

表层组织超细化轧制工艺在 L245 级管线钢板开发中的应用

范建文，严春莲，王彦锋，李光，谢瑞萍

(首钢集团总公司技术研究院, 北京 100041)

摘要：采用表层组织超细化轧制工艺在首钢 3500 mm 中厚板生产线上进行了 L245 管线钢板的批量试制。结果表明, 采用这种特殊的控轧控冷工艺, 普碳钢的化学成分可保证钢板的力学性能达到厚规格 L245 管线钢板的要求。试制钢板表层铁素体晶粒达到 12 级, 中心部位 10 级, 屈服强度达到 300~365 MPa, 抗拉强度达到 430~480 MPa, 同时保持 29%~35% 的伸长率, -10 °C 夏比冲击功 130 J 以上, 剪切面积 85% 以上。在几乎不增加冶金成本的前提下, 试制钢板具有优良的强度、塑性配合, 优良的低温韧性水平。

关键词: 超细晶粒铁素体; 普碳钢; 管线钢板

中图分类号: TG333 文献标识码: A 文章编号: 0449-749X(2006)06-0038-05

Application of Rolling Process for Ultrafine Grained Ferrite in Surface Layers to L245 Plates

FAN Jian-wen, YAN Chun-lian, WANG Yan-feng, LI Guang, XIE Rui-ping

(Research Institute of Technology, Shougang Group Corporation, Beijing 100041, China)

Abstract: The L245 (API 5L B PSL2) plates are produced on 3500 mm 4-high mill at Shougang Group to obtain ultra-fine grained ferrite in the surface layers. By special controlled rolling and accelerated cooling process, mechanical properties of plain carbon steel can meet the requirements of thick L245 plates. The grade of grain size in surface layers is 12 and 10 in central layer of the plates. The yield and tensile strength are 300-365 MPa and 430-480 MPa respectively with the elongation of 29%-35%. The sharp V-notch impact energy is above 130 J with the shear area above 85% at -10 °C. With little increase in cost of steel making, the steel with good combination of strength and plasticity and satisfied toughness at low temperature can be produced by controlled rolling and cooling.

Key words: ultra-fine grained ferrite; plain carbon steel; pipeline steel plate

目前, 针对普碳钢、普通碳锰钢及微合金钢的组织超细化塑性加工工艺开展了大量研究工作, 并取得了重要的研究成果^[1,2]。组织超细晶化工艺应用于热连轧板卷、长型材生产, 取得了很好的效果^[3]。然而, 这些工业应用目前局限于薄规格、小直径产品, 工艺上容易实现短道次间隔、低温大变形、道次间及终轧后的快速冷却, 因而铁素体晶粒容易细化。与之比较, 由于轧件厚度增加, 生产流程自动化程度低、轧制道次间隔时间长、难于获得大冷却速度等因素, 中厚板的组织超细化很困难。在中厚板中, 获得均匀一致的超细晶组织尚未见过报道。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^[4,5]。同样, 油气输送管线也存在组织裂纹萌生和裂纹止裂问

题。采用表层组织超细化工艺生产管线钢板使钢板表层获得超细晶组织有利于最终管体的裂纹止裂。为此, 在成功研究表层组织超细化轧制工艺的前提下, 本文叙述了将该工艺应用于 L245 级管线钢板的批量试制, 这也是国内组织超细化轧制工艺在中厚板生产中的首次工业应用。

1 成分和工艺

1.1 L245 管线钢的技术条件

L245 管线钢板厚度规格为 25.4 mm, 力学性能根据用户的技术条件执行, 如表 1 所示。在 GB/T700—1988 中, 同规格 Q235C 钢的屈服强度为 225 MPa 以上, 抗拉强度 370~500 MPa 之间, 断后伸长率大于 25%, 0 °C 纵向冲击功大于 27 J, 对断口没有要求。由表 1 可见, 与之比较, L245 钢的强度、韧性要求高。

表1 L245 管线钢技术要求

Table 1 Technical requirements of L245 plates

板厚/mm	拉伸性能				-10 ℃冲击性能(横向)				冷弯 $d=2a$
	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	屈强比	冲击功/J	剪切面积/%	单个	平均	
≤30	270~430	430~740	≥25	≤0.90	≥50	≥65	≥60	≥80	完好

表2 L245 钢的成分范围

Table 2 Chemical composition of L245 pipeline steel %

钢级	w(C)	w(Mn)	w(Si)	w(P)	w(S)	w(Al ₂ O ₃)
L245	≤0.16	≤1.00	≤0.25	≤0.02	≤0.01	0.02~0.04

