

· 工艺技术 ·

## 屈服强度 750 MPa 低合金钢高强度集装箱用钢的开发

殷 胜<sup>1,2</sup> 朱红丹<sup>3</sup>

(1 西北工业大学材料学院, 西安 710072;

宝钢股份梅钢公司 2 技术中心热轧产品研究所, 3 制造管理部检测中心, 南京 210039)

**摘 要** 设计和开发了屈服强度 750 MPa 低合金高强度集装箱用钢( $\% : 0.06 \sim 0.09\text{C}, 0.25 \sim 0.35\text{Si}, 1.60 \sim 1.80\text{Mn}, \leq 0.015\text{P}, \leq 0.003\text{S}, 0.10 \sim 0.20\text{Mo}, 0.05 \sim 0.06\text{Nb}, 0.09 \sim 0.11\text{Ti}, \geq 0.0015\text{Ca}, \geq 0.015\text{Al}$ )。试验钢的工艺流程为 260 t BOF-LF-RH-230 mm 板坯连铸-热轧成 2~6 mm 板。通过 Nb-Ti 复合微合金化和 Ca 处理, 控制精轧结束温度 840~880 °C, 层流冷却速度  $\geq 60$  °C/s, 卷取 520~580 °C, 热轧钢卷的冷却速度  $\leq 10$  °C/h 等工艺措施, 热轧带钢具有良好的表面质量, 组织为细晶铁素体 + Nb-Ti 碳氮化物, 力学性能为上屈服强度 760~790 MPa, 抗拉强度 860~910 MPa, 伸长率 21%~25%, 满足用户要求。

**关键词** 屈服强度 750 MPa 低合金高强度钢 集装箱用钢 表面质量 开发

## Development of Yield Strength 750 MPa HSLA Steel for Container

Yin Sheng<sup>1,2</sup> and Zhu Hongdan<sup>3</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

2 Hot-Rolled Products Institute, Technical Center,

3 Examination Center, Manufacturing Department, Meisteel Co, Baosteel, Nanjing 210039)

**Abstract** The yield strength 750 MPa high strength low alloy (HSLA) steel for container ( $\% : 0.06 \sim 0.09\text{C}, 0.25 \sim 0.35\text{Si}, 1.60 \sim 1.80\text{Mn}, \leq 0.015\text{P}, \leq 0.003\text{S}, 0.10 \sim 0.20\text{Mo}, 0.05 \sim 0.06\text{Nb}, 0.09 \sim 0.11\text{Ti}, \geq 0.0015\text{Ca}, \geq 0.015\text{Al}$ ) has been designed and developed. The process flowsheet for tested steel is 260 t BOF-LF-RH-230 mm slab casting-hot-rolling to 2~6 mm plate. With the process measures including Nb-Ti compound microalloying and Ca treatment, controlling finishing rolling temperature 840~880 °C, lamina flow cooling rate  $\geq 60$  °C/s, coiling at 520~580 °C, and hot-rolled coil cooling rate  $\leq 10$  °C/h, the hot-rolled strip coil has better surface quality, its structure is fine grain ferrite + Nb-Ti carbo-nitride, and the mechanical properties of strip are upper yield strength 760~790 MPa, tensile strength 860~910 MPa, and elongation 21%~25% to meet the requirement of user.

**Material Index** Yield Strength 750 MPa HSLA Steel, Strip Steel for Container, Surface Quality, Development

为满足集装箱市场发展要求, 研发了一种屈服强度 750 MPa 级集装箱用热轧钢板<sup>[1]</sup>, 解决了现有的集装箱用热轧钢板的强度低、表面易生成锈红色氧化铁皮、生产成本高等技术问题。

### 1 高强集装箱钢板的成分及工艺设计原理

集装箱用钢在加工过程采用剪切、焊接、折弯、辊压等工艺, 因此对材料成形性、焊接性和纯净度要求较高。尤其是随着钢板强度的提高, 对于钢中夹杂物、偏析等洁净度要求更高, 另外随着集装箱使用周期的增加, 对表面质量提出了更高的要求。

#### 1.1 化学成分设计

为使钢板获得 750 MPa 以上的强度, 需要充分利用固溶强化、细晶强化、析出强化、相变强化等多种强化手段<sup>[2-6]</sup>。为减少轧机的负荷和提高钢的强韧性, 在钢中加入微量合金元素 Nb。Nb 可以提高奥氏体的再结晶温度, 扩大未再结晶区, 即在较高的

