

回火温度对含钒 X80 管线钢显微结构及低温冲击韧性的影响

张 阳¹, 李龙飞^{2*}, 王春辉³

(1. 中国金属学会, 北京 100081; 2. 钢铁研究总院有限公司冶金工艺研究所, 北京 100081; 3. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了明确轧后回火温度对含钒 X80 管线钢低温冲击韧性的影响, 通过多种微观结构表征手段, 对经过不同轧后回火温度处理的六组试验钢显微结构进行了研究, 阐明其与低温冲击韧性之间的关系。结果表明, 回火温度由 450 °C 提高到 650 °C, 钢中纳米尺度析出相尺寸与数量增加, 钢中针状/板条状铁素体及粒状贝氏体的尺寸和数量降低, 多边形铁素体增多, 钢中大角度晶界比例降低, 低温冲击韧性主要由析出相的尺寸和数量主导, 呈现逐渐降低的变化趋势; 而当回火温度升高至 700 °C 时, 钢中细小析出相数量比例降低, 平均尺寸增大, 显微组织主要由粗大的多边形铁素体构成, 且大角度晶界比例和 $\Sigma 3$ 晶界占比显著增高, 晶界结构特征为该条件下低温冲击韧性的主要影响因素, 冲击功大幅提升, 高达 307.28 J。

关键词: 回火温度; X80 级管线钢; 钒; 低温冲击韧性

中图分类号: TF76, TF704.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2026)04-0125-10

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.04.015

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Effect of tempering temperature on the microstructure and low-temperature impact toughness of vanadium-contained X80 pipeline steel

ZHANG Yang¹, LI Longfei^{2*}, WANG Chunhui³

(1. The Chinese Society for Metals, Beijing 100081; 2. Department of Metallurgical Technology Research, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 3. School of Metallurgy and Ecology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: In this paper, in order to clarify the influence of tempering temperature after thermo-mechanical control process on the low-temperature impact toughness of vanadium-contained X80 pipeline steel, the microstructural variation including nano-scale precipitates, microstructure, grain boundaries, and crystallographic characteristics, in experimental steels processed under six different tempering temperatures were investigated by multiple microstructural characterization methods. Furthermore, the relationship between the steel microstructures and low-temperature impact toughness was revealed. The results showed that with increasing tempering temperature from 450 °C to 650 °C, the size and number of nano-scale precipitates in steel increased, while the size and quantity of granular acicular/lath ferrite and bainite decreased. Under these conditions, the low-temperature impact toughness was primarily dominated by the size and quantity of precipitates, exhibiting a gradually decreasing trend. Meanwhile, the number of polygonal ferrite increased and the ratio of high angle grain boundaries decreased. These microstructural changes led to a gradual decrease in low-temperature impact toughness. However, as the temper-

收稿日期: 2026-03-06; 修回日期: 2026-04-27; 接受日期: 2026-05-06

作者简介: 张阳, 1992 年出生, 女, 河北邢台人, 硕士, 工程师, 从事高强度低合金钢成分设计与热处理工艺研究, E-mail: zy@csm.org.cn; *通信作者: 李龙飞, 1990 年出生, 男, 辽宁锦州人, 博士, 高级工程师, 长期从事电炉短流程冶炼工艺技术研究, E-mail: aifei_0105@126.com。

ing temperature increased to 700 °C, the ratio of fine precipitates in steel decreased and the average size increased. Moreover, the microstructure composed of coarse polygonal ferrite, with a significant increase in the ratio of high angle grain boundaries and $\Sigma 3$ grain boundaries. Under tempering treatment at 700 °C, the structural characteristics of grain boundaries were the main factors influencing low-temperature impact toughness. The impact energy of the steel tempered at 700 °C has been greatly improved, reaching up to 307.28 J.

Key words: tempering temperature; X80 pipeline steel; vanadium; low temperature toughness

0 引言

管道输送具有能耗少、成本低、效率高等特点,是石油、天然气等能源大规模输送的主要方式。目前,我国油气管网建设处于快速发展阶段,在国家能源安全战略与市场化改革的双重驱动下,已经初步形成联通南北、贯穿东西的“全国一张网”格局^[1-2]。截止 2025 年,我国主要油气管道总长度已超过 10 万 km,并预计全国油气管道规模将达到 21 万 km 左右,输送天然气能力从 2020 年的 2 230 亿 m³ 增至目前的 3 940 亿 m³^[3]。与此同时,在国家“双碳”目标的指引下,且随着油气管网逐步向大口径、多介质输送、高压及复杂环境敷设发展,对管线钢的综合性能提出了更高要求^[4-7]。

按照材料自身屈服强度的差异,将管线管分为不同的级别,其中 X80 级管线钢因其良好的性能已成为我国长距离油气输送的主干管网核心材料,被广泛应用于西气东输二线、三线、四线以及中俄东线等关键能源动脉中^[8-11]。然而,由于新进发现和开采的油气资源多处于深地、深海、高寒等更为复杂严苛的自然环境中,均需要 X80 级管线钢具备更优良的低温冲击韧性,国内外研究学者也做了大量研究工作^[12-15]。袁晓鸣等人^[16]研究发现,向 X80 管线钢中添加 0.005 0% 的稀土元素铈,可降低韧脆转变温度,提高材料的低温韧性。何小东等人^[17]通过对比研究发现,与质量百分数铈含量为 0.075% 的 X80 管线钢相比,铈含量为 0.055% 的 X80 管线钢中粒状贝氏体组织比例更小,其低温冲击韧性更高。侯宇^[18]研究发现,Cr 元素在冷却相变过程中扩大粒状贝氏体形成区间,对 X80 管线钢焊缝冲击韧性带来不利影响。夏瑶等人^[19]研究发现,喷雾冷却可以细化 X80 管线钢焊缝及热影响区的晶粒,有效提升焊缝的低温冲击韧性。袁良增等人^[20]运用热模拟试验机仿照 X80 弯管用管线钢感应加热过程,获得最优加热温度为 980 °C,此状况下钢的构造由细微的粒状贝氏体和马氏体/奥氏体(M/A)岛构成,-45 °C 时低温冲击吸收功可达到 200 J。Yang 等人^[21]研究发现,X100 管线钢中 {001}<110> 织构对冲击韧性

