研究与开发

热轧工艺对S355J2G4机车用钢组织性能的影响

佟欣儒[1,2],艾铖珅[3],王刚[3],孙继鸿[1,2],孙傲[1,2],刘志众[1,2]
(1.海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室,辽宁 鞍山 114009;2.鞍钢集团钢铁研究院,辽宁 鞍山 114009;3.鞍钢股份有限公司鲅鱼圈钢铁分公司,辽宁 营口 115007)

摘要: 将鞍钢ASP 2150产线生产的S355J2G4机车用钢作为研究对象,通过成分设计、控轧控冷实现S355J2G4机车用钢强度和韧性同步提高。利用EBSD等手段分析了组织演变的规律,揭示了组织和性能之间的关系。结果表明,精轧温度860 ℃,卷取温度由600 ℃降低至550 ℃,组织由铁素体和珠光体变成铁素体和贝氏体,屈服强度升高31 MPa,抗拉强度升高27 MPa,延伸率降低4.5%,-40 ℃低温冲击功降低96 J。卷取温度600 ℃,精轧温度由880 ℃降至860 ℃,组织均为铁素体和珠光体,屈服强度提升32 MPa,抗拉强度提升14 MPa,延伸率升高1.5%,-40 ℃低温冲击功提高18 J,实现强度和韧性同步提升。通过试验结果确定了S355J2G4机车用钢最佳生产工艺为精轧温度860 ℃,卷取温度600 ℃,为指导热轧带钢产品实际生产中涉及全流程工艺匹配提供可靠的数据支撑。

关键词: 热轧工艺;S355J2G4;组织性能
中图分类号: TG142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)05-0028-06
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613.2026.05.004

Effect of Hot Rolling Process on Microstructure and Properties of S355J2G4 Locomotive Steel

TONG Xinru[1,2], AI Chengshen[3], WANG Gang[3], SUN Jihong[1,2], SUN Ao[1,2], LIU Zhizhong[1,2]
(1. State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China; 3. Bayuquan Branch of Angang Steel Co., Ltd., Yingkou 115007, Liaoning, China)

Abstract: Taking S355J2G4 locomotive steel produced by Ansteel ASP 2150 production line as the research object, the strength and toughness of the S355J2G4 locomotive steel were simultaneously improved through compositon design, thermo-mechanical control process. The law of organizational evolution was analyzed by using EBSD and other methods, and the relationship between microstructure and properties was revealed. The results showed that the final rolling temperature was 860 ℃, and the coiling temperature was reduced from 600 ℃ to 550 ℃, the microstructure changed from ferrite and pearlite to ferrite and bainite. The yield strength was increased by 31 MPa, the tensile strength was increased by 27 MPa, the elongation was decreased by 4.5%, and the impact energy at -40 ℃ was decreased by 96 J. The coiling temperature was 600 ℃, and the final rolling temperature was reduced from 880 ℃ to 860 ℃ with the microstructure composed of ferrite and pearlite. The yield strength was increased by 32 MPa, and the tensile strength was increased by 14 MPa. The elongation was increased by 1.5%, and the impact energy at -40 ℃ was increased by 18 J, realizing synchronous

佟欣儒,硕士,工程师,2019年毕业于辽宁科技大学材料科学与工程。E-mail:969593225@qq.com

improvement of strength and toughness. The optimal production process for S355J2G4 was a final rolling temperature of 860 ℃ and a coiling temperature of 600 ℃, which provided reliable data support for the matching of the entire process involved in the actual production of hot-rolled strip steel products models in the field of metal materials.

