

AISI409L 铁素体不锈钢板坯连铸过程工艺研究

杨 军, 王立江, 盛建华

(宝山钢铁股份有限公司不锈钢分公司, 上海 200431)

摘 要: 由于 409L 铁素体不锈钢的物理特性和稳定化元素的加入, 使得连铸过程中存在水口堵塞、板坯宽度不稳定、柱状晶发达、板坯易断裂等问题。针对上述情况, 不锈钢分公司炼钢厂针对该钢种凝固特点、高温物理特性、析出物析出行为等方面进行了研究, 解决了 409L 钢种浇铸过程中的工艺问题, 保证了产品的质量。

关键词: 409L 不锈钢; 高温特性; 工艺调整

中图分类号: TF76 文献标识码: A 文章编号: 0449-749X(2008)03-0029-04

Study of Slab Casting Technology for AISI409L
Ferritic Stainless Steel

YANG Jun, WANG Li jiang, SHEN G Jiar hua

(Stainless steel branch, Baoshan Iron and Steel Co., Ltd., Shanghai 200431, China)

Abstract: The SEN clogging, slab width variation, developed columnar crystals, and slab fracture of 409L steel are caused by special physical properties and stabilization element addition. The study of solidification, elevated temperature physical properties and precipitation of 409L was carried out. The preliminary solution was got to solve these technical problems, and the product quality was enhanced.

Key words: 409L stainless steel; elevated temperature property; technological adjustment

近年来, 由于不锈钢产量的上升造成了镍资源短缺和价格高涨, 使低镍或无镍的铁素体不锈钢开始得到了国内外不锈钢生产企业和制品企业的重视, 其产量规模不断提高。公司主要的生产目标是 Cr 的质量分数为 10% ~ 14% 级别铁素体不锈钢 AISI409L, 该钢种是一种 Cr 的质量分数为 12% 的基本型稳定化低碳氮铁素体不锈钢, 主要用于汽车排气系统和部分耐用消费品领域。材料设计中, 一定量的 Ti 或 Nb 作为稳定化元素被加入, 以减少晶界贫 Cr 现象。在生产实践中, 由于铁素体不锈钢固有的物理特性和稳定化元素的加入, 连铸过程一度非常困难, 水口堵塞、板坯宽度控制、等轴晶率控制、表面质量、缓冷工艺等一系列工艺问题严重影响了该钢种的正常生产。为解决问题, 大量的资源被投入到 409 L 的浇铸工艺研究中, 到目前为止, 机理研究和相应工艺调整已在生产实践中产生效果。应该指出, 上述研究工作的意义不仅对于 409 L 不锈钢本身, 而且对其它 Cr 含量级别的稳定化或非稳定化铁素体不锈钢的生产也具有借鉴意义。

1 宝钢不锈钢 AISI409L 连铸板坯生产工艺

不锈钢板坯连铸工艺装备及主要参数见表 1。

表 1 不锈钢板坯连铸机主要参数和技术装备

Table 1 Main parameters of slab caster for stainless steel

项目	内容
机型	直弧型
可浇铸钢种	304, 304L, 316, 316L, 409L, 410, 420, 430
流数	1 机 1 流
中间包工作容量/t	25
板坯厚度/mm	(750~ 1 650) × (180, 200)
拉速范围/(m • min ⁻¹)	1. 4(AISI409L) (最大)
结晶器长度/mm	900
弯曲/矫直点数	7/9
冶金长度/mm	24 501
主要工艺技术和装备	钢包下渣检测; 长水口密封圈+ 氩封、内装整体式 SEN; 中间包连续测温; 结晶器液面自动控制; 扇形段电磁搅拌; 动态轻压下

典型 AISI409L 不锈钢化学成分(质量分数, %) 为: C 0. 014, Si 0. 52, Mn 0. 3, S 0. 001, P 0. 016, Cr 11. 55, Ni 0. 09, Ti 0. 203, N 0. 0052。

