.

[9] 高祥明,裴明德,李国平.冷轧硬化对超级双相不锈钢 S32750 析出相的影响[J]. *钢铁*, 2019, 54(9): 94-98.

[10] 张志宏.冷却速率对 2507 超级双相不锈钢  $\sigma$  相析出的影响[J]. *轧钢*, 2018, 35(5): 34-38.

[11] Eun Seok Jang, Ki Young Kim, Suk Jun Kim. Influence of the cooling rate on the phase precipitation of super duplex stainless steel[J]. *Journal of Korea Foundry Society*, 2015, 35(2): 023-028.

[12] Irene Calliari, Paola Bassani, Katya Brunelli, et al. Effect of continuous cooling on secondary phase precipitation in the super duplex stainless steel ZERON-100[J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2013, 22(12): 3860-3866.

[13] Gi-Hyoum Kwon, Young-Sang Na, Wee-Do Yoo, et al. Effects of the cooling rate after annealing treatment on the microstructure and the mechanical properties of super-duplex stainless steel[J]. *Journal of the Korean Institute of Metals & Materials*, 2012, 50(10): 735-743.

[14] Chen T H, Yang J R. Effects of solution treatment and continuous cooling on  $\sigma$ -phase precipitation in a 2205 duplex stainless steel[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2001, 311(1-2): 28-41.

### 下 期 要 目

结晶器电磁搅拌对 Q355NE $\Phi$ 800 mm 圆坯凝固组织及偏析的影响 .....	周伟基等
8620 系齿轮钢 300 mm $\times$ 340 mm 铸坯宏观偏析改善 .....	葛洪硕等
冷拔变形量对 30CrMnSiNi2A 六角材晶粒度及脱碳判定的影响 .....	赵成志等
高成材率模具钢用 3.1t 轧制锭的优化设计与生产实践 .....	韩 东等
盐浴等温热处理对超高强硬线钢 100Si 组织和性能的影响 .....	郭洛方等
Cr 对超高强帘线钢 LX82A 工艺和力学性能的影响 .....	宋廷成等
高钛焊丝钢保护渣吸收 TiN 的研究 .....	王时松等
预热处理工艺对 SCr420H 齿轮钢高温渗碳奥氏体晶粒长大行为的影响 .....	苏 梁等
高镜面塑料模具钢 P80 在线固溶工艺实践 .....	李声廷等
自由锻工艺及碳含量对高温合金 GH3128 显微组织与力学性能影响 .....	李成龙等
TP170P 大口径高钢级射孔枪管开发 .....	周家祥等
废钢比对转炉钢液过氧化的影响及配料调优 .....	李立凯等