

超快冷工艺对 X100 管线钢 14.8 mm 热轧带卷力学性能的影响

周峰^{1,2} 吴开明¹ 陈建新²

(1 高性能钢铁材料及其应用湖北省协同创新中心, 武汉科技大学国际钢铁研究院, 武汉 430081;

2 华菱涟源钢铁有限公司, 娄底 417009)

摘要 试验研究终轧温度 790 ~ 850 °C, 轧后用超快冷与层流冷却相结合, 40 ~ 60 °C/s 冷却至 580 °C, 卷取温度 380 °C 时 X100 管线钢 (/% : 0.05C, 0.25Si, 1.97Mn, 0.008P, 0.002S, 0.26Cu, 0.36Cr, 0.38Ni, 0.22Mo, 0.03V, 0.02Ti, 0.09Nb, 0.029Als) 14.8 mm 热轧带卷的组织 and 力学性能。结果表明, 该钢带卷的晶粒度为 13.5 级, 带状组织 0 ~ 0.5 级, 组织为粒状贝氏体 + 马氏体, 并含有 0.2 ~ 0.8 μm 马氏体/奥氏体岛, -20 °C 冲击功 265 ~ 277 J, 具有良好的综合力学性能, 满足《天然气输送管道 X100 螺旋缝埋弧焊管用热轧板卷技术条件》标准要求。

关键词 X100 管线钢 14.8 mm 热轧带卷 超快冷 组织 力学性能

Effects of Ultra-Fast Cooling Process on Mechanical Properties of 14.8 mm Hot-Rolled Strip Coil of X100 Pipeline Steel

Zhou Feng^{1,2}, Wu Kaiming¹ and Chen Jianxin²

(1 Hubei Collaborative Innovation Center for Advanced Steels and its Application, International Research Institute for Steel Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Hualing Lianyuan Iron and Steel Co Ltd, Loudi 417009)

Abstract The structure and mechanical properties of 14.8 mm hot-rolled strip coil of X100 pipeline steel (/% : 0.05C, 0.25Si, 1.97Mn, 0.008P, 0.002S, 0.26Cu, 0.36Cr, 0.38Ni, 0.22Mo, 0.03V, 0.02Ti, 0.09Nb, 0.029Als) with finishing rolling at 790 ~ 850 °C, after rolling combined ultra-fast cooling and laminar flow cooling with rate 40 ~ 60 °C/s cooling to 580 °C and coiling at 380 °C are tested and studied. Results show that the grain size rating of strip coil is 13.5, the banded structure rating is 0 ~ 0.5, the structure is granular bainite + martensite and containing 0.2 ~ 0.8 μm martensite/austenite island, the impact energy at -20 °C is 265 ~ 277 J and it has better comprehensive mechanical properties to meet the requirement of standard "Technical Specification of Hot Rolled Plate Used for Manufacturing Grade X100 SAWL Pipe for Gas Pipeline".

Material Index X100 Pipeline Steel, 14.8 mm Hot-Rolled Strip Coil, Ultra-Fast Cooling, Structure, Mechanical Properties

进入 21 世纪以来,我国在高强度管线钢管开发领域取得了显著进展^[1-3],在我国西气东输二线工程中 4 895 km 长的主干线全部采用 X80 管线钢^[4],为进一步降低管线建设和运行成本,人们又将开发目标集中在 X100 及以上高钢级管线钢上^[5-8]。国际上 X100 管线钢的开发已从单纯试制发展到对钢管适用性的研究阶段^[9-13]。当前,已经生产 X100 管线钢的国外企业主要有日本新日铁、JFE、住友金属、NKK 公司、加拿大 IPSCO (伊普斯科钢管) 公司、美国 Exxon Mobil (埃克森美孚石油) 公司和韩国浦项 (POSCO) 公司等。国内宝钢、武钢、南钢、湘钢、太钢、首钢等先后对其进行研究^[14-15]。本文研究了在新型超快冷工艺条件,采用不同超快冷冷却速率 (不同组冷却集管) 对 X100 管线钢力学性能的影响。

