

一种高铌 X80 管线钢的组织性能分析

Microstructure and Mechanical Properties of a High Nb microalloyed X80 Pipeline Steel

张莉莉¹, 张骁勇¹, 高惠临¹, 王 锋²

(1 西安石油大学 材料科学与工程学院, 西安 710065;

2 武汉钢铁股份有限公司 大型轧钢厂, 武汉 430080)

ZHANG Li-li¹, ZHANG Xiao-yong¹, GAO Hui-lin¹, WANG Feng²

(1 School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2 The Heavy Section Mill of Wuhan Iron and Steel Company Limited, Wuhan 430080, China)

摘要: 采用力学性能测试手段和电子显微分析技术对一种高铌(Nb)合金设计的 X80 管线钢的组织与性能进行了研究。结果表明: 这种高 Nb 管线钢具有高的强韧性和低的韧脆转变温度, 已成功应用于国内“西气东输二线”工程。对 Nb 元素在管线钢的细晶强化、组织强化和沉淀强化作用进行了分析。

关键词: X80 管线钢; 针状铁素体; Nb 元素

中图分类号: TG142.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)05-0001-05

Abstract: Mechanical property testing and microscope analysis were applied to evaluate the microstructure and mechanical properties of a high niobium microalloyed X80 pipeline steel. The results show that the high niobium microalloyed pipeline steel possesses higher strength toughness and lower ductile-brittle transition temperature, and was already successfully applied to the Second West-east Gas Pipeline Project in China. The effects of niobium microalloyed element on grain refinement, microstructure strengthening and precipitation hardening of pipeline steel were analyzed.

Key words: X80 pipeline steel; acicular ferrite; niobium microalloyed

国内 X70 管线钢的生产趋于成熟, 已成功应用于“西气东输一线”等管线工程。正在建设的“西气东输二线”选用的管线钢的钢级为 X80。目前, 国内“西气东输二线”工程中, 国内外 10 余家钢铁企业提供了几十种不同合金设计的 X80 管线钢, 其中引人注目的是一种高 Nb X80 管线钢。在传统的微合金管线钢中, Nb 的质量分数通常为 0.02% ~ 0.04%, 国内外一些管线标准对管线钢的最高 Nb 含量限制为 0.06% (质量分数, 下同)。随着管道工程的要求和管线钢冶炼技术的进步, 钢中含碳量逐渐降低。由于钢中含碳量的降低, 提高了 Nb 在 γ 中的溶度积, 可允许添加较高的 Nb 含量。当 γ 中固溶 Nb 含量增加时, γ 再结晶温度显著提高, 因而可采用较高的轧制温度(终轧温度为 $A_{r3} + 80^{\circ}\text{C}$, 比常规高 100°C)来生产满足现代油气管线所需要的高强韧钢板。这种方法被称之为“高温工艺技术”, 或简称为“HTP”(High Temperature Process)技术。所谓的高 Nb 管线钢即是通过这种“HTP”技术生产的管线钢, 其 Nb 的质量分数约为 0.10%^[1-3]。

本工作选用“西气东输二线”工程用钢中的一种高 Nb X80 管线钢, 通过对这种钢的组织 and 力学性能的研究, 以探讨 Nb 元素在 X80 管线钢中的作用规律。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验材料选用典型的高 Nb 含量 X80 管线钢, 板厚为 18.4mm。从钢板宽度 1/2 处取样进行化学成分分析。实验钢的化学成分见表 1, 其中 Nb 的质量分数为 0.095%。

1.2 实验方法

在钢板板宽 1/2 部位取横向拉伸试样, 实验标准为 ASTM A370。拉伸试样形式包括矩形试样和圆棒试样两种。矩形试样为标距内长 50mm、宽 38.1mm 的全壁厚试样, 在 MTS810(100t)材料试验机上进行实验。圆棒拉伸试样为标距内长 50mm、直径 12.7mm 的拉伸试样, 在 MTS810-15(25t)材料试验机上进行实验。

表 1 X80 钢的化学成分 (质量分数/%)

Table 1 The chemical constituent of X80 steel (mass fraction/%)

C	Si	Mn	P	S	Nb	Mo+Cr+Ni+Cu
0.038	0.21	1.60	0.0058	0.0017	0.095	0.749
V	Ti	B	Al	N	P _{cm}	CE
0.007	0.019	0.0004	0.035	—	0.16	0.39

Note: CE = C+ Mn/6+ (Cr+ Mo+ V)/5+ (Cu+ Ni)/15
 $P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$

