加热制度对 X80 管线钢原始奥氏体晶粒影响研究

孙俊兰[1], 崔成波[2], 祁 祯[2]

(1. 包头钢铁职业技术学院, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章以 X80 管线钢为研究对象, 开展不同加热温度和保温时间对原始奥氏体晶粒尺寸影响研究。结果表明, 不同加热温度保温 1 h 的 X80 管线钢的原始奥氏体晶粒尺寸随加热温度的升高而逐渐增大; 在 1 180 ℃均热条件下, 保温初期, 在高晶界驱动力的作用下, 奥氏体晶粒迅速粗化, 平均尺寸在 1 h 内由 15 μm 快速长大至50 μm, 表现出对时间的高度敏感性。

关键词: 加热温度; X80 管线钢; 原始奥氏体晶粒
中图分类号: TG142 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009 - 5438(2026)01 - 0060 - 05

Study on Effects of Reheating Schedule on Original Austenite Grain of X80 Pipeline Steel

Sun Junlan[1], *Cui Chengbo*[2], *Qi Zhen*[2]

(1. *Baotou Iron and Steel Vocational Technical College*, *Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region*, *China*;
2. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co.*, *Ltd.*, *Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region*, *China*)

Abstract: In this paper, the effects of different heating temperatures and holding time on original austenite grain size are studied by taking X80 pipeline steel as the research object. The results showed that the original austenite grain size of X80 pipeline steel holding for 1 hour at different heating temperatures was gradually increased with the increase of heating temperature; the austenite grain was coarsened rapidly with the effect of driving force of high grain boundary at initial stage of holding under the soaking condition of 1 180 ℃ as well as the average size was increased from 15 μm to 50 μm within 1 hour, which showed the high sensitivity to time.

Key words: heating temperature; X80 pipeline steel; original austenite grain

为了适应能源管道建设工程的需要, 在强度指标满足相关标准要求的基础上, 开展提高 X80 管线钢的冲击韧性、断裂韧性、焊接匹配性能等研究工作迫在眉睫[1-2]。

通过添加 Nb、Ti 等微合金元素, 以及加热和轧制过程的参数设计控制组织转变, X80 管线钢理想

收稿日期: 2025 - 03 - 01

作者简介: 孙俊兰(1971 -), 女, 内蒙古包头市人, 硕士, 高级讲师, 现从事金属材料、机械设备、机械制造及自动化方向科研与教学工作。

的显微组织为贝氏体,从而使 X80 级别管线钢获得较高强度和较高韧性[3]。管线钢原始奥氏体晶粒尺寸的控制对成品性能有重大作用。X80 管线钢的生产过程中,铸坯的均热温度和保温时间直接影响着钢的原始奥氏体晶粒尺寸和显微组织均匀化程度以及 Nb、Ti 等微合金元素的固溶量。由于合金元素的扩散速度较慢[4-6],合金钢热处理设定的加热温度一般较高,保温时间也相对较长[7]。

为精准控制厚规格 X80 管线钢的生产,包钢基于 2 250 mm 热连轧生产线,通过优化成分体系与加热制度确保 Nb、Ti 等微合金元素充分固溶,旨在获得均匀细小的原始奥氏体晶粒,为形成均匀的再结晶奥氏体组织奠定基础。因此,深入研究加热制度对原始奥氏体晶粒的影响,确定最佳的均热温度与保温时间,对保障钢材的综合力学性能具有重要意义。

1　试验材料与试验方法

1.1　试验材料

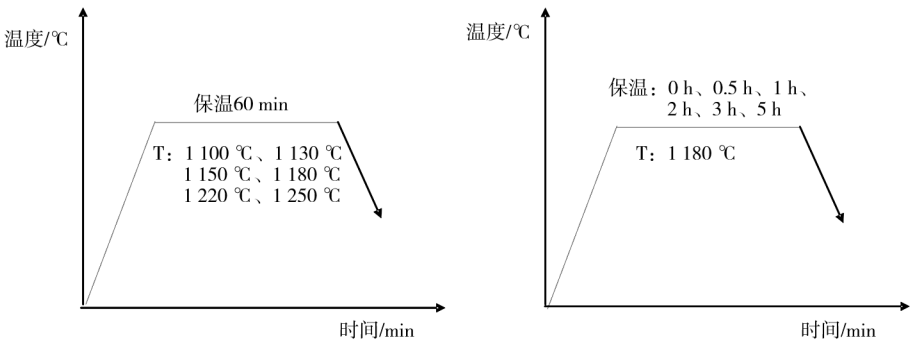
试验材料取自包钢 2 250 mm 热轧生产线生产的 X80 管线钢产品,其具体化学成分见表 1。

