

双辊薄带连铸生产不锈钢技术探讨

邹冰梅

(中冶赛迪工程技术股份有限公司 连铸事业部,重庆 400013)

摘 要: 不锈钢是双辊薄带连铸工艺重点开发的钢种之一。综述了不锈钢的分类和性能特点,简要介绍了不锈钢的几种生产型式,详细讨论了双辊薄带连铸生产不锈钢的技术要点和难点。

关键词: 不锈钢;双辊薄带连铸;布流系统;侧封技术

中图分类号: TF764.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-1043(2009)04-0068-05

Study of stainless steel produced with twin roll strip casting process

ZOU Bing-mei

(Continuous Casting Department, CISDI Engineering Co., Ltd., Chongqing 400013, China)

Abstract: Stainless steel is one of the important steel grades that can be produced with twin roll thin strip casting process. The present paper summarizes the classification and performance of the stainless steel and briefly recommends several modes of its production and discusses the technological key points and difficulties on stainless steel production with twin roll thin strip casting in detail.

Key words: stainless steel; twin roll strip casting; metal delivery system; side seal technology

目前一般采用常规板坯连铸机+半连续式轧机、常规板坯连铸机+炉卷轧机、薄板坯及中等厚度薄板坯连铸连轧生产不锈钢热轧板、卷。为寻求低投资和低生产成本的生产工艺,近 20 年美国、日本、德国、法国、英国和中国等都在开展双辊连铸特殊钢薄带的研究,如不锈钢、硅钢、高速钢、耐热钢等,其中不锈钢是双辊薄带连铸工艺重点开发的钢种之一。双辊薄带连铸技术的特点是钢液在两反向旋转的水冷辊间快速凝固(冷却速度在 $100\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 之间),使浇铸的材料在微观结构上发生显著变化,如晶粒得到细化,抑制第二相的析出等,从而大大改善材料的性能。

1 不锈钢的分类及生产工艺特点

根据钢种的成分、结晶组织、显微结构和性能特点等因素及分析,不锈钢可以分为四大类:铁素体类($\alpha\text{-Fe}$)不锈钢、马氏体类($\alpha\text{-Fe}$)不锈钢、奥氏体类($\gamma\text{-Fe}$)不锈钢和奥氏体+铁素体双相($\alpha\text{-Fe}+\gamma\text{-Fe}$)不锈钢。各种不锈钢的特点如表 1 所

示。目前,不锈钢主要生产工艺特点如表 2 所示。

2 双辊薄带连铸工艺生产不锈钢的技术要点和难点

双辊薄带连铸工艺是一个在高温条件下以较高的铸速连续铸出薄带的复杂过程,伴随有流动、传质、凝固传热、应力变形以及相变等,其工艺特点有:

- (1) 厚度薄,一般产品厚度只有 $1\sim 6\text{ mm}$;
- (2) 拉速高,约 $30\sim 150\text{ m/min}$,比板坯和薄板坯连铸高几十倍;
- (3) 冷却凝固速度快,在凝固过程中杂质元素来不及产生偏析,不会对薄带质量产生严重影响,所以可用低价废钢作原料;
- (4) 冶金长度短;
- (5) 结晶器与凝固带钢之间无相对运动,无摩擦力。

不锈钢为多元素的高合金钢,含 Cr 量比普碳钢高很多,钢水中含有多种易氧化元素。因不锈

作者简介:邹冰梅(1976-),女,中冶赛迪工程技术股份有限公司连铸事业部,工程师,硕士,从事连铸机的工艺设计。

表 1 各种不锈钢的特点

种类	结晶组织	显微结构	主要成分	有无磁性	能否热处理	耐腐蚀性
铁素体类不锈钢	α -Fe	体心立方	$15\% \leq w(\text{Cr}) \leq 30\%$ $w(\text{C}) < 0.12\%$	有	不能	较强
马氏体类不锈钢	α -Fe	体心立方	$12\% \leq w(\text{Cr}) \leq 18\%$ C 有低碳、中碳和高碳 $w(\text{Ni}) < 2\%$	有	不能	强
奥氏体类不锈钢	γ -Fe	面心立方	$w(\text{Cr}) \geq 17\%$ $w(\text{Ni})$ 或 $w(\text{Mn}) > 8\%$ C 有低碳、中碳和高碳	无	能	最强
奥氏体 + 铁素体 双相不锈钢	α -Fe + γ -Fe	体心立方	$18\% \leq w(\text{Cr}) \leq 27\%$ $w(\text{C}) \leq 0.03\%$ $4\% \leq w(\text{Ni}) \leq 5\%$ $w(\text{Mo}) \leq 4\%$ $0.1\% \leq w(\text{N}) \leq 0.28\%$	有	能	较强