Key words: hot-rolling process; S355J2G4; microstructure properties

铁路车辆用钢分为货车、客车和机车用钢，其中机车用钢以355 MPa级低合金高强度结构钢板为主，广泛用于铁路机车的制造及维修。近年来，随着铁路车辆对机车车身结构强度、韧性及产品需求厚度规格的要求日益提高，开发高强度、高厚度的铁路车辆用钢已经成为目前亟需解决的问题和难点。随着各大钢厂炼钢、连铸和轧制设备的能力提升以及工艺的持续改进，很多钢厂都在研究采用热连轧卷板代替中厚板的趋势日益明显[1]。在学术研究方面，许多学者通过大量实验室研究探索了工艺参数对产品性能的影响机制，通过降低终轧温度和卷取温度实现块状铁素体转变为针状铁素体，进而提升强度[2]，或通过提高终轧温度、前端冷却代替集中冷却实现增加高温时间促进晶粒形核长大进而改善横向组织均匀性[3]，通过热轧工艺调控组织来实现性能优化。然而，目前关于实际生产中涉及全流程工艺综合匹配对产品组织、性能影响的研究比较少。因此，探寻热轧工艺与产品质量之间的关系，对保证顺利生产、产品质量提升十分重要。本文以鞍钢ASP 2150产线[4]生产的厚度为16 mm的S355J2G4机车用钢为研究对象，利用组织观察分析、析出相形貌分析、力学性能检测，分析了精轧温度和卷取温度对机车用钢组织的影响，进一步探究了机车用钢组织与性能之间的关系，为开发高强度、高韧性的机车用钢提供了理论基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本文使用鞍钢ASP 2150产线生产的16 mm厚的S355J2G4机车用钢，S355J2G4钢的化学成分(质量分数)如表1所示。

表1 S355J2G4钢的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical Composition of the S355J2G4 Steel (Mass Fraction) %

C	Si	Mn	P	S	Nb	Fe
0.156	0.188	1.279	0.016	0.004	0.01~0.03	Bal.

1.2 试验方法

连铸坯经1架粗轧机和7架精轧机热轧，S355J2G4钢热轧工艺参数如表2所示。连铸板坯出炉目标温度控制为1 200 ℃，板坯出加热炉后经过粗轧、精轧、层流冷却、卷取处理。其中轧制过程采用三种不同工艺完成轧制：粗轧温度均设为(1 020 ± 20) ℃，1号精轧温度(FDT)为880 ℃，卷取温度(CT)600 ℃；2号精轧温度860 ℃，卷取温度600 ℃；3号精轧温度860 ℃，卷取温度550 ℃。

表2 S355J2G4热轧工艺参数
Table 2 Hot Rolling Process Parameters of S355J2G4 Steel

编号	出炉温度/℃	粗轧温度/℃	精轧温度/℃	卷取温度/℃
1	1 208	1 023	880	600
2	1 206	1 021	860	600
3	1 207	1 021	860	550

在成品钢卷距卷尾6 m位置取样，在钢卷板宽1/4位置取横向拉伸试样和金相试样，取样位置示意图如图1所示。

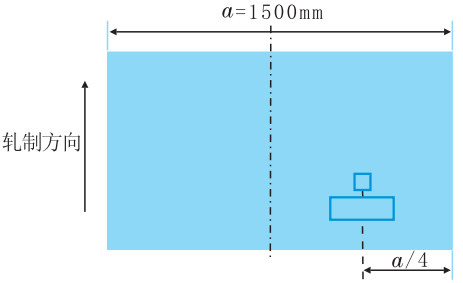


图1 取样位置示意图
Fig. 1 Schematic Diagram of Sampling Location

按标准GB/T 2975—2018执行，使用Zwick Z600拉伸试验机上进行室温拉伸测试；将金相试样制样、研磨、抛光，并在4% 硝酸酒精溶液腐蚀15 s，使用光学显微镜和ZEISS SPURA55扫描电镜观察组织形貌特征。使用碳覆膜方法进行萃取复型，在TecnaiG2 20透射电镜下观察析出相形貌特点。