2 水口堵塞问题

在 409L 钢种浇铸过程中, 水口堵塞引起的拉速下降甚至于浇铸停止的现象时有发生。图 1 显示了由于水口堵塞造成一炉内浇铸停顿的过程。

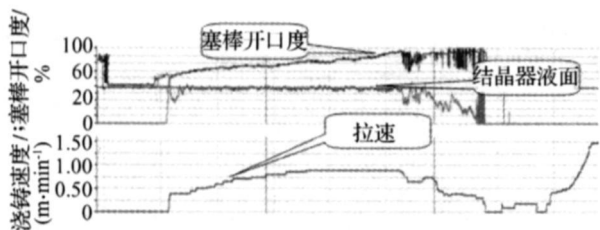


图 1 塞棒开口度随浇铸时间变化图

Fig. 1 Stop rod position changed with casting time

图 1 表明,在工艺条件不合理的情况下,Ti 稳定 409L 铁素体不锈钢的浇铸可以在短短 30 min 内

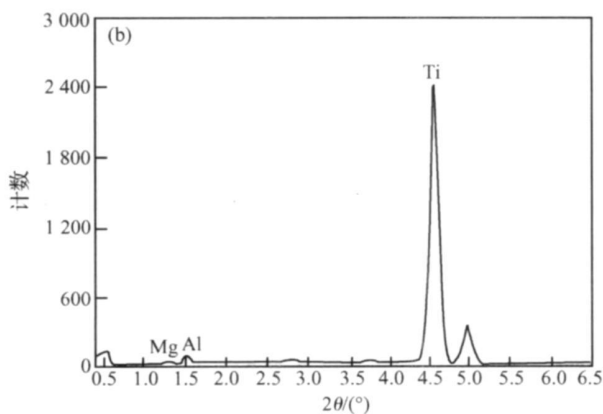
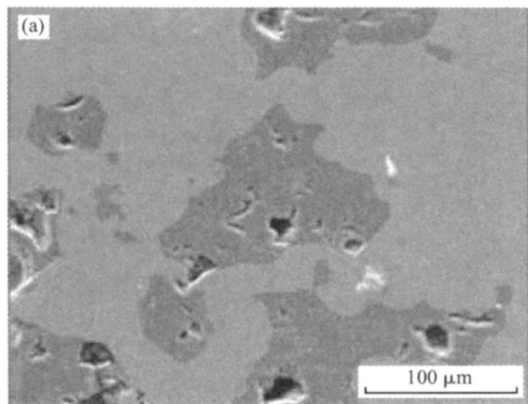


图 2 堵塞物 SEM 扫描照片 (a) 和堵塞物能谱分析 (b)

Fig. 2 Morphology (a) and spectrum analysis (b) of clogged material

表 2 堵塞物化学成分(能谱结果)

Table 2 Chemical composition of clogged material (Spectrum analysis)

元素	O	Mg	Al	Ti
质量百分比/%	27.39	1.86	2.16	68.60
原子百分比/%	51.87	2.32	2.43	43.39

从能谱分析结果看,TiO₂ 是堵塞物的主要组成部分,没有发现 TiN 的大量富集。表 2 数据可以说明:

- (1) 连铸工序以前钢液中大颗粒 TiO₂ 夹杂物没有完全去除,吹氩工艺和钢液镇静时间需要调整;
- (2) 钢包自开率偏低造成钢流暴露,二次氧化严重,形成弥散 TiO₂ 夹杂物;同时,吸入的 N 还不足以引起 TiN 析出。

浇铸过程中,如果钢液中有一定数量的 TiO₂ 夹杂存在,其可能在浸入式水口内壁钢液流速较慢的区域形成附着。粗糙附着面形成后,由于 TiO₂ 与 11% Cr-Fe 钢液之间的浸润角较小,水口内壁形成的 TiO₂ 结瘤物传热较快^[1],钢液凝固使结瘤层

便由于浸入式水口的完全堵塞而被迫停止,同时水口堵塞过程伴随着结晶器液面的大幅震荡,板坯表面质量恶化,修磨损失上升。

研究工作围绕含有堵塞物的水口进行,观察含有堵塞物的浸入式水口断面,可以看到水口通钢孔表面附着有大量灰色脆性多孔物质并伴有大量冷钢呈网格状将脆性物质包围。将水口横切后取小块堵塞物处理后经 SEM 观察,可以发现浅灰色钢基体上存在深灰色夹杂物,图 2 (a);选取其中非金属部分以能谱分析组成成分,得出结论见图 2 (b)。