表 1　化学成分(质量分数)　%

编号	C	Si	Mn	P	S	Al_t	Nb	Ti	Mo	Cr	Ni	Cu
标准	≤0.07	≤0.30	≤1.80	≤0.015	≤0.005	≤0.06	≤0.080	≤0.025	≤0.25	≤0.30	≤0.30	≤0.30
1#试验钢	0.054	0.19	1.70	0.011	0.001	0.033	0.020	0.012	0.08	0.22	0.20	0.10
2#试验钢	0.052	0.20	1.72	0.010	0.001	0.034	0.021	0.016	0.06	0.22	0.20	0.10

1.2　试验方法

板坯加热制度直接影响到钢的初始奥氏体晶粒尺寸和微合金元素的固溶程度[8],制定合理的加热制度对研究含 Nb、Ti 微合金元素高钢级管线钢十分必要。制定 X80 管线钢加热工艺时主要考虑避免原始奥氏体晶粒明显粗化和保证微合金元素充分溶解。本研究制定的加热工艺见图 1。



(a) 加热温度　　(b) 保温时间

图 1　加热工艺

试验在箱式电阻炉中进行。将加工好的试样置于炉膛恒温区,随炉升温至设定温度(1 100 ~ 1 250 ℃)。升温速率控制在 10 ℃/min,到达目标温度后,参照图 1 所示工艺规范进行保温(例如 1 100 ℃保温 60 min),确保试样温度均匀并完成组织奥氏体化。保温结束后,迅速取出试样并立即投入预先备好的水箱中(温度约 20 ℃)中进行淬火,以固定高温组织。

淬火后的试样经线切割取样,依次采用不同型号(240# 至 1000#)的金相砂纸进行打磨,然后抛光至镜面。使用加热至约 60 ℃的饱和苦味酸水溶液进行热蚀显示,腐蚀时间约 3 ~ 5 min。经清水冲洗、酒精漂洗并吹干后,在蔡司金相显微镜下观察并采集清晰的原始奥氏体晶界图像。最后对晶粒进行统计,测定奥氏体晶粒平均尺寸。

2 试验结果

2.1 加热温度对原始奥氏体晶粒的影响

图 2 为 1#试验钢不同温度加热 1 h 的奥氏体晶粒形貌,表明原始奥氏体晶粒尺寸随加热温度的升高而逐渐增大。当加热温度在 1 100 ℃时,由于温度较低,奥氏体化不充分,组织不均匀,随加热温度升高,奥氏体晶粒尺寸逐渐增大,组织变得更均匀;当加热温度超过 1 200 ℃时,有晶粒异常长大现象,出现粗大奥氏体晶粒。