1 试验材料与方法

1.1 化学成分

X100 管线钢成分设计在保证高强度、高韧性的同时,又要保证良好的焊接性能。本次实验采用低 C (C ≤ 0.06%)、Nb + Ti 微合金化、Mo + Cu + Ni 适度合金化的化学成分设计。实际生产成分见表 1。

1.2 生产工艺

通过转炉连铸工艺生产的 230 mm (厚) × 1 550 mm (宽) 的板坯轧制成为 14.8 mm 厚度的钢卷。采用二段式轧制,在粗轧阶段进行 7 道次轧制变形,确保在完全再结晶温度以上轧制,确保奥氏体晶粒细化。精轧阶段进行 7 道次轧制,保证在未再结晶区有足够的道次变形率和累积变形,并适当增加 F5-F7

通讯作者: 吴开明, 教授, 博士生导师, 武汉科技大学国际钢铁研究院, 武汉 430081

E-mail: wukaiming@wust.edu.cn.

的压下率,使得奥氏体晶粒充分压扁,在奥氏体转变过程中提供更多的形核位置,将终轧温度设定为 790~850℃。轧后采用超快冷与层流冷却相结合冷却方式,采用不同超快冷冷却速率,出口温度在 580℃,再采用层流进行冷却,卷取温度设定为 380℃ 时进行卷取。X100 管线钢轧制工艺参数如表 2 所示。

2 实验结果与讨论

2.1 力学性能

在钢卷宽度 1/2 处沿轧制方向 30° 位置处取拉伸试样毛坯,并加工成板状及棒状试样,其中板状试样标距长为 50 mm,标距内宽为 38.1 mm,厚度与钢管壁厚等厚;圆棒试样加工成标距段直径为 12.7 mm,标距长为 50.8 mm。试验标准为 ASTM A370-2009《钢产品机械性能试验的方法与定义》。拉伸试验结果见表 3。

2.2 弯曲试验

沿钢卷宽度 1/4 处与轧制方向成 30° 位置处取拉伸试样毛坯,并进行弯曲试验。试样宽度为 38.1 mm,厚度为钢卷壁厚。弯轴直径为 30 mm(2t, t 为试样厚度),弯曲角度为 180°,试验按 ASTM A370-2009 进行。试验结果见表 4。

2.3 冲击性能

按照《天然气输送管道 X100 螺旋缝埋弧焊管用热轧板卷技术条件》标准要求,在钢卷母材处取冲击试样,并沿厚度中心处加工成 (mm) 10 × 10 × 55 的冲击试样, V 型缺口垂直厚度方向。试验按 ASTM E23-2002《金属材料缺口冲击试验》进行,钢卷 -20℃ 下冲击试验结果见表 5。

2.4 落锤撕裂试验(DWTT)

对投用的钢卷,沿钢卷宽度 1/4 处与轧制 30° 处取 DWTT 样坯,并加工成尺寸 (mm) 为 300 × 75 × 16.3 的试样,缺口型式依据标准压制成 V 型,试验温度为 -15℃,并按 API RP 5L3-1996 进行,试验结果见表 6。

2.5 金相、硬度检测

在沿钢卷宽度 1/2 位置处横向取样,并加工成全壁厚试样进行晶粒度检验,并按照“技术条件”附录 E 评定;在沿钢卷宽度 1/2 位置处纵向取样,并加工成全壁厚试样进行带状组织及非金属夹杂物检验,其中带状组织按照“技术条件”附录 D 进行评

表 1 试验 X100 管线钢的成分 / %

Table 1 Analysis of test X100 pipeline steel / %

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Nb	Als
0.05	0.25	1.97	0.008	0.002	0.26	0.36	0.38	0.22	0.03	0.02	0.09	0.029

