



显微组织对薄壁 X65M 管线钢落锤试验性能的影响

张 明

(江阴兴澄特种钢铁有限公司特钢研究院, 江阴 214429)

摘 要:对厚度为 6~9.5 mm 的薄壁管线钢低温落锤性能容易出现波动的问题,通过轧制对比实验分析,探究了薄规格 X65M 管线钢低温落锤性能的控制工艺的影响因素。通过不同低温落锤试验结果样品的显微组织分析和数值化结构研究,发现钢中多边形铁素体晶粒尺寸大小和钢板心部片条状分布的 M/A 组织对低温落锤性能影响显著。当钢中面积在 $200 \mu\text{m}^2$ 以上的晶粒数量较多,平均面积超过 $260 \mu\text{m}^2$,或者 M/A 组织占比 $>6\%$ 时,钢板低温落锤性能明显恶化。通过连铸过热度控制以及控轧控冷工艺优化,有效细化了晶粒尺寸并减少了 M/A 组织的形成,实现 6~9.5 mm 薄壁钢板批量稳定生产 8 万 t 以上,可以满足 $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ 低温落锤要求,对薄规格管线钢产品的研发和生产具有重要意义。

关键词:薄壁管线钢;落锤;晶粒尺寸;M/A 组织;X65M

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00205 **中图分类号:**TG142.1

Influence of Microstructure on DWTT Performance of Thin-wall X65M Pipeline Steel

Zhang Ming

(Special Steel Research Institute, Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin 214429, China)

Abstract: The paper addresses the issue of fluctuating low-temperature drop-weight tear test (DWTT) performance in 6-8 mm thin-wall pipeline steel, the influencing factors of the control process of low-temperature DWTT of X65 thin-wall pipeline steel have been explored. With microstructure analysis and numerical deconstruction study of different low-temperature DWTT results, it reveals that the size of polygonal ferrite grains and the distribution of M/A constituents in the central part of the steel plate significantly affect low-temperature DWTT performance. When the average area of grains with an area $\geq 200 \mu\text{m}^2$ is greater than $260 \mu\text{m}^2$, and the proportion of M/A constituents is greater than 6%, DWTT performance shall deteriorate significantly. By optimizing the composition and continuous casting and rolling processes, control of grain size and M/A constituents can effectively improve the low-temperature DWTT performance of thin-specification pipeline steel. The related product has achieved stable production of more than 80,000 tons, meeting the requirement of $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ low-temperature DWTT, it is of great significance for the development and production of thin-wall pipeline steel products.

Key Words: Thin-wall Pipe Line Steel; DWTT; Grain Size; M/A Microstructure; X65M

近年来,随着钢材生产技术的不断进步,薄规格管线钢由于在减重、运输及生产过程中的经济性优势,几年来得到了快速发展和应用,壁厚已扩展到了 6~8 mm 的极薄规格。由于壁厚越薄,在受外力作用时越易发生断裂,如何防止其在低温环境下发生脆断,从而提高使用寿命和安全性,已成为极薄规格管线钢研发和生产应用时的一个重要问题。

由于管线钢管的落锤试验断口与钢管爆破断口有相近的韧脆转变温度和剪切面积转变温度(SATT)曲线,落锤试验(DWTT)目前已被广泛用于对极薄管线的断裂进行控制和预测,并成为衡量极薄规格管线钢抵抗脆性开裂能力的重要指标之一^[1]。

薄规格管线钢轧制压缩比通常都在 20 以上,高的压缩比导致铸坯中心偏析等缺陷在薄规格钢板芯部更加集中,恶化落锤性能,由于薄规格钢板降温快,难以实现充分控制轧制,这进一步导致低温 DWTT 性能控制难度大^[2],限制了薄壁管线钢的生产和推广应用。结合 8 mm 厚度 X65M 高强管线钢的生产,通过不同落锤检验结果试样的显微组织分析,重点研究了不同轧制工艺和冷却工艺对落锤性能的影响规律,并提出相应的控制措施,希望能够为薄壁高强管线钢产品的研发和生产提供了理论和实践依据。