1.2 成分设计

尽管L245管线钢比Q235C钢的力学性能要求高得多,但希望通过调整轧制工艺可在保持原来Q235C化学成分基本不变的前提下,满足L245钢板的要求。试制的L245管线钢碳的质量分数控制在0.16%以下,锰的质量分数控制在1.0%以下,化学成分基本接近普碳钢Q235的成分。对于管线钢来讲,硫、磷含量必须控制在较低水平,并采用钙处理控制硫化物形貌。表2为首钢试制的L245钢的成分范围。

1.3 轧制工艺设计

晶粒细化是唯一同时提高强度和韧性的强化机制,在化学成分基本不变的情况下,必须采取措施使钢板的铁素体晶粒细化,才能达到表1中规定的L245管线钢板的要求。为此,采用了普碳钢中厚板的表层组织细晶化轧制技术^[6]。首钢连铸板坯厚度为220 mm,加热炉温度控制1150~1250 ℃,终轧温度810~850 ℃,在Ar₃温度(约800 ℃)以上,通过相变最大程度地细化晶粒;终冷温度控制在650~700 ℃以获得表层超细晶粒组织。

1.4 试制管线钢板微观组织及性能检验方法

试验轧制管线钢板现场取样。制备金相样品,用4%硝酸酒精溶液腐蚀后在光学显微镜下观察材料组织,按照标准ASIM E112-1996(等同于国标GB/T6394-2002),采用美国LECO-Lx31型定量金相分析仪进行晶粒度评级,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。

进行全厚度横向拉伸实验。拉伸实验执行标准GB/T228-2002。取横向试样,保留一个热轧表面并作为冷弯的拉伸表面、冷弯试样厚度减薄到20 mm,弯轴直径 $d=2a$ ($a=20$ mm),横向180°冷弯,在冷弯的拉伸表面不出现裂纹和裂缝为合格。在-10 ℃进行横向冲击实验,试样尺寸V型10 mm×10 mm×55 mm数据。

mm,取样方法按照GB/T2975-1998执行(钢板厚度1/4处);执行标准是GB/T229-1994;试验机型号JB-30B,低温冲击试样采用JCD低温浴。

2 试制的L245管线钢板的力学性能

2.1 表层组织超细化工艺轧制厚规格普碳钢板的微观组织与力学性能

在分析中厚板控轧控冷工艺特点的基础上,运用大变形量再结晶细化奥氏体晶粒及形变诱导铁素体相变原理,制定现实可行的试验工艺,在首钢中厚板厂曾成功试制出28 mm厚具有表层超细晶铁素体的普碳钢板^[6]。试制钢板的微观组织如图1所示,定量金相检验及力学性能检验结果如表3所示。由图1可见,试制钢板的表层铁素体晶粒明显细化,晶粒度达到12级以上,为超细晶铁素体,而板厚1/4处和中心的铁素体晶粒尺寸相近,晶粒度10级,为细晶粒铁素体。普通轧制20 mm厚普碳钢板的表层到中心铁素体无明显差别,且晶粒粗大,仅在7~8级。从力学性能比较,具有表层超细晶粒铁素体普碳钢板的屈服强度比普通轧制钢板的高约60 MPa,而伸长率保持与普通轧制钢板相近的水平。因此,在化学成分不变的条件下,采用表层超细晶轧制工艺试制钢板的微观组织不但比普通轧制钢板的明显细化,而且强度水平也明显提高。同时,试验表明,表层组织铁素体晶粒细化,有利于钢板疲劳性能的提高^[7]。此外,铁素体晶粒细化也有利于改善材料的韧性。油气输送管线要求很高的安全性,管线钢板的首要性能是高韧性,一方面在恶劣条件下,能阻止裂纹萌生,另一方面在管道发生破坏时,能在较短距离内阻止裂纹扩展,减少损失。优良的焊接性也是非常重要的,其次为强度,并且也需要良好的疲劳性能。因此,低碳当量、实现钢板组织细晶化甚至超细晶化是管线钢板生产工艺的指导性原则。尽管L245钢板属于低档管线钢板,但厚度较大时,在经济性的前提下,保证其强韧性要求仍具有较大难度,为此,采用表层超细晶粒中厚板轧制工艺试制了这批钢板。