2 试验结果与讨论

2.1 不同热轧工艺对性能的影响

不同热轧工艺下S355J2G4的力学性能如图2所示，由图2可以看出，3种工艺下成品卷性能均满足屈服强度不低于355 MPa，抗拉强度不低于490 MPa，延伸率不低于20%，-40 ℃低温冲击功不低于20 J的要求。当卷取温度相同，精轧温度由880 ℃降至860 ℃时，屈服强度提升32 MPa，抗拉强度提升14 MPa，延伸率升高1.5%，-40 ℃低温冲击功高出18 J。而当精轧温度相同，卷取温度由860 ℃降至550 ℃时，屈服强度升高31 MPa，抗拉强度升高27 MPa，延伸率降低4.5%，-40 ℃低温冲击功降低96 J。

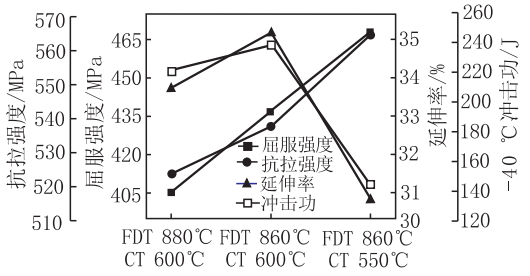


图2 不同热轧工艺下S355J2G4的力学性能

Fig. 2 Mechanical Properties of the S355J2G4 in Different Hot Rolling Process

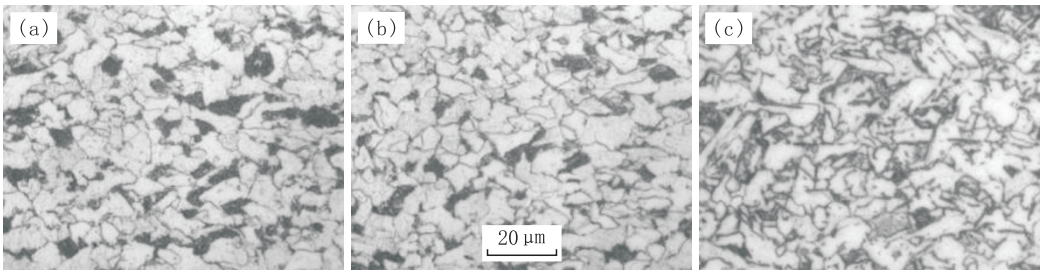
2.2 不同热轧工艺对组织的影响

2.2.1 金相组织分析

研究精轧温度和卷取温度对S355J2G4钢中组织的影响。不同精轧温度和卷取温度下S355J2G4钢的显微组织如图3所示，卷取温度为600 ℃，精轧温度为880 ℃时，钢中组织为多边形铁素体和珠光体，尺寸不均匀，位错密度低，这是因为较高温度下，位错的增值与位错攀移、动态再结晶达到平衡，导致位错密度维持在较低水平；卷取温度为600 ℃，精轧温度为860 ℃时，钢中组织为多边形铁素体和珠光体，晶粒边界不清晰，晶粒尺寸较精轧温度880 ℃小，这是由于温度降低，点缺陷迁移率降低，与位错的相互作用增强，进一步钉扎位错，抑制其动态回复，发生细晶强化，同时在晶粒内形成亚结构，轧后的冷却过程中，细小的多边形铁素体晶粒不再长大，晶界数量增加，位错在晶界处塞积密度提高，亚结构中位错密度大，增加位错滑移阻力，导致强度提高；精轧温度为860 ℃，卷取温度为550 ℃时，钢中组织为铁素体和贝氏体，位错密度高，这是由于轧制过程中过冷度较大，形成先共析相铁素体后未发生珠光体转变，而直接发生贝氏体转变。这解释了力学性能中，3号试样较2号试样强度高，延伸率低的现象[5]。相比于珠光体，贝氏体转变温度低，拥有更高强度，但是塑性降低，这是由于贝氏体铁素体位错的位置上碳原子堆积，影响了组织的位错密度[6]，高密度位错阻碍后续位错运动，显著提高流变应力，同时贝氏体转变中，碳原子过饱和固溶于铁素体中，增加晶格畸变阻力，导致该组织强度增强[7]，但是高密度位错难以发生滑移或攀移，导致塑性降低。因此为保证S355J2G4塑性性能，生产中卷取温度设定为600 ℃。

