

· 组织性能 ·

含铌管线钢 X70 针状铁素体组织的产生及影响因素

杨瑞成 张安明

(兰州理工大学甘肃先进有色金属新材料国家重点实验室, 兰州 730050)

摘要 测试和分析了由 150 mm 铸坯连轧成 14.6 mm 微合金化管线钢 X70 (% :0.04C, 1.54Mn, 0.05Nb, 0.04V, 0.01Ti, 0.003 9N) 的力学性能和显微组织。结果表明, 通过加入微量 Nb 与开坯后 ≤ 950 °C 进行变形量 $\geq 70\%$ 的控制轧制, 终轧 800 °C 并以 20 ~ 30 °C/s 冷至 500 ~ 550 °C, 管线钢 X70 的室温组织为典型的针状铁素体, 晶粒尺寸 2 ~ 5 μm , 具有良好的综合力学性能, 即 $\sigma_{0.5} \geq 565$ MPa, $\sigma_b \geq 655$ MPa, $C_v(-20$ °C) ≥ 212 J。

关键词 X70 控制轧制 针状铁素体 金属强化

Formation of Acicular Ferrite Structure of Pipeline Steel X70 Containing Niobium and Affecting Factors

Yang Ruicheng and Zhang Anming

(State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract The mechanical properties and micro structure of microalloying pipeline steel X70 (% :0.04C, 1.54Mn, 0.05Nb, 0.04V, 0.01Ti, 0.003 9N) of 14.6 mm sheet continuous rolled from 150 mm casting slab have been tested and analyzed. Results show that with adding micro niobium and after breakdown with control rolling by deformation $\geq 70\%$ at ≤ 950 °C, finishing rolling at 800 °C, then cooling to 500 ~ 550 °C with 20 ~ 30 °C/s, the structure of X70 pipeline steel at ambient temperature is typical acicular ferrite with grain size 2 ~ 5 μm , which has excellent comprehensive mechanical properties i. e. $\sigma_{0.5} \geq 565$ MPa, $\sigma_b \geq 655$ MPa and C_v at -20 °C ≥ 212 J.

Material Index X70, Control-Rolling, Acicular Ferrite, Metal Strengthening

国家“西气东输”工程中的油气管线输送压力在 10 MPa 以上, 要求 X70 及 X70 以上级别的管线钢。在 X70 的研制过程中, 其微量元素铌的加入和与之相对应的轧制工艺成为关键所在^[1]。

管线钢强化机制主要包括沉淀析出强化、晶界强化、位错强化和固溶强化。其中固溶强化效果与溶质原子和溶剂原子尺寸之差有关, 尺寸差越大, 溶质原子引起的点阵畸变越大, 强化效果越明显^[2]。由于铌的原子半径(0.208 nm)比铁原子(0.172 nm)的大很多, 因此其加 Nb 的固溶强化的效果比其他合金元素更加明显。此外, 控制轧制和控制冷却工艺(TMCP)是一种有效的改善管线钢 X70 最终组织和性能的方法, 配合合理的合金成分设计, 可以得到以针状铁素体为主的组织, 针状铁素体具有彼此咬合、相互交错分布的板条束或针状片条束结构, 其有效晶粒尺寸细小, 铁素体板条内分布着高密度缠结位错、亚结构, 微合金化的碳氮化合物在基体沉淀析出并对位错钉扎, 残余富碳奥氏体的转变产物不易激发裂纹, 并往往成为裂纹扩展的障碍^[3,4]。所有这些微观结构因素使得针状铁素体组织具有更高韧性和更好的焊接性能, 具有抗天然气中硫化氢腐

蚀和氢诱发裂纹性能, 是国内外高压输气管线的首选钢种。

文献[1,3]主要是从生产控制方面, 介绍了在线控轧控冷对管线钢 X70 的组织 and 性能的影响。文献[4,5]从 Ti(Nb)NC、NbC 和 Nb(Ti)C 的析出热力学、动力学及其析出行为做了相关的介绍, 通过对微合金元素(Nb、V、Ti)在 X70 中的析出相的形态及其与晶格和位错的相互关系, 阐述了微合金化对管线钢 X70 的强化机理和作用。本文结合生产实际, 着重介绍了微合金元素铌的加入与控制轧制控冷工艺相结合, 对管线钢 X70 性能的影响。