1 试验材料及方法

采用超低碳和 Nb、Ti 微合金化成分设计。选取不同炉次连铸坯料,坯料厚度 150 mm,经不同 TMCP 工艺轧制成 8 mm 厚 X65M 管线钢板。试验用材料化学成分和试轧工艺参数见表 1。

对轧制后钢板分别在钢板宽度 1/4 和 3/4 处取样,按 API 5L3 进行 DWTT 落锤试验,试验温度 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。选取剪切撕裂面积 0~100% 不同实验结果的典型落锤断口试样,从距断口面 10 mm 近缺口处制取金相样,金相样制取示意图如图 1 所示。采用 4% 硝酸酒精溶液对打磨抛光后的金相样进行腐蚀,并在光学显微镜下进行光学组织观察。对厚度 1/2 位置显微组织照片利用 ImageJ 软件进行解构,对比分析不同剪切撕裂面积结果的组织特征。

2 试验结果

不同试样 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温 DWTT 试验结果见表 2,可以看到,在成分接近一致的情况下,两个不同钢板

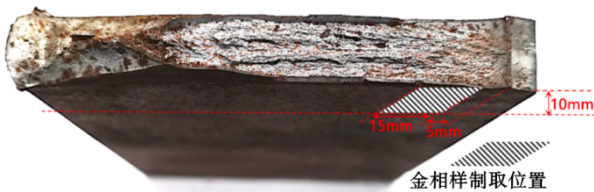


图 1 落锤断口金相样制取位置示意图

Fig. 1 Schematic Diagram for sampling position of microstructure fracture after DWTT

表 1 X65M 管线钢化学成分及试轧工艺参数

Table 1 Chemical composition and trial rolling process of X65 pipeline steel plate

试样	化学成分/%						待温厚度/ mm	精轧开轧温度/ $^{\circ}\text{C}$	终冷温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷速/ $(^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1})$
	C	Si	Mn	P	S	Nb+Ti				
1 [#]	0.06	0.24	1.56	0.010	0.001	<0.06	16	1 000	560	24
2 [#]	0.06	0.26	1.57	0.009	0.001	<0.06	28	970	560	23

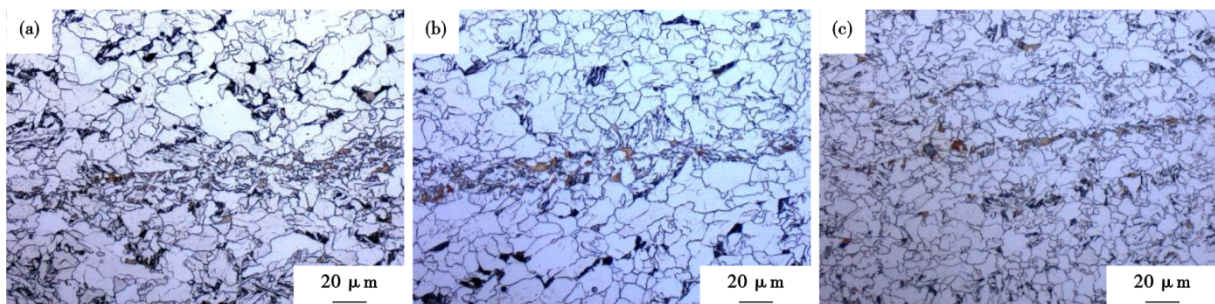


图 2 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ DWTT 检验不同剪切撕裂面积典型金相组织图:(a)SA = 0,(b)SA = 20%,(c)SA = 100%

Fig. 2 Typical microstructure diagram of different SA% at $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ DWTT test results : (a)SA = 0,(b)SA = 20%,(c)SA = 100%

试样 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 落锤检验结果差异性较大,从 0 到 100% 分布。

厚度 1/2 位置典型试样落锤组织照片如图 2 所示,可以看到,8 mm 厚 X65M 管线钢主要由多边形铁素体和少量珠光体及铁素体贝氏体组织构成。DWTT 性能差的试样,如图 2(a)、(b)所示,多边形铁素体组织明显比 DWTT 性能良好的晶粒尺寸大,如图 2(c)所示,并且心部伴有严重的 M/A 异常组织,这与其他研究者针对薄规格的低温韧性影响规律相一致。

