

X80 管线钢的组织与性能研究

衣海龙, 杜林秀, 王国栋, 刘相华

(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 利用光学显微镜、扫描电镜、透射电子显微镜等对 X80 级别管线钢的组织与性能进行了研究。实验结果表明, 通过控轧控冷工艺轧制的 16 mm 厚的 X80 管线钢的屈服强度达到 670 MPa 以上时, 其屈强比低于 0.85, 韧脆转变温度低于 -60℃, 达到了很好的强韧性匹配。细化的针状铁素体有效地改善了实验钢的强度及韧性。X80 管线钢中存在两种典型的析出物, 一种以 Nb、Ti(CN) 为主, 尺寸较大(50~200 nm); 另一种以 NbC 为主, 尺寸细小(小于 30 nm)。这些纳米级析出物对钢的组织细化和强化起到了重要作用。

关 键 词: X80 管线钢; 控轧控冷; 针状铁素体; 韧脆转变温度; 析出物

中图分类号: TG 115.21⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3026(2008)02-0213-04

Microstructure and Mechanical Properties of Pipeline Steel X80

YI Hai-long, DU Lin-xiu, WANG Guo-dong, LIU Xiang-hua

(The State Key Laboratory of Rolling Technology & Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: YI Hai-long, E-mail: longhaiyi_2004@tom.com)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of pipeline steel X80 were investigated by means of optical electron microscope, scanning electron microscope, transmission electron microscope, etc. The experimental results showed that the yield strength of pipeline steel X80 with 16mm wall thickness can be up to over 670 MPa through controlled rolling/cooling, and the ratio of tensile strength to yield strength and ductile-brittle transition temperature are lower than 0.85 and -60℃, respectively, thus providing a nice match between strength and toughness. Fine acicular ferrite has good effect on both the strength and toughness of the steel. Two kinds of precipitates were observed in the steel, where the coarse ones are mainly the Nb and Ti(CN) ranging from 50nm to 200 nm, and the fine ones are mainly NbC less than 30 nm. Both the nano-precipitates play an important role in strengthening and grain refinement of the steel.

Key words: pipeline steel X80; controlled rolling/cooling; acicular ferrite; ductile-brittle transition temperature; precipitate

能源结构的调整和能源需求的增加促进了大口径、高压、长距离输送天然气管线的发展。为了降低管线建设和运营成本,提高管线安全性和可靠性,高压大口径管线用钢不仅要具有更高强度,还要具有更高韧性^[1-2]。目前,发达国家已广泛使用 X70 级别管线钢, X80 级别管线钢也已开始试应用,并正在研制开发 X100/120 级别的管线钢;国内也开始生产 X70 级别管线钢,并加快了对 X80 管线钢的研究^[3-6]。从管线建设的发展趋势来看, X80 管线钢在工程上的应用将逐渐增加^[7-8]。因此, X80 级别的高强度管线钢具有重要的研究价值与应用前景。

本文主要结合国内某厂的设备情况,通过实验室的热轧实验,开发出厚度规格为 16 mm 的 X80 级别管线钢,对其组织及力学性能进行了研究,并分析了析出物的形貌及成分,为制定现场的轧制生产工艺提供了重要依据。

1 实验材料和方法

实验钢采用真空感应炉冶炼,并浇铸成 100 kg 钢锭,其化学成分如表 1 所示。热轧试样的断面尺寸为 100 mm × 100 mm。首先,将热轧试样加热到 1 200℃,保温 1 h 后,利用 φ450 mm 实验轧机,经两阶段控温轧制。第一阶段的轧制温度为

收稿日期: 2007-02-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2003AA33G010); 国家自然科学基金资助项目(50271015)。

作者简介: 衣海龙(1979-),男,辽宁阜新,东北大学讲师,博士;杜林秀(1962-),男,辽宁本溪人,东北大学教授;王国栋(1942-),男,辽宁大连人,东北大学教授,博士生导师,中国工程院院士;刘相华(1953-),男,黑龙江双鸭山人,东北大学教授,博士生导师。

1 050 ~ 1 000 ,第二阶段轧制温度为 900 ~ 800 ;轧制后经加速冷却后得到 16 mm 厚的钢板 .