不利,在非再结晶区域的低温终轧可使管线钢获得更细小的组织和更优的冲击韧性。鞍钢集团刘干等人^[22]研究发现,通过调整控轧控冷工艺,使得厚规格 X80M 管线钢形成以针状铁素体为主,以及少量分散分布的 M/A 岛构成的显微结构,能够达成材料强度与韧性的良好配合,产品低温韧性卓越。此外,相关学者和团队在回火温度对低合金高强度钢低温冲击韧性的影响方面也做了较多研究。赵强强等人^[23]通过研究不同回火温度对 1 000 MPa 级低合金高强钢力学性能的影响发现,经轧后淬火且 540 °C 和 580 °C 回火的钢组织发生明显回复,板条界的条状碳化物减少,低温冲击韧性显著改善。麻亚鑫等人^[24]以 500 MPa 级海洋工程用钢为研究对象,发现随着回火温度升高,位错密度降低,大角度晶界比例升高,可有效阻碍裂纹扩展,提升材料低温冲击韧性。在团队前期的研究中已证实,在相同的控轧控冷-回火工艺条件下将 X80 管线钢中的钒含量提高至 0.12% ~ 0.14%,可增加钢中作为有效氢陷阱的纳米尺度析出相数量,从而有效改善 X80 管线钢的抗氢致开裂及抵抗氢致塑性损失的能力^[25-26]。然而,回火温度对此类钒含量较高的 X80 管线钢低温冲击性能影响的研究在国内外却鲜有报道。

因此,笔者以含钒量为 0.12% 的 X80 管线钢作为研究目标,运用高分辨率透射电子显微镜、扫描电子显微镜、电子背散射衍射技术等手段,首次系统探究了 450 ~ 700 °C 范围回火温度对钢中析出相、晶界等微观结构特性的影响,并分析了其与钢低温冲击韧性之间的联系。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

利用 ZG-0.01 型中频真空感应炉冶炼得到 X80 管线钢的试验钢,化学成分如表 1 所示。将试验钢锭按照如图 1 所示的热加工工艺进行处理,根据六组试验钢的轧后回火温度的差异,将回火温度分别为 450、500、550、600、650、700 °C 的试验钢分别定义为 H450、H500、H550、H600、H650、H700。

1.2 试验方法

在试验钢板的 1/4 厚度位置取 10 mm×10 mm×8 mm 试样, 经过打磨、抛光以及 4%(体积百分数) 硝酸酒精溶液侵蚀后在扫描电子显微镜下观察微观结构; 在由轧制的轧向和横向组成的平面上制备碳复型样品, 选用带有能谱的高分辨透射电镜 (HRTEM) 分析各样品中纳米尺度析出相, 通过 Image J 软件统计析出相的数量和尺寸特征; 借助电子背散射衍射技术 (EBSD) 分析六种试验钢的晶粒取向和晶界类型与占比, EBSD 样品制备需机械+电解

抛光, 其中电解抛光液选用 5%(体积百分数) 高氯酸酒精溶液, 电压 30 V, 电流 0.75 A, 温度 -10 ℃, 扫描步长为 0.4 μm/s。

如图 2 所示, 在每个热轧后钢板试验钢 1/2 厚度处按照 GB/T 229-2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》标准取出 3 个冲击试样, 利用 ZBC2452-B 型摆锤式冲击试验机进行 -20 ℃ 的低温冲击试验, 低温冷却介质为液氮和酒精的混合液, 冲击功取 3 组样品的平均值。使用 JSM-6480LV 扫描电镜 (SEM) 对各试验钢冲击断口进行宏观和微观观察。

表 1 试验用 X80 管线钢化学成分
Table 1 Chemical composition of experimental X80 pipeline steel

C	Si	Mn	S	Ni	Mo	Cr	V	Nb	Ti	O	Al	N	Fe
0.034	0.15	1.80	0.004 0	0.22	0.11	0.25	0.120	0.03	0.005	0.005 0	0.03	0.003 3	Bal.

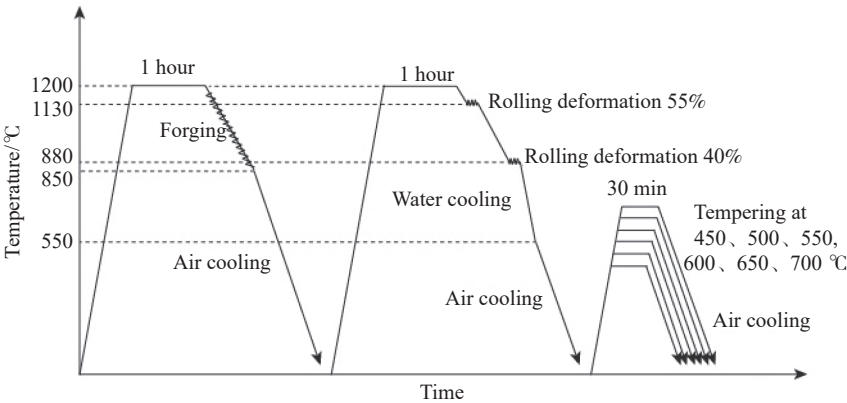


图 1 试验钢热加工路线示意
Fig. 1 Schematic diagram of hot working process for experimental steel

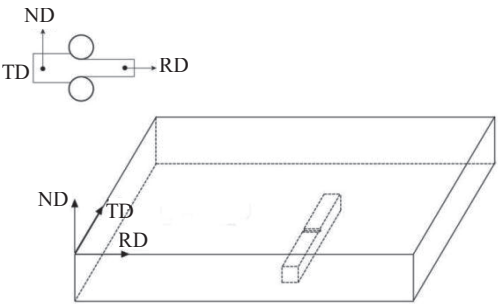


图 2 试验钢冲击试样取样示意
Fig. 2 Schematic diagram for sampling impact test specimens of experimental steel

2 试验结果与讨论

2.1 试验钢中析出相分析

借助 HRTEM 对六组试验钢的碳复型样品进行观察分析, 在 10 000 倍下随即选取 20 个分析面积均为 3.26 μm² 的视场, 纳米尺度析出相的数量和尺寸分布统计结果如图 3 所示, 析出相的平均直径如表 2 所示。

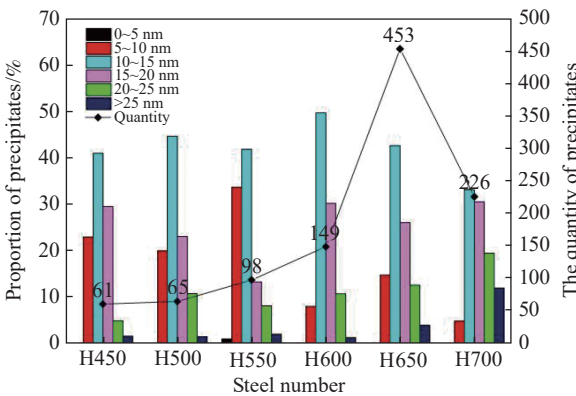


图 3 试验钢中析出相数量与尺寸统计
Fig. 3 Statistics of the number and size of precipitates in experimental steels

由图 3 可知, 随着回火温度由 450 ℃ 升高至 650 ℃, 试验钢中纳米尺度析出相的数量逐渐增加, 且回火温度越高, 析出相数量增幅越大。当回火温度提高到 700 ℃ 时, 纳米尺度析出相数量反而骤降。试验钢中析出相尺寸集中分布在 20 nm 以下, 尺寸在 20 nm 以上的, 数量百分比随轧后回火温度的升