为了更进一步分析晶粒尺寸和 M/A (马氏体奥氏体岛)组织对薄规格管线钢 DWTT 性能的影响,通过计算机软件量化分析,统计了各试样中 M/A 组织的占比、面积 $\geq 200\text{ }\mu\text{m}^2$ 的晶粒个数和平均晶粒面积,结果见表 3 和如图 3、图 4 所示。从图 3、图 4 可以看到,晶粒尺寸大小以及 M/A 组织占比对薄规格管线钢低温落锤性能有明显影响。当晶粒平均面积 $> 260\text{ }\mu\text{m}^2$ 时以及 M/A 组织占比 $> 6\%$ 时, DWTT 性能明显恶化。

3 结果讨论

生产实践表明^[3-6],细小的多边形铁素体组织呈现大角度晶界(晶界取向差 $> 15^{\circ}$)和高位错密度的亚晶结构特征,可以有效降低钢的平均有效晶粒尺寸。裂纹扩展过程中遇到这些细小多边形铁素体时,其传播角度会发生大的转折,可以增加裂纹传播时所需要的能量,从而可以显著提高钢的低温韧性,其原理图如图 5 所示。但当多边形铁素体晶粒粗大时,如图 6 所示,作为一种低位错密度组织,

表 2 8 mm 厚 X65M 管线钢板-30 °C 低温 DWTT 试验结果
Table 2 DWTT test results at -30 °C low-temperature of 8 mm thickness X65M pipeline steel plate

试样	撕裂剪切面积(SA) /%	
	单值≥75	平均≥85
1#	0,0,5,20,40,40	17.5
2#	75,85,100,100	90

表 3 8 mm 厚 X65M 管线钢板不同落锤试验性能试样晶粒尺寸和 M/A 组织占比量化数据表
Table 3 Quantitative data of grain size and M/A structure proportion of 8 mm thickness X65M pipeline steel plate with different DWTT results

试样	落锤试样编号	剪切撕裂面积比例/%	面积>200 μm ² 晶粒		M/A 组织占比/%
			个数/个	平均面积/μm ²	
1#	1	0	15	272.7	8.56
	2	5	14	284.8	8.46
	3	0	17	310.0	10.78
	4	40	9	265.7	6.58
	5	20	12	273.7	8.71
	6	40	14	252.7	6.09
2#	1	75	9	241.5	4.42
	2	100	4	241.2	5.43
	3	85	6	243.4	3.49
	4	100	6	251.9	4.80

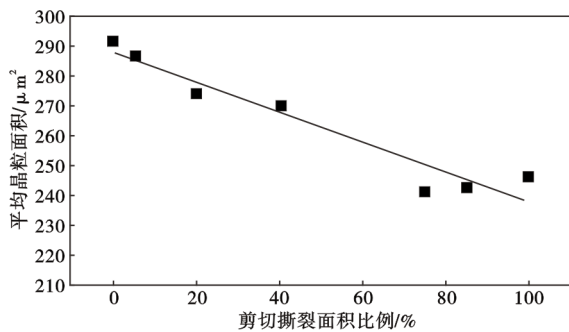


图 3 8 mm 厚 X65M 管线钢板落锤试验性能与 ≥200 μm² 晶粒平均面积关系图

Fig. 3 Relationship diagram between DWTT properties and grain with area larger than 200 μm² of 8 mm thickness X65M pipeline steel plate

裂纹更容易在其内部快速扩展,从而导致 DWTT 性能下降。

M/A 组织是一种富碳的硬脆相,在钢变形时或受力时易作为裂纹起源位置,特别当钢中 M/A 呈片条状分布,在 M/A 组织周围形成应力分布不均匀,片条状尖端处更容易应力集中,从而造成裂纹在 M/A 组织处形成并沿其与基体之间的晶界扩展,M/A 尺寸越大,对材料的韧性破坏性越大^[3,7-10]。图 7 为