1 试验材料和方法

试验用管线钢 X70 的钢坯为钢厂的连铸坯, 其断面尺寸为 150 mm \times 2 000 mm。为获得针状铁素体, 所添加的微合金化元素(Nb、V、Ti)及试验用管线钢 X70 的化学成分见表 1。

试验在钢厂的轧机上进行, 轧制 11 道次, 初轧

表 1 试验用管线钢 X70 的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of test pipeline steel X70 /%

C	Mn	P	S	Si	N	Nb	V	Ti
0.04	1.54	0.008	0.001	0.18	0.003 9	0.05	0.04	0.01

坯的厚度为 150 mm,中间坯厚度为成品卷厚的 4 倍,成品钢卷厚度为 14.6 mm。试验选取某炉号的 3 块板坯,其试验工艺流程为:加热炉加热→控制轧制→控制冷却→卷取。

轧制工艺流程如图 1 所示,1 200 ℃加热 2.5 ~ 3 h,并且要求在保温炉段保温时间不少于 0.5 h,以确保铌在奥氏体中充分溶解。

控制轧制分为两阶段:第 1 阶段为初轧,由于 Nb、V、Ti 的作用——使奥氏体再结晶的温度提高到 1 000 ~ 1 100 ℃,这样允许轧机在较高的轧制温度(1 000 ~ 1 180 ℃)下,实施更灵活的轧制工艺,可以实施大变形的轧制工艺(变形量 ≥ 61%),使得奥氏体晶粒被压扁和拉长,晶粒内产生大量的滑移带和位错,增大了有效晶界面积,相变时铁素体在晶界上和变形带上形核。在中间的待温区过后,当板坯的温度 ≤ 950 ℃ 之后,进入第 2 阶段的控制轧制,即中间坯待温厚度为 4 倍的成品厚度,在一定的变形量(变形量 ≥ 70%)和低轧制负荷下进行,扁平化了的奥氏体为奥氏体向铁素体转变提供了最大的铁素体形核位置,以获得最大细化晶粒的强韧化效果。

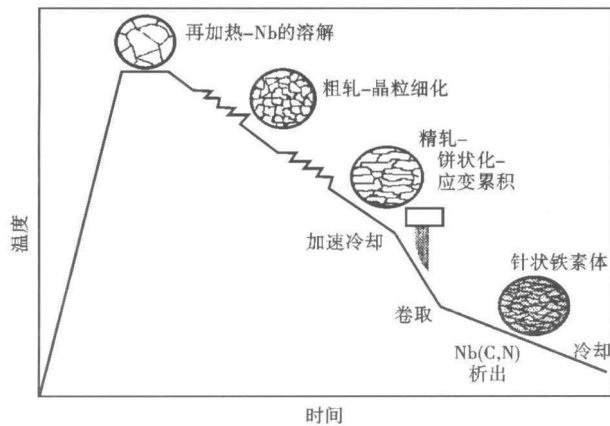


图 1 试验用管线钢 X70 的轧制工艺流程图

Fig.1 Schematic of rolling process for test pipeline steel X70

2 试验结果

2.1 针状铁素体组织的获得

本试验用 X70 钢板在 780 ~ 820 ℃ 终轧之后,立即进入冷却阶段,由其奥氏体连续冷却转变曲线(图 2)可知:为使管线钢获得针状铁素体(AF)组织和良好的板形,应采用的冷却速率为 20 ~ 30 ℃/s,终冷温度为 500 ~ 550 ℃。冷却速率的提高,促使铁素体开始转变温度 Ar_3 下降,从而抑制了珠光体转变,促进针状铁素体的形成,而且 Ar_3 点下降越多,