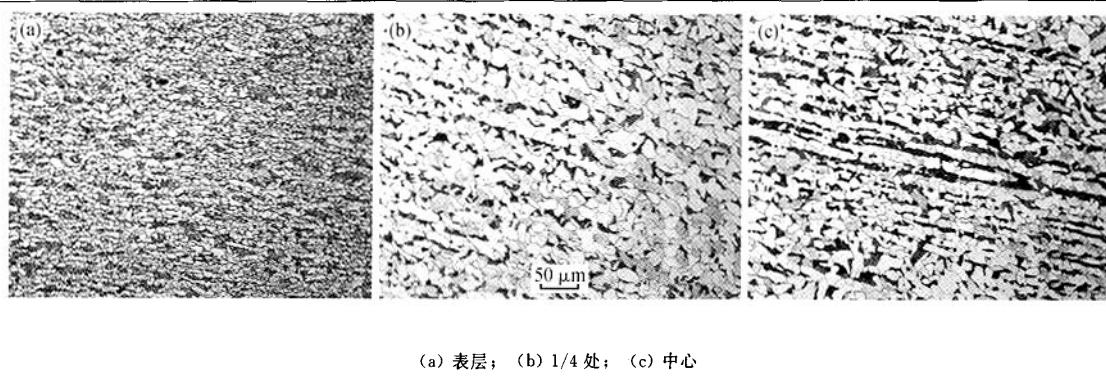


图 1 工业试验 28 mm 表层超细晶粒普碳钢板的微观组织

Fig. 1 Microstructure of 28 mm trial low carbon steel plate with ultra-fine grained ferrite in surface layers

表 3 工业试制钢板微观组织和力学性能检验结果

Table 3 Mechanical properties and ferrite grain size of trial plates

工艺	规格 / mm	晶粒度			屈服强度 / 抗拉强度 / 断后伸长率 / %	
		表层	1/4 处	中心	MPa	MPa
普通轧制	20	7.3	7.3	7.3	250	426
特殊轧制	28	12.6	10.0	10.0	312	443

2.2 L245 管线钢的微观组织与力学性能

图 2 为批量生产 L245 管线钢板的微观组织。由图 2 可见, 表层铁素体晶粒比沿厚度 1/4 处和中心处明显细化, 定量金相获得的结果为表层铁素体晶粒度达到 12.3 级, 1/4 处为 10.2 级, 中心处为 9.8 级, 与上节所述 28 mm 普碳钢板的微观组织相同。表 4 列出了试制的 25.4 mm 厚 L245 管线钢板部分批次及平均力学性能。整批(60 多轧制批, 共 2200 t) L245 钢板的下屈服强度绝大部分在 300~365 MPa, 满足表 1 的 270~430 MPa 的技术指标; 抗拉强度在 430~480 MPa, 伸长率在 29%~35%, 与规定的 25% 的数值相比, 富余量较大, 表明试制

的 L245 钢板的塑性优良。屈强比也是管线钢的重要指标, 试验结果表明该比值在 0.67~0.76 之间, 符合 ≤ 0.90 的要求。上述结果表明试制的 L245 具有较好的强度、塑性配合。整批钢板的冷弯性能合格率 100%。

试制 L245 钢板的 -10 °C 冲击值在 130~260 J, 整批平均 182 J, 所有批次钢板的冲击值都达到要求, 而且超过要求 1 倍以上, 有较大的富余量。整批钢板的 -10 °C 冲击断口纤维状面积百分数在 60%~100%, 整批检验平均 91%, 满足其平均值 $\geq 80\%$ 的要求。

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]给出了包含实验数据的低碳钢屈服强度完整的 Hall-Petch 公式:

$$\sigma_s = 70 + 84w(\text{Si}) + 32w(\text{Mn}) + 680w(\text{P}) - 30w(\text{Cr}) + 38w(\text{Cu}) + 33w(\text{Ni}) + 11w(\text{Mo}) + 5000w(\text{C} + \text{N}) + 18.1d^{-1/2} + \sigma_p + \sigma_D + \sigma_t \quad (1)$$

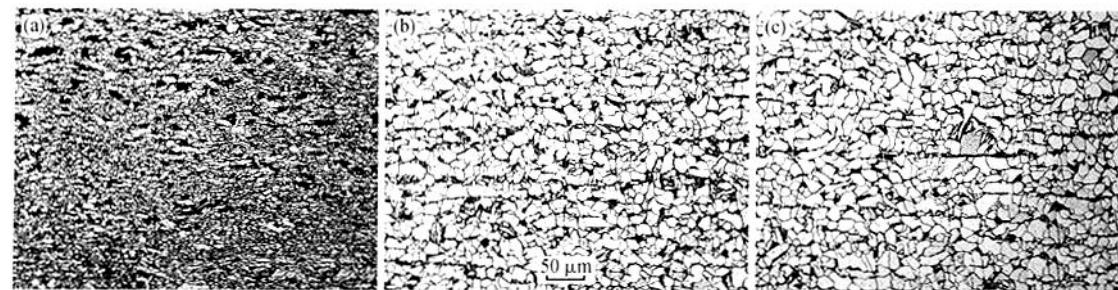


图 2 工业生产 25.4 mm 表层超细晶粒 L245 管线钢板的微观组织(炉批号: 5A03321420)