表 2 不锈钢主要生产工艺特点

机组名称	不锈钢产量/ 万 t	薄带厚度/ mm	品种和质量	设备重量	占地 面积	基建 投资	单位加 工费用
常规板坯连铸机 + 半 连续式轧机	250~500	≥ 1.5	生产全部品种,质量满足高端产品要求	最大	最大	最大	最大
常规板坯连铸机 + 炉 卷轧机	50~80	≥ 1.2	品种规格有限制,质量满足用户的要求	较大	较大	较大	较大
中等厚度薄板坯连铸 连轧	100~250	≥ 2.0	能生产大部分品种,质量满足要求	大	大	大	大
薄板坯连铸连轧	100~200	≥ 1.0	品种规格有限制,质量满足用户的要求	中	中	中	中
薄带连铸	40~70	0.7~2.0	品种有限,可满足一般产品要求,但质量 不稳定	小	小	小	小

钢液黏度大,流动性差,在相同的钢水过热度
和冷却条件下,不锈钢比普碳钢的凝固时间要长一
倍左右。因此,不锈钢是双辊薄带连铸的重点开
发钢种之一。部分公司开发的双辊薄带铸轧机生
产不锈钢的技术指标如表 3 所示。

双辊薄带连铸工艺生产不锈钢有其特有的技
术要点和难点。下面就结晶辊辊径和材质、钢液

氧化、布流系统、侧封技术、工艺参数、控制系统等
展开讨论。

2.1 结晶辊辊径和材质

结晶辊辊径大小和材质与薄带的质量和生
产成本密切相关。早期研究者认为辊径大、熔池高
度高,液面宽,有利于降低熔池铸流冲击,平稳钢
液面,提高薄带质量。但 IHI、BHP 和纽柯公司

表 3 部分公司开发的同径双辊薄带铸轧机生产不锈钢的技术指标

开发公司	铸辊直径/ mm	辊宽/ mm	铸速/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	带厚/ mm	卷重/ t	主要生产钢种
德国蒂森和法国于齐诺尔公司	1500	865	20~100	1~6	25	不锈钢、硅钢、碳钢
日本新日铁和三菱重工	1200	1330	20~130	1.6~5	10	不锈钢
澳大利亚的 BHP 与日本的 IHI 公司		1900	30~40	2	18	不锈钢、低碳钢
韩国浦项和英国戴维公司	750	350	30~50	2~6	1	不锈钢、碳钢
英国钢铁联合公司	750	400	8~21	2~6	3	不锈钢、硅钢、碳钢
德国蒂森克虏伯、法国于齐诺尔和奥地利奥钢联公司	1500	800	8~100	2~7	20	不锈钢、电工钢
日本的 IHI、澳大利亚的 BHP 与美国的 纽柯公司	500	2050	30~150	0.7~2.0	25	不锈钢、碳钢

的合作研究者认为,小辊径可以减少侧封板磨损带来的损耗,使设备投资和运行成本降低,并在美国的克劳福兹维尔厂建设了一台结晶辊直径为 500 mm 的不锈钢双辊薄带连铸机,且取得了成功,大大降低了生产成本^[1]。

结晶辊是双辊薄带连铸的核心设备。浇铸时若结晶辊发生形变,会影响铸带的最终形状,影响铸带的表面质量。目前结晶辊大多采用钢制圆柱体芯部,在其轴向和纵向布置许多冷却介质通道;辊芯外侧为 40~45 mm 厚的铜或铜合金外套,外套内侧布置许多冷却介质流动沟槽,可对辊套强制导热;外部镀镍或镍铬合金。这种结晶辊热变形较小,但造价高,寿命低,使生产成本居高不下。因此,众多研究者开展对结晶辊温度场及其热变形规律的研究^[2-3],一方面积极寻求新的结晶辊材质,另一方面不断优化结晶辊辊子形状和内部结构设计,提高辊子使用寿命。

2.2 钢液氧化

不锈钢钢液中含有多种易氧化的元素。在浇铸过程中,如果铸流保护不佳,极易与空气发生反应生成二次氧化物,形成结膜、结壳、翻皮等缺陷。采用双辊薄带连铸工艺生产不锈钢时,为防止钢液氧化,造成夹杂物和有害气体含量增多,影响薄带内部质量和外部质量,需要采用惰性气体如氮气、氩气等保护弯月面。有公司成功研制出一种装置,如图 1 所示,将惰性气体 N_2 、Ar 通入弯月面的各个部位,使钢液与空气完全隔离,防止钢水表面二次氧化和热损失。