表 1 X80 管线钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of pipeline steel X80 (mass fraction)								%
C	Si	Mn	P	S	Nb + V + Ti	Mo	Ni	Cu
0.08	0.31	1.82	0.006	0.002 5	0.11	0.28	0.2	0.1

对钢板取样后在 100 t 电液伺服万能实验机上进行拉伸性能实验,采用矩形试样,标距长度为 80 mm,标距内宽度为 20 mm,从实验钢板上沿垂直于轧制的方向上切取冲击试样,经机床加工成 10 mm ×10 mm ×55 mm 的夏比 V 型缺口冲击试样,在 20, - 20, - 30, - 40, - 60 温度下,按照 GB 4159—84 和 GB/ T 229—1994 的标准规定,在 JB2300B 机械式半自动冲击实验机上进行冲击试验,应用 LEICA - DMIRM 多功能光学显微镜和 JSM - 5500LV 扫描电镜观察显微组织,利用 H - 800 透射电镜观察试样组织及析出物.

2 实验结果

2.1 实验钢的性能

表 2、表 3 分别为轧制得到的 X80 管线钢的力学性能及系列冲击性能.由表 2 可知,经实验室两阶段控温轧制得到的 X80 管线钢具有良好的力学性能, $R_{t0.5}$ 为 678 ~ 688 MPa, R_m 为 802 ~ 903 MPa.当实验钢的 $R_{t0.5}$ 达到 600 MPa 以上时,其具有较高的抗拉强度、良好的断后伸长率及良好的综合力学性能.管线钢的屈强比(屈服强度与抗拉强度之比)是钢管抵抗破裂的重要参数,它体现了材料从屈服到最后断裂过程中的变形能力.根据世界上各石油公司天然气钢管的技术条件,对屈强比的限定值多数在 0.85 以下,实验用 16 mm 厚的 X80 管线钢达到此规范要求.由表 3 可知,在 - 60 ~ 20 温度范围内,虽然 X80

管线钢板冲击吸收功随温度的变化有所波动,但是变化幅度相对较小,都在 300 J 以上;由此可知,其韧脆转变温度低于 - 60 ,实验钢具有良好的低温韧性指标.

2.2 显微组织分析

图 1 为 X80 管线钢的金相组织照片.由图 1 可知,X80 管线钢的金相组织由多边形铁素体和贝氏体组成,由 SEM 观察可知,铁素体形状都被显著地拉长成为细条状,形状不规则,呈针状铁素体形貌;同时,未发现典型的贝氏体的板条结构,如图 2 所示.

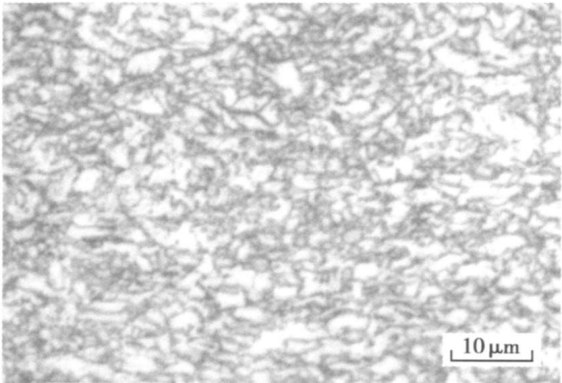


图 1 X80 管线钢的组织

Fig. 1 Microstructure of pipeline steel X80

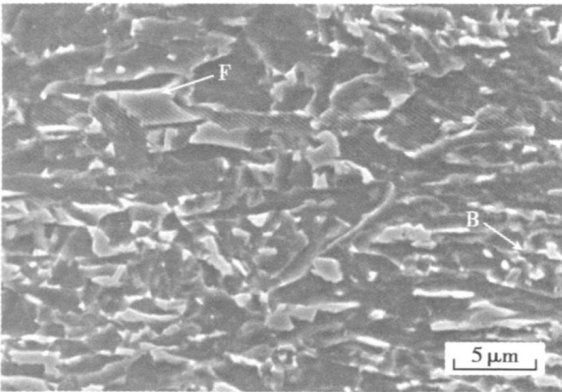


图 2 X80 管线钢的 SEM 组织形貌

Fig. 2 SEM image of morphology of pipeline steel X80

应用透射电镜进一步观察实验钢的组织,其结果如图 3 所示.由图中可以看出,其组织呈现明显的针状铁素体形貌,组织中针片结构较为发达.这是由于实验钢中含有的合金元素钼能够使铁素体析出线明显右移,从而抑制先共析铁素体的形成,但对贝氏体转变的推迟较小,所以,过冷奥氏体直接向贝氏体转变.同时,由于钼的存在,碳在