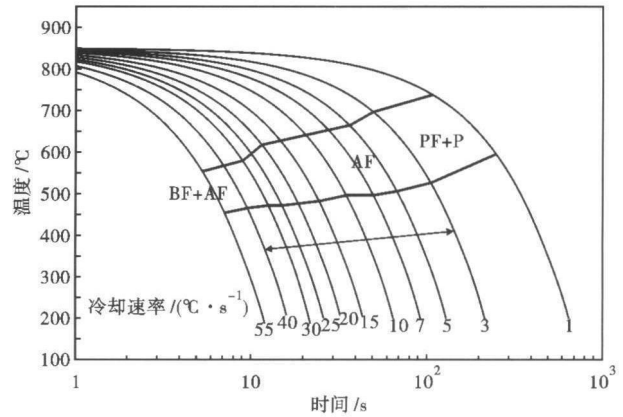


图 2 管线钢 X70 的奥氏体连续冷却转变曲线

Fig.2 Austenite continuous cooling transformation curves of pipeline steel X70

针状铁素体晶粒越细。同时,由于微合金元素 Nb 在铁素体中的溶解度甚低于其在奥氏体中的溶解度,加速冷却既可以阻止铌的碳氮化物在奥氏体中析出,又可促进其在较低的温度下自铁素体中析出,可有效起到析出强化作用。因此,随着温度的降低,将发生奥氏体向铁素体转变,沉淀温度将影响沉淀相质点的平均尺寸,随着沉淀温度的降低,沉淀质点的尺寸将减小,管线钢的强度和韧性都会提高。

管线钢 X70 的高强度、高韧性的力学性能主要得益于其细小且均匀的针状铁素体组织,其晶粒度等级达到 11 ~ 12 级,晶粒尺寸可达到 2 ~ 5 μm。本试验中 X70 针状铁素体组织的扫描电镜照片如图 3 所示。

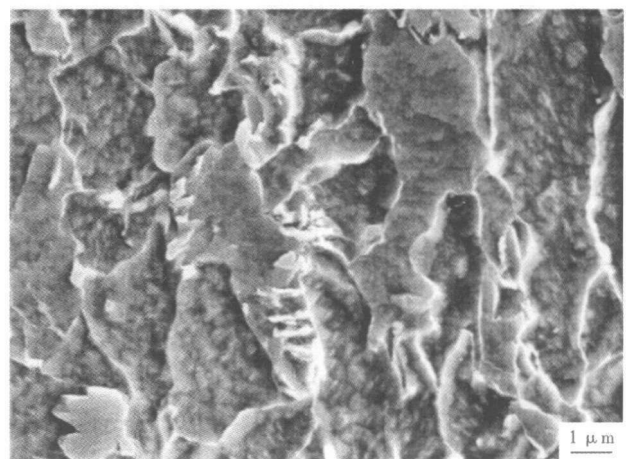


图 3 管线钢 X70 针状铁素体组织形貌,SEM

Fig.3 Morphology of structure of acicular ferrite in pipeline steel X70, SEM

2.2 控轧控冷 X70 钢针状铁素体的力学性能

3 个钢卷的主要力学性能(Cv-夏比 V 型冲击

功/J;SA- 夏比冲击剪切面积;
DWTT- 落锤试验)如表 2 所示。

从表 2 所列的管线钢 X70 的主要力学性能:屈服强度、抗拉强度、伸长率、屈强比,夏比 V 型冲击功,夏比冲击的剪切面积和落锤试验(DWTT 值)都符合“西气东输工程用螺旋缝埋弧焊管热轧钢板技术条件”的性能要求。其中 σ_b 高于技术条件 11% ~ 16%、夏比 V 型冲击功的平均值高于技术条件 10% ~ 36%。

3 结果分析与讨论

3.1 管线钢 X70 获得针状铁素体的成分保证

针状铁素体是微合金化钢在控轧控冷过程中,在稍高于贝氏体转变温度范围内,通过切变和扩散的混合相变机制而形成的具有高位错密度的非等轴铁素体,是一种不同于铁素体-珠光体的类贝氏体组织。针状铁素体钢是在 Mn-Nb 系钢的基础上,通过降低碳的含量(本试验中降到 0.04%)和提高锰的含量(本试验中为 1.54%)而形成的。低的碳含量是形成针状铁素体的先决条件,碳含量过高将在轧制后的快冷过程中形成传统的贝氏体或马氏体,而不能形成针状铁素体^[5]。一定的锰含量,起到固溶强化铁素体基体的作用,保证钢的强度而不会降低其韧性。同时,微合金化元素铌的加入,提高了奥氏体的再结晶温度,既能扩大形变奥氏体未再结晶区的温度范围,有利于增加奥氏体的轧制变形量,又能抑制晶粒长大;而且铌在变形和冷却过程中析出,起到细化晶粒和沉淀强化的作用^[6]。