逐渐变厚,TiO₂ 夹杂附着速度加快,在短时间内堵塞水口,影响浇铸顺行。因此,合理的吹氩、镇静工艺和避免 Ti 加入后钢液二次氧化是不锈钢分公司防止 409L 不锈钢浇铸过程水口堵塞的重要措施;同时应该认识到,虽然目前在水口堵塞物中没有发现 TiN,但 TiN 高温析出相仍是 Ti 稳定不锈钢水口堵塞的重要原因,完全的保护浇铸仍是必须的。

在材料性能满足的情况下,以部分 Nb 或 Zr 作为稳定化元素加入,减少 Ti 的加入量,也是解决 409L 不锈钢浇铸过程水口堵塞的方法。

3 板坯宽度控制问题

409L 铁素体不锈钢在浇铸过程中易产生板坯宽度随拉速变化而变化的趋势。由于出结晶器坯壳的高温强度相对比较低,在失去侧面支撑的情况下,409L 钢坯壳厚度和钢液静压力的双重影响将使宽面发生形变延展,使板坯宽度发生变化,该变化不同于普通的窄面鼓肚,因为此类板坯的窄面基本保持平直。该问题的出现是由于铁素体不锈钢的固有特性决定的,也是该类不锈钢生产中的难点之一。

不锈钢分公司连铸设备具有 Autopilot 功能, 但调整幅度小于 5 mm, 无法完全解决问题, 工艺上的改进在所难免。恒拉速是最直接的解决方法, 稳定的拉速可以保证出结晶器坯壳厚度的稳定和钢液静压力的稳定, 从而为连铸开浇前结晶器宽度设定提供一个稳定的参考系。问题在于, 确定拉速的因素非常多, 钢液过热度、钢水质量情况、生产节奏匹配等都会影响浇铸速度, 完全稳定的拉速控制在实际生产中几乎无法实现。图 3^[4] 在某种程度上给出了另外一种可能性: 调整二冷工艺, 提高 409L 不锈钢坯壳强度使之足以抵抗钢水静压力。

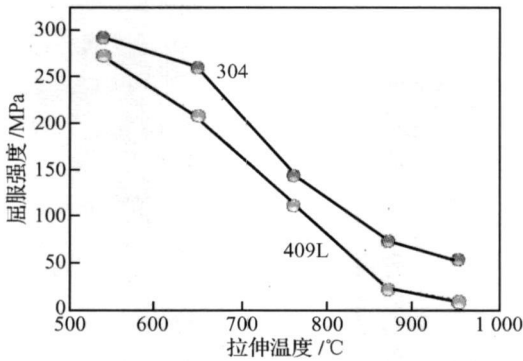


图 3 典型铁素体不锈钢和奥氏体不锈钢的高温强度

Fig. 3 Elevated temperature strength of ferritic and austenitic stainless steels

调整 I、II 扇形段冷却强度后, 出结晶器坯壳温度下降至 850 ℃ 左右, 从而使坯壳强度上升至 40 MPa, 抵抗钢液静压力能力加强, 板坯宽度波动程度降低, 图 4。

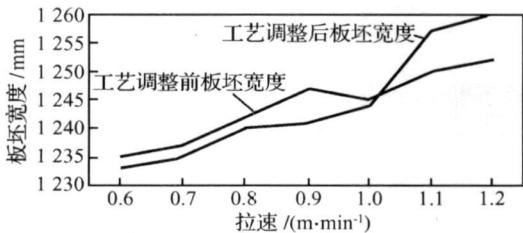


图 4 409L 钢种板坯宽度(目标1250 mm)随拉速变化趋势

Fig. 4 409L steel slab width changed with casting speed

图 4 显示, 二冷强度的调整可以有效减小板坯宽度随拉速波动的幅度, 但无法完全解决 409L 板坯宽度问题。因此, 在解决该问题时, 仍需考虑拉速控制等其它工艺手段。