高而逐渐增大;当回火温度为 700 ℃ 时, 20 nm 以上析出相数量百分比已超过了 30%。

从表 2 可以看出, 回火温度在 450 ~ 650 ℃ 范围内, 试验钢析出相平均直径随着轧后回火温度升高小幅增加, 而回火温度为 700 ℃ 的 H700 钢中析出相尺寸大幅增加。这是因为在回火过程中, 发生了 Ostwald 熟化过程, 与基体保持共格关系的细小纳米尺度析出相在界面能的驱动下长大粗化, 且在

相同的回火处理时间下, 析出相熟化速率会随着回火温度的升高而增大, 涨幅也逐步扩大^[21]。

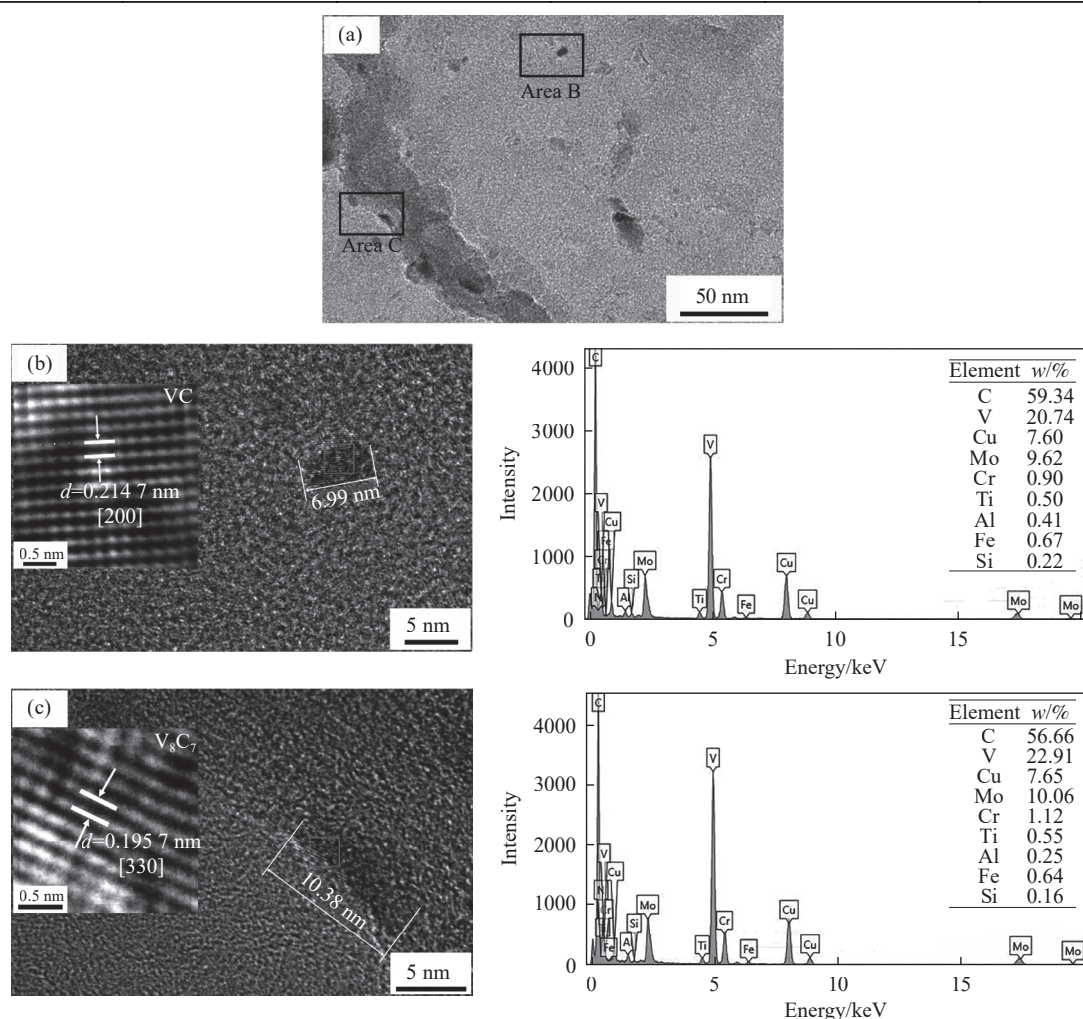
此外, 以 H650 试验钢为例, 通过带有能谱的 HRTEM 分析了钢中典型的纳米尺度析出相类型, 如图 4 所示。由于试验钢中含有 0.12% 较高比例的微合金化元素钒, 无论是晶界处还是在晶粒内部, 含钒 X80 管线钢中纳米尺度析出相多为含钒的 VC、V₈C₇ 等类型碳化物, 形状多为椭球状。

表 2 试验钢中析出相平均直径

Table 2 Average diameter of precipitates in experimental steels

nm

H450	H500	H550	H600	H650	H700
13.76 ± 4.21	13.89 ± 4.33	14.08 ± 5.02	14.83 ± 4.00	14.96 ± 4.91	17.53 ± 5.39



(a)低倍下析出相形貌; (b)图 4(a)中区域 B 高分辨图及能谱结果; (c)图 4(a)中区域 C 高分辨图及能谱结果

图 4 H650 钢中典型纳米尺度析出相

Fig. 4 Typical nano-size precipitates in H650 steel

2.2 试验钢显微组织分析

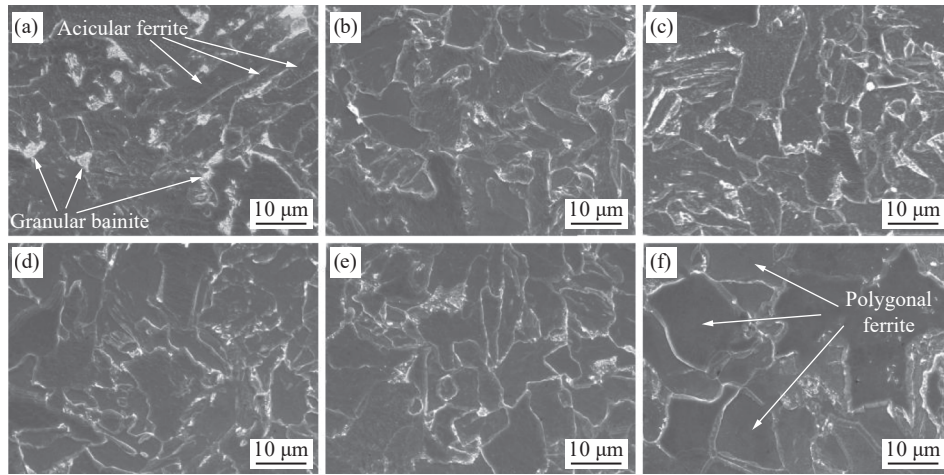
六组试验钢在扫描电镜下的显微组织如图 5 所示。H450 钢主要由一定数量针状、多边形铁素体和大量粒状贝氏体组成, 随着回火温度提高, 钢中多边形铁素体数量增加, 针状铁素体和粒状贝氏体的