温度下实现奥氏体非再结晶区轧制, 从而使轧件在较高的温度下完成轧制变形, 获得细小的、含有大量变形带的奥氏体组织, 使相变前的奥氏体组织尽量细化; 另一方面在控制冷却过程中细小的碳氮化铌在控轧控冷过程中析出, 起到沉淀强化作用, 提高钢的强度。此外还必须添加一定量的 Ti, Ti 能提高奥氏体再结晶温度和奥氏体粗化温度, 从而提高连铸和加热过程中晶粒度; 同时 Ti 加入含 Nb 钢中可以延长(NbC)的析出孕育期, 使 Nb-Ti 复合钢中碳化物的析出开始时间较 Nb 钢中晚, 从而使析出物更加细小、弥散; 最后由于钛在高温下, 能与 N 形成 TiN 高温难熔质点, 因此钛的加入还能提高焊接热影响区的晶粒度, 从而改善焊接热影响区的韧性。

为满足 750 MPa 级集装箱钢加工工艺要求, 本试验利用 Ca 处理<sup>[7]</sup>及 Ca 与硫结合降低带状组织级别, 另可实现夹杂物变性使夹杂物球化, 均匀分布

夹杂物,防止高强钢冷弯过程在夹杂物处应力集中导致开裂,满足集装箱板弯曲成形要求。

从低成本控制角度出发,充分利用硅的固溶强化作用。硅溶于铁素体后有很强的固溶强化作用<sup>[8]</sup>,碳钢中每增加 0.1% 的硅,可使热轧钢的抗拉强度提高 7.8 ~ 8.8 MPa,屈服强度提高 3.9 ~ 4.9 MPa;但是硅含量超过 0.4% 以后对韧性和表面质量不利影响明显增大,试验钢在特定弱还原气氛下加热可减小硅对表面质量的不利影响。试验钢的化学成分设计如表 1 所示。

## 1.2 轧制工艺设计

### 1.2.1 加热工艺

设计加热炉空气过剩系数(加热炉中实际燃烧空气量和理论燃烧空气量之比)为 0.9 ~ 1.0,即弱还原气氛<sup>[9]</sup>;设计板坯出炉温度为 1 230 ~ 1 270 °C,均热段时间不低于 30 min,总在炉时间不低于 180 min,保证钢中 Nb、Ti 充分溶解。

### 1.2.2 终轧温度

精轧温度设定有两方面的作用<sup>[10]</sup>,一方面通过奥氏体未再结晶区轧制,得到内部有变形带的扁平状奥氏体晶粒,在随后的层流冷却过程中转变成细小的铁素体晶粒,发挥细晶强化的作用。另一方面精轧温度也不能过低,过低的精轧温度容易诱发 Nb、Ti 微合金碳、氮化物在轧制过程中的奥氏体状态析出,导致在后续的相变过程中没有足够的析出物,影响析出强化效果。在成分设计下 Ar<sub>3</sub> 温度为 754 °C,兼顾考虑轧制负荷,设计精轧结束温度设定为 840 ~ 880 °C。

### 1.2.3 层流冷却方式和冷却速度

在精轧后的冷却目的是采用快的层流冷却速度来抑制晶粒的长大和 Nb、Ti 微合金碳氮化物在高温段的析出,因此冷却方式为前段冷却。通过快速冷却抑制 Nb、Ti 微合金碳氮化物粒子在奥氏体的析出,在形变奥氏体中保留固溶 Nb、Ti 元素,使得在较低温度下的铁素体区间析出细小弥散的 Nb、Ti 微合金碳氮化物成为可能。因此本试验设定层流冷却阶段采用前段强冷,冷却速度 ≥ 60 °C/s。

### 1.2.4 卷取温度和缓冷

表 1 试验低合金高强度钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of tested HSLA steel / %

C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Mo	Ca	Alt
0.06 ~ 0.09	0.25 ~ 0.35	1.60 ~ 1.80	≤ 0.015	≤ 0.003	0.050 ~ 0.060	0.09 ~ 0.11	0.10 ~ 0.20	≥ 0.0015	≥ 0.015

热轧卷取温度主要影响材料的组织、性能。本设计中有 Nb、Ti,根据铌钛微合金元素最佳析出温度,将卷取温度设计为 520 ~ 580 °C。若是卷取温度低于 520 °C,将会导致 Nb、Ti 微合金碳、氮化物析出受到抑制而强度不足;若是卷取温度高于 580 °C,将会导致 Nb、Ti 微合金碳、氮化物析出物粗化而导致韧性不足,后续用户折弯、冲压等过出现开裂问题。

钢卷缓慢冷却的作用使钢板进一步充分析出 Nb、Ti 微合金碳、氮化物粒子,并缩小钢卷内圈和外圈的性能波动。如板卷冷却速度过快,Nb、Ti 微合金碳、氮化物不能充分析出,强度不足。另外,如钢卷冷却过快,钢卷外圈冷却较快,强度较低,钢卷卷中部位冷却较慢,强度较高,则钢卷的性能波动较大。综合考虑,本文设定缓冷阶段热轧钢卷的冷却速度 ≤ 10 °C/h,缓冷终点热轧钢卷温度为 80 ~ 100 °C。