在调整二冷工艺时, 必须考虑如何在 409L 不

锈钢板坯宽度控制和等轴晶比例之间形成平衡, 因为强冷带来了铸坯厚度方向温度梯度提高的问题, 柱状晶生长趋势强烈, 不利于冷轧退火板表面光洁度的提高。

4 等轴晶率

409L 不锈钢薄板产生折皱状(Ridging)缺陷是该钢种在塑性变形中形成的严重的表面质量问题^[2]。由于板坯凝固过程中形成的发达的柱状晶凝固组织通过热轧不能被完全破坏而残留到最终退火板, 如图 5 所示。(001) 柱状晶影响了最终产品的晶粒聚集组织和带状结构^[3], 并形成折皱缺陷。

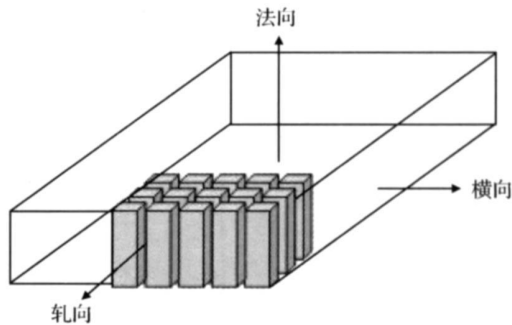


图 5 409L 不锈钢退火板晶粒取向示意图

Fig. 5 Schematic of crystal orientation in 409L slab

铸流电磁搅拌(S-EMS)通常用来破碎初生的柱状晶。同时, 柱状晶碎片可以成为形核质点, 增加等轴晶比例。研究认为, 当 409L 连铸板坯等轴晶率达到或超过 45% 时, 柱状晶对最终冷轧退火板折皱缺陷的不利影响已基本弱化, 其表面抗折皱特性趋于稳定^[4]。

不锈钢分公司板坯连铸机在 3 号扇形段安装有 S-EMS 装置, 最大搅拌电流为 1700 A, 图 6 为 409L 不锈钢板坯等轴晶率和搅拌电流强度之间的关系。

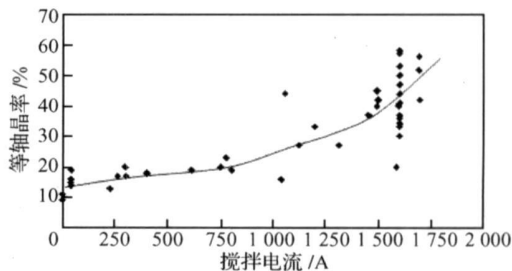


图 6 409L 不锈钢板坯等轴晶率和搅拌电流的关系

Fig. 6 Equiaxed crystal zone of 409L slab changed with stirring current

除了不同的搅拌电流, 试验炉次具有相同的搅拌工艺参数设定, 包括频率和搅拌模式; 浇铸参数方面, 上述试验炉次的钢液过热度 and 拉速均不相同。从试验数据分析, 2 点可以明确:

(1) 搅拌电流 < 600 A 的情况下, 等轴晶率维持在 10% 左右, 等轴晶率值偏差在 $\pm 5\%$, 显示在此范围内搅拌电流的增加还不足以折断板坯柱状晶; 同时, 其它工艺参数在搅拌能不足的情况下对板坯等轴晶率几乎没有影响;

(2) 搅拌电流 > 600 A 后, 等轴晶率随搅拌电流上升而提高, 在到达 1600 A 搅拌电流后, 大部分板坯等轴晶率可以达到 45% 以上的水平。同时, 等轴晶率偏差值也随搅拌电流提高而上升 ($\pm 7.5\%$), 显示其它因素在有足够搅拌能后开始影响等轴晶率变化趋势。

以上结论说明, 搅拌电流是影响 409L 不锈钢板坯等轴晶率最重要的因素。随搅拌电流增加, 搅拌效果不断加强。搅拌电流达到 800 A 以上, 电磁搅拌的效果变得明显, 其它影响因素也开始发挥作用; 电流达到 1600 A, 虽然存在个别板坯等轴晶率偏低的现象, 但大多数板坯内部可以得到大于 40% ~ 50% 均匀致密的等轴晶组织。