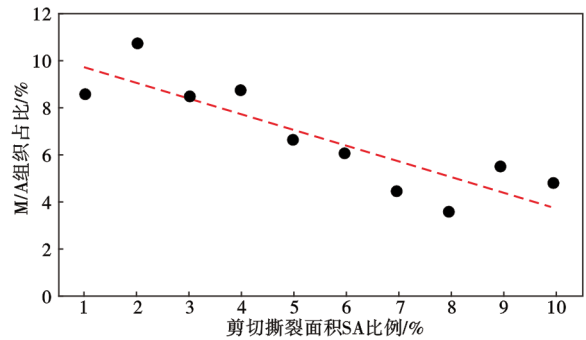


图 4 8 mm 厚 X65M 管线钢板落锤试验性能与厚度中心 M/A 组织占比关系图

Fig. 4 Relationship diagram between DWTT properties and proportion of M/A microstructure of 8 mm thickness X65M pipeline steel plate

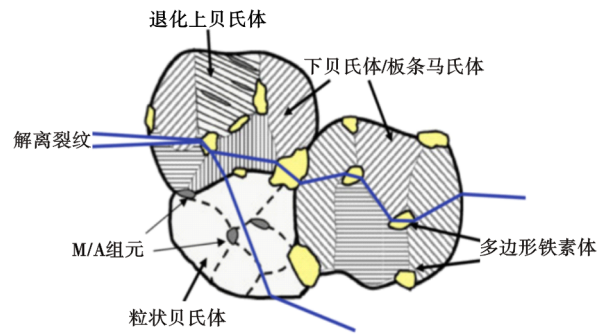


图 5 裂纹在含多边形铁素体双相组织中传播示意图^[6]
Fig. 5 Schematic diagram for propagation path of cracks in Dual-phase microstructure with PF^[6]

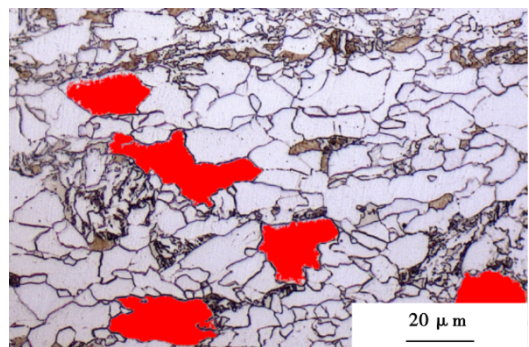


图 6 8 mm 厚 X65M 管线钢板面积 ≥200 μm² 的典型晶粒识别结果

Fig. 6 ≥200 μm² identification of typical grain identification distribution of 8 mm thickness X65M pipeline steel plate

观察到的裂纹沿 M/A 组织带扩展的典型图片,图 8 为本次试验 DWTT 样 M/A 组织识别结果图,可以看到在心部存在有大量的粗大片条状 M/A 组织,这也是导致 DWTT 性能恶化的原因之一。

高强管线钢的低温 DWTT 性能控制,最为关键的是控制轧后多边形铁素体晶粒的大小以及 M/A

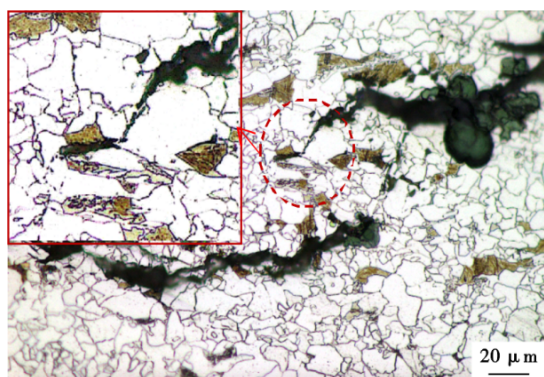


图7 8 mm厚X65M管线钢板裂纹沿M/A组织扩展图

Fig. 7 Diagram of cracks propagation along M/A microstructure of 8 mm thickness X65M pipeline steel plate

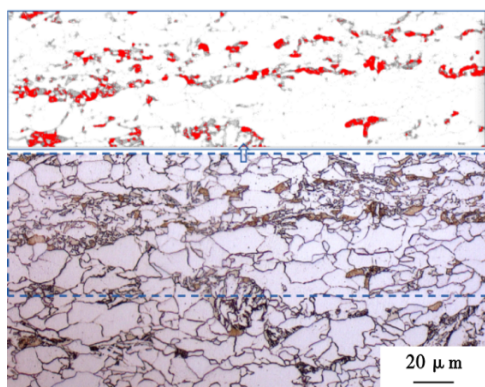


图8 8 mm厚X65M管线钢板条片状分布M/A组织识别结果

Fig. 8 Strip distribution of M/A constituents recognition of 8 mm thickness X65M pipeline steel plate