在钢板板宽 1/4 处取横向冲击试样, 试样加工成标准的 10mm×10mm×55mm 夏比(Charpy) V 型缺口冲击试样, V 型缺口沿板厚方向。冲击实验按照 GB/T 229—1994 在 JB-800 试验机上进行。

在钢板板宽 1/4 部位取横向落锤撕裂试样(Drop Weight Tear Test, DWTT), 试样尺寸为 300mm×75mm×原壁厚, 缺口型式为标准压制 V 型缺口, 实验设备型号为 JL-30000。DWTT 实验按照 API RP 5L3 进行。

光学显微组织分析在 RECHART MEF3A 型显微镜上进行, 扫描电镜观察在 TESLA-BS-300 型上进行, 透射电子显微分析在 JEM 200CX 上进行。

2 实验结果

2.1 实验钢的力学性能

实验钢是一种以 Nb 为典型合金成分的 X80 管线钢, 通过 HTP 工艺获得, 其力学性能测试结果如表 2 所示。由表 2 可知, 实验选用的 X80 管线钢具有较高的屈服强度($R_{0.5}$)、抗拉强度(R_m)和良好的断后伸长率(A)。管线钢的屈强比($R_{0.5}/R_m$)体现了材料从屈服到最后断裂过程中的变形能力, 是钢管抵抗破裂的重要参数。根据 2007 年 API SPEC 5L 标准规定, 对 X80 级管线钢屈强比的限定值在 0.93 以下, 实验用 X80 管线钢屈强比低于 0.93, 达到此规范要求, 也符

表 2 X80 钢的力学性能

Table 2 The mechanical properties of X80 steel

Sample		Tensile testing				Charpy impact testing(−20℃)			DWTT(−15℃)	
		R_m /MPa	$R_{0.5}$ /MPa	A /%	$R_{0.5}/R_m$	A_{kv} /J	SA/%	FATT _{50CVN}	SA/%	FATT _{8DWTT}
X80	Rectangle	693	608	41.0	0.88	361	100	< −79℃	93	−39℃
	Baculine	683	563	24.5	0.82					

合国内“西气东输二线”工程的技术要求。

图 1 为 X80 钢板夏比冲击吸收功(A_{kv})和断口剪切面积(Shear Area, SA)百分比的系列温度转变曲线, 图 2 为 DWTT 剪切面积(SA)百分比的系列温度转变曲线。由表 2 和图 1 可知, 在管道设计温度(−20℃)下, X80 管线钢的韧性高达 361J。虽然 X80

管线钢板冲击吸收功在温度小于 −60℃ 时开始下降, 但是在 −60~20℃ 温度范围内随温度的变化幅度相对较小, 都在 300J 以上, 其韧脆转变温度应用 50% 剪切状断口所对应的温度(Fracture Appearance Transition Temperature, FATT₅₀), 其值低于 −79℃。DWTT 实验结果主要是建立断口形貌与温度间的关

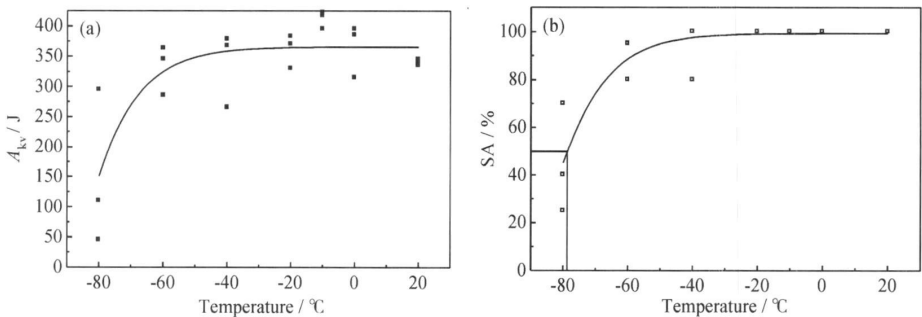


图 1 X80 钢的夏比冲击吸收功(a)和断口剪切面积(b)的系列温度转变曲线

Fig. 1 The serial changed temperature curves of Charpy impact toughness (a) and shear area (b) of X80 steel

系,从而确定管线钢的韧脆转变温度。如图 2 所示,实验钢 DWTT 的韧脆转变温度(85% 剪切状断口所对应的温度)FATT₈₅ 低于-39℃。由于 DWTT 实验所获得的结果与管道实物爆破的实验结果相当吻合^[4],由此可见,由该 X80 管线钢制造的钢管具有良好的低温韧性和抗断裂能力。