## 2 生产工艺

梅钢二炼钢厂采用深脱硫铁水(S ≤ 0.006%),装入 260 t 顶底复吹转炉,完成脱碳和初步合金化工

表 2 开发的低合金高强度集装箱用钢卷板的力学性能

Table 2 Mechanical properties of strip coil of developed HSLA steel for container

取样部位	上屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率 A/%
技术要求	≥ 750	800 ~ 950	≥ 19
卷头	790	910	21
卷中	775	840	23
卷尾	760	860	25

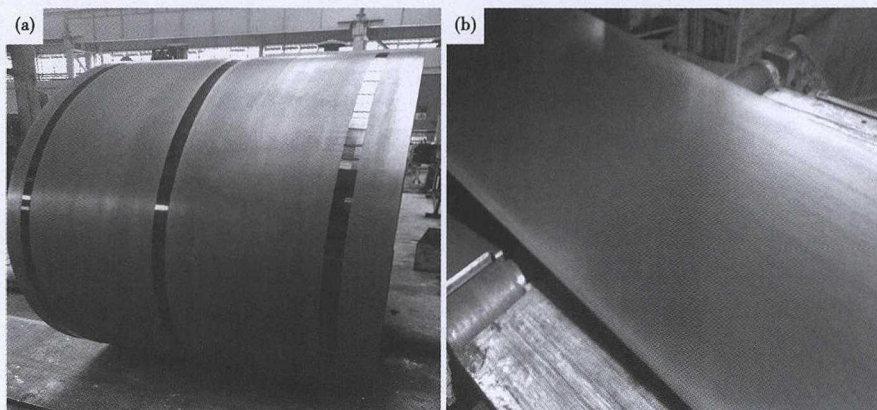


图 1 试验 750 MPa 低合金高强度集装箱用钢热轧卷板整卷(a)和卷内(b)表面质量  
Fig. 1 Surface Quality of whole coil (a) and interior coil (b) of hot-rolled strip coil of tested 750 MPa HSLA steel for container

作,控制转炉出钢温度 $1\ 680\ ^\circ\text{C}$ ,控制出钢碳 $0.02\% \sim 0.05\%$ ;接着钢水进入 LF 精炼,在 LF 完成深脱硫和合金化,LF 出站 $S \leq 0.003\%$ ,在 LF 炉加入中碳锰铁等合金,使钢水中锰含量略小于目标值;随后钢水进入 RH 精炼,使钢水在真空下完成脱气和钢水搅拌,随后加入铝线完成脱氧,最后加入铌铁、硅铁、钛铁、钙线和高碳锰铁完成最终合金化,使 C、Si、Mn、P、S、Nb、Ti、Al 等达到设计范围,RH 出站温度为 $1\ 560 \sim 1\ 580\ ^\circ\text{C}$ ;随后将经过 LF + RH 双重精炼的钢水,通过奥钢联直弧形连铸机连铸成 $230\ \text{mm} \times 1\ 300\ \text{mm}$ 板坯,连铸过热度控制在液相线 $+20\ ^\circ\text{C}$ ,控制拉速波动 $0.8 \sim 1.0\ \text{m/s}$ 。

产品热轧在梅钢 1780 轧机生产,板坯通过热装热送(控制炼钢工序到热轧工序时间,尽量利用板坯余温,减少加热工序能耗),到梅钢二热轧 1780 产线。经过可逆轧机 5 道次粗轧和除磷,轧制成 $(42 \sim 49)\ \text{mm} \times 1\ 250\ \text{mm}$ 中间坯;随后经过 7 道次精轧和除磷,轧制成 $(2 \sim 6)\ \text{mm} \times 1\ 250\ \text{mm}$ ,最后通过层流冷却工序,采用前段冷却方式(钢板一出精轧立即水冷)到卷取温度,经过卷取机收卷后,钢卷在 2 h 之内进入保温罩,冷却 24 h 后出保温罩,使钢种 Nb、Ti 微合金碳氮化物能够充分析出,使钢板能够得到强化,提升钢板力学性能,随后进行取样检测,合格后放行。

### 3 力学性能和组织分析

为了验证本设计钢板力学性能,对钢卷头、中、尾进行取样,按照《GB/T228.1-2010 金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》进行拉伸试验,拉伸试验机为 Instron 5582 型号,其力学性能见表 2。