2.2.2 显微组织分析

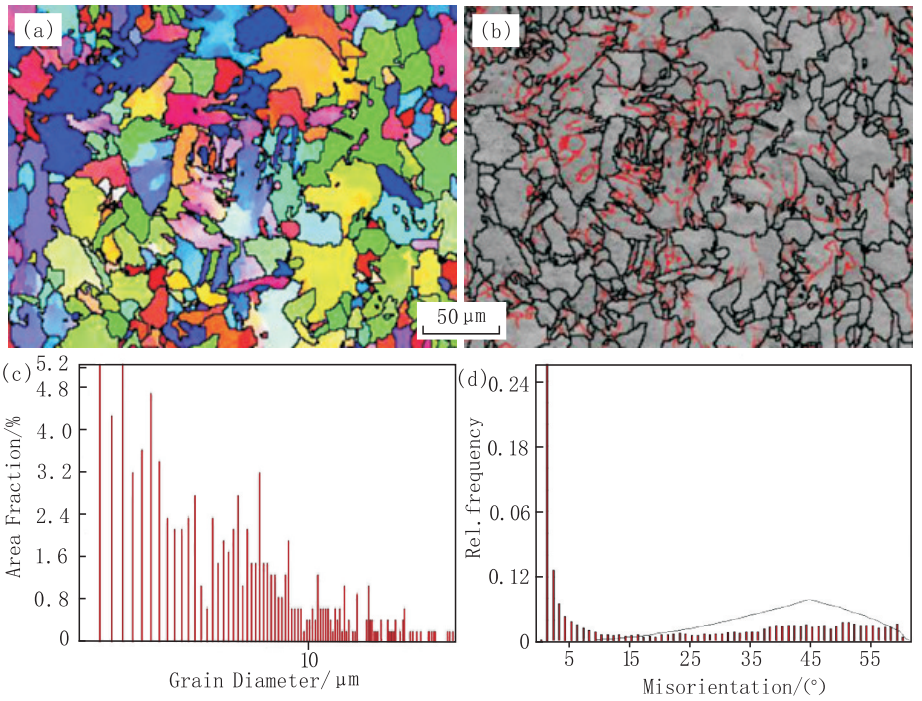
S355J2G4钢在精轧温度880 ℃，卷取温600 ℃下的EBSD结果和S355J2G4在精轧温度860 ℃，卷取温度600 ℃下的EBSD结果分别如图4和图5所示。



(a) FDT 880 ℃, CT 600 ℃; (b) FDT 860 ℃, CT 600 ℃; (c) FDT 860 ℃, CT 550 ℃

图3 不同精轧温度和卷取温度下S355J2G4钢的显微组织

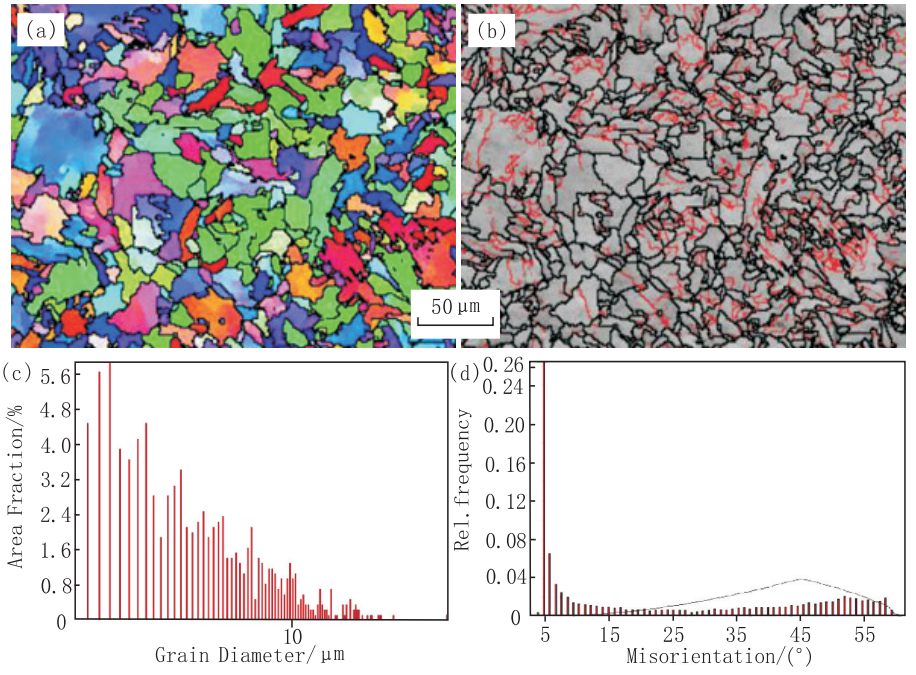
Fig. 3 Microstructure of S355J2G4 at Different FDT and CT