数量减少、尺寸缩小。回火温度上升至 700 ℃ 时, 多边形铁素体尺寸显著增大, 针状铁素体和粒状贝氏体组织几乎消失, 在晶界和晶内可以观察到一定量的第二相颗粒。

回火温度升高会使得回火前钢中贝氏体内的

碳原子扩散进入基体, 促使贝氏体减少。同时, 碳原子会与钢中的铌、钒、钛等微合金元素形成纳米级别碳化物, 起到钉扎晶界和沉淀强化的作用。

当回火温度达到 700 °C 时, 钢中析出相尺寸明显增大, 钉扎晶界作用减弱, 多边形铁素体晶粒显著增大。



(a) H450; (b) H500; (c) H550; (d) H600; (e) H650; (f) H700

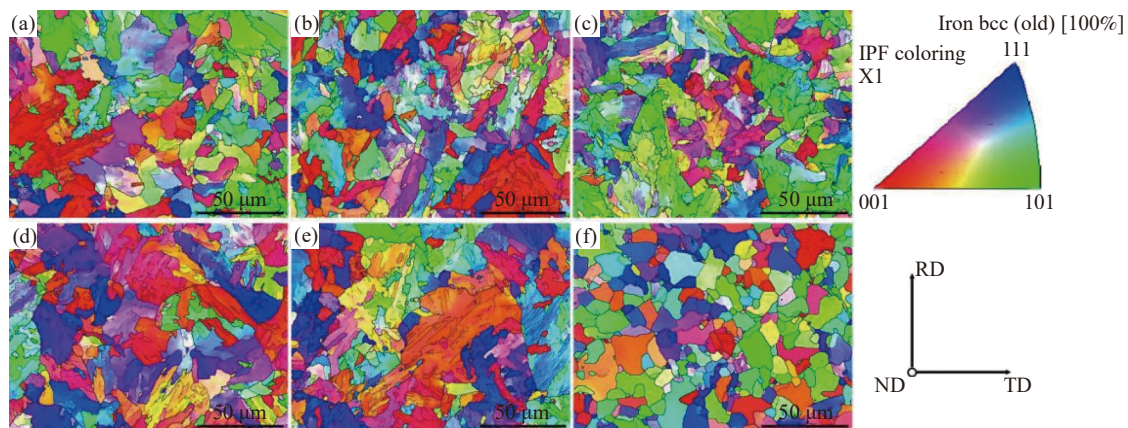
图 5 试验钢在不同回火温度下回火后的显微组织

Fig. 5 Microstructure of experimental steels after tempering at different temperatures

2.3 试验钢晶界类型与晶体学特征分析

图 6 为经 EBSD 分析得到的各试验钢垂直于法向方向平面上的晶粒取向。由图 6 可知, H450、H500、H550、H600、H650 主要组织组成为细小的等轴状晶粒+针状/板条状铁素体, 且随着回火温度的升高, 晶粒尺寸和分布变化较小; 当回火温度进一步达到 700 °C 时, H700 主要由等轴晶粒组成, 且晶粒尺寸更大, 针状/板条状结构基本消失, 这与 2.2 部分利用扫描电镜观察显微组织结果类似。从晶粒取向角度分析, 对于 X80 管线钢这类以体心立方结构

α -Fe 铁素体为主的低合金高强钢而言, $\{100\}$ 晶面正向结合强度最低, 解理裂纹最易沿此晶面快速扩展, $\{110\}$ 晶面最易于发生滑移, 当应力高于材料屈服强度, 裂纹会优先沿此面扩展, 引起断裂失效, 而 $\{111\}$ 晶面对于阻碍裂纹扩展作用最大^[21, 27-29]。图 6 各试验钢晶粒取向图中蓝色区域代表 $[111]$ 取向晶粒, H450、H500、H550、H600、H650 和 H700 钢中该取向晶粒比例分别为 5.52%、11.5%、15.7%、14.5%、17.0% 和 14.3%, 整体呈现先升高后降低的变化趋势, 但变化幅度较小。



(a) H450; (b) H500; (c) H550; (d) H600; (e) H650; (f) H700

图 6 试验钢在不同回火温度下回火后的晶粒取向

Fig. 6 Grain orientation map of experimental steels after tempering at different temperatures

表 3 为由 EBSD 结果处理软件统计出的各试验钢大角度晶界比例。轧后回火温度升高, 钢中大角度晶界的比例呈先降后升的变化趋势, H650 钢中

大角度晶界比例最低为 15.35%; H700 钢大角度晶界比例最高达到了 65.68%, 这是由于在 700 °C 的较高温度回火, 热轧后钢板中的原始粒状贝氏体和

针状/板条状铁素体组织向块状多边形铁素体发生转变,且钢中纳米尺度析出相快速粗化,自身钉扎晶界和阻碍位错运动的能力大幅削减,晶粒长大,位错发生回复,大角度晶界比例大幅提升。基于对6组不同回火温度试验钢的EBSD结果,统计了相同检测区域内不同类别CSL(Coincidence Site Lattice)晶界类型($\Sigma 3$, $\Sigma 5$, $\Sigma 7$, $\Sigma 9$, $\Sigma 11$, $\Sigma 13a$, $\Sigma 13b$, $\Sigma 15$, $\Sigma 17a$, $\Sigma 17b$, $\Sigma 19a$, $\Sigma 19b$, $\Sigma 21a$, $\Sigma 21b$, $\Sigma 23$, $\Sigma 25a$, $\Sigma 25b$, $\Sigma 27a$, $\Sigma 27b$, $\Sigma 29a$, $\Sigma 29b$)所占比例,结果如图7所示。由结果可以看出,回火温度在450~600℃范围内

时,试验钢中 $\Sigma 3$ 晶界在检测区域内的绝对占比均处于2.4%~2.9%范围内,并小范围波动;回火温度为650℃的试验钢中 $\Sigma 3$ 晶界占比最低为1.36%,而回火温度最高的H700钢中 $\Sigma 3$ 晶界占比大幅提升至6.66%,表明高回火温度促进了特殊晶界的重构。