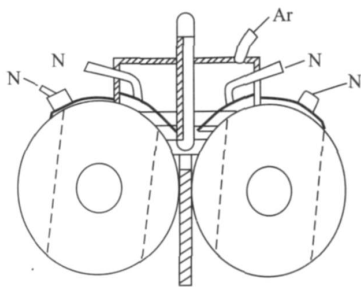


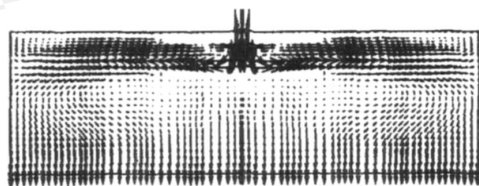
图 1 双辊薄带铸机弯月面保护装置示意图

2.3 布流系统

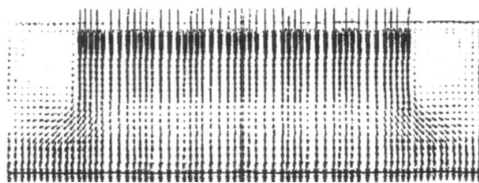
钢液通过布流系统由中间罐注入结晶器熔池,布流系统结构设计决定液面波动状况和熔池内钢液的流动形态,而液面波动状况和熔池内钢液的流动形态与薄带的表面和内部质量又密切相关。较小的熔池液面波动,可以保持稳定的弯月

面,防止出现纵向裂纹。熔池内合理的钢液流动,可以保证整个薄带均匀凝固,使铸带结晶组织均匀。

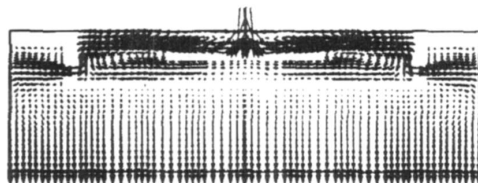
王波^[4]等人通过物理模拟和数学模拟方法对采用传统的管状水口和狭缝式水口对熔池内流体流场进行研究,结果表明这两种布流装置,熔池内钢液流场都不是很理想。采用管状水口,流体从水口两侧流出,碰到侧封板后,一部分流体向上,在侧封板处形成一个小的回流,一部分流体向下,在重力作用下由辊缝流出,如图 2a 所示。采用狭缝式水口,钢液在侧封板处形成较大回流,造成该处钢液过冷而凝固,容易造成液面结壳和卡辊,如图 2b 所示。于是他们开发了一种新型楔形布流系统,包括分配器和布流器两部分。模拟试验表明,采用新型布流系统,使钢液均匀分布在熔池中,保证沿整个辊面薄带均匀凝固,同时可以加强侧封板处钢液的湍动能,防止该处温度过低而使表面结壳,如图 2c 所示。



(a) 管状水口



(b) 狭缝式水口



(c) 楔形布流系统

图 2 不同布流系统时双辊薄带连铸熔池内流体流场分布

2.4 侧封技术

侧封是防止双辊薄带连铸机的钢液从辊的两端溢漏而设计的密封装置,侧封的好坏直接关系

到薄带连铸能否顺利进行。侧封板的结构、材质对薄带的边部质量、漏钢和生产成本影响很大。

采用液压缸顶紧形式的固体式侧封,由于结晶辊与侧封板之间的相对滑动造成侧封板磨损和侧封板受钢水侵蚀造成熔损,不但污染钢液,而且降低寿命。因此要求侧封材料具有合适的导热率、耐蚀度、强度、润滑性,降低侧封板因钢液化学侵蚀及机械磨损造成的损耗。目前侧封板多采用石英、氧化铝等耐热材料制成,寿命低,成本高。

有研究^[5]表明:侧封板与钢水液面和铸辊吻合处的温差最大,应力也最大,所以在侧封板的中上部和与铸辊吻合点处易产生纵向裂纹;在侧封板的边部应力也大,易产生横向裂纹。生产中应提高侧封板的预热温度,采用在线加热功能,保证整个浇铸过程中侧封板附近钢水温度恒定。

内陆钢公司于1989年开始开发电磁式侧封(EMD)装置,通过向钢液表面施加交变磁场,使之与钢液内部的感应涡流发生交互作用来抑制钢液的流动。并于1994年在日本太平洋金属工业公司的日立造船厂工业规模的双辊薄带连铸机上进行了试验。试验结果表明:采用EMD装置可以实现非接触侧封,且对铸带边部无不良影响,可以减少铸带后续加工前的切边量。电磁式侧封技术的成功开发,有力地推动了双辊薄带连铸机工业性生产的进程。