表 2 X80 管线钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of pipeline steel X80			
$R_{t0.5}$ /MPa	R_m /MPa	A_{80} /%	屈强比
688	884	25	0.78
679	903	24	0.75
678	802	25	0.84

表 3 X80 管线钢冲击实验结果

Table 3 Impact test data of pipeline steel X80				
实验温度/	A_{KV} /J (横向)			
	单值		平均值	
20	366	366	372	368
- 20	351	376	393	373
- 30	384	374	405	388
- 40	379	366	347	364
- 60	343	309	318	323

奥氏体中的扩散激活能增加,从而使碳的扩散系数降低;因此,钼在强烈抑制先共析铁素体的析出

和长大的同时,促进了高密度位错亚结构的针状铁素体的形成^[9]。

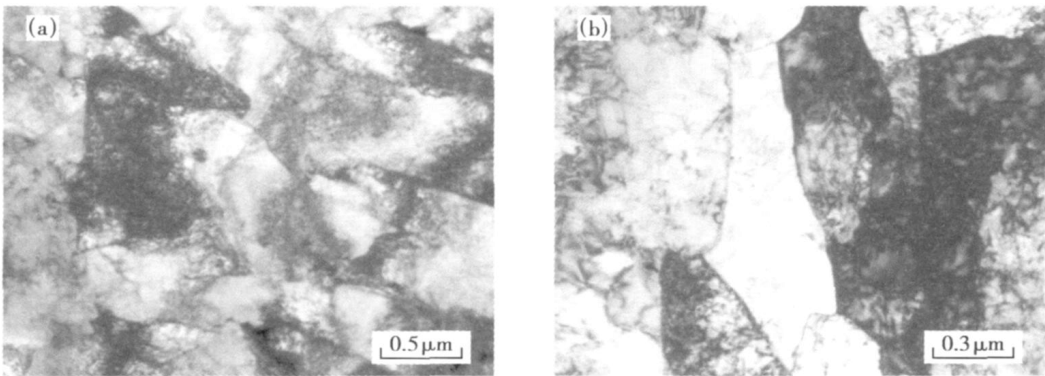


图 3 X80 管线钢的 TEM 组织形貌
Fig. 3 TEM images of morphology of pipeline steel X80
(a) —多边形铁素体 + 针状铁素体; (b) —针状铁素体。

由表 2 和表 3 可知,组织的细化在提高实验钢强度的同时,也有效地改善了实验钢的韧性。由透射电镜观察可知,实验钢中 M/A 岛的数量较少,且尺寸较小。虽然 M/A 岛为脆性组成物,对管线钢的韧性可能有不利影响,但均匀细小的 M/A 岛有利于改善钢板的韧性。在实验钢中形成的 M/A 岛主要是由于钢的成分和工艺的影响。首先,从化学成分上来说,实验钢的含碳量直接影响到岛状物的相对数量,由于本文所用的实验钢碳含量相对较低,因此,一定程度上减少了岛状组织的形成。其次,在热轧过程中,采用较大的冷却

速度可以减小岛状物的相对数量及尺寸,有利于改善实验钢的韧性。

2.3 析出物的分析

由表 2、图 2 和图 3 可知,实验钢经控制轧制和控制冷却后得到了细小的针状铁素体组织,获得了钢板的细晶强化效果,提高了钢板的强度。对于针状铁素体型的微合金钢来说,除了固溶强化和细晶强化,还有不可忽视的析出强化。为了进一步分析析出物的成分及形貌,对实验钢进行了透射观察及成分测定。图 4 为利用透射电镜观察到的典型的析出物的形貌及对应的成分分析。由图