表3 试验钢中大角度晶界比例

Table 3 Proportion of high-angle grain boundaries in experimental steels %

H450	H500	H550	H600	H650	H700
29.39	21.7	21.53	20.62	15.35	65.68

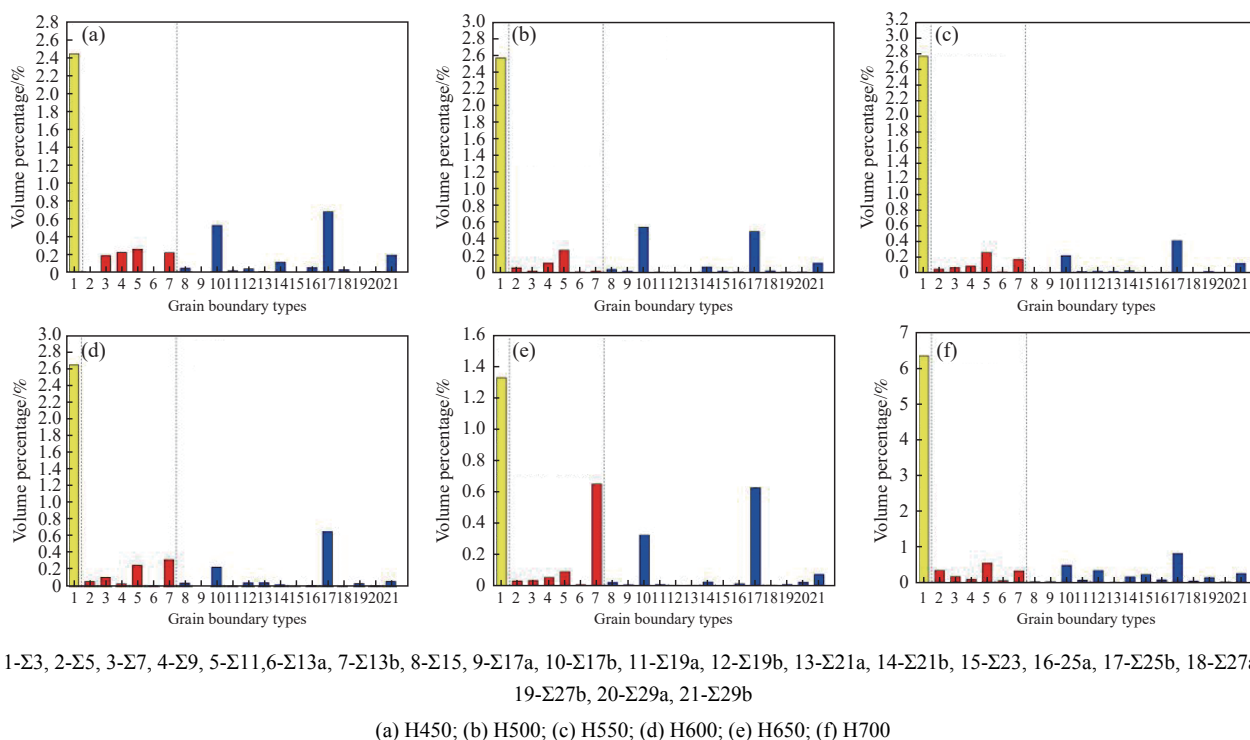


图7 试验钢在不同回火温度下回火后 CSL 晶界占比

Fig. 7 Distribution of CSL grain boundaries in the experimental steel after tempering at different temperatures

2.4 试验钢低温冲击性能分析

在-20℃条件下对六组试验钢试样进行夏比冲击试验,各试验钢的冲击吸收功结果如图8所示。轧后回火温度由450℃提高至650℃时,钢的低温冲击功从271.62 J逐步降低至182.28 J,当回火温度进一步提高至700℃时,钢的低温冲击功大幅增至307.28 J。六组试验钢中仅H600和H650钢冲击功低于200 J。各试验钢冲击断口的宏观形貌如图9所示,结合其左侧典型冲击断口形貌示意图可以看出,H450、H500、H700三组钢的冲击断口主要由纤维区和变形的剪切唇区所组成,而H550、H600、H650三组钢的冲击断口中出现了一定比例解理断裂的放射区,且放射区的面积比例随着回火温度升高而逐渐增大,而韧性降低。

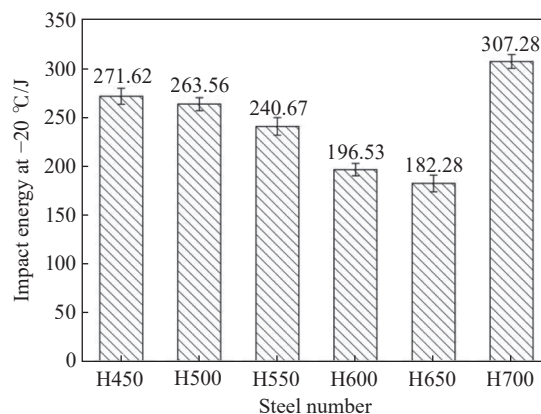
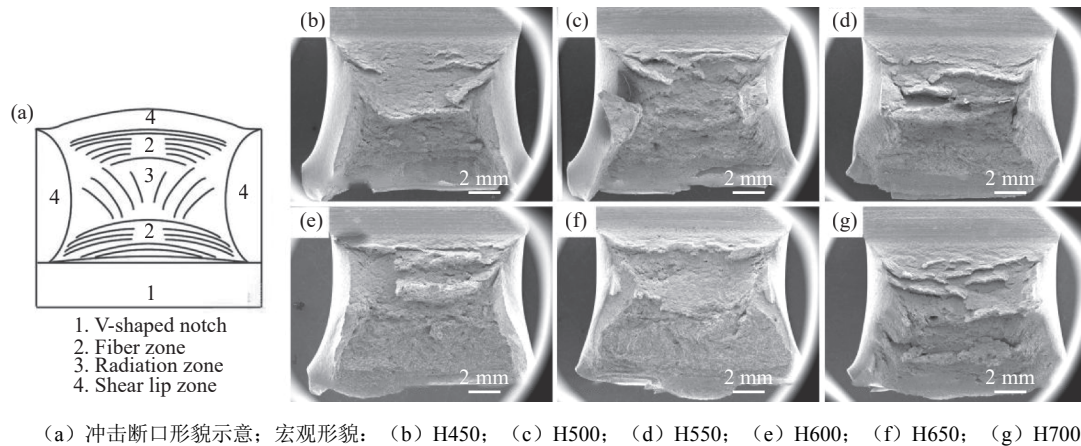


图8 不同回火温度下回火后在-20℃下的冲击功

Fig. 8 Impact energy at -20°C after tempering at different temperatures

各试验钢冲击断口纤维区和放射区的微观形貌如图10所示。可以看出,随着轧后回火温度逐渐升高,钢的冲击断口纤维区韧窝平均尺寸先降低后增高,H600和H650钢纤维断口中,在大尺寸韧窝和小尺寸韧窝之间出现了一定数量的由细密韧窝组成的撕裂棱,表明材料的韧性降低。然而,当回火温度升高至700℃时,H700钢冲击断口均由较大尺寸的韧窝组成,韧性特征显著。从H550、H600、H650