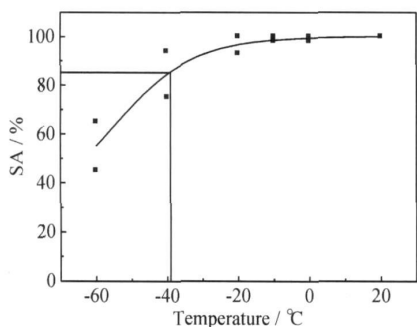


图2 X80 钢 DWTT 剪切面积系列温度转变曲线

Fig. 2 The serial changed temperature curve of DWTT shear area of X80 steel

2 2 实验钢的显微组织

X80 管线钢光学显微组织如图 3 所示。可以看出,实验钢为典型的针状铁素体钢,其主体组织为细小的粒状铁素体和少量的准多边形铁素体,局部区域可观察到贝氏体铁素体,细小的 M/A 岛状组织呈粒状和点状分布。



图3 X80 钢的光学显微组织

Fig. 3 The OM microstructure of X80 steel

3 分析与讨论

上述实验结果表明,在 HTP 工艺过程中,通过高 Nb 合金化技术获得的 X80 管线钢具有高的强韧性和低的韧脆转变温度,满足国内“西气东输二线”工程的技术要求。研究表明,实验钢这种优良性能的获得是与 Nb 在管线钢中的细晶强化、组织强化和析出强化

的作用紧密相关。

3 1 Nb 的细晶强化

细化晶粒是目前惟一既提高强度又提高韧性的强化手段。实验用 X80 管线钢 SEM 电子显微组织如图 4 所示。由图 4 可知,实验钢经控制轧制和控制冷却后具有细小的针状铁素体组织。进一步定量金相测试结果表明,实验钢的晶粒度为 ASTM 12 0 级,铁素体晶粒可细至 4 μm。研究表明,在高 Nb 合金化的管线钢中, Nb 在钢中细化晶粒的主要作用表现在两个方面。首先,在控轧再热过程中,未溶的 Nb 的碳、氮化合物通过质点钉扎晶界的机制而明显阻止 γ 晶粒的粗化过程,从而有效阻止奥氏体晶粒的长大。同时,在钢板的控轧过程中,通过固溶 Nb 的溶质拖曳和应变诱导沉淀析出质点对晶界和亚晶界的钉扎作用,而显著地阻止或延迟形变 γ 的再结晶,从而通过由未再结晶 γ 发生的相变而获得细小的相变组织^[4-6]。研究表明,当钢中 Nb 含量达到 0.06% 时,奥氏体再结晶温度可提高到 950℃ 以上,而同样含量的 Ti 和 V 加入到钢中,奥氏体再结晶温度只有 820~870℃^[7]。由此可知,因 Nb 元素产生的晶粒细化可以同时提高管线钢的强度和韧性,使 X80 管线钢板获得显著的细晶强化效果。

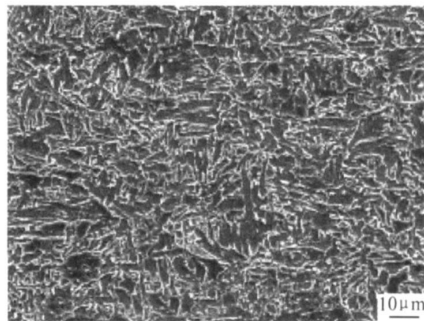


图4 X80 钢的 SEM 电子显微组织

Fig. 4 The SEM microstructure of X80 steel

3 2 Nb 的组织强化

应用透射电镜进一步观察实验钢的组织,其结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,实验钢的组织呈明显的针状铁素体形貌,板条结构较为发达。这是由于在高温形变后的冷却过程中,实验钢中含有的合金元素 Nb 在晶界偏聚会阻碍新相形成,从而降低 γ→α 相变温度,抑制多边形铁素体相变,促进针状铁素体形成^[8]。针状铁素体对材料性能的贡献首先归结于它的多方位的析出形态。由于针状铁素体尺寸参差不齐,彼此交错分布,使材料具有较小的有效晶粒尺寸。而且在针状铁素体内具有细小的亚结构和较高密度的可