在目前无法上移搅拌位置以提高搅拌效率的情况下, 大电流搅拌模式可能在今后相当长的一段时间内执行。在铁素体不锈钢生产比例不断扩大后, 长时间采用最大搅拌功率进行操作在很大程度上会影响电磁搅拌装置的寿命和运行稳定性。因此, 在强调铸流电磁搅拌作用的同时, 下工序的工艺优化也十分重要, 包括热轧工艺制度的优化、退火工艺优化等。

5 缓冷工艺

在组织 409L 铁素体不锈钢生产过程中, 板坯在运输和热加工过程中发生过断裂情况, 断面形貌呈现典型沿晶界脆性断裂特征。虽然该情况发生极为偶然, 但对生产组织和安全造成了很大的威胁, 断裂机理和当时板坯应力状态有关。图 7 为 409L 不锈钢板坯在冷却过程中相组成的变化情况, 从中可以得出:

(1) 高温区非平衡态冷却过程仍存在 $\gamma \rightarrow \alpha$ 的相变过程。由于 b. c. c 结构的 α 相在 C、N 溶解度上远低于 f. c. c 结构的 γ 相^[5], 美国匹兹堡大学 DeArdo 教授等对单稳定 (Ti) T409 铁素体不锈钢中 Ti 的析出行为进行研究后认为, 830~780 °C TiC

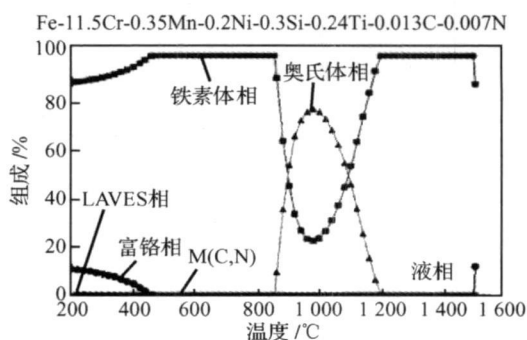


图 7 409L 不锈钢相组成计算 (JMatPro 3.0)

Fig. 7 Calculated phase fraction of 409L (JMatPro 3.0)

在晶界大量析出不可避免, 并形成应力集中点。由于高温状态下 409L 铁素体不锈钢强度很低 (图 3), 应力集中点容易形成裂纹源, 并沿晶界扩展, 成为宏观裂纹, 甚至造成板坯运输过程中发生脆性断裂。所以切割后 409L 板坯在高温区必须缓冷以控制碳氮化物析出速度;

(2) 在中温区 (500 °C) 冷却过程中, 不恰当的冷却工艺会导致金属间相的形成, 所以板坯在 500 °C 附近冷却时冷却速度要加快, 避免脆性相的产生;

(3) 在低温区 (200 °C), 由于 409L 脆性转变点比较高^[6], 低于 200 °C 的情况下板坯修磨容易出现修磨裂纹, 所以板坯温度应尽量避免低于 200 °C 的情况。

从目前不锈钢分公司板坯缓冷设备来看, 缓冷坑和缓冷罩分别承担 80% 和 20% 铁素体不锈钢板坯冷却任务, 冷却效果见图 8。

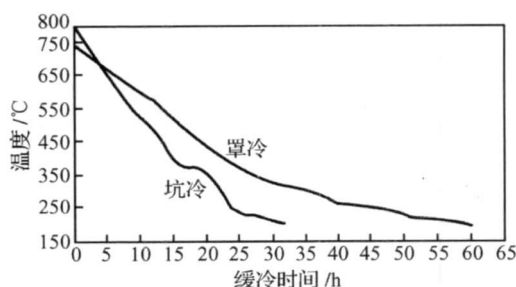


图 8 板坯冷却效果曲线

Fig. 8 Cooling curves of slab

从板坯冷却效果看, 由于缓冷坑存放板坯容量较大 (72 块板坯), 板坯调运过程中坑盖频繁开启导致坑内板坯温度变化大, 不利于板坯冷却速度控制; 保温罩存放板坯数量有限 (8 块), 但冷却效果比较稳定, 有利于控制板坯冷却速度, 保证板坯质量。

(下转第 37 页)

参考文献:

[1] LI Chuan-sheng, Thomas B G. Thermomechanical Finite Element Model of Shell Behavior in Continuous Casting of Steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2004, 35B (6): 1151.

