

高钢级管线钢显微组织的演变

张小立¹ 冯耀荣² 赵文轸² 霍春勇²

(1 中原工学院材料与化学工程学院, 郑州 450007; 2 西安交通大学材料科学与工程学院, 西安 710049)

摘要 随着管线钢强韧性的提高, 其对应组织的演变为铁素体-珠光体型(X65 级)、针状铁素体型(X80 级)、粒状贝氏体-铁素体型(X100 级)和下贝氏体型(X120 级)组织。晶粒细化和弥散的第 2 相亦是提高管线钢强韧性的的重要手段, 通常通过钢的成分优化和提高控制轧制工艺的冷却速度改善管线钢的组织。

关键词 高钢级管线钢 珠光体 针状铁素体 贝氏体 晶粒细化

Evolution of Microstructure of High-Grade Pipeline Steel

Zhang Xiaoli¹, Feng Yaorong², Zhao Wenzhen² and Huo Chunyong²

(1 Materials and Chemical Engineering School of Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007;
2 School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract With increasing the strength and toughness of pipeline steel, the corresponding evolution of structure is pearlite-ferrite (X65 grade), acicular ferrite (X80 grade), particle bainite-ferrite (X100 grade) and lower bainite (X120 grade). Grain refining and dispersed secondary phase are also important measures to increase the strength and toughness of pipeline steel. In general the structure of pipeline steel is improved by optimizing composition of steel and increasing cooling speed of control rolling process.

Material Index High-Grade Pipeline Steel, Pearlite, Acicular Ferrite, Bainite, Grain Refining

高钢级管线钢的组织发展经历了铁素体-珠光体型、针状铁素体型、粒状贝氏体铁素体型和下贝氏体型(表 1)。本文将对它们的组织类型的演变进行综述、分析和研究。

表 1 高钢级管线钢化学成分和组织类型

Table 1 Chemical compositions and structure type of different high-grade pipeline steels

管线钢	Ni + Cr + Cu	C _{eq}	工艺类型	组织类型	晶粒度
X65	0.308	0.279	TMCP	B(以 B _粒 为主) + PF + P	11.6
X70	0.357	0.387	TMCP	B(以 B _粒 为主) + PF + P	11.6
X80	0.750	0.484	TMCP	B(以 B _粒 为主) + AF + P	11.6
X100	0.586	0.492	TMCP	B _粒	12.6

注: (1) C_{eq} = C + Mn/6 + (Mo + Cr + V)/5 + (Ni + Cu)/15;

(2) TMCP- Thermal Mechanical Control Process(控制轧控冷过程);

(3) B- bainite 贝氏体, PF- polygonal ferrite 多边铁素体, P- pearlite 珠光体。

1 铁素体-珠光体型管线钢

铁素体-珠光体钢的基本成分为 C-Mn。铁素体-珠光体碳含量 0.10% ~ 0.25%, 锰含量 1.30% ~ 1.70%。当要求较高强度时, 可取高限碳含量, 或在 Mn 系的基础上加入微量 Nb、V。

铁素体-珠光体型管线钢的代表为 X65 和 X70 钢。在现有标准中 X65、X70 级管线钢的抗拉强度

要求为 535 MPa、570 MPa。

通常估算铁素体-珠光体力学性能的关系式为:

$$\sigma_b \text{ (MPa)} = 15.4 [19.1 + 1.8\text{Mn} + 5.4\text{Si} + 0.25(\text{珠光体}) + 0.5d^{-1/2}] \quad (1)$$

$$\text{FATT} \text{ (}^\circ\text{C)} = -19 + 44\text{Si} + 700N_f^{1/2} + 2.2(\text{珠光体}) - 11.5 d^{-1/2} \quad (2)$$

式中: d - 晶粒直径; N_f - 氮化物含量。

从公式(1)可以看出, 铁素体-珠光体型管线钢中的珠光体是改变强度的主要因素, 但每增加 10% 的珠光体, 使韧脆转变温度 FATT(公式 2) 升高 22 °C。而要增加珠光体含量, 必然要提高钢中的碳含量, 这样势必影响管线钢的焊接性。