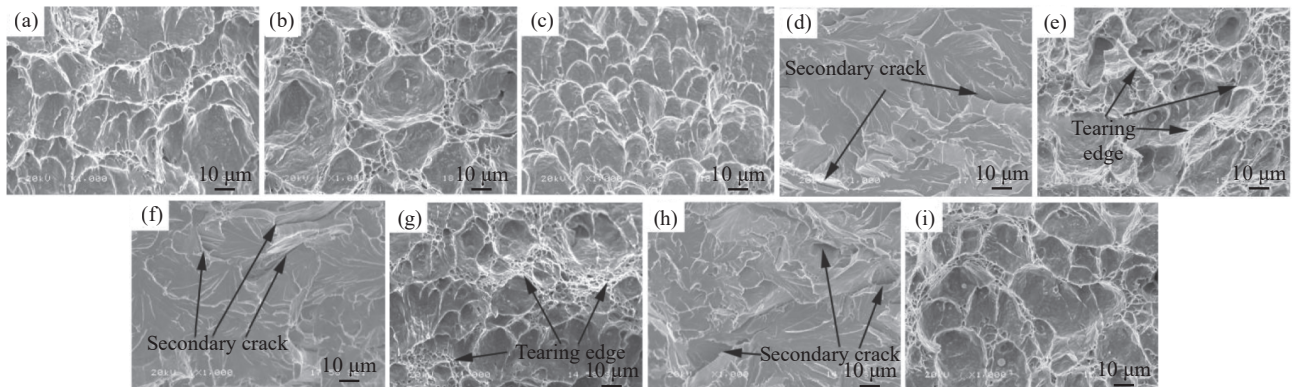
三组钢冲击断口的放射区微观形貌看,均存在垂直于断面的二次裂纹,且随着回火温度的升高,二次裂纹的数量略有增加,但单个裂纹长度缩短。冲击断口放射区的二次裂纹通常可以吸收一定量的冲击功,阻止主裂纹的快速扩展,起到一定程度的止裂作用,即二次裂纹越深越长,冲击功相对更高,韧性更佳。此外,从放射区的河流状花样看,H550、H600、H650三组钢相近。



(a) 冲击断口形貌示意; 宏观形貌: (b) H450; (c) H500; (d) H550; (e) H600; (f) H650; (g) H700

图9 不同回火温度下回火后冲击断口宏观形貌

Fig. 9 Macroscopic morphology of impact fracture surface of experimental steel after tempering at different temperatures



(a)H450 钢纤维区;(b)H500 钢纤维区;(c)H550 钢纤维区;(d)H550 钢放射区;(e)H600 钢纤维区;(f)H600 钢放射区;(g)H650 钢纤维区;(h)H650 钢放射区;(i)H700 钢纤维区

图10 不同回火温度下试验钢冲击断口微观形貌

Fig. 10 Microscopic morphology of impact fracture surfaces of experimental steels after tempering at different temperatures

综上可得,含钒X80管线钢随着轧后回火温度的升高,低温冲击韧性呈先降后升的变化趋势,当回火温度为650℃时韧性最差。结合前文2.1~2.3部分对试验钢显微结构的分析,回火温度条件的不同会造成材料纳米尺度析出相、显微组织类型、晶界和晶粒取向特征等差异,进而对钢的低温冲击性能产生影响。

首先,纳米尺度析出相会阻碍钢中位错的运动,当位错遇到尺寸小于某一临界值(该值与材料自身

属性有关,通常在5nm左右)的可变形析出相时,其会以切过的方式通过,阻力小;当位错遇到尺寸大于某一临界值的不可变形析出相时,其会以Orowan绕过机制通过,并在析出相颗粒周围留下位错环,且析出相尺寸越大,在其周围留下的位错环越密集,形成的局部应力越高,当该应力超过材料的解理强度时,就会在析出相界面或晶界处形核微裂纹^[30]。此外,纳米尺度析出相会导致钢中裂纹扩展的走向改变,当钢中纳米尺度析出相细小且分布均匀时,微裂

纹需要以穿晶或沿晶的方式频繁改变扩展路径,损失更多的能量,但当钢中纳米尺度析出相粗大或聚集分布时,微裂纹将沿着粗大析出相快速贯通,造成材料韧性的骤降。根据本文 2.1 部分析出相的分析结果,随着试验钢回火温度由 450 °C 升高至 650 °C,钢中纳米尺度析出相平均尺寸在 13.5 ~ 15.0 nm 范围内小幅增加且数量显著增多,H650 钢中单位面积纳米尺度析出相数量已达到 H450 钢的 7 倍以上,会使得钢中析出相周围易于产生微裂纹且裂纹更易快速扩展,导致低温韧性大幅下降,这正是导致 H650 钢冲击功低于 H450 钢冲击功近 1/3 的主要原因。同样地,从析出相尺寸、数量特征看,回火温度为 700 °C 使 H700 钢内部纳米尺度析出相平均尺寸更大,其低温韧性应更差,但材料的韧性还受显微组织、晶界类型等诸多因素综合影响。

其次,在钢的显微组织中,多边形铁素体自身硬度低于粒状贝氏体和针状/板条状铁素体,相对来讲是一种软相,具有较低的位错密度和较少的亚结构,对材料的冲击韧性有显著的改善作用,且其尺寸越大,对冲击功的吸收能力越强,故从显微组织类型分析,回火温度升高对材料低温冲击韧性具有较好的提升作用。特别地,当回火温度达到 700 °C 时,钢中多边形铁素体尺寸大幅增加,粒状贝氏体和针状/板条状铁素体消失。H700 钢在冲击载荷的作用下,应力集中的夹杂物或第二相粒子附近一旦形成微孔缺陷,其在粗大铁素体内部缺少足够阻挡,很容易迅速拉长、合并,因而在冲击断口的纤维区形成了如图 10(h) 所示的大量宽且深的韧窝。

此外,从晶界类型分析,大角度晶界具有更高的晶界能,对裂纹延伸和扩展起到很强的阻碍作用,会迫使裂纹发生偏转,增加裂纹扩展的路径,消耗和吸收更多的能量^[31-32]。针对表 3 中各组试验钢大角度晶界比例和在 -20 °C 下的冲击功结果做了二者之间的相关性分析,由试验结果可以总结出冲击功 A_{k2} 与大角度晶界比例 P_{HAGB} 之间的关系为 $A_{k2}=201.87P_{HAGB}+185.02$,线性相关性 R^2 为 0.621 3,相关程度属于中等,这主要与前述分析中当回火温度达到 700 °C 时,钢中较多大尺寸碳化物析出相对材料韧性恶化作用有关。此外,晶界结构对钢铁材料的韧性同样具有重要影响,特别是 $\Sigma 3$ 孪晶界,其两侧相邻点阵重合度高,既可以有效阻止裂纹扩展,又不容易引起杂质元素在晶界上偏聚,能够显著提升冲击韧性^[33-34]。综合表 3 和图 7 中各试验钢大角度晶界比例和 CSL 晶界占比分布结果可以判断,当回火温度由 650 °C 提高至 700 °C 时,钢中大角度

晶界比例和 $\Sigma 3$ 晶界占比均大幅增加,显著提升了材料的冲击韧性,而相比较之下,回火温度为 650 °C 的 H650 钢中晶界特征对其冲击韧性最为不利。对于回火温度相对较低的几组试验钢, $\Sigma 3$ 晶界占比差别较小,而回火温度为 450 °C 的 H450 钢大角度晶界比例相比其他试验钢高出近 1/3,对其自身冲击韧性提升具有重要贡献。