表 2 X100 管线钢轧制工艺参数

Table 2 Parameters of rolling process for strip coil of X100 pipeline steel

试样	未再结晶轧制阶段 终轧温度/℃	超快冷阶段			卷取温度/℃
		超快冷水量/组	超快冷冷却速率/(℃·s ⁻¹)	出口温度/℃	
1	790~850	5	60	580	380
2	790~850	3	40	580	380

表 3 X100 管线钢 14.8 mm 带卷的力学性能

Table 3 Mechanical properties of 14.8mm strip coil of X100 pipeline steel

试样	试验位置	取样位置	屈服强度 ($R_{p0.2}$)/MPa	抗拉强度 (R_m)/MPa	伸长率 (A)/%	屈强比 ($R_{p0.2}/R_m$)
1	钢卷头部	外圈沿轧制 30°	730	836	22.5	0.87
1	钢卷中部	中部沿轧制 30°	725	828	21.3	0.88
1	钢卷尾部	内圈沿轧制 30°	722	834	22.2	0.87
2	钢卷头部	外圈沿轧制 30°	692	818	21.4	0.83
2	钢卷中部	中部沿轧制 30°	691	815	21.9	0.85
2	钢卷尾部	内圈沿轧制 30°	691	824	20.4	0.84
	标准要求	-	690~840	760~990	≥14	≤0.96

表 4 X100 管线钢 14.8 mm 带卷的弯曲性能

Table 4 Bending properties of 14.8mm strip coil of X100 pipeline steel

试样	试验位置	长 × 宽 × 厚 (mm)	弯轴直径/ mm	试验	结果
1	钢卷头部、 钢卷中部、 钢卷尾部	300 × 38 × 14.8	30	无缺陷	合格
2	钢卷头部、 钢卷中部、 钢卷尾部	300 × 38 × 14.8	30	无缺陷	合格

表 5 X100 管线钢 14.8 mm 带卷的冲击性能

Table 5 Impact toughness of 14.8mm strip coil of X100 pipeline steel

试样	取样位置	试验温度/ ℃	冲击功/ J	剪切面积/ %	平均值/ %
1	钢卷中部板宽 1/4 处	-20	277	100	100
2	钢卷中部板宽 1/4 处	-20	265	100	100
标准要求	-	-20	≥220	≥70	≥85

定,非金属夹杂物按 ASTM E45-2011A 方法进行评定;在沿钢卷宽度 1/4 位置处横向取样,并加工成全壁厚试样进行硬度检验,检验结果见表 7。

2.6 显微组织

从图 1 可以看出,组织均为粒状贝氏体(Granular Bainite, GB)、板条状贝氏体(Lath Bainite, LB)和马氏体(Martensite, M)的混合组织。板条状贝氏相所

表 6 X100 管线钢 14.8 mm 带卷的落锤撕裂试验 (DWTT) 结果

Table 6 Results of drop weight tear test (DWTT) of 14.8 mm strip coil of X100 pipeline steel

试样	试验温度/℃	剪切面积/%	
		单个	平均
1	-15	98	96
		94	
2	-15	96	95
		93	
钢卷中部	-15	95	97
标准	-15	≥70	≥85

表 7 X100 管线钢 14.8 mm 带卷的非金属夹杂、组织和硬度

Table 7 Nonmetallic inclusions, structure and hardness of 14.8 mm strip coil of X100 pipeline steel

试样	非金属夹杂物/级								晶粒度/级	带状组织/级	硬度 (HV10)		
	A		B		C		D				1	2	3
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗					
1	0	0	0	0	0	0	1	1	13.5	0	283	278	282
2	0	0	0	0	0	0	1	0.5	13.5	0.5	281	275	283
标准要求	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	10 或更细	≤3	≤285		

占比例较高,由于试样的 Mo、Cu、Ni 含量高产生了更强的固溶强化效果,因此其屈服和抗拉强度较高。细小的贝氏体组织可以有效地阻碍裂纹扩展,从而提高材料的韧性,因此有较高的冲击韧性。