现场观察,试验钢板表面无锈红色氧化铁皮,其表面质量见图 1(a,b)。

屈服强度 750 MPa 级集装箱用热轧钢板,采用 Zeiss Axiophot2 金相显微镜,观察金相组织,采用 Quanta450 扫描电镜(SEM)及能谱材料析出物成分。其热轧钢板的显微组织为细晶粒铁素体 + Nb 和 Ti 的碳氮化物析出物见图 2(a),铁素体基体上有均匀析出的 Nb 和 Ti 的碳氮化物见图 2(b),铁素体的晶粒度为 10 ~ 12 级。

### 4 结论

(1) 成分设计为( $\%$ ) $0.06 \sim 0.09\text{C}$ , $0.25 \sim 0.35\text{Si}$ , $1.6 \sim 1.8\text{Mn}$ , $\leq 0.015\text{P}$ , $\leq 0.003\text{S}$ , $0.05 \sim$

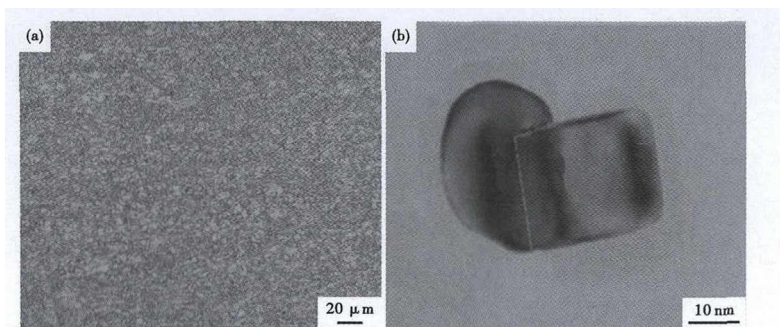


图 2 屈服强度 750 MPa 低合金高强度集装箱用钢热轧板组织和析出碳氮化物的形貌,光学(a),碳氮化物形貌,TEM(b)

Fig.2 Morphology of structure and precipitated carbo-nitride, optical (a) and carbo-nitride, TEM (b) in hot-rolled strip of yield strength 750 MPa HSLA steel for container

$0.06\text{Nb}$ , $0.09 \sim 0.11\text{Ti}$ , $0.10 \sim 0.2\text{Mo}$ , $\geq 0.015\text{Al}$ , $\geq 0.0015\text{Ca}$ ,炼钢采用 LF 和 RH 双重精炼保证材料纯净度,热轧采用 TMCP 工艺,开发了屈服强度 750 MPa 级别的低成本、高强度、高表面质量集装箱用钢。

(2) 钢板的显微组织为细晶粒铁素体 + Nb 和 Ti 的碳氮化物析出物,铁素体的晶粒度为 10 ~ 12 级,铁素体基体上有均匀析出的 Nb 和 Ti 的碳氮化物。

(3) 合理的加热工艺和成分设计,能兼顾钢板表面质量和成本的平衡。

### 参考文献

- [1] 郭晓宏,郝森,王东明,等. 高强集装箱用钢 AQ700MC 的开发[J]. 鞍钢技术,2005(1):17-30.
- [2] 曲鹏. 本钢 FTSC 机组 700MPa 级高强度集装箱用钢的研制[J]. 物理测试,2009,27(3):10-13.
- [3] 刘志伟,赵宝纯,郭晓宏,等. 700 MPa 级高强集装箱用钢的研制[J]. 上海金属,2013,35(4):9-12.
- [4] 由洋,王学敏,尚成嘉. 奥氏体化温度对 HSLA100 高强度低合金组织及冲击韧性的影响[J]. 金属学报,2012,48(11):1290-1298.
- [5] 陆周成,严玲,张鹏,等. 集装箱船用 EH47 高止裂钢的组织 and 性能[J]. 材料热处理学报,2017,38(8):83-87.
- [6] 贺信莱. 高性能低碳贝氏体钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2008:85-146.
- [7] 巧彤,朱志远,王万军,等. 钙处理对集装箱板钢铸坯高温延塑性影响研究[J]. 钢铁,2002,37(6):35-38.
- [8] 李世红,田璐,牛全峰. 集装箱用耐候钢 W600GJ 焊接性能研究[J]. 焊管,2012,35(8):23-26.
- [9] 杨奕,谭文,韩斌,等. 热轧集装箱用钢表面缺陷分析[J]. 钢铁研究,2013,41(2):21-24.
- [10] 李文远,刘锐,惠亚军,等. 终轧温度对热轧高强集装箱用钢组织及性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2015,27(8):64-68.

殷胜(1980-),男,博士生(2015年西北工业大学),硕士(南京理工大学),高级工程师,南京理工大学(本科)毕业,汽车用钢研发。E-mail:yinsheng@baosteel.com

收稿日期:2018-08-02