(a) 晶粒取向图；(b) 晶界分布图(黑线为大角度$\theta \geqslant 10^{\circ}$晶界，红线为小角度$2^{\circ} \leqslant \theta \leqslant 10^{\circ}$晶界)；
(c) 晶粒尺寸分布；(d) 晶粒取向角分布

图4 S355J2G4在精轧温度880 ℃，卷取温度600 ℃下的EBSD结果

Fig. 4 EBSD Results of the S355J2G4 Steel at the FDT of 880 ℃ and the CT of 600 ℃



(a) 晶粒取向图；(b) 晶界分布图(黑线为大角度$\theta \geqslant 10^{\circ}$晶界，红线为小角度$2^{\circ} \leqslant \theta \leqslant 10^{\circ}$晶界)；
(c) 晶粒尺寸分布；(d) 晶粒取向角分布

图5 S355J2G4在精轧温度860 ℃，卷取温度600 ℃下的EBSD结果

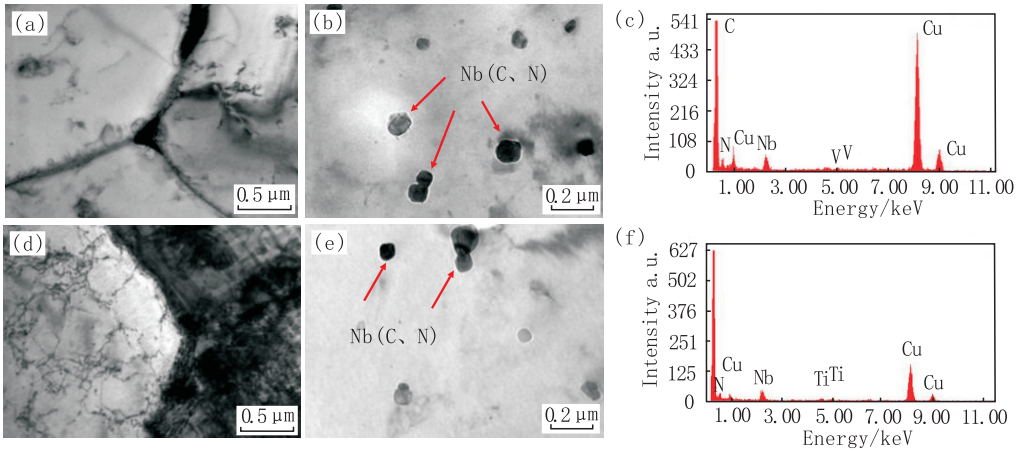
Fig. 5 EBSD Results of the S355J2G4 Steel at the FDT of 860 ℃ and the CT of 600 ℃