2.5 工艺参数

工艺参数如熔池液面高度、过热度、浇铸速度、浇铸温度、冷却水量、辊速和辊缝等的控制至关重要^[6],它们直接关系到铸坯的显微组织、内部质量、表面质量和几何尺寸精度等。各工艺参数之间相互影响,对工艺参数的控制应根据各种钢种的性能特点,有针对性的整体考虑。

凝固起始点控制是双辊薄带连铸不锈钢的关键。希望凝固在整个带钢宽度上均匀开始,并均匀展开,否则就会出现折皱和纵裂等缺陷。

增大辊速可提高熔池中钢液整体流动水平,有助于钢液的自身搅拌和保持钢液温度及化学成分的均匀,但辊速过大会造成熔池流动不稳定。如铁素体不锈钢,高温强度低,结晶速度快,凝固过程中柱状晶发达,若浇铸中钢水过热度控制不好,柱状晶往往延伸到板坯中心区域,不仅易形成中心偏析和疏松,而且往往导致最终轧材成品表面产生“鱼鳞”缺陷。采用常规法生产时消除这种缺陷的有效措施是采用二冷区电磁搅拌技术,促

进凝固中坯壳内的钢液有序流动,均匀凝固前沿钢水温度,促进等轴晶生长,尽量避免最终轧材产生“鱼鳞”缺陷的危险。采用双辊薄带生产铁素体不锈钢时,可适当提高辊速,加大熔池液面高度,改善不锈钢钢液的流动性。

浇铸温度指金属熔体从喷嘴喷出时的温度。因不锈钢钢液的流动性差,浇铸时比普碳钢的过热度要大一些。但对双辊薄带连铸生产不锈钢,浇铸温度过高会出现薄带重熔现象。一般浇铸铁素体和马氏体不锈钢,该温度应高于合金液相线 $20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$;浇铸奥氏体不锈钢,该温度应高于合金液相线 $40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

不锈钢的浇铸速度希望高一些。浇铸速度提高,弯月面与铸辊之间的接触点就降低,由此由熔池表面扰动引起的凝固起始影响减小。浇铸速度加快,也改善了不锈钢钢液的流动性。

2.6 控制系统

采用结晶器熔池液面控制、铸带厚度控制、二次冷却和浇铸速度控制等自动控制系统,可以稳定浇铸,保证铸带的良好质量。

液面控制采用中间罐塞棒调整钢液流速,由一台电荷耦合器件(CCD)摄像机监视液面,要求液面控制精确度在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内。

自动厚度控制可以采用恒定辊力厚度控制法。恒定辊力厚度控制是借助于液压伺服系统,使结晶辊作用于铸带表面的作用力恒定,并通过调整辊子速度来逐渐修正所产生的厚度偏差。由一个辊力控制回路和一个厚度控制回路组成。辊力控制回路测量辊子作用力并控制其达到预设水平。厚度控制回路调整辊子速度,以测量的辊缝值经补偿后获得的厚度反馈值作为目标值。

二次冷却和浇铸速度控制,应根据不同种类不锈钢的流动、传质、凝固传热、相变和结晶等特点,不同的浇铸状况,建立二次冷却控制模型。

3 结 语

双辊薄带连铸工艺生产不锈钢,由于凝固速度快和直接成形的特点,大幅度降低了设备投资、能源消耗和生产成本,解决了部分特殊不锈钢塑性差和难加工的问题。但为了达到理想的效果,控制生产成本,提高不锈钢铸带的产量、表面质量和内部质量,需采取以下措施:

(1) 选择造价低、寿命长的结晶辊,并尽可能选择小辊径;

- (2) 采用保护浇铸,防止钢液氧化;
- (3) 设计合理的布流系统,优化熔池内钢液流场;
- (4) 采用成熟的、经济的侧封技术;
- (5) 根据不同种类不锈钢的性能组织特点,控制相应的工艺参数,建立相关的控制模型,保证稳定浇铸。

[参 考 文 献]

- [1] Killmore C, Phillips CR, Kaul A, et al. Development of ultrathin cast strip products by the CASTRIP Process[C]// AISTech 2007 Proceedings, 2007.
- [2] Buchner A R, Thiemann M. Twin roll strip casting of steel studies of heat transfer into rolls[C]// 1st chinese-german

seminar on fundamentals of iron and steelmaking. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2004: 276-286.