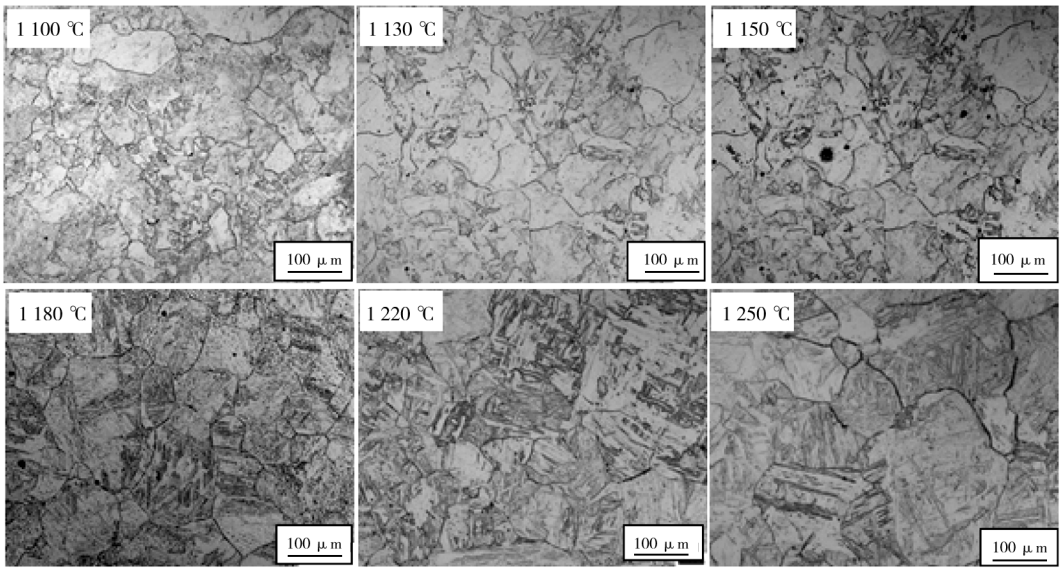


图 2 1#试验钢原始奥氏体晶粒

图 3 为 2#试验钢不同温度加热 1 h 的奥氏体晶粒形貌,可以看出 2#试验钢奥氏体晶粒长大趋势与 1#试验钢相似,只是 2#试验钢奥氏体晶粒普遍比 1#试验钢晶粒尺寸大,在较高温度下更为明显。在 1 180 ℃加热时,1#试验钢奥氏体平均晶粒尺寸为 68 μm,2#试验钢为 89 μm;在 1 220 ℃加热时,1#试验钢奥氏体平均晶粒尺寸为 83 μm,2#试验钢为 112 μm。

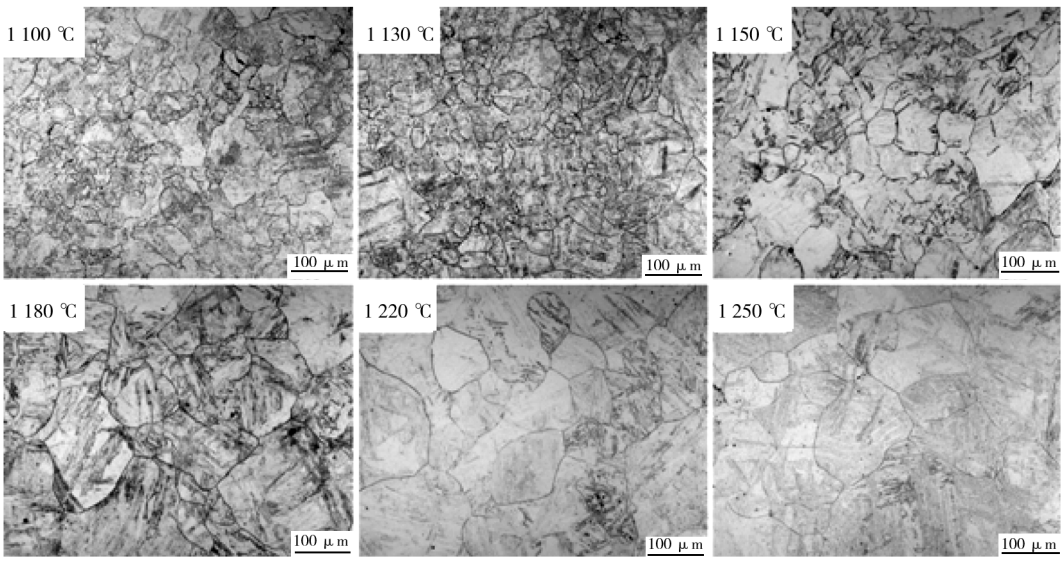


图 3 2#试验钢原始奥氏体晶粒

两个试验钢晶粒尺寸的差异性主要源于其化学成分的细微差别对“钉扎效应”的影响。晶粒的长大实则为晶界的迁移过程,而钢中 Nb、Ti 等微合金元素形成的碳氮化物析出相,能对晶界产生强烈的钉扎作用,有效阻碍其移动。2#试验钢的成分可能使其析出相的数量更少、尺寸更大或高温稳定性稍差,导致其对晶界的钉扎力(Zener 钉扎力)弱于 1#试验钢。尤其在 1 220 ℃高温下,2#试验钢中部分析出相可能发生粗化或溶解,使其钉扎作用进一步削弱,晶界迁移阻力显著下降,因而晶粒更容易发生粗化,尺寸差异也随之扩大。