动位错,使针状铁素体具有良好的强韧性^[4]。

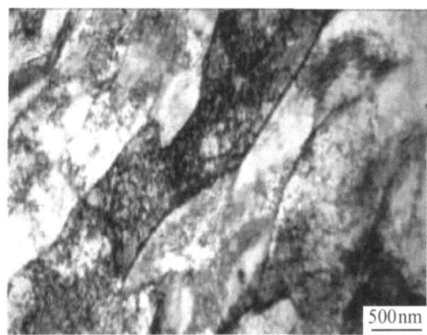


图5 X80 钢的 TEM 电子显微组织

Fig 5 The TEM microstructure of X80 steel

观察表明,在 X80 钢显微组织中存在细小的 M/A 岛状组织。这种细小的岛状组织既可分布在原奥氏

体晶界,也可分布在针状铁素体板条界和板条束界。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。然而,在实验钢中的这种 M/A 组元对韧性不构成危害。这是由于在控轧、控冷条件下形成的 M/A 组元细小,小岛平均弦长通常小于 2 μ m,不足以构成 Criffith 裂纹临界尺寸,而且其中的 10% ~ 20% (体积分数)的残余奥氏体是一种有利的韧性相,可降低裂纹尖端应力,消耗部分扩展功^[9- 11]。不少研究者在管线钢中观察到,裂纹遇到 M/A 岛时常发生转折,表现了 M/A 岛对裂纹扩展的阻滞作用^[4]。图 6 为实验钢针状铁素体板条间岛状组织的明场、暗场及其衍射斑点。表明岛状物以条状分布在针状铁素体板条之间。文献[12]的研究结果表明, Nb 对 M/A 形态的影响很显著。当 Nb 含量低于 0. 064% 时, M/A 呈粒状, Nb 含量超过 0. 064% , M / A 逐渐转变为条状。

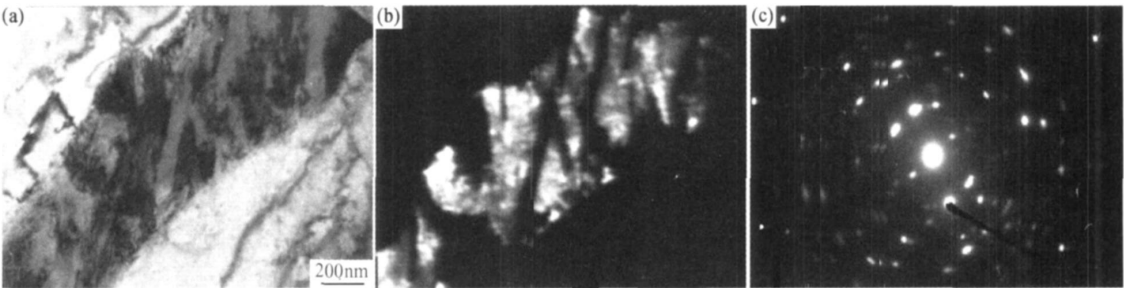


图6 X80 钢的岛状组织 (a) 明场; (b) 暗场; (c) 衍射斑点

Fig 6 The island structure of X80 steel

(a) bright field; (b) dark field; (c) diffraction spot

本研究的观察结果与文献[12]的研究结果一致。

3 3 Nb 的析出强化

实验钢在轧制及轧后的连续冷却过程中,还可通过控制 Nb 合金碳、氮化物在 α 中的沉淀析出过程来

达到析出强化的目的。Nb 的碳、氮化合物,可在热轧过程中从 γ 中析出,或在相变过程中在相界析出,或在最终冷却过程中从过饱和 α 中析出^[4]。图 7 是利用透射电镜观察到的典型析出物的形貌。观察表明, X80

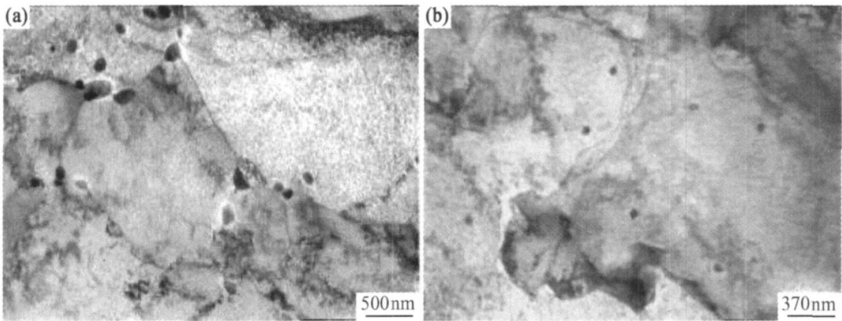


图7 X80 钢的碳、氮化合物的析出物

(a) Nb(C, N) 析出; (b) Nb(C) 析出

Fig 7 The precipitation of carbide and nitride of X80 steel

(a) Nb(C, N) precipitation; (b) Nb(C) precipitation

管线钢的碳、氮化合物呈点状析出,一种是尺寸在50~200nm 范围内,以 Nb(C, N) 为主,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。另一种是尺寸小于 30nm 的 Nb(C),是在 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变过程中或冷却到单相的铁素体相区,由过饱和固溶微合金元素脱溶析出时形成的,尽管它们的体积分数很小,却能起到有效的强化作用^[13, 14]。因此在现场的生产过程中,综合利用 Nb 合金元素的作用,合理控制其析出相的析出过程是 X80 管线钢开发的关键。