由上述分析可知, 对于 X65 和 X70 级管线钢, 组织变化差异不大(图 1), 珠光体的含量略呈减少趋势; 控制轧控冷工艺略有不同, 主要表现在冷却速度增大。组织均为多边铁素体 + 珠光体 + 粒状贝氏体, 晶粒度为 11.6 级。对管线钢组织研究分析表明, 以针状铁素体为主的组织比多边铁素体为主的组织冲击韧性好。图 2 对应于含 0.07% C 的管线钢不同组织时的韧性^[1]。因此, 随着高钢级管线钢向着高强度高韧性发展, 针状铁素体组织设计成为有价值的选择途径。

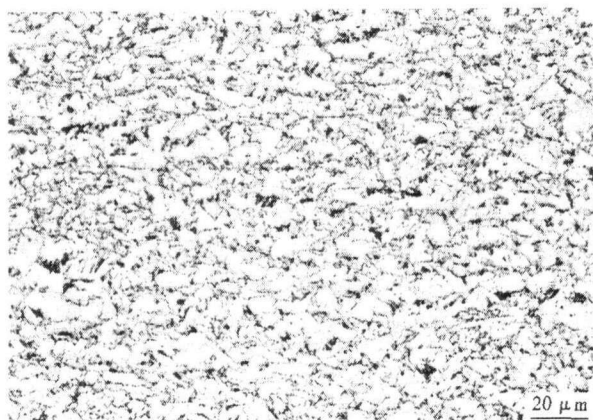


图1 X65及X70级管线钢组织形貌: B(B_粒为主) + PF + P, 晶粒度 11.6 级

Fig.1 Morphology of structure of X65 and X70 grade pipeline steels: B (mainly particle B) + PF + P, grain rating 11.6)

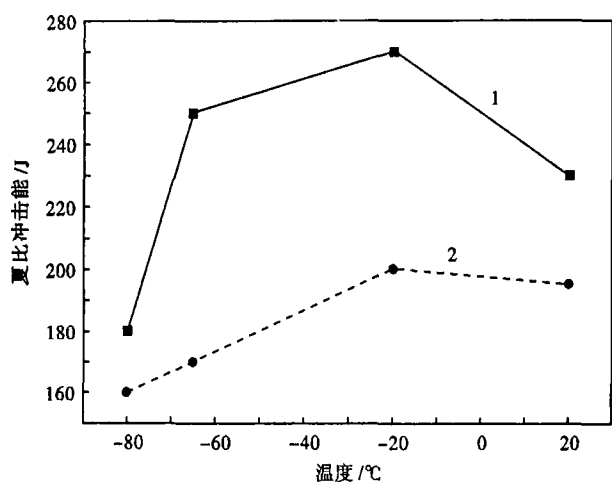


图2 组织对 X70 钢材的冲击韧性的影响: 1- 针状铁素体为主; 2- 多边铁素体为主

Fig.2 Effect of structure on impact energy of X70 grade steel products: 1- mainly acicular ferrite; 2- mainly polygonal ferrite

2 针状铁素体型管线钢

针状铁素体通常在较低温度下与贝氏体相变相近的区域内形成。由于针状铁素体具有尺寸较小、交叉分布、大角度晶界、存在亚结构和高密度可动位错的组织结构特点,使得管线钢及其焊管接头焊缝具有较好的韧性。

针状铁素体(acicular ferrite)通常在(超低碳)低合金钢冷却过程中形成,又称为超低碳贝氏体^[2]。

研究表明,针状铁素体首先在钢中预先存在的缺陷处形核、长大。随后不断激发新的晶核。针状铁素体在长大过程中,伴随表面浮凸效应,其浮凸具有不变平面应变(IPS型)特征。若形成温度较高,铁素体和奥氏体的强度较低,IPS型浮凸可能以塑性变形方式松弛,形成大量位错。实验证实,针状铁素体位错密度高达 10^{14} m^{-2} ,对强度的贡献约 145 MPa。