图 4 为 1#、2#试验钢原始奥氏体晶粒尺寸随加热温度变化的规律。由图 4 可见,当加热温度在 1 150 ℃以下时,晶粒尺寸增长缓慢,随着加热温度的升高,原始奥氏体晶粒尺寸显著增大,且晶粒长大速率随之增大。当温度超过1 200 ℃后,晶粒出现异常长大现象,形成粗大且不均匀的混合晶粒组织。

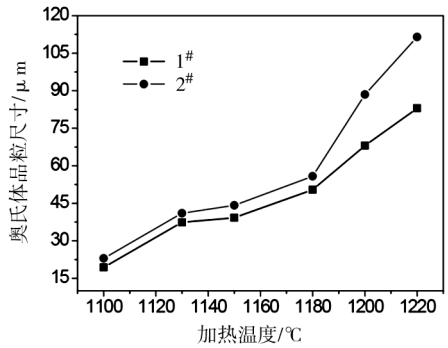


图 4　晶粒尺寸随加热温度变化曲线

2.2　保温时间对原始奥氏体晶粒的影响

图 5 为 1#试验钢加热到 1 180 ℃保温不同时间后的奥氏体晶粒尺寸。图 6 为 2#试验钢加热到 1 180 ℃保温不同时间后奥氏体晶粒尺寸。

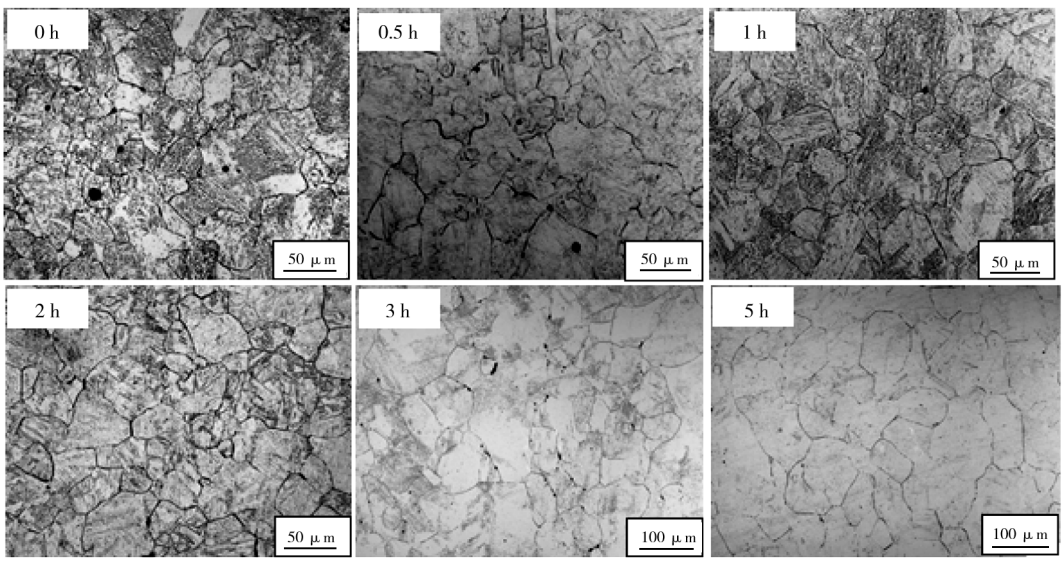


图 5　1#试验钢原始奥氏体晶粒

在 1 180 ℃加热条件下,奥氏体晶粒长大呈现出明显的阶段性规律。保温初期(1 h 内),晶粒尺寸由约 15 μm 急剧长大至 50 μm,尺寸变化迅速;超出 1 h 后,即使保温时间延长至 5 h,其平均尺寸也仅增加至约 60 μm。2#试验钢奥氏体晶粒长大规律与 1#试验钢相似。

从图 7 奥氏体晶粒尺寸随保温时间变化结果看出,加热初期奥氏体晶粒尺寸长大较快,两种化学成分的试验钢在 1 h 前原始奥氏体晶粒尺寸与保温时间的相关性较大,奥氏体晶粒尺寸变化明显;超出 1 h,奥氏体晶粒尺寸与保温时间的相关性较小,加热 5 h 的 1#、2#试验钢的平均晶粒尺寸分别为 60 μm、65 μm。