图 2 为 X100 管线钢扫描电镜下的微观组织照片。用 Lebera 腐蚀剂显示组织主要为浅颜色的不规则块状组织和贝氏体组织(图 2a)。SEM 观察发现,不规则块状组织为 M/A 岛,其尺寸 0.2 ~ 0.8 μm(图 2a, b)。

图 2(c)为 X100 管线钢试样 1 金属薄膜试样的透射电镜分析结果表明,组织为板条状,板条之间有其它相,如贝氏体内部和板条间有碳化物颗粒,板条中存在高密度位错网络(图 2c)。板条贝氏体尺寸为 3 μm × 1 μm,粒状贝氏体尺寸为 (2.5 ~ 2.8) μm × 0.5 μm。

2.7 冲击断口形貌观察与分析

X100 试样的冲击断口均为韧窝状(图 3)。这是由于当裂纹通过粒状贝氏体(GB)与贝氏体铁素体(BF)组织时,由于不断受到多位向分布组织的障碍作用而呈现波浪起伏扩展,裂纹扩展速率降低,从而使其对应的断口呈撕裂韧窝状。

2.8 讨论

超快冷冷却速率越快,通过奥氏体硬化区时间短,保留的硬化奥氏体量越多,在后面的冷却相变过程中其形核核心越多,晶粒更加细化,析出物更加均匀细小。

不同冷却条件下的组织中都存在细小的 M-A 组元。转变组织中 M-A 的形成是由于碳在 γ/α 界面上奥氏体中富集,由于碳含量的增加使得奥氏体稳定性增加,从而部分奥氏体残留下来与马氏体共同形成的,大冷却速率增加了基体的畸变能,使得碳的扩散加剧,碳在 γ/α 界面的富集减少。另外,大

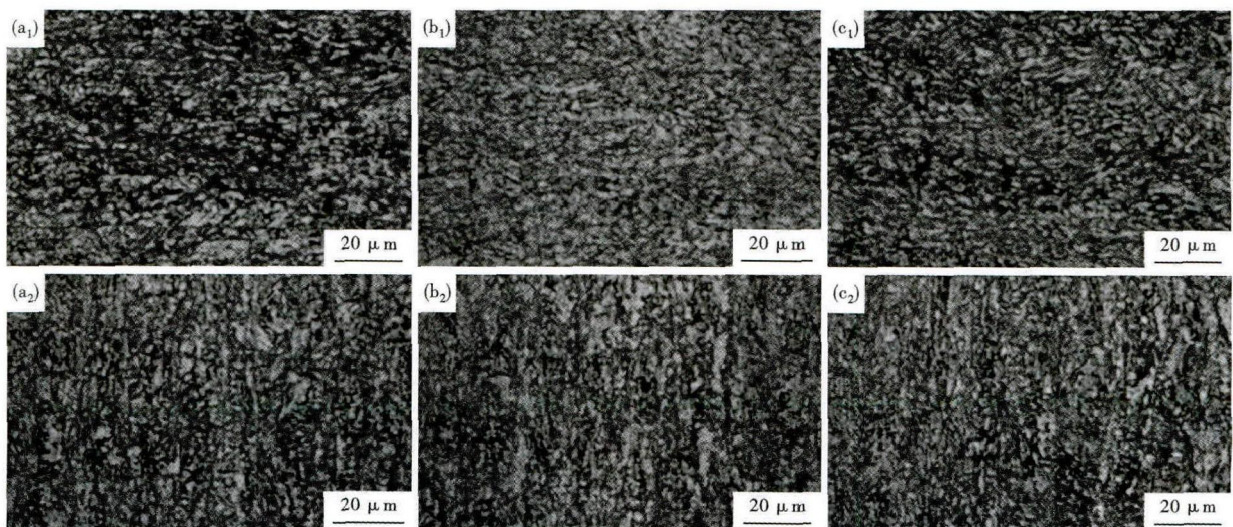


图 1 X100 管线钢 14.8 mm 带卷的组织形貌:(a₁)(b₁)(c₁)试样 1[#],60 °C/s,光学;(a₂)(b₂)(c₂)试样 2[#],40 °C/s,光学;(a₁)(a₂)表面;(b₁)(b₂)1/4厚度;(c₁)(c₂)1/2厚度