[2] 王恩刚, 赫冀成, 杨泽宽, 等. 结晶器内小方坯凝固过程及应力分布的有限元数值模拟[J]. 金属学报, 1999, 35(4): 433. (WANG En-gang, HE Ji-cheng, YANG Ze-kuan, et al. Finite Element Numerical Simulation on Solidification and Stress and Continuous Casting Billet in Mold [J]. Acta Metallurgical Sinica, 1999, 35(4): 433.)

[3] Park J K, Thomas B G, Samarasekera I V. Analysis of Thermomechanical Behaviour in Billet Casting With Different Mould Radii [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2002, 29(5): 359.

[4] 荆德君, 蔡开科. 连铸结晶器内热力耦合状态有限元模拟[J].

金属学报. 2000, 36(4): 403. (JING De-jun, CAI Kai-ke. Finite Element Simulation of Thermomechanical Coupled States in Continuous Casting Mold [J]. Acta Metallurgical Sinica, 2000, 36(4): 403.)

[5] 张家泉, 崔立新, 陈志平, 等. 板坯连铸结晶器内温度/应力场耦合模型[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(4): 373. (ZHANG Jia-quan, CUI Li-xin, CHEN Zhi-ping, et al. Coupling Model for Temperature/Stress Fields Analysis in Slab Casting Moulds [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 26(4): 373.)

[6] Han H N, Lee J E, Yeo T J, et al. A Finite Element Model for 2-Dimensional Slice of Cast Strand [J]. ISIJ International, 1999, 39(5): 445.

[7] Matsumiya T, Kajoka J, Mizoguchi S, et al. Mathematical Analysis of Segregation in Continuously Cast Slab [J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1984, 24: 873.

(上接第 32 页)

6 结论

(1) 生产中吹氩工艺和连铸保护浇铸工艺必须保证最大程度地去除一次氧化 TiO₂, 并且确保连铸保护浇铸效果, 避免二次氧化 TiO₂ 的产生, 从而减少浸入式水口堵塞。

(2) 板坯宽度合格率的提高依赖于中间包温度命中率 and 稳定的拉速保证。此外, 二次冷却工艺的调整有利于板坯宽度的控制。

(3) 409L 钢种板坯等轴晶率受浇铸参数变化和电磁搅拌参数变化的影响, 其中搅拌电流大小是影响等轴晶率最直接、最大的影响因素, 搅拌电流不宜低于 800 A。

(4) 根据不同温度段 409L 不锈钢板坯不同的物理特性和析出行为, 其冷却速度需做相应调整; 在缓冷方式上, 易于板坯温度控制的保温罩是首选方法。

感谢匹兹堡大学 BAMPI 实验室在 JM atPro-3.0 使用中的帮助。

参考文献:

[1] Dong S Kim. Clogging of Submerged Entry Nozzle during the Casting of Titanium Bearing Stainless Steels [A]. 80th Steelmaking Conference Proceedings [C]. Beijing: Iron and Steel Society 1997.

[2] Wu P D. Correlation of Ridging and Texture in Ferritic Stainless Steel Sheet [J]. Materials and Science Engineering, 2006, (7): 241.

[3] SooHo PARK. Evolution of Microstructure and Texture Associated With Ridging in Ferritic Stainless Steels [J]. ISIJ International, 1993, 33(7): 783.

[4] 余海峰. 铁素体不锈钢带表面条纹缺陷形成机理研究及控制 [D]. 上海: 宝钢集团, 2006.

[5] 陆世英. 不锈钢 [M]. 北京: 原子能出版社, 1994.

[6] Wolf M. Estimation Method of Crack Susceptibility for New Steel Grades [A]. Proceedings 1st European Conference on Continuous Casting [C]. Italy: 1991. 2489.