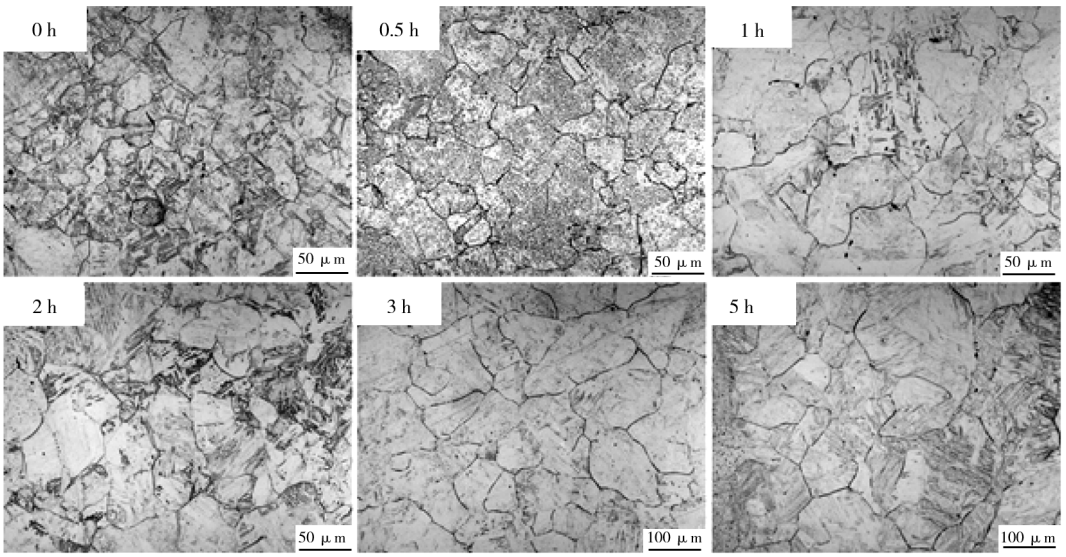


图6 2#试验钢原始奥氏体晶粒

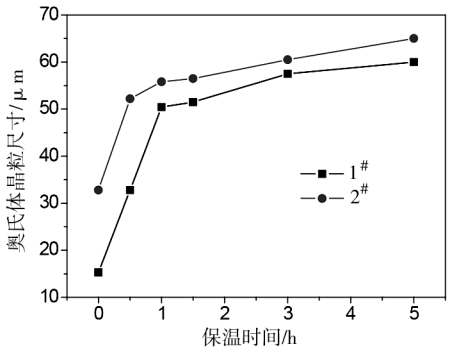


图7 奥氏体晶粒尺寸随保温时间变化曲线

奥氏体晶粒长大行为主要受晶界迁移驱动力和钉扎阻力的共同控制。在加热初期,系统极高的晶界能促使晶界迅速扫过,吞并小晶粒,导致晶粒快速粗化。同时,钢中微细的第二相粒子(如Nb、Ti的碳氮化物)对晶界具有显著的"钉扎效应"(Zener钉扎),有效阻碍其迁移。随着保温时间延长至1 h后,晶粒尺寸分布趋于稳定,晶界总面积的减小导致驱动力下降,晶粒长大因而减缓[9]。两个试验钢晶粒尺寸的微小差异根源在于其化学成分(如Nb、C含量)的细微不同,这直接影响第二相粒子的数量、尺寸和稳定性。1#试验钢可能含有更稳定或更多的纳米级析出物,从而提供了更强的钉扎力,使其最终晶粒尺寸略小于2#试验钢。本研究揭示了通过调控微合金元素与析出物,可有效控制X80管线钢在高温下的组织稳定性。

综合上述试验结果,加热制度对X80管线钢奥氏体晶粒尺寸的影响具有重要的科学与实践意义。研究揭示了1 180 ℃下奥氏体晶粒尺寸随保温时间演变的规律,这为制定合理的热加工工艺提供了指导。在实际生产中,为控制晶粒尺寸、避免组织不均或晶粒粗化,将加热温度严格控制在1 100 ℃至1 200 ℃之间,且保温时间不宜过长。此研究对优化X80管线钢的热处理工艺、保证成品性能具有一定指导价值。