Fig.1 Structure morphology of 14.8 mm strip coil of X100 pipeline steel: (a₁), (b₁) and (c₁) sample No1, 60 °C/s, optical; (a₂), (b₂) and (c₂) sample No2, 40 °C/s, optical; (a₁) and (a₂) surface; (b₁) and (b₂) 1/4 thickness; (c₁) and (c₂) 1/2 thickness

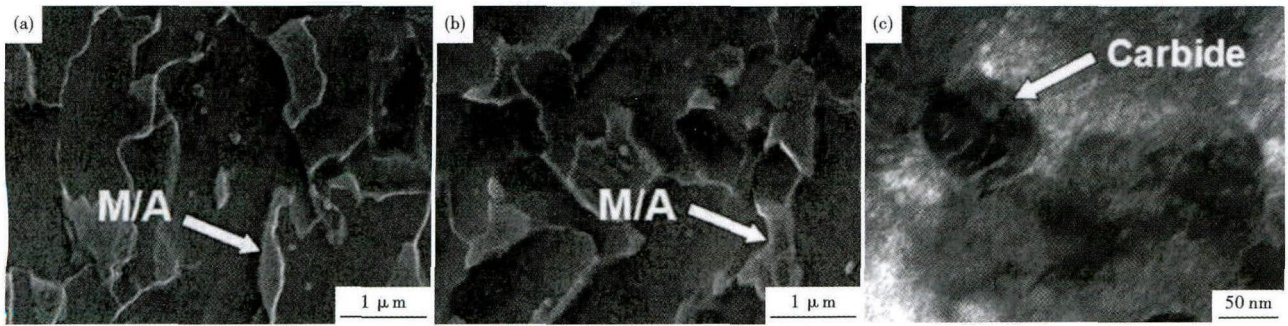


图2 X100 管线钢 14.8 mm 带卷的显微组织形貌:(a) 试样 1#, 60 °C/s 和 (b) 试样 2#, 40 °C/s, SEM; (c) 试样 1#, 60 °C/s, TEM
Fig. 2 SEM morphology of 14.8 mm strip coil of X100 pipeline steel: (a) sample No1, 60 °C/s and (b) sample No2, 40 °C/s, SEM; (c) sample No1, 60 °C/s, TEM

冷却速率也使组织中产生高密度的亚结构及位错, 阻碍了共格及半共格 γ/α 界面的生长, 从而 M-A 岛含量降低、尺寸减小, 并且变得更加分散。细小弥散分布的 M-A 岛是强化相, 它的存在会提高基体的强度。因此提高超快冷冷却速率使得 M-A 岛的数量、大小、形貌及分布对提高管线钢的性能是十分有利的。

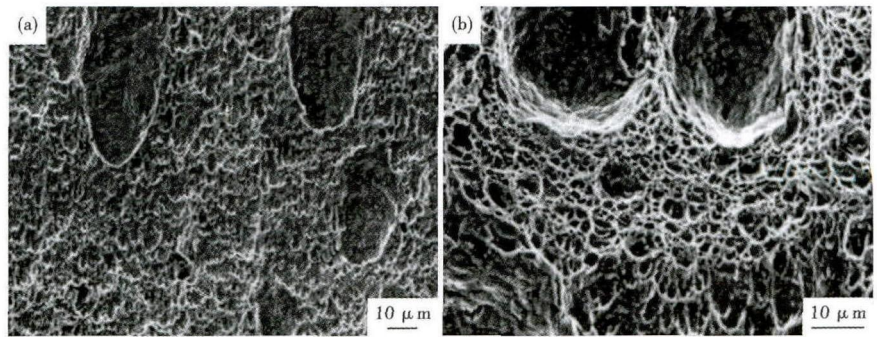


图3 X100 管线钢夏比冲击断口形貌:(a) 试样 1#, 60 °C/s; (b) 试样 2#, 40 °C/s
Fig. 3 The Charpy impact fractured morphology of the X100 pipeline steel: (a) sample 1, 60 °C/s; (b) sample 2, 40 °C/s