3.2 变形量对管线钢 X70 针状铁素体形成的影响

针状铁素体钢中位错强化、亚晶强化对其强度具有较大的贡献,其中较多数量的位错和亚晶是由奥氏体未再结晶区大变形量产生的。这就要求终轧快冷前有一定的变形量,否则快冷后只能得到传统的粒状贝氏体组织;而且,如果变形量不够,变形只能发生在取向有利的部分奥氏体晶粒内,只在这部分奥氏体晶粒内积累位错和形变带而形成亚晶,并在冷却中经贝氏体转变后形成针状铁素体,而未变形的奥氏体和变形不够的奥氏体仍转变为传统的粒状贝氏体组织而非针状铁素体组织^[7]。因此为得到尽量多的针状铁素体,还必须满足一定的变形量,同时变形量越大,针状铁素体的形核率越高,形成的亚晶越多,晶粒也就越细小,其强化和韧化效果越明

表 2 控轧控冷管线钢 X70 的力学性能

Table 2 Mechanical properties of control rolling and cooling pipeline steel X70

卷号	拉伸性能				韧性				
	$\sigma_{0.5}/$ MPa	$\sigma_b/$ MPa	$\delta/$ %	$\sigma_{0.5}/$ σ_b	Cv(-20℃)/ J			Cv(SA)/ %	DWTT(-20℃)/ SA, %
1	565	685	39	0.82	279	269	289	95	100
	575	670	39	0.86					
2	570	670	40	0.85	234	212	234	98	97
	580	665	40	0.87					
3	580	659	40	0.88	292	278	292	100	95
	585	655	41	0.89					
技术要求	530 ~ 650	≥590	≥22	≤0.90	≥210			≥80	≥85

显。本试验中采取了第 2 阶段轧制的变形量 ≥ 70%,起到细化晶粒效果,其结果可使 $\sigma_{0.5} \geq 565$ MPa, $\sigma_b \geq 655$ MPa, Cv(-20℃) ≥ 212 J, σ_b 高于技术条件 11% ~ 16%,夏比 V 型冲击功的平均值高于技术条件 10% ~ 36%。

3.3 管线钢 X70 获得针状铁素体的冷却控制

要获得针状铁素体组织,冷却速度 ≥ 15℃/s,一般在 20 ~ 30℃/s。冷却速度过低将得到以块状铁素体为主的组织,强度偏低;冷却速度过大,将得到贝氏体组织,韧性较差。开冷温度和终冷温度对组织和性能也有较大的影响,开冷温度过低,在快速冷却之前有太多的先共析铁素体形成,强度较低;当终冷温度在 600℃以下时,随着温度的降低,强度和韧性都会提高,这是因为加速冷却可使 Nb 的碳氮化物在较低温度析出,可以有效的起到强化作用。但是,如果终冷温度过低,小于 500℃,这样冷却速度将达到 40℃/s 以上,钢卷将产生瓢曲,无法保证卷形。本试验中冷却速率控制在 20 ~ 30℃/s,终冷温度为 500 ~ 550℃,均处在最佳的范围,获得了良好的效果。

3.4 管线钢 X70 针状铁素体组织结构的微细化

大量的试验观察表明,多晶体的屈服强度与晶粒尺寸之间符合 Hall-Petch 公式: $\sigma_y = \sigma_i + Kyd^{-1/2}$ 。公式中: σ_y - 屈服强度; σ_i 、 K_y - 分别为与材料有关的常数; d - 晶粒尺寸^[8]。

在低碳微合金化的管线钢中,添加微量的 Nb,在 950℃以下可显著抑制热加工后奥氏体的静态再结晶。原因是均热后不施以热加工而直接冷却时,奥氏体中的 Nb(CN)一般不会析出,但是在热加工时会发生析出现象,此现象称为应变诱导析出。由于热加工导入的位错成为第二相粒子优先析出形核场所,形核速度加大而促进析出, Nb(CN)在奥氏体中这些地点均匀细小地析出是延迟奥氏体再结晶的

主要原因。Nb(CN)的析出物对于位错起到钉扎作用,一方面阻碍位错的运动,延迟回复过程;另一方面又阻碍了再结晶界面的移动,从而减少了再结晶晶粒的长大速度。析出物越多,或者析出物尺寸越小,钉扎力越大。为了充分发挥析出物抑制再结晶的作用,应尽可能地使析出物分布弥散,从而得到细小的奥氏体再结晶晶粒。为此使合金元素一次性地完全固溶在奥氏体中,再通过其后的形变导入位错,使合金碳化物弥散析出是重要的^[9-11]。