Fig. 2 Microstructure of 25.4 mm L245 plate with ultra-fine grained ferrite in surface layers (product serial number: 5A03321420)

表4 L245管线钢的力学性能
Table 4 Mechanical properties of L245 plates

炉批号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	180°冷弯,d=2a	硬度 HV10	-10 °C夏比冲击试验			
						冲击功/J		剪切面积/%	
						单个最小	平均	单个最小	平均
5A03148040	320	440	31.5	合格	142	184	211	90	97
5A03321420	330	460	30.0	合格	147	221	223	100	100
5A03321430	335	450	31.5	合格	132	235	236	100	100
5A03322010	335	465	27.5	合格	142	190	195	100	100
5C03433010	305	435	32.5	合格	138	178	204	90	97
整批平均	320	449	31.0		141		182		91

文献[9]给出了抗拉强度的计算公式:

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

式(1)和(2)中,w为代入元素的质量分数,w(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_t 为织构强化贡献。细晶强化系数一般在14~23 N/mm^{3/2}[4],这里取18.1 N/mm^{3/2}。根据L245钢板的化学成分(取w(C)0.14%,w(Si)0.20%,w(Mn)0.80%,w(P)0.012%,w(S)0.006%),按照式(1)和(2)计算材料强度,如表5所示。由于L245管线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。由表5可见,普碳钢化学成分,采用普通轧制工艺获得7.5级以下铁素体晶粒度(晶粒尺寸25 μm以上)不能达到L245的技术要求,此外考虑到较高的冲击韧性要求,10级以上铁素体晶粒度(晶粒尺寸10 μm以下)是可靠的。而普碳钢化学成分的厚钢板达到10级铁素体晶粒度是比较困难的,必须采用控轧控冷工艺才能获得。本文采用表层超细晶粒中厚板轧制工艺,使接近普碳钢成分的25.4 mm钢板中心部位铁素体晶粒度达到10级,满足了L245管线钢板的技术要求,并且计算数值(10级铁素体晶粒度)与实际生产钢板的强度非常接近,符合得很好。说明化学成分设计时,采用经验公式计算获得的结果具有较好的可信度。这也反映了在材料微观组织设计方面进行强度预测的重要性。

3.2 管线钢板的冲击韧性

L245钢板的技术条件对夏比冲击功及剪切面积作出明确要求。目前,首钢生产的中厚钢板中,管线钢板是唯一对夏比冲击剪切面积提出要求的品种。根据生产经验,剪切面积百分数是技术条件中万方数据

表5 L245管线钢板计算强度

Table 5 Calculated strength of L245 plates

参数	数据				
	晶粒尺寸/μm	25	15	13	10
屈服强度/MPa	250	283	294	316	352
抗拉强度/MPa	420	434	439	448	463

最难的项目,应首先满足。一种思路可采用降碳及微合金化加控轧控冷达到这个要求,但冶炼成本增加。另一种,采用普碳钢成分,冶炼成本低,但对轧制工艺的控制提出严格要求,这种方法是企业最经济的方法。相同化学成分的连铸坯,采用常规轧制钢板铁素体晶粒较粗,材料的屈服强度为280 MPa左右,但-10 °C剪切面积达不到平均80%的要求。采用优化的控轧控冷工艺努力降低板材的铁素体晶粒尺寸是使产品韧性达到技术要求的关键。中厚板轧制的特点决定了在常规条件下获得从表层到心部均匀一致的细晶粒甚至超细晶粒铁素体几乎不可能,但利用轧件表层变形量大及冷却速度快的条件,再通过大压下量使形变向轧件深层渗透,增加心部的形变量,可使成品钢板内部获得细晶粒铁素体,而在表层获得超细晶铁素体。本文在成功发表表层超细晶粒中厚板轧制工艺基础上,在25.4 mm厚L245管线钢板生产中获得应用,不仅保证了钢板的强度要求,更重要的是满足了钢板对夏比冲击剪切面积的要求。

