

345 MPa 级表层超细晶普碳钢中厚板的工业试制

范建文¹, 左智宏², 谢瑞萍¹, 闫智平², 金永春¹

(1. 首钢集团总公司技术研究院, 北京 100041; 2. 首钢中厚板轧钢厂, 北京 100041)

摘要: 以充分挖掘材料潜力提高中厚板强度级别为目标, 开展了普碳钢中厚板的表层组织超细化和心部组织细晶化控轧控冷工艺研究。在形变相变规律研究及实验室轧制工艺摸索的基础上, 制定了现场轧制工艺。在首钢中厚板厂3500 mm 轧机上, 采用化学成分(质量分数, %)为 0.13~0.16 C-0.20~0.25 Si-0.80~0.95 Mn-0.01~0.02 P-0.005~0.010 S 的连铸坯, 成功轧制出表层超细晶中厚钢板。25 mm 厚钢板的表层铁素体晶粒度达到 12 级, 中心铁素体晶粒度达到 11 级, 屈服强度达到 350~385 MPa, 抗拉强度达到 470~500 MPa, 同时保持 25% 以上的伸长率, 完全满足国标 GB/T1591-94 中规定的 Q345 MPa 级钢的力学性能要求。本研究对于企业降低冶炼成本, 同时提高中厚板产品强韧性具有重要意义。

关键词: 普碳钢中厚板; 铁素体晶粒超细化; 屈服强度; 工业试制

中国分类号: TG335.5 文献标识码: A 文章编号: 0449-749X(2008)07-0059-05

Pilot Production of 345 MPa Plain Low Carbon Steel Plate With Ultra-Fine Ferrite in Surface Layer

FAN Jian-wen¹, ZUO Zhi-hong², XIE Rui-ping¹, YAN Zhi-ping², JIN Yong-chun¹

(1. Shougang Research Institute of Technology, Beijing, 100041, China;

2. Shougang Steel Plate Rolling Plant, Beijing 100041, China)

Abstract: In order to exploit the potential of materials and increase the strength of steel plates, a rolling process was studied to manufacture the plain low carbon steel plates with ultra-fine ferrite in surface and fine ferrite in center. On the basis of the study of austenite deformation and transformation and the rolling process in laboratory, a rolling schedule of pilot production was worked out and was carried out for low carbon (Fe-0.13%-0.16% C-0.20%-0.25% Si-0.80%-0.95% Mn-0.01%-0.02% P-0.005%-0.01S in wt.-%) continuously cast steel slabs on 3500 mm plate mill. The produced plates of 25 mm in thickness were characterized by ultra-fine ferrite of 5 μm in size (ASTM E112 No. 12) in the surface layer and 7 μm (No. 11) in the center. The yield strength was in the range of 350-385 MPa and the tensile strength in the range of 470-500 MPa with elongation of more than 25%. The mechanical properties of the plates met the requirements of Grade Q345 HSLA steel, GB/T1591-94. The study is beneficial to the steel makers in decreasing the steel making cost, and increasing the strength and the toughness of plates.

Key words: plain low carbon steel plate; ultra-refinement of ferrite grains; yield strength; trial-production

随着中国钢铁工业的快速发展, 产能的急速膨胀, 各钢厂的生存和发展将面临环境保护、原材料价格上涨、同行业竞争等诸多方面的挑战。立足自身条件, 设法降低成本提高产品竞争力获取最大利润永远是企业追求的目标。在新形势下, 更显得尤为必要。组织细晶化甚至超细晶化, 既能提高钢的强度又能改善其韧性, 是钢铁企业降低冶金成本, 提高产品档次的有效方法, 目前已经成为材料设计和轧钢工艺优化的重要研究内容。这方面的研究已经取得了重要的研究和应用成果^[1-3]。在国内, 采用组织超细晶化工艺成功开发出 400 MPa 级化学成分类似于普碳钢热连轧板卷, 以及 400 MPa 级 Q235