以上分析表明,在高 Nb 管线钢中,通过 Nb 的细晶强化、组织强化和析出强化的综合作用,可使管线钢获得优良的强韧化水平^[15]。同时,在高 Nb 管线钢中, γ 再结晶温度显著提高,因而可采用较高的轧制温度来生产满足现代油气管线所需要的高强韧性钢板,缓解传统合金化技术对轧机的苛刻要求,提高轧制效率。另外,高 Nb 合金化技术的合金元素成本低^[1, 9]。因而以高 Nb 合金化为特征的“HTP”技术近年来在冶金界和管道工程界备受关注。然而,高 Nb 合金化的主要强化机制是细晶强化和沉淀强化,因而应注意材料屈强比升高的问题。

4 结论

(1) 在 HTP 工艺过程中,通过高 Nb 合金化技术获得的 X80 管线钢具有高的强韧性和低的韧脆转变温度,满足国内“西气东输二线”工程的技术要求。

(2) 在高 Nb 管线钢中,通过 Nb 的细晶强化、组织强化和析出强化的综合作用,可使管线钢获得优良的强韧化水平。

(3) 高 Nb 合金化技术的合金元素成本低;可采用较高的轧制温度来生产满足现代油气管线所需要的高强韧性钢板,缓解传统合金化技术对轧机的苛刻要求,提高轧制效率。

(4) 高 Nb 合金化的主要强化机制是细晶强化和沉淀强化,因而应注意材料屈强比升高的问题。

参考文献

[1] 焦多田,王路兵,武会宾,等. HTP 高铌钢形变奥氏体再结晶规律研究[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(3): 119– 131.

[2] KLAUS HULKA, PASCOAL BORDIGNON, MALCOLM

GRAY. Experience of low carbon steel with 0.06 to 0.10 percent niobium [J]. Microalloying Technology, 2004, (4): 13– 17.

- [3] JIANG Haitao, QIAO Minglian, HUANG Yixin, et al. Microstructure and mechanical properties of X80 HTP pipeline steel produced by steckel mill [J]. Engineering Sciences, 2008, (1): 78– 82.
- [4] 高惠临. 管线钢—组织性能焊接行为 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995. 15– 71.
- [5] 齐俊杰, 黄运华, 张跃. 微合金化钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006. 45– 88.
- [6] 薛春芳, 王新华, 辛义德. 含铌微合金钢强韧化机理 [J]. 金属热处理, 2003, 28(5): 15– 18.
- [7] 孔君华, 谢长生, 郑琳. 高钢级 X80 管线钢工艺、组织与性能的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [8] KIOUMARS POORHAYDARI, DOUGLAS G IVEY. Application of carbon extraction replicas in grain size measurements of high strength steels using TEM [J]. Materials Characterization, 2007, 58: 544– 554.
- [9] 于海颖, 张海军, 王怀宇, 等. 铌微合金化在管线钢板生产中的应用 [J]. 宽厚板, 2003, 9(2): 35– 43.
- [10] YU Hao, SUN Yi, CHEN Qixiang, et al. Precipitation behaviors of X70 acicular ferrite pipeline steel [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, (6): 523– 527.
- [11] ZHONG Yong, XIAO Fur ren, ZHANG Jingwu, 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.
- [12] 李鹤林, 郭生武, 冯耀荣, 等. 高强度微合金管线钢显微组织分析与鉴别图谱 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 3– 29.
- [13] 衣海龙, 杜林秀, 王国栋, 等. X80 级高温轧制工艺管线钢的组织及性能 [J]. 机械工程材料, 2008, 32(2): 44– 48.
- [14] SHANMUGAM S, RAMISSETTI NK, MISRA R, et al. Microstructure and high strength/toughness combination of a new 700MPa Nb microalloyed pipeline steel [J]. Materials Science and Engineering, 2007, (6): 1– 12.
- [15] XIAO Fur ren, LIAO Bo, REN Deliang, et al. Acicular ferritic microstructure of a low carbon Mn-Mg-Nb microalloyed pipeline steel [J]. Materials Characterization, 2005, 54: 305– 314.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50874090)

收稿日期: 2008-11-10; 修订日期: 2009-03-05

作者简介: 张莉莉(1982—), 女, 硕士研究生, 研究方向为管线钢组织和性能, 联系地址: 西安石油大学材料科学与工程学院(710065), E-mail: lily49_2000@163.com