3.3 表层超细化L245管线钢板轧制工艺的设计

板坯连铸过程中,由于结晶器的激冷作用,在连铸坯表层产生等轴细晶粒。但是在中厚板生产中,板坯加热炉分预热、加热、均热三段,特别是在加热段,温度一般在1250~1350 °C,铸坯由外向内逐渐升温,由于暴露在加热气氛中,铸坯表层是温度最高且高温持续时间最长的部分。L245管线钢连铸坯

仅含 C、Si、Mn、P、S、Al 等元素,此时,即使原来铸坯中有 AlN 第二相也已经完全溶解。因此,出钢时,铸坯表层和心部的奥氏体晶粒不应存在太大的差异,即由于加热的原因,基本抵消了连铸坯表层等轴细小晶粒对随后轧制过程中轧件表层组织细化的影响。

普通轧制钢板终轧温度高,在 900 ℃以上。在较高的轧制温度,轧件表层与心部的温度差小,因而沿厚度方向温度、变形量差异不大,因此,铁素体晶粒度沿板厚方向没有明显差别。L245 管线钢板终轧温度为最后一道次的轧件入口温度。由 1.3 节可见,终轧温度在 Ar_3 温度以上且与 Ar_3 非常近。在实际变形过程中,由于轧辊与轧件的接触传热及机架水的冷却作用,钢板表面的瞬时温度应该更低一些。这样在急冷条件下,钢板的表层组织的 Ar_3 温度将下降,达到一种过冷作用,同时由于变形的作用,可发生应变诱导相变获得表层超细晶铁素体。另外,首钢中厚板厂的矫直机能力有限,如果钢板温度太低,板形无法保证,因此根据实际情况,终冷温度控制在 650~700 ℃,但如果条件,终冷温度可控制得再低一些,也许效果会更好,但前提是必须保证钢板的板形优良。由于本文中钢板较厚达 25.4 mm,在经过控制冷却段后,钢板表面实际空冷,而空冷速度慢,依然获得表层超细晶组织,在这一温度下持续一段时间,细小的铁素体晶粒长大的可能性较小。

4 结论

(1) 采用接近普碳钢板的化学成分设计,在不增加冶金成本的前提下,通过表层超细晶粒中厚板轧制工艺,批量试制了厚规格 L245 管线钢板。

(2) 试制的 L245 管线钢板的基本组织为铁素体和珠光体,表层铁素体晶粒度达到 12 级,1/4 处和中心处约为 10 级。

(3) 试制的 L245 管线钢板具有较好的强度、塑

性配合,屈服强度在 300~365 MPa,抗拉强度在 430~480 MPa,伸长率在 29%~35%。

(4) 试制的 L245 管线钢板具有较高的低温韧性水平,−10 ℃冲击值在 130~260 J,平均 182 J,断口纤维状面积百分数在 60%~100%,平均 90% 以上,冷弯性能优良。

参考文献:

- [1] Hurley P J, Hodgson P D. Analysis and Characterization of Ultra-fine Ferrite Produced During a New Steel Strip Rolling Process [J]. Scripta Materialia, 1999, 40(4): 433-438.
- [2] 杨玉明. 低碳钢形变强化相变的特征[J]. 金属学报, 2004, 40(2): 135-140. (YANG Wang-yue. Characteristics of Deformation Enhanced Transformation in Low Carbon Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(2): 135-140.)
- [3] 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. 521-556. (WENG Yu-qing. Ultra-fine Grained Steel—Theory and Controlling Technology of Grain Refinement in Steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003. 521-556.)
- [4] Hidesato Mabuchi. Metallurgical Features of Steel Plates With Ultrafine Grains in Surface Layers and Their Formation Mechanism [J]. ISIJ. Int., 1999, 39(5): 477-485.
- [5] Ishikawa T. Steel Plate Having Surface-Layers With Ultrafine Grained Microstructure (SUF Steel) and Its Welding Joint Properties[A]. First International Conference on Advanced Structural Steels (ICASS 2002)[C]. Tsukuba, 2002. 91-92.
- [6] 范建文, 谢瑞萍, 张维旭, 等. 表层超细晶粒普碳钢中厚板的工业试制[J]. 钢铁, 2006, 41(4): 40-46. (FAN Jian-wen, XIE Rui-ping, ZHANG Wei-xu, et al. Trial Production of Plain Low Carbon Steel Plates With Ultrafine Grained Ferrite in Surface Layers[J]. Iron and Steel, 2006, 41(4): 40-46.)
- [7] Fan J W. Fatigue Behavior of Low Carbon Steel Plates With Fine Grained Ferrite in Surface Layers[J]. Materials Science and Technology, 2005, 21(5): 583-589.
- [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. 51-57.
- [9] Ginzburg V B. 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. 50-91.