综合分析以上析出相尺寸和数量、显微组织以及大角度晶界比例和 CSL 晶界占比等对不同回火温度含钒 X80 管线钢低温冲击韧性的影响可知,回火温度在 450 ~ 650 °C 范围内时,试验钢的显微组织和晶界特征差异较小,低温冲击韧性主要受析出相的尺寸和数量特征主导,且析出相的数量影响更为显著,因而呈现出随着回火温度升高,试验钢冲击韧性下降的结果;当回火温度升至 700 °C 时,试验钢在高温回火工艺的作用下,析出相尺寸、显微组织、晶界结构等特征均发生较大变化,此时低温冲击韧性则由析出相粗化引发的韧性恶化与晶界结构优化带来的韧性提升共同决定,且大角度晶界比例($\geq 65\%$)和 $\Sigma 3$ 晶界占比($\geq 6.5\%$)的显著增加成为主导韧性提升的关键因素,抵消了析出相粗化带来的不利影响,使 H700 钢在 -20 °C 下具有最高的冲击功。然而,考虑到笔者团队前期在不同轧后回火对含钒 X80 管线钢抵抗氢致塑性损失性能的影响规律研究结果^[35],轧后回火温度为 550 ~ 580 °C,钢材的抗氢腐蚀及强韧性等综合性能最优。

3 结论

1) 含钒 X80 管线钢中纳米尺度析出相主要类型为 VC、 V_8C_7 等,且轧后的回火温度在 450 ~ 650 °C 范围内,回火温度越高则钢中纳米尺度析出相数量越多,当回火温度提高到 700 °C,钢中碳化物析出相的数量减少,但平均尺寸增大;

2) 随着轧后回火温度在 450 ~ 650 °C 范围内升高,钢中多边形铁素体增多,粒状贝氏体及针状/板条状铁素体的尺寸和数量降低,钢中大角度晶界占比减少,而回火温度提高到 700 °C,钢显微组织以粗大多边形铁素体为主,且大角度晶界和 $\Sigma 3$ 晶界占比大幅增高;

3) 含钒 X80 管线钢回火温度在 450 ~ 650 °C 范围内时,钢中析出相的尺寸和数量特征对低温冲击韧性起主导作用,回火温度达到 700 °C 时,晶界结构特征成为低温冲击韧性的主要影响因素,可抵消该工艺下析出相粗化的不利影响。

参考文献

- [1] 贾承造. 中国石油工业上游发展面临的挑战与未来科技攻关方向[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1445-1464.
Jia Chengzao. Development challenges and future scientific and technological researches in China's petroleum industry upstream[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1445-1464.
- [2] 程政, 缪成亮, 王章岭, 等. X80 管线钢边部裂纹成因分析与改进[J]. 中国冶金, 2019, 29(8): 76-79.
Cheng Zheng, Miao Chengliang, Wang Zhangling, et al. Formation analysis and improvement of edge cracks in X80 pipeline steel[J]. China Metallurgy, 2019, 29(8): 76-79.
- [3] 梁永图, 邱睿, 涂仁福, 等. 中国油气管网运行关键技术及展望[J]. 石油科学通报, 2024, 9(2): 213-223.
Liang Yongtu, Qiu Rui, Tu Renfu, et al. Key technologies and prospects for the operation of oil and gas pipeline networks in China[J]. Petroleum Science Bulletin, 2024, 9(2): 213-223.
- [4] 郑晓飞, 康永林, 孟德亮, 等. 终轧温度对 X80 抗大变形管线钢组织性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(5): 557-562.
Zheng Xiaofei, Kang Yonglin, Meng Deliang, et al. Effects of finish rolling temperature on the microstructure and mechanical properties of X80 high deformability pipeline steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(5): 557-562.
- [5] 任振渔, 宋波, 许国方, 等. 铌析出物对 X80 管线钢抗氢致裂纹性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2025, 46(4): 166-173.
Ren Zhenyu, Song Bo, Xu Guofang, et al. Influence of niobium precipitates on the hydrogen-induced cracking resistance of X80 pipeline steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2025, 46(4): 166-173.
- [6] 宿成, 袁晓鸣, 曹妍, 等. 控轧控冷工艺对厚规格 X80M 热轧钢带 DWTT 性能的影响[J]. 钢铁, 2024, 59(11): 122-130.
Su Cheng, Yuan Xiaoming, Cao Yan, et al. Effects of TMCP on DWTT property of thick X80M hot rolled steel strip[J]. Iron and Steel, 2024, 59(11): 122-130.
- [7] 徐景涛. X80 管线钢在长输管道中的应用及展望[J]. 中国冶金, 2016, 26(8): 1-7.
Xu Jingtao. Application and prospect of X80 steel in long-distance pipeline[J]. China Metallurgy, 2016, 26(8): 1-7.
- [8] 刘阳, 刘峻峰, 张斌, 等. 我国长输天然气用管线钢的发展现状与趋势[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(3): 98-112.
Liu Yang, Liu Junfeng, Zhang Bin, et al. Development status and trend of pipeline steel for long-distance natural gas transportation in China[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45(3): 98-112.
- [9] 袁晓鸣, 苏记平, 任慧平, 等. 大口径厚规格 X80 管线用钢板热轧工艺研究[J]. 宽厚板, 2024, 30(3): 11-15, 35.
Yuan Xiaoming, Su Jiping, Ren Huiping, et al. Study on hot rolling process of steel plate for X80 grade pipeline with large diameter and thick wall specification[J]. Wide and Heavy Plate, 2024, 30(3): 11-15, 35.
- [10] 段贺, 单以银, 杨柯, 等. X80 低温用高强度管线钢的工艺与组织性能试验[J]. 钢铁, 2020, 55(2): 103-111, 138.
Duan He, Shan Yiyin, Yang Ke, et al. Experimental on process, microstructure and mechanical properties of X80 high strength pipeline steel for low temperature[J]. Iron and Steel, 2020, 55(2): 103-111, 138.
- [11] 李龙飞, 张阳, 林腾昌, 等. 含钒 X80 级管线钢奥氏体晶粒长大行为[J]. 钢铁, 2022, 57(3): 115-123.
Li Longfei, Zhang Yang, Lin Tengchang, et al. Austenite grain growth behavior of X80 pipeline steel containing vanadium[J]. Iron and Steel, 2022, 57(3): 115-123.
- [12] 牛延龙, 刘清友, 贾书君, 等. 控冷工艺下组织及 M/A 岛对管线钢韧性的影响[J]. 钢铁, 2020, 55(6): 91-100.
Niu Yanlong, Liu Qingyou, Jia Shujun, et al. Influence of microstructure and M/A island evolution on toughness of pipeline steel under controlled cooling process[J]. Iron and Steel, 2020, 55(6): 91-100.
- [13] 周民, 杜林秀, 衣海龙, 等. X80 管线钢落锤撕裂性能的影响因素分析[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(09): 33-36, 55.
Zhou Min, Du Linxiu, Yi Hailong, et al. Factors affecting DWTT Property of X80 pipeline steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009, 21(09): 33-36, 55.
- [14] 刘清友, 贾书君, 任毅. 高钢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.
Liu Qingyou, Jia Shujun, Ren Yi. Research on controlled technology of low temperature fracture toughness on high-grade thick-wall pipeline steels[J]. Welded Pipe and Tube, 2019, 41(07): 39-47, 54.
- [15] 洪良, 左秀荣, 姬颖伦, 等. 厚规格 X80 管线钢低温断裂行为研究[J]. 材料研究学报, 2018, 32(1): 33-41.
Hong Liang, Zuo Xiurong, Ji Yinglun, et al. Fracture behavior of thick X80 pipeline steel plates at -25 °C[J]. Chinese journal of materials research, 2018, 32(1): 33-41.
- [16] 袁晓鸣. 稀土元素 Ce 对 X80 管线钢 DWTT 性能影响研究[J]. 包钢科技, 2024, 50(4): 67-71.
Yuan Xiaoming. Study on effects of rare earth element Ce on DWTT(Drop Weight Tear Test) properties of X80 pipeline steel[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2024, 50(4): 67-71.
- [17] 何小东, 杨耀彬, 陈越峰, 等. 不同 Nb 含量 X80 钢管环焊热影响区的微观组织与韧性[J]. 焊接学报, 2024, 45(3): 75-81.