为了使 Nb 完全固溶在奥氏体中,本试验中板坯的加热温度一般高达 1 200 ℃,随后在热加工后的冷却过程中,过饱和的 Nb 即以 Nb(CN)的形式弥散析出,不仅阻碍了奥氏体的再结晶,有利于获得针状铁素体组织,还使针状铁素体组织结构更微细化(达到 2~5 μm),在获得较高强度的同时提高了韧性[-20 ℃ 的 Cv 最高达到 290 J、-20 ℃ 的 Cv(SA)和 DWTT(SA)接近 100%]。

综上所述,对于“西气东输”工程高要求的管线钢 X70,进行工业化大生产的关键在于选取适合的控轧和控冷工艺参数,在添加 Nb 进行微合金化和提高 Mn 量的基础上,加大奥氏体未再结晶区的变形量和控制冷却(包括合适的开冷温度、终冷温度

和冷却速度),主要保证得到以针状铁素体为主的组织,就能获得强韧化的效果。

4 结论

(1)通过采用控制轧制和控制冷却(TMCP)相结合的工艺方法,对于含 Nb 的管线钢 X70 得到晶粒尺寸为 2~5 μm 的针状铁素体组织,其强度和韧性可分别高于“西气东输”管线钢技术要求 11%~16% 和 10%~36%,使 X70 具有良好的综合力学性能。

(2)获得细小、均匀针状铁素体的因素是 Nb 等微合金元素的添加、奥氏体未再结晶区大变形量、开冷温度和终冷温度以及轧后冷却控制。Nb 在 TMCP 过程中应变诱导沉淀析出的碳氮化铌显著地延迟或阻止形变奥氏体的再结晶,以及抑制再结晶后奥氏体晶粒的长大,从而使随后的奥氏体向铁素体转变后,获得更加细小的针状铁素体组织。

(3)管线钢 X70 的生产工艺必须严格控制,合适的工艺制度为:加热到 1 200 ℃,在炉时间为 2.5~3 h,保温时间 ≥ 0.5 h;第 1 阶段的轧制变形量 ≥ 61%,第 2 阶段的轧制变形量 ≥ 70%,并在温度 ≤ 950 ℃ 开轧,终轧温度在 800 ℃ 左右;加速冷却速度在 25 ℃/s 左右,控制终冷温度在 500~550 ℃。

参考文献

- 1 焦金华.薄板坯连铸连轧生产 X70 管线钢的生产试验.轧钢,2008,25(5):52
- 2 毛卫民,朱景川,酆 剑,等.金属材料结构与性能.北京:清华大学出版社,2008
- 3 王晓钢,魏建国,刘 生.X70 管线钢控轧工艺与组织性能关系的研究.宽厚板,2003,9(5):21
- 4 邓素怀.铌的固溶、析出与变形诱导铁素体相变耦合关系研究:[硕士论文].大连:大连理工大学,2004
- 5 王春明,吴杏芳,刘 玠,等.X70 针状铁素体管线钢析出相.北京科技大学学报,2006,28(3):254
- 6 孔翠敏.微合金管线钢:[硕士论文].北京:北京科技大学,2004
- 7 金永元,大雕·卡内洛.铌·高温应用.北京:冶金工业出版社,2005
- 8 刘瑞堂,刘大博,刘锦云.工程材料力学性能.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2001
- 9 赵明纯.新一代针状铁素体管线钢的组织与性能研究:[博士论文].沈阳:中国科学院金属研究所,2003
- 10 Bahman Mirzakhani, Mohammad Taghi Salehi, Shahin Khoddam, et al. Investigation of Dynamic and Static Recrystallization Behavior During Thermomechanical Processing in a API-X70 Microalloyed Steel. ASM International, 2009, 18(8):1035
- 11 Shanmugam S, Misra R D K, Hartmann J, et al. Microstructure of High Strength Niobium-containing Pipeline Steel. Materials Science and Engineering, 2006, A(441):215

杨瑞成(1946-),男,教授,博士生导师,材料微观结构性能研究和新材料开发。

收稿日期:2009-12-13

欢迎订阅 2010 年《特殊钢》杂志

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

全国各地邮局均可订阅(可破订)

2010 年上半年如漏订,可汇款至杂志社补订,收款后即寄杂志

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司 邮编:435001