3 结论

(1)不同加热温度保温1 h的X80管线钢的原始奥氏体晶粒尺寸随加热温度的升高而逐渐增大。当加热温度在1 100 ℃时,奥氏体化不充分导致显微组织不均匀;当超过1 200 ℃时,有晶粒异常长大现象并出现粗大奥氏体晶粒。

(2)在1 180 ℃加热条件下,奥氏体晶粒尺寸与保温时间的相关性呈现出不同规律,保温1 h前,晶粒尺寸与保温时间的相关性较大,晶粒尺寸从15 μm迅速长大至50 μm;保温1 h后,晶粒尺寸与保温时间的相关性减弱,晶粒长大缓慢,保温5 h后的尺寸约为60 μm。

参 考 文 献

[1] 巩忠旺,赵志伟,陈跃华,等. 中俄东线工程用Φ1 422 mm X80钢级感应加热弯管研发[J]. 钢管,2020,49(3):25-29.

(下转第94页)

于单金属和双金属混合极板。中期阶段,单金属极板钝化加速,电压持续飙升;双金属混合极板槽电压增速放缓,反应60分钟后,电压为4.7 V,增幅为14.6%;双金属梯度极板槽电压平缓上升,60分钟仅为4.5 V,增幅为12.5%,钝化抑制持续性更强。后期阶段,单金属极板槽电压仍有高增幅,为61.9%;双金属混合极板槽电压增幅为31.7%;双金属梯度极板槽电压增幅为10%,增速进一步降低。双金属梯度极板稳定性最优,能长期保持低槽电压,减少电流损失。

综上所述,通过总结三项试验的结果得知,梯度工艺设计出的双金属阳极板在电絮凝极板反应中的除氟效率、抗钝化效果及材质稳定性方面,具有绝对优势,相比单金属及普通双金属极板更具使用价值。同时实现了在电絮凝技术中核心材料的升级与推广。

3 结束语

针对传统电絮凝除氟技术中单一金属极板及普通双金属极板存在的除氟效率有限、易钝化、使用寿命短等问题,采用双金属极板的梯度合金工艺设计,通过正交试验系统研究了铝铁双金属极板比例、工艺参数对除氟效率的影响,同时验证了其除氟效率强化效应与抑制钝化性能,为电絮凝核心材料的技术创新提供了试验与理论依据,为含氟工业废水治理提供高效、经济、可靠的技术方案,在水质净化领域具备优越的工程应用前景与推广价值。后续可进一步优化极板梯度结构参数,探究其在实际工业废水处理中的长期运行性能,为技术规模化应用提供更全面的支撑。

参 考 文 献

[1] 严群. 电絮凝处理电镀废水过程中聚苯胺对阳极缓蚀过程研究[D]. 无锡:江南大学,2023.

[2] 游松. 水泥基电絮凝极板的制备及其去除水体中重金属离子的研究[D]. 武汉:武汉纺织大学,2022.

[3] 黄雪琪,靖波. 电絮凝过程中倒极消除极板钝化[J]. 环境工程学报,2019,13(11):2661-2667.

(上接第64页)

[2] 袁良增,姜金星,赵丽洋,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):77-80.

[3] 董露,郝世英,张骁勇,等. 加热温度对X100热煨弯管钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报,2013,34(6):42-46

[4] 章传国,郑磊. 轧后加热温度对高NbX80管线钢板组织性能的影响[J]. 钢铁,2013,48(1):82-86.

[5] 刘迎来,池强,王鹏. 加热温度对X80弯管钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理. 2010,35(10):2-4.

[6] 田晨超,许飞,焦磊,等. 加热温度对X80钢级热煨弯管组织性能的影响[J]. 焊管,2014,37(6):11-16.

[7] 谭会杰,王海燕,李德超,等. X80管线钢连续冷却相变及组织研究[J]. 金属热处理. 2015,40(7):91-94.

[8] Xu W, XIAO F R, FU Y H, et al. Material development for grade X80 heavy-wall hot induction bends[J]. Material and Engineering A, 2011,530:539-547.

[9] 蒋昌林,林涛,诸建阳,等. 加热温度对X80钢级弯管用管线钢板冲击韧性的影响[J]. 宽厚板,2019,25(4):5-8.