化学成分的长型材^[4]。然而, 随着轧件厚度增加, 生产流程自动化程度低、轧制道次间隔时间长、难以获得大冷却速度等多种因素, 致使中厚板的组织超细化很困难。目前, 这方面研究得较少。然而, 利用轧件表层组织变形量大, 冷却速度快等特点, 在中厚板中心获得细晶粒组织, 而在表层获得超细晶组织是有可能的。日本学者采用普通碳锰钢进行了探索并获得成功, 应用于船体结构的止裂板^[5]。笔者带领的研究组对实现 Q235 中厚板的表层组织超细晶化开展了研究, 并取得了显著的效果。在此基础上, 通过适当调整连铸坯化学成分, 在首钢3500 mm 轧机上成功轧制出力学性能满足国标 GB/T1591-94

基金项目: 北京市科技新星计划资助项目(H013610320111)

作者简介: 范建文(1970-), 男, 博士, 教授级高级工程师; E-mail: fjjw_biam@yahoo.com.cn; 修订日期: 2007-10-09

要求的 25 mm 厚普碳钢板。

1 试验材料和研究方法

1.1 研究方法和工业试验

首先开展了表层超细晶普碳钢中厚板轧制工艺研究,材料化学成分(质量分数,%)为0.12~0.18C,0.18~0.25Si,0.55~0.70Mn,0.01~0.02P,0.01~0.02S,0.02~0.05Al。实验室轧制获得9 mm 厚钢板,之后进行了 28 mm 普碳钢板的工业试验,达到了预期的目标,确定了以形变诱导铁素体相变为主的控轧控冷工艺路线^[6,7]。最终以达到国标GB/T1591-94 为目的,进行工业试验。在首钢第二炼钢厂进行冶炼和板坯连铸,铸坯规格为 220×1800×L(mm),化学成分(质量分数,%)为0.12~0.18C,0.18~0.25Si,0.80~0.95Mn,0.01~0.02P,0.005~0.01S,0.02~0.05Al。在首钢中厚板厂进行轧制,板坯再加热温度为1150~1250℃,坯料出炉后首先进行展宽轧制,之后在1000~1100℃进行再结晶控轧,坯料待温至设定温度范围(950~750℃)进行精轧,精轧总变形量为66%以上,780~820℃终轧,之后采用高密度直集管层流系统冷却,终冷温度为630~680℃,成品板厚为25 mm。

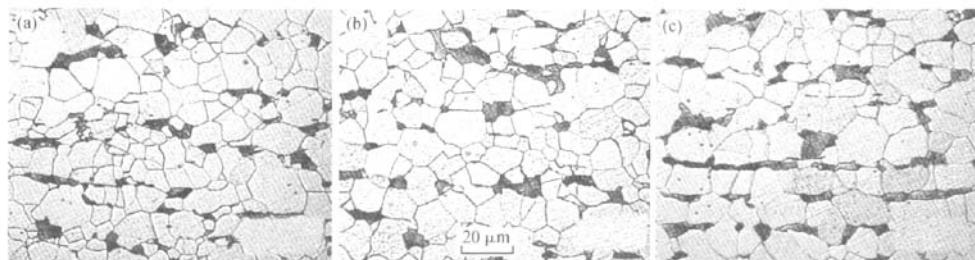
1.2 试制板材微观组织及性能检验

试验轧制板材现场取样。制备金相样品,用4%硝酸酒精溶液腐蚀后观察材料组织,按照标准ASIM E112-1996(等同于国标GB/T6394-2002),采用美国LECO-Lx31型定量金相分析进行晶粒度评级,之后选择部分试样采用 MEF3型 LEICA 图像分析仪进行微观组织拍照。对试制钢板,按照标准GB/T228-2002进行拉伸试验;按照GB/T229-1994进行冲击试验,试样尺寸V型10 mm×10 mm×55 mm。