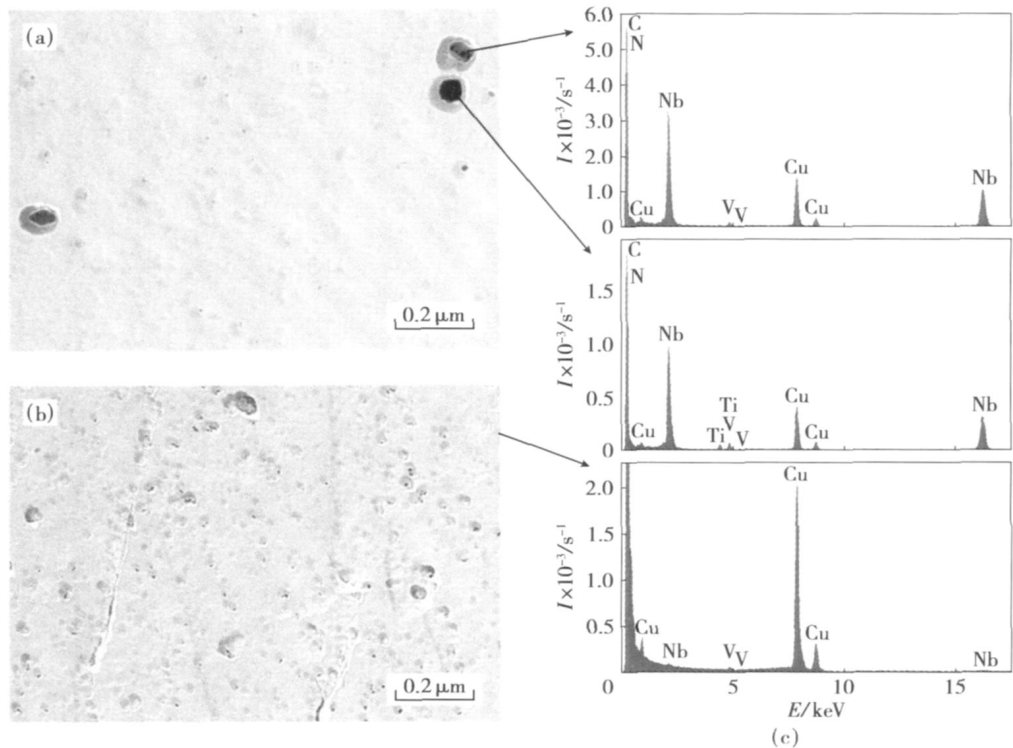


图 4 X80 管线钢的 TEM 析出物及对应成分
Fig. 4 TEM images of precipitates and their compositions in pipeline steel X80
(a) —尺寸较大的析出物; (b) —尺寸较小的析出物; (c) —对应的成分分析。

4 可知, X80 管线钢中的析出物主要为微合金元素的碳氮化物, 在组织中能观察到不同尺寸的碳氮化物, 它们主要是在不同阶段不同温度下析出的, 在钢中主要有以下两方面作用。

1) 相对较大的碳氮化物尺寸一般在 50 ~ 200 nm 范围内, 它们一般是在冷却过程的较高温度下析出的, 其主要作用是钉扎晶界, 阻止奥氏体晶粒长大。图 4 的成分分析表明, 这种尺寸较大的碳氮化物主要为 Nb, Ti (CN)。在多种碳氮化物中, TiN 的作用最显著, 这是由于 TiN 在奥氏体中的溶解度最低, 热力学稳定性较高, 最不容易粗化^[10]。

2) 相对较小的碳氮化物尺寸一般在 30 nm 以下, 这种碳氮化物主要是在奥氏体向铁素体转变过程中或冷却到单相的铁素体相区时形成的。过饱和的固溶微合金元素在脱溶过程中析出了这种碳氮化物, 尽管它们的体积分数很小, 却能起到有效的强化作用。图 4 中析出物的形貌和成分分析表明, 这种尺寸细小的碳氮化物主要为 NbC, 尺寸大多在 10 nm 以下, 由于实验钢中含有微合金元素钒, 因此在成分测定中也检测到钒的碳氮化物。

图 5 为 X80 管线钢中析出物的分布示意图。由图可知, 尺寸细小的析出物的数量较多, 它们对提高实验钢的强度起到了重要作用。在现场的生产过程中, 综合利用微合金元素的作用, 合理控制其析出相的析出过程是管线钢开发的关键。前面对析出物的分析表明, 在析出总量相同的条件下, 析出物的尺寸越细小, 分布越分散, 对强度的贡献越大, 同时对韧性的损害越小。