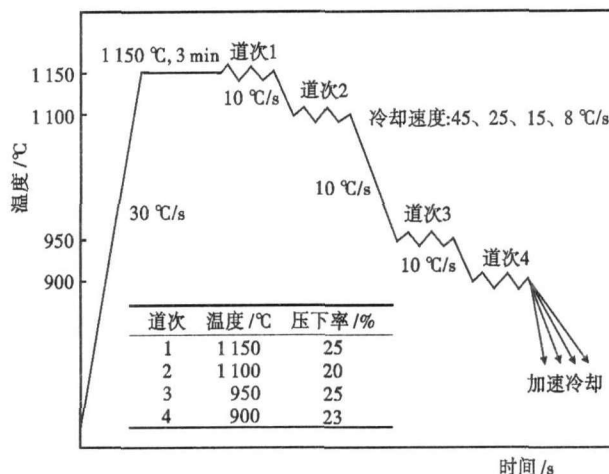


图3 X80 级管线钢轧制工艺示意图

Fig.3 Schematic of rolling process for X80 grade pipeline steel

X80 级管线钢具有高强度和高韧性的原因主要是其组织设计为针状铁素体组织。对于图 3, X80 级管线钢轧后随着冷却速度^[3]的变化对强度的影响有两种强化机制。当冷却速度很慢时,发生粒状贝氏体转变形成的相变强化,冷却速度较快时则产生细晶强化。因此, X80 级管线钢不是主要依靠合金化来达到所需要的强度,而是通过轧制工艺的优化和轧后加速冷却速度的调控得到高强度和高韧性的组织,从而获得最优的力学性能。

图 4 为 X80 级管线钢的金相组织形貌,可以看出, X80 级管线钢组织中粒状贝氏体组织明显增加,珠光体组织较为少见,和 X65、X70 级相比,铁素体形状逐渐拉长。这种组织设计可以使 X80 级管线钢的强度达到 670 MPa,夏比冲击功约为 200 J。



图4 针状铁素体型(AF型)X80级管线钢的组织形貌: B(B_粒为主) + PF + P, 11.6 级

Fig.4 Structure morphology of acicular ferrite X80 grade pipeline steel: B (mainly particle B) + PF + P, grain rating 11.6)

3 粒状贝氏体铁素体型管线钢

目前大多数高强度或超高强度的管线钢为贝氏

体组织。粒状贝氏体定义为由多边铁素体和分布于其上的第2相组成。高分辨电子显微镜分析表明,铁素体长大由扩散机制控制,少量板条铁素体晶体限制残余奥氏体成为粒状或等轴状。

对于 X100 级管线钢(图 5),基体相由粒状贝氏体并配合有合适数量的 MA(马氏体-残余奥氏体)岛

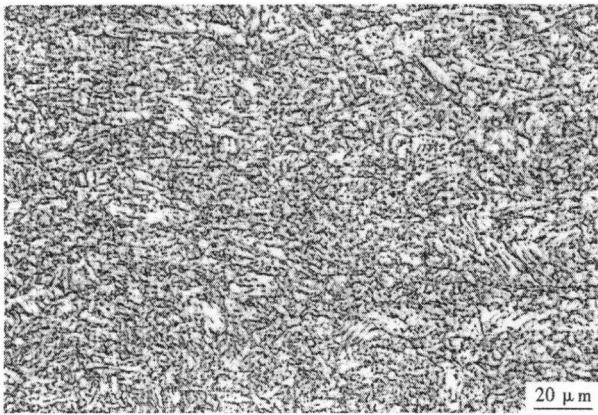


图 5 X100 级管线钢的组织形貌: B_粒, 12.6 级

Fig. 5 Morphology of structure of X100 grade pipeline steel: Particle B, grain rating 12.6

为弥散相,被证明是最佳选择。TMCP 轧制工艺制备的 X100 产品表现出明显的细晶特征^[4],使其抗拉强度性能达到 800 MPa,而韧性没有明显降低。

4 下贝氏体型管线钢

对于 X120 级管线钢(表 2),具有低的转变温度范围的低碳贝氏体,即下贝氏体组织是组织设计的目标^[5]。由于淬硬性增加,这就需要添加适量的贝氏体来调整连续冷却转变(CCT)曲线。这是因为当贝氏体微量固溶后对淬硬性有明显的影响。