2 试验结果

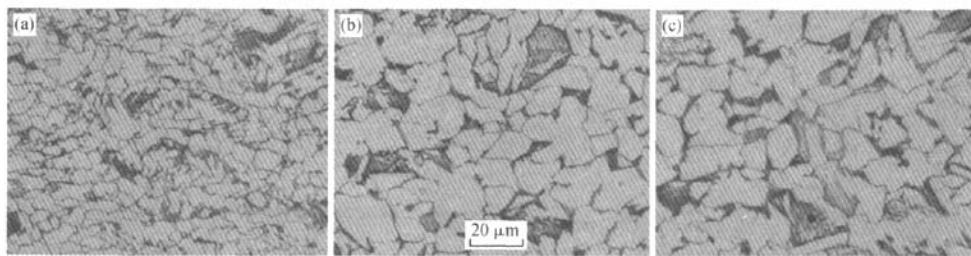
2.1 微观组织

表层超细晶中厚板实验室模拟轧制试验,微观组织如图1所示,由于轧件较薄(9 mm),从心部到表层,铁素体晶粒尺寸(截距法)没有明显差异,在7.9 μm左右,合晶粒度10.8级。常规轧制工艺生产的相近规格钢板铁素体晶粒度在7~9级,表层和中心没有明显差别^[7]。工业试制钢板为铁素体+珠光体组织,见图2。表层铁素体晶粒度在11.5~12.0级,比实验室轧制钢板的晶粒还要细;1/4处和中心处11.0级左右,与实验室试制结果接近,比正常生产钢板的晶粒明显细化,如图3所示。



(a) 表层; (b) 1/4 处; (c) 中心
图 1 实验室热轧 9 mm 细晶铁素体普碳钢板的微观组织(轧后空冷)

Fig. 1 Microstructure of low carbon steel plates of 9 mm in thickness hot-rolled in laboratory Air cooling after final rolling



(a) 表层; (b) 1/4 处; (c) 中心
图 2 工业试验钢板的微观组织(炉批号:6A01144930)

Fig. 2 Microstructure of pilot-produced plates of 25 mm in thickness

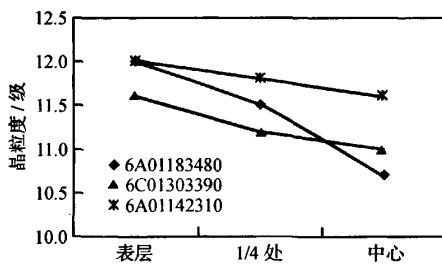


图3 试验钢板铁素体晶粒尺寸

Fig. 3 Grain size of pilot-produced plates of 25 mm in thickness

2.2 化学成分和力学性能

试制钢板的化学成分如表1所示,力学性能如

表2所示。采用相近的控轧控冷工艺,坯料Mn的质量分数为0.55%~0.70%时,实验室轧制9 mm钢板的屈服强度为315 MPa,抗拉强度437 MPa。工业试验28 mm钢板屈服强度为312 MPa,抗拉强度为443 MPa。

坯料Mn的质量分数提高到0.80%~0.95%,屈服强度达到350 MPa以上,平均367 MPa,上升55 MPa;抗拉强度470 MPa以上,平均484 MPa,上升41 MPa;伸长率保持在26.0%以上,平均27.0%,下降7.2%。与表2中列出的GB/T1591-94标准中Q345系列拉伸性能比较,化学成分调整后轧制的钢板完全达到同规格Q345的拉伸性能要求,与冲击试验结果一起评判,试验钢板完全满足Q345C的要求。

表1 材料的化学成分与国标Q345钢要求的比较(质量分数)

Table 1 Chemical composition of pilot-produced plates and specifications of Q345 Steel

项目	C	Si	Mn	P	S	Al	%
GB/T1591-94 ¹⁾	Q345A	≤0.20	≤0.55	1.00~1.60	≤0.045	≤0.045	
	Q345B	≤0.20	≤0.55	1.00~1.60	≤0.040	≤0.040	
	Q345C	≤0.20	≤0.55	1.00~1.60	≤0.035	≤0.035	≥0.015
	Q345D	≤0.18	≤0.55	1.00~1.60	≤0.030	≤0.030	≥0.015
	Q345E	≤0.18	≤0.55	1.00~1.60	≤0.025	≤0.025	≥0.015
	常规普碳钢	Q235	0.12~0.18	0.18~0.25	0.55~0.70	0.01~0.02	0.01~0.02
新普碳钢	Q235 试	0.12~0.18	0.18~0.25	0.80~0.95	0.01~0.02	≤0.01	0.02~0.05