3 结论

(1) 采用控制轧制和新型超快速冷却工艺生产的 X100 管线钢组织均匀细小, 为粒状贝氏体和板条状贝氏体、马氏体的混合组织, 板条状贝氏体、马氏体相所占比例较高, 因此该钢

强度高、低温韧性好, 综合力学性能优良。

(2) 冷却速率越快, 保留的硬化奥氏体量越多。在相变过程中其形核核心越多, 晶粒更加细化, 析出物更加均匀细小, 综合力学性能更好。

参考文献

- [1] 张伟卫, 熊庆人, 吉玲康, 等. 国内管线钢生产应用现状及发展前景[J]. 焊管, 2011, 34(1): 5-8.
- [2] 张斌, 钱成文, 王玉梅, 等. 国内外高级管线钢的发展及应用[J]. 石油管道工程建设, 2012, 38(1): 1-4.
- [3] 王晓香, 李延丰. 高强度管线钢管开发在中国的新进展[J]. 钢管, 2011, 40(1): 12-18.
- [4] 李鹤林, 吉玲康. 西气东输二线高强度韧性焊管及保障管道安全运行的关键技术[J]. 世界钢铁, 2009(1): 56-64.
- [5] 彭玲利. X100 高级管线钢研发[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [6] 王路兵, 任毅, 张鹏程, 等. 高级别管线钢 X100 的试验研究[J]. 钢铁, 2008, 43(1): 80-83.
- [7] 彭玲利, 张丁非, 刘清友, 等. 轧制工艺对 X100 管线钢组织性能的影响[J]. 材料热处理技术, 2010, 39(10): 1-4.
- [8] 王莹, 朱涛. X100 管线钢的相变规律及控轧工艺研究[C]. 北京: 全国十一大钢研院所学术交流会, 2010: 7-12.
- [9] 肖英杰, 孙常. X100/X120 管线钢的研发和生产[J]. 焊管, 2010, 33(5): 67-72.
- [10] 齐殿威, 周舒野. 国外 X100 及以上钢级管线钢专利技术简述[J]. 焊管, 2009, 32(5): 65-70.
- [11] Niu Tao, Kang Yong-lin, Gu Hong-wei, et al. Precipitation Behavior and Its Strengthening Effect of X100 Pipeline Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2010, 17(11): 73-78.
- [12] Hashimoto Y, Komizo T, Tsukamoto M, et al. Recent Development of Large Diameter Line Pipe (X80 and X100 Grade) [J]. The Sumitomo Search, 1988, 37: 93-104.
- [13] Mitsuhiro Okatsu. Metallurgical and Mechanical Features of X100 Linepipes Steel [C]. Pipe Dreamer's Conference. UK: Scientific Surveys Ltd, 2002: 263-272.
- [14] 许学利, 赵科, 赵迪, 等. 本钢高级别石油管线钢 X100 合金化原理及轧制难点分析[C]. 赤峰: 全国轧钢生产技术会议文集, 2010: 282-285.
- [15] 高珊, 郑磊, 章传国. 超高强度系列管线钢厚板的研制[J]. 世界钢铁, 2009, 9(5): 1-6.

周峰(1977-), 男, 博士研究生(武汉大学), 首席工程师, 2000年武汉大学(本科)毕业, 钢铁产品开发和工艺研究. E-mail: 63419822@qq.com

收稿日期: 2014-10-12