图 6 表明,具有碳含量低于 0.06% 的下贝氏体(LB)组织的低碳钢和碳含量约 0.10% 的上贝氏体(UB)组织的低碳钢,都可作为 X120 级管线钢的备选钢种。高强度管线钢的另一种选择,可以是铁素体-马氏体的双相钢(DP),其生产工艺为热轧后正常空冷。在非再结晶温度范围内,二次加热板材控轧后分级淬火就能得到下贝氏体组织。对于 X120 级管线钢,空冷时奥氏体向铁素体转变的温度非常低,因而很难实现这种铁素体-马氏体双相钢的高产率,故低碳贝氏体钢得到应用^[6]。

表 2 典型 X120 级钢的化学成分和力学性能

Table 2 Typical chemical composition and mechanical properties of steel X120 grade

化学成分/%					其他元素	P _{cm}	拉伸强度(环向) 设计值	CVN 能量设计值 (-30 °C)
C	Mn	Mo	Ti	B				
0.042	1.94	0.29	0.013	0.000 9	Cu, Ni, Cr, Nb	0.21	YS ≥ 827 MPa (120 ksi)	≥ 231 J

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

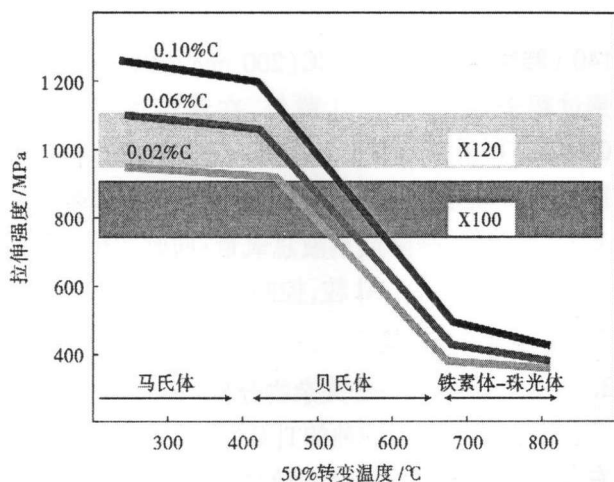


图 6 管线钢 50% 转变温度和强度关系示意图

Fig. 6 Relation between 50% transition temperature and strength of pipeline steel

5 结论

管线钢总体的变化趋势为珠光体型向贝氏体型转变,强度不断提高,冷却速度不断增加。晶粒细化是提高强度的重要方法之一。但是随着强度设计的

不断提高,组织设计作用更加重要。

参考文献

- 1 陆月璋,周玉红. X80—X100 级管线钢的开发. 宽厚板, 2000, 6(5): 34
- 2 方鸿生,王家军,杨志刚,等. 贝氏体相变. 北京: 科学出版社, 1999
- 3 薛小怀,杨淑芳,吴鲁海,等. X80 管线钢的研究进展. 上海金属, 2004, 26(45): 45
- 4 Mauro Pontremoli. New Generations of Ultra-high Strength X100/X120 Pipelines; A Breakthrough for Economic Long-distance Gas Transportations. Proceedings of the Fifteenth (2005) International Offshore and Polar Engineering Conference, 2005, 31
- 5 Hitoshi Asahi, Futsu Chiba, Takuya Hara. X120 Uoe Linepipe With Improved Properties and Varied Sizes. Proceedings of IPC 2006 6th International Pipeline Conference, September 25-29, 2006 Calgary, Alberta, Canada.
- 6 Hitoshi Asahi, Takuya Hara, Hiroshi Morimoto. Development and Properties of Ultra-high Strength Uoe Linepipe. Proceedings of IPC 2004 International Pipeline Conference October 4-8, 2004 Calgary, Alberta, Canada.

张小立(1969-),女,博士后,高级工程师,高温结构材料和高钢级管线钢的研究。

收稿日期: 2007-09-27