1) 规定C~E级钢,Nb、V、Ti、Al必须加入一种,范围为Nb 0.015~0.060,V 0.02~0.15,Ti 0.02~0.20。

表2 材料的力学性能与国标Q345钢要求的比较

Table 2 Mechanical properties of pilot-produced plates and specifications of Q345

项目	钢种	板厚/mm	R _{el} /MPa	R _m /MPa	A _{5.65} /%	180°冷弯	-10 °C夏比冲击功/J		平均冲击功要求/J
							最小值	平均值	
GB/T1591-94	Q345A	16~35	≥325	470~630	21	d=3a 合格	—	—	无
	Q345B	16~35	≥325	470~630	21	d=3a 合格	—	—	+20 °C, ≥34
	Q345C	16~35	≥325	470~630	22	d=3a 合格	—	—	0 °C, ≥34
	Q345D	16~35	≥325	470~630	22	d=3a 合格	—	—	-20 °C, ≥34
	Q345E	16~35	≥325	470~630	22	d=3a 合格	—	—	-20 °C, ≥27
实验室9 mm板	Q235	9	315	437	37.8	d=2a 合格	—	—	—
工业试验28 mm板	Q235	28	312	443	34.2	d=2a 合格	—	—	—
新普碳钢25 mm板	Q235 试	25	367	484	27.0	d=2a 合格	181	202	—
新普碳钢25 mm板	Q235 试	25	350~382	470~495	26.0~28.0	d=2a 合格	132~227	149~237	—

3 讨论

3.1 板材的化学成分与强度水平

细晶强化是同时提高材料强韧性的唯一手段,文献[8]给出低碳钢屈服强度完整的Hall-Petch公式:

$$\sigma_s(\text{MPa}) = 70 + 84\text{Si} + 32\text{Mn} + 680\text{P} - 30\text{Cr} +$$

$$38\text{Cu} + 33\text{Ni} + 11\text{Mo} + 5000(\text{C} + \text{N}) +$$

$$18.1d^{-1/2} + \sigma_p + \sigma_D + \sigma_t \quad (1)$$

文献[9]给出了抗拉强度的计算公式:

$$\sigma_t(\text{MPa}) = 294 + 83\text{Si} + 28\text{Mn} + 3.85(\% \text{珠光体}) + 7.7d^{-1/2} \quad (2)$$

式中,代入元素的质量分数,C、N指固溶在铁素体中的质量分数;d为铁素体晶粒尺寸,mm(平均直线

截距法); σ_p 为沉淀硬化对屈服强度贡献量; σ_D 为位错强化贡献; σ_i 为织构强化贡献。细晶强化系数一般在 $14 \sim 23 \text{ N/mm}^{3/2}$ 之间^[10], 这里取 $18.1 \text{ N/mm}^{3/2}$ 。根据试验钢的化学成分, 按照式(1)、(2)计算材料强度, 如表 3 所示。由于试验钢板的化学成分没有添加微合金和合金元素, 因此, 沉淀强化的作用可不考虑。又由于轧制温度仍然位于奥氏体区, 因此, 位错强化和织构强化的作用也可忽略。

表 3 的计算值和表 2 的实测值符合得很好。由表 3 可见, Mn 的质量分数控制在 0.60% 左右, 常规热轧后晶粒度在 7.3~8.5 级之间时, 完全满足普通 Q235 系列钢板标准的要求。当晶粒度达到 10 级时, 屈服强度可上升到约 310 MPa, 11 级以上时, 可上升到 330 MPa 左右。因此, 如果希望达到 345 MPa 以上的屈服强度, 则晶粒尺寸需要进一步细化。但是, 从多次试验的情况看, 在设备能力有限的前提下, 控轧 20 mm 以上的 Q235 钢板中稳定获得