参考文献

- [1] 吉玲康, 李鹤, 李为卫. 现代高强度韧性管线管落锤撕裂试验的技术要求[J]. 石油管材与仪器, 2019, 5(5): 18-25.
- [2] 诸建阳, 许峰, 孙宪进, 等. 超薄规格高品质X65M管线钢的研发与生产实践[J]. 宽厚板, 2022, 28(1): 18-23.
- [3] 邢钊, 梁晓军, 郝英敏. 基于材料组织量化的DWTT性能优化探究[J]. 宝钢技术, 2021(1): 24-28.
- [4] 刘清友, 李拔, 贾书君, 等. 高强度级低温管线钢的韧化机制及控制技术[J]. 鞍钢技术, 2020(2): 8-17.
- [5] 刘清友, 贾书君, 任毅. 高强度级厚壁管线钢低温断裂韧性控制技术研究[J]. 焊管, 2019, 41(7): 39-47+54.
- [6] Hara T, Shinohara Y, Asahi H, et al. Effects of microstructure and texture on DWTT properties for high strength line pipe steels [C]. Proceedings of 2006 International Pipeline Conference, 2008: 245-250.
- [7] Hwang B, Lee C G, Kim S J. Low-temperature toughening mechanism in thermomechanically processed high-strength low-alloy steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(3): 717-728.
- [8] 马璇, 王慧, 刘刚伟, 等. MA形成过程和分布对高强度管线钢力学性能的影响[J]. 焊管, 2016, 39(5): 64-68.
- [9] Kabanov A, Korpala G, Kawalla R, et al. Effect of hot Rolling and Cooling Conditions on the Microstructure, MA Constituent Formation, and Pipeline Steels Mechanical Properties [J]. Steel Research International, 2019, 90(6): 10-14.
- [10] 杨政, 栗庭亚, 冯耀荣, 等. 高性能管线钢落锤撕裂试样断裂性能的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(9): 1079-1082+1103.
- [11] 叶晓瑜, 黄贞益, 李拔, 等. 再结晶区轧制工艺参数对X80管线钢组织及织构的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(4): 12-16.
- [12] 杨小龙, 张振兴, 申建明, 等. 轧制工艺对L450M管线钢组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(3): 35-38.
- [13] 贾书君, 段琳娜, 刘清友. 高强度级管线钢中M/A组元的控制工艺[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(3): 82-88.

组织的产生数量。对于多边形铁素体组织大小,可以通过加热温度、待温厚度以及适当调控合金元素降低 A_{c3} 相变温度点等方法进行控制^[11-12]。而对于M/A组织控制,需结合铸坯内部质量控制、成分设计、冷却速度、冷却温度等对应关系来控制,如通过降低钢种C含量减少铸坯的偏析波动,轧制时降低终冷温度并提高冷却速度等措施都可以有效减少钢中M/A组织的形成^[13]。

目前,国内某钢厂薄壁管线钢生产时,控制连铸过热度 $\leq 25^\circ\text{C}$ 改善铸坯偏析从而抑制了钢中M/A组织的形成;同时,在轧制时为了实现更好控轧效果细化晶粒,提高精轧待温厚度 ≥ 3.5 倍成品厚度,并降低精轧开轧温度至 980°C 以下。通过这些措施,已批量供货6~9.5 mm薄壁管线钢8万余吨,产品可以满足 -30°C DWTT落锤要求,极大满足了市场对薄规格管线钢的需求。

4 结论

(1)对于薄壁X65M高强管线钢,晶粒尺寸大小以及M/A组织占比对薄规格管线钢低温落锤试验性能影响显著。当晶粒平均面积 $>260\ \mu\text{m}^2$ 时以及M/A组织占比 $>6\%$ 时,DWTT性能明显恶化。

(2)通过连铸过热度控制、增加轧制待温厚度,降低精轧开轧温度等措施,可以有效细化晶粒尺寸并减少钢中M/A组织的形成,从而实现有低温落锤试验要求的薄规格管线钢稳定生产。