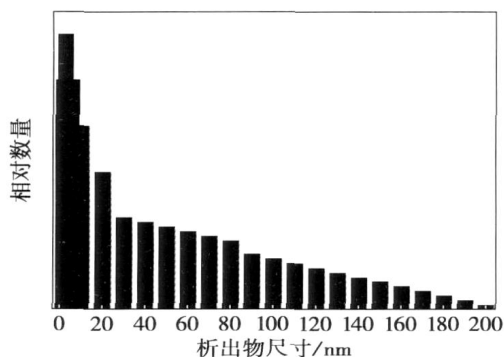


图 5 X80 管线钢析出物分布示意图

Fig. 5 Block diagram of distribution of precipitates in pipeline steel X80

3 结 论

1) 采用控轧控冷工艺轧制 16 mm 厚的 X80 管线钢, 其中细化的针状铁素体及细小弥散的析出物有效改善了实验钢的强度及韧性。X80 管线

钢的屈服强度达到 670 MPa 以上, 其屈强比低于 0.85, 韧脆转变温度低于 -60℃, 达到了很好的强韧性匹配。

2) X80 管线钢中大致存在两种典型的析出物, 一种以 Nb, Ti (CN) 为主, 尺寸较大 (50 ~ 200 nm); 另一种为以 NbC 为主, 尺寸细小 (小于 30 nm)。尺寸细小弥散的析出物有效提高了实验钢的强度, 并在一定程度上改善了韧性。

参考文献:

- [1] 郑磊, 傅俊岩. 高等级管线钢的发展现状[J]. 钢铁, 2006, 41(10): 1-10.
(Zheng Lei, Fu Jun-yan. Recent development of high performance pipeline steel[J]. *Iron and Steel*, 2006, 41(10): 1-10.)
- [2] 庄传晶, 冯耀荣, 霍春勇, 等. 国内 X80 级管线钢的发展及今后的研究方向[J]. 焊管, 2005, 28(2): 10-14.
(Zhuang Chuan-jing, Feng Yao-rong, Huo Chun-yong, et al. The development and its future research direction of grade X80 pipeline steel in China[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2005, 28(2): 10-14.)
- [3] Reip C P, Shanmugam S, Misra R D K. High strength microalloyed CMn (V-Nb-Ti) and CMn (V-Nb) pipeline steels processed through CSP thin-slab technology: microstructure, precipitation and mechanical properties[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 424(1/2): 307-317.
- [4] Wang C M, Wu X F, Liu J, et al. Transmission electron microscopy of martensite/austenite islands in pipeline steel X70[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 438/439/440: 267-271.
- [5] Zhong Y, Xiao F R, Zhang J W, et al. In situ TEM study of the effect of M/A films at grain boundaries on crack propagation in an ultra fine acicular ferrite pipeline steel[J]. *Acta Materialia*, 2006, 54: 435-443.
- [6] Zhao M C, Yang K, Xiao F R, et al. Continuous cooling transformation of undeformed and deformed low carbon pipeline steels[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 355(1/2): 126-136.
- [7] Xiao F R, Liao B, Shan Y Y, et al. Challenge of mechanical properties of an acicular ferrite pipeline steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, 431(1/2): 41-52.
- [8] Zhang L, Shan G. Research and trial production of X80 pipeline steel with high toughness using acicular ferrite[J]. *Engineering Science*, 2005, 3(3): 91-94.
- [9] 孔君华, 郑琳, 郭斌, 等. 钼在高级管线钢中的作用研究[J]. 钢铁, 2005, 40(1): 66-68.
(Kong Jun-hua, Zheng Lin, Guo Bin, et al. Effect of Mo in high strength pipeline steel[J]. *Iron and Steel*, 2005, 40(1): 66-68.)
- [10] 杨才福, 张永权, 王宇杰. 钛含量对热轧带钢力学性能的影响[J]. 钢铁, 1995, 30(8): 48-51.
(Yang Cai-fu, Zhang Yong-quan, Wang Yu-jie. Effect of Ti content on mechanical properties of hot-rolled strip steel[J]. *Iron and Steel*, 1995, 30(8): 48-51.)