超过 11 级晶粒度的铁素体难度非常大, 并且从表 2 的试验结果看, 抗拉强度也达不到国标要求。因此, 采用目前的 Q235 成分设计 (Mn 的质量分数 0.55%~0.70%), 在首钢 3500 mm 轧机上轧制出强度满足 Q345 要求的钢板似乎不太可能。为此, 尝试把 Mn 的质量分数提高 0.20%~0.25%, 计算表明 11 级晶粒度屈服强度能达到 355 MPa, 试验 25 mm 钢板强度达到 350~382 MPa, 平均 367 MPa, 超过国标 GB/T1591-94 中同规格 Q345 级钢板要求 25 MPa 以上, 此外, 抗拉强度也满足了 Q345 的要求。相同控轧工艺条件下, 与常规成分普碳钢比较, Mn 的质量分数上调 0.20%~0.25% 以后, 铁素体晶粒度由 10 级细化到 11 级 (指厚度中心和 1/4 处)。新材料的强度提高, 一方面是 Mn 固溶强化量的增加, 更重要的是 Mn 增加降低了奥氏体-铁素体相变温度, 有利于晶粒细化, 增强了细晶强化作用。

表 3 材料的力学性能计算值

Table 3 Chemical composition and mechanical properties of steels

MPa

试验钢种	热轧后晶粒度/级							
	7.3~8.5(26.6~16.8 μm)		10.8(7.9 μm)		10(10 μm)		11(7.07 μm)	
	屈服强度	抗拉强度	屈服强度	抗拉强度	屈服强度	抗拉强度	屈服强度	抗拉强度
常规成分	244~272	436~448	330	468	314	466	—	—
新普碳钢	249~278	439~451	—	—	—	—	355	484

3.2 设备能力及生产效率

控轧控冷工艺研究必须结合实际装备情况和产品技术要求进行。提高普碳钢 Q235 钢板的强度, 也可在获得适度晶粒尺寸前提下, 通过终轧后快冷获得少量贝氏体组织^[10]。但是终冷温度很低, 需要有很强的矫直能力, 否则板形很难保证。由于设备能力限制, 首钢中板厂正常生产时, 终冷温度必须在 600 °C 以上, 才能确保良好板形。因此, 在此条件下, 只能希望于晶粒细化, 在细化达不到要求时, 采用适当修改化学成分的方法, 由此使 Q235 类普碳钢的强度达到 Q345 钢的要求。

实际生产中采用两阶段控轧, 且精轧的终轧温度较低。精轧前的待温时间长有可能影响产量。然而, 生产过程中可充分利用轧机前后的辊道, 实践证明, 与常规生产比较, 生产效率没有太大变化, 企业是可以接受的。

3.3 Q345 级钢的新成分设想

从工业试验的结果可见, 在原来 Q235 钢的基

础上, 将钢中 Mn 的质量分数提高 0.20% 时, 采用优化的控轧控冷工艺, 使钢中铁素体的晶粒度达到 11 级左右, 试制 25 mm 钢板性能达到了 GB/T1591-94 中对 Q345 级钢的要求。在实际大批量生产时, 钢板的性能指标必须预留一定的余量, 以保证用户使用。为此, 在此基础上, 需要再将 Mn 的质量分数作一次调整, 如目标控制在 0.95% 左右, 通过控轧控冷工艺, 获得 11 级以上的晶粒度, 就完全能满足用户的要求。国标 Q345 化学成分规定 Mn 的质量分数下限为 1.00%, 通过本试验证明, 即使不添加微合金元素, Mn 含量也有下调的空间。对于中厚板产品, Mn 的质量分数在 0.85% 以上就可以了。对于热轧板卷, Mn 的质量分数可能在 0.70% 左右就完全能达到国标 Q345 的强度要求。

同时, 对于一般要求的 Q345 强度级别的钢板, 采用 C、Si、Mn 和 Al 就完全可以经济地生产, 不用添加微合金元素。这种成分 C 的质量分数一般在 0.14~0.18% 之间, 接近国标要求的上限, 属于较高水平, 但成本低。实际生产中, 往往由于较高 C 含

量,导致连铸坯 Mn、P、S 等严重偏析。一定条件下,生产的钢板由于 Mn 偏析而在钢板心部容易生成 C 含量较高的贝氏体组织,与 P 偏析和 MnS 夹杂物一起,再加上残余应力的作用,导致板材内部产生分层缺陷。实践证明,相同工艺条件下,其它元素不发生变化,由于 Mn 含量低,Q235 类钢板的心部珠光体带状组织比上述成分的 Q345 钢板轻得多,同时,探伤合格率也高,说明内部的分层缺陷少。因此,降低 Mn 含量有利于改善 Q345 钢板的内部质量。