- He Xiaodong, Yang Yaobin, Chen Yuefeng, et al. Microstructure and toughness of heat-affected zone in girth welding of X80 steel pipe with different Nb content[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(3): 75-81.
- [18] 侯宇. 合金元素对 X80 管线钢环焊接头组织和性能的影响[J]. 冶金分析, 2023, 43(4): 24-33.
Hou Yu. Effect of alloying element on microstructure and properties of girth welded joints of X80 pipeline steel[J]. Metallurgical Analysis, 2023, 43(4): 24-33.
- [19] 夏瑶, 袁昊, 杨泽坤, 等. 喷雾冷却强度对 X80 管线钢多丝埋弧接头组织与性能的影响[J/OL]. 焊接. <https://link.cnki.net/urlid/23.1174.TG.20250512.1235.002>.
Xia Yao, Yuan Hao, Yang Zekun, et al. Effect of spray cooling intensity on microstructure and mechanical properties of X80 pipeline steel multi-wire submerged arc welded joints[J/OL] Welding & Joining. <https://link.cnki.net/urlid/23.1174.TG.20250512.1235.002>.
- [20] 袁良增, 姜金星, 赵雨洋, 等. 加热温度对 X80 管线钢显微组织和低温韧性的影响[J]. 上海金属, 2023, 45(4): 77-83.
Yuan Liangzeng, Jiang Jinxing, Zhao Liyang, et al. Effect of heating temperature on microstructure and low-temperature toughness of X80 pipeline steel[J]. Shanghai Metals, 2023, 45(4): 77-83.
- [21] Yang Xiaoli, Xu Yunbo, Tan Xiaodong, et al. Influences of crystallography and delamination on anisotropy of Charpy impact toughness in API X100 pipeline steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 607: 53-62.
- [22] 刘干, 王进臣, 杨博, 等. TMCP 工艺对厚规格 X80M 管线钢低温韧性的影响[J]. 中国冶金, 2025, 35(9): 81-89.
Liu Gan, Wang Jinchun, Yang Bo, et al. Effects of TMCP process on low-temperature toughness of thick-gauge X80M pipeline steel[J]. China Metallurgy, 2025, 35(9): 81-89.
- [23] 赵强强, 刘文月, 赵宁, 等. 回火温度对 1000MPa 级高强高韧钢显微组织和力学性能的影响[J]. 上海金属, 2023, 45(2): 11-19.
Zhao Qiangqiang, Liu Wenyue, Zhao Ning, et al. Effect of tempering temperatures on microstructure and mechanical properties of 1000 MPa grade High-strength high-ductility steel[J]. Shanghai Metals, 2023, 45(2): 11-19.
- [24] 麻亚鑫, 贾潇, 杨宇龙, 等. 回火温度对 500MPa 级海工钢组织性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(12): 1465-1475.
Ma Yaxin, Jia Xiao, Yang Yulong, et al. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of 500 MPa grade offshore engineering steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(12): 1465-1475.
- [25] Li Longfei, Song Bo, Cai Zhiyong Y, et al. Effect of vanadium content on hydrogen diffusion behaviors and hydrogen induced ductility loss of X80 pipeline steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 742: 712-721.
- [26] Cheng Wensen, Song Bo, Mao Jinghong, et al. Role of vanadium content in hydrogen diffusion behavior in X80 pipeline steel[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2023, 50(3): 257-265.
- [27] Venegas V, Caleyo F, Baudin T, et al. On the role of crystallographic texture in mitigating hydrogen-induced cracking in pipeline steels[J]. Corrosion Science, 2011, 53(12): 4204-4212.
- [28] Masoumi M, Echeverri E A A, Silva C C, et al. Effect of different thermomechanical processes on the microstructure, texture, and mechanical properties of API 5L X70 steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(4): 1694-1705.
- [29] Mohtadi-Bonab M A, Szpunar J A, Razavi-Tousi S S. Hydrogen induced cracking susceptibility in different layers of a hot rolled X70 pipeline steel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(31): 13831-13841.
- [30] 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
Yong Qilong. Secondary Phases in Steels[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [31] Yan Peng, Liu Zhengdong, Bao Hansheng, et al. Effect of tempering temperature on the toughness of 9Cr-3W-3Co martensitic heat resistant steel[J]. Materials & Design, 2014, 54: 874-879.
- [32] 余宏伟, 董中波, 吴开明, 等. 终轧温度对高性能桥梁钢力学性能及组织的影响[J]. 钢铁研究学报, 2023, 35(7): 861-872.
Yu Hongwei, Dong Zhongbo, Wu Kaiming, et al. Effects of finish rolling temperature on mechanical property and microstructure in a high performance bridge steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2023, 35(7): 861-872.
- [33] 唐超, 马鑫凯, 孟范超, 等. 晶界特性对 GH4151 合金冲击性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2025, 35(12): 4129-4148.
Tang Chao, Ma Xinkai, Meng Fanchao, et al. Effect of grain boundary characteristics on impact toughness of GH4151 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2025, 35(12): 4129-4148.
- [34] 高尚, 崔宇晗, 陈贤森, 等. 晶界显微组织特征对无间隙原子钢韧脆转变温度的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(24): 252-256.
Gao Shang, Cui Yuhao, Chen Xianmiao, et al. Effect of microstructure characteristics in grain boundaries on ductile-to-brittle transition temperature of interstitial-free steel[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(24): 252-256.
- [35] Li Longfei, Song Bo, Yang Biwen, et al. Effect of tempering temperature after thermo-mechanical control process on microstructure characteristics and hydrogen-induced ductility loss in high-vanadium X80 pipeline steel[J]. Materials, 2020, 13: 2839.