- [3] Hwang SM, Kang Y H. Analysis of flow and heat transfer in twin roll strip casting by finite element method[J]. Journal of Engineering for Industry, 1995, 117 (3): 305-315.
- [4] 王 波,张捷宇,张 胤,等. 双辊薄带连铸布流系统的模拟优化研究[J]. 铸造技术, 2006, 27 (7): 707-710.
- [5] 张捷宇,赵顺利,樊俊飞,等. 双辊薄带连铸侧封板热应力模拟及试验研究[J]. 包头钢铁学院学报, 2006, 25 (2): 116-118.
- [6] Buchner, Achim Rudiger. Thin strip casting of steel with a twin-roll caster-correlations between process parameters[J]. Steel Research, 1997, 68 (6): 247-257.

(修回日期: 2008-07-13)

(上接第 37 页)

2.2.2 硫化物夹杂变性效果分析

对于硫化物变性, Dsamu Haida^[4]等人提出利用原子浓度比 ACR 作为衡量硫化物变性程度的指标。对于连铸:

$$ACR = \frac{[\%Ca] - (0.18 + 130 \cdot [\%Ca]) \cdot [\%O]}{1.25 \cdot [\%S]} \quad (1)$$

P. V. Ribound^[5]指出,当 $ACR = 0.2 \sim 0.4$ 时,硫化物不完全变性,当 $ACR > 0.4$ 时,硫化物基本变性,而要使铝镇静钢中的硫化物完全变性, ACR 需大于 1.8。

此外,管线钢生产中^[6],为获得良好的抗 HIC 性能,一是把钢中的 $w(S)$ 降低到 20×10^{-6} 以下,二是把钢中的 $w(Ca)/w(S)$ 控制在 $2 \sim 5$ 。如果 $w(Ca)/w(S) < 2$,钢中就仍存在 MnS 夹杂;如果 $w(Ca)/w(S) > 5$,纯 CaO 和 CaS 夹杂就出现在钢中,而无论是 MnS 还是 CaS 夹杂对钢质量都是不利的。

某钢厂管线钢生产中硫化物的变性效果如表 3 所示。

表 3 钢中硫化物夹杂变性效果

$w(S)/10^{-6}$	$w(T, Ca)/w(S)$		ACR	
	标准	现状	标准	现状
$\frac{20 \sim 30}{25}$	$2 \sim 5$	$\frac{0.27 \sim 0.7}{0.46}$	> 0.4	$\frac{0.09 \sim 0.25}{0.15}$

注:表中数据横线上为范围值,横线下为平均值。

从表 3 可知,VD 钙处理后钢中原子浓度比 ACR 在 $0.09 \sim 0.25$,平均值为 0.15,低于硫化物

基本变性的要求;同时 $w(Ca)/w(S)$ 在 $0.27 \sim 0.70$,平均值为 0.46,也低于 $w(Ca)/w(S) > 2$ 的要求。因此钢中的硫化物变性效果较差,对钢的性能不利。

3 结 论

(1) VD 钙处理后,没有观察到纯的 Al_2O_3 夹杂,说明脆性 Al_2O_3 夹杂已得到不同程度的变性,转变成各种钙铝酸盐及钙铝酸盐与 CaS 或 MnS 的复合夹杂;

(2) 分析氧化物及硫化物夹杂变性效果时发现:钢中的氧化物及硫化物夹杂均没有达到完全变性的要求。

[参 考 文 献]

- [1] 佚名. 钙洁净钢[M]. 刘新华,韩郁文,译. 北京:冶金工业出版社,1994.
- [2] Faulring G M, Farrell J W, Hilty D C. Steel flow through nozzles: influence of calcium[J]. Iron making and steelmaking, 1980 (1): 7-14.
- [3] 梁 玫. 石钢转炉洁净钢生产技术研究[D]. 北京:北京科技大学,2006.
- [4] Dsamu Haida, Toshihiko EMI, Goto KASAI, et al. Mechanism of sulfide shape control in continuously cast HSLA steel slabs treated with Ca and/or RE[J]. Tetsu-to-hagane, 1980 (3): 354-360.
- [5] Ribound PV, Gatellier C. New products: what should be done in secondary steelmaking[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1985, 12 (2): 79-86.
- [6] 张彩军,蔡开科,袁伟霞. 管线钢硫化物夹杂物及钙处理效果研究[J]. 钢铁, 2006, 41 (8): 33.

(修回日期: 2008-06-05)