当卷取温度为600 ℃时，通过图4和图5可以看出，S355J2G4钢在880 ℃和860 ℃卷取时其IPF

分布相似，晶粒大小、晶界分布和晶粒尺寸差异明显。随着精轧温度由880 ℃降至860 ℃，铁素体平均晶粒尺寸从6.9 μm降低至5.9 μm，其中精轧温度880 ℃时，≤5 μm的晶粒体积分数约为45%，≥10 μm的晶体体积分数约为20%；精轧温度860 ℃时，≤5 μm的晶粒体积分数约为53%，≥10 μm的晶粒体积分数约为11%。由此可见，随着精轧温度降低，小于等于5 μm的较小尺寸晶粒的体积分数增加，大于等于10 μm的大尺寸晶粒的体积分数降低。由图4(b)和5(b)中黑色实线所示中的大角度晶界和图4(b)和5(b)红色实线所示小角度晶界可知，860 ℃精轧温度下铁素体界面密度更大，880 ℃精轧温度下铁素体大角度界面密度降低，同时随着精轧温度降低，晶粒尺寸减小。有研究[8-9]表明，晶粒尺寸减小会提高材料屈服强度及抗拉强度，这是由于细晶强化的作用。对于铁素体细晶强化对屈服强度的影响采用Hall-Petch公式计算[10]：

$$\Delta\sigma_g = K_y \cdot D^{-1/2} \tag{1}$$

式中，$\Delta\sigma_g$为细晶强化增量，MPa；K_y为比例系数，常取17.4[10]，MPa·mm$^{1/2}$；D为有效晶粒尺寸，mm。由式(1)计算，当精轧温度860 ℃时细晶强化增量$\Delta\sigma_g$为227 MPa，当精轧温度880 ℃时，细晶强化增量$\Delta\sigma_g$为210 MPa。降低精轧温度，细晶强化增量提高了17 MPa。



(a) FDT880 ℃组织形貌；(b) FDT880 ℃析出相；(c) FDT880 ℃析出相成分谱图；
(d) FDT860 ℃组织形貌；(e) FDT860 ℃析出相；(f) FDT860 ℃析出相成分谱图

图6 不同精轧温度下S355J2G4钢微观结构和析出相

Fig. 6 the Microstructure and Precipitation of the S355J2G4 Steel at Different FDT

2.2.3 透射电镜分析

不同精轧温度下S355J2G4钢微观结构和析出相如图6所示。

通过图6(a)、6(d)明显看出晶粒晶界处的位错情况，图6(b)、6(e)明显看出试验钢析出物粒子形貌，图6(c)、6(f)对析出的球状粒子成分进行了定性分析，确定为Nb(C、N)粒子。析出的Nb(C、N)有效钉扎晶界从而阻止开轧前奥氏体晶粒的粗化，形核率控制因素大于粗化因素，通过细晶强化和析出强化能够有效提高钢的力学性能[11-12]。这是由于随着精轧温度降低，过冷度增加，析出相形核点数量增加，从而形成更细小、弥散的析出相；精轧温度降低，形成的亚结构位错密度高，位错线可作为析出相的形核点，增加析出相分布的均匀性，析出的第二相粒子更弥散；精轧温度降低，原子迁移能力减弱，析出相生长速率降低，从而尺寸减小[13]，细小的析出相可有效钉扎位错和晶界，抑制再结晶和晶粒长大，进一步稳定组织。

结合不同热轧工艺对力学性能的影响结果，卷取温度600 ℃下，精轧温度由880 ℃降至860 ℃，延伸率和冲击功均远远高于客户要求，而抗拉强度明显提升，该强度增量来自于细晶强化、位错强化和析出强化；精轧温度860 ℃，卷取温度550 ℃下，贝氏体的产生必定引起延伸率的下降[14-16]。因此，为保证S355J2G4强度性能，生产中精轧温度设定为860℃。

3 结论

（1）S355J2G4机车用钢在卷取温度600 ℃，精轧温度由880 ℃降为860 ℃，组织均为铁素体和珠光体，晶粒尺寸减小，发生晶粒细化，析出相更细小且弥散，发生析出强化，屈服强度、抗拉强度、延伸率均提高。