因此,针对 Q345 级的中厚板,采用 C、Si、Mn 和 Al 成分设计,C 的质量分数在 0.14~0.18% 之间,Mn 的质量分数在 0.85~1.00% 之间,不仅节约了冶金成本,而且从产品质量提高方面也有益处。

4 结论

(1) 在首钢中厚板厂 3500 mm 轧机上,采用化学成分(质量分数,%)为 0.12~0.18 C,0.18~0.25 Si,0.80~0.95 Mn,0.01~0.02 P,0.005~0.01 S,0.02~0.05 Al 的连铸坯,精轧总变形量 66% 以上,780~820 °C 终轧,630~680 °C 终冷,成功轧制出满足国标 GB/T1591-94 中规定 Q345 MPa 级钢力学性能要求的表层超细晶中厚钢板。

(2) 试制 25 mm 厚钢板的表层铁素体晶粒达到 12 级,中心铁素体晶粒度达到 11 级,屈服强度达到 350~385 MPa,抗拉强度达到 470~500 MPa,同时保持 25% 以上的伸长率。

(3) 采用 C、Si、Mn 和 Al 成分设计,C 的质量分数在 0.14%~0.18% 之间,Mn 的质量分数在 0.85%~1.00% 之间,采用合理的控轧控冷工艺制度,以细晶强化为主要手段,可生产出性能满足 Q345 要求的中厚板。

参考文献:

[1] Hurley P J, Hodgson P D. Analysis and Characterisation of

Ultra-fine Ferrite Produced during a New Steel Strip Rolling Process [J]. Scripta Materialia, 1999, 40(4):433.

- [2] SUN Zuqing. Study on the Deformation of Undercooled Austenites in Plain Low Carbon Steels [A]. CSM, NIMS and POSCO, Conf on Advanced Structural Steels (ICASS-2004) [C]. Shanghai, 2004. 68.
- [3] SHIN Dong Hyuk. Ultrafine Grained Steels Fabricated by Equal Channel Angular Pressing [A]. CSM, The Joint Int Conf of HSLA Steels 2005 & ISUGS 2005 Proceedings (ISUGS Part) [C]. Haikou, Nov. 8-10, 2005. 80.
- [4] 翁宇庆. 超细晶钢-钢的组织细化理论与控制技术 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2003. 521. (WENG Yu-qing. Ultra-fine Grained Steel- Theory and Controlling Technology of Grain Refinement in Steel. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003. 521.)
- [5] Hidesato Mabuchi. Metallurgical Features of Steel Plates with Ultrafine Grains in Surface Layers and their Formation Mechanism [J]. ISIJ. Int., 1999, 39(5):477.
- [6] 范建文. 普碳钢中板表层组织超细化的形变机理 [J]. 材料热处理学报, 2005, 26(6):69. (FAN Jian-wen. Deformation Mechanism of Ultra-fine Grained Microstructure in the Surface Layers of Plain Low Carbon Steel Plate [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2005, 26(6):69.)
- [7] 范建文. 表层超细晶粒普碳钢中厚板的工业试制 [J]. 钢铁, 2006, 41(4):40. (FAN Jian-wen. Trial-production of Plain Low Carbon Steel Plates with Ultra-fine Grained Ferrite in the Surface Layers [J]. Iron and Steel, 2006, 41(4):40.)
- [8] Mintz B. 微合金化低碳高强度钢 [M]. 姚泽雄, 成光祜译. 北京:冶金工业出版社, 1982. 51.
- [9] V. B. Ginzburg. 板带轧制工艺学 [M]. 马东清, 陈荣清译. 北京:冶金工业出版社, 1998. 50.
- [10] 王国栋. 400 MPa 级超级钢的开发和应用 [A]. 中国金属学会. 新一代钢铁材料研讨会论文集 [C]. 北京: 2001. 299. (WANG Guo-dong. Development and Application of 400 MPa Super-Steel [A]. The Chinese Society for Metals. Workshop on New Generation Steel (NG Steel' 2001) [C]. Beijing: 2001. 299.)