（2）S355J2G4机车用钢在精轧温度860 ℃，卷取温度由600 ℃降至550 ℃，组织由铁素体和珠光体变为铁素体和贝氏体，强度显著增强，延伸率下降。

（3）通过提高形核率，抑制扩散粗化、利用位错密度和调控相变路径显著提升了355 MPa级机车用钢的强度和塑性。并且通过试验结果确定了355 MPa级机车用钢最佳工艺为精轧温度860 ℃，卷取温度600 ℃。

参考文献

[1] 孙长玉，霍培珍. Q345R锅炉压力容器钢板的研制[J]. 包钢科技，2015，41(3)：39-41.
[2] 孔君华，吴力新，谢长生. 热轧工艺对低碳微合金钢组织与性能的影响[J]. 热加工工艺，2004，11(2)：43-47.
[3] 王恩睿，陈子刚，李斌，等. 热轧工艺对420 MPa级薄带钢组织性能和表面质量的影响[J]. 热加工工艺，2022，51(11)：27-31.
[4] 关菊，张红军，马小军，等. 鞍钢第二代ASP生产线技术创新与探索[J]. 鞍钢技术，2010(1)：60-62.
[5] 张富强. 成分和卷取温度对热轧铌微合金钢组织和性能的影响[J]. 上海金属，2008，30(5)：48-51.
[6] 闫中鹤. 铁路车辆用高耐蚀型耐候钢的研发[D]. 沈阳：东北大学，2019.
[7] 杨跃辉. 纳米尺度析出对低碳贝氏体钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理，2017，42(5)：58-61.
[8] 周晓光，刘振宇，吴迪，等. 含Nb钢在FTSR工艺中铁素体相变行为研究[J]. 轧钢，2007，24(3)：5-8.
[9] Cheng Ma，Qunjia Peng，Enhou Han，et al. Microstructure and stress corrosion cracking of a SA508-309L/308L-316L dissimilar metal weld joint in primary pressurized water reactor environment[J]. Journal of Materials Science and Technology，2020(5)：1-14.
[10] 杨俊伟，李邵东，张可，等. 卷取温度对模拟热轧51CrV4钢显微组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理，2016，41(2)：98-103.
[11] 李龙，丁桦，杨春征，等. 控轧控冷工艺对低碳铌微合金钢组织和性能的影响[J]. 钢铁研究学报，2006，18(7)：46-51.
[12] 张可，雍崎龙，孙新军，等. 卷取温度对Ti-V-Mo复合微合金化超高强度钢组织及力学性能的影响[J]. 金属学报，2016，52(5)：529-537.
[13] 张玉平，韦光珍，王梦涵. 钒微合金化对5CrNiMo模具钢组织与性能的影响分析[J]. 钢铁钒钛，2022，43(3)：146-151.
[14] 王小江，孙新军，李昭东，等. 卷取温度对高Nb微合金钢组织力学性能及第二相析出的影响[J]. 材料工程，2016，44(2)：35-42.
[15] 孙乐飞，王福明，陶素芬，等. 机车车轮用钢奥氏体晶粒的长大行为[J]. 北京科技大学学报，2014，36(3)：301-307.
[16] S. W. Thompson，P. R. Howell. Factors influencing ferrite/pearlite banding and origin of large pearlite nodules in a hypoeutectoid plate steel[J]. Materials Science and Technology，2013，8(9)：777-784.

（编辑 白璐）
修回日期：2025-05-08

《鞍钢技术》版权声明

遵循《中华人民共和国著作权法》，作者向本刊主动投稿（或接受约稿），视为作者将该论文的许可使用权（复制权和发行权）、汇编权、信息网络传播权及其他各种形式出版的使用权等授予《鞍钢技术》编辑部。本刊一次性支付作者的稿酬包含上述各种稿酬。作者应保证论文的原创性、不涉密、不侵权、署名无争议。若发生问题，一切责任由作者承担，文责自负。未经书面许可，任何人及单位不得以任何形式复制、翻印、使用本刊的任何图文。如作者不同意将文章版权交予《鞍钢技术》编辑部，敬请在来稿首页显著位置作出书面声明。

《鞍钢技术》编辑部