

轧制与热处理对 304 奥氏体不锈钢组织与性能的影响

宋文鹏¹ 陈靖¹ 马喆¹ 王丽娜¹ 邢万里² 邢振国^{1,2} 石银冬^{1*}

1.河北工程大学, 河北省高强韧耐磨金属材料重点实验室, 河北 邯郸 056038

2.邯郸慧桥复合材料科技有限公司, 河北 邯郸 056038

[摘要]304 奥氏体不锈钢因为具有优异的耐蚀性、成型性和焊接性, 在各类工业领域应用广泛。但是常规的固溶态 304 屈服强度较低, 难以满足重载工作的需求, 而且传统的强化技术普遍存在强度-塑性倒置的难题。文中采用 80%压下率的室温冷轧工艺来制备试样, 然后在 400~700℃、保温 60min 退火热处理, 系统地研究退火工艺对奥氏体不锈钢组织与力学性能的影响。研究表明: 650℃保温 60min, 制备出了未再结晶的硬质相和再结晶的软质相共存的双峰异质结构, 其屈服强度是 859.12MPa、抗拉强度是 891.21MPa、断后伸长率是 16.27%, 实现了强塑性优秀匹配。这种异质结构引发的背应力强化与 TRIP 效应耦合, 有效地突破了传统强塑性倒置难题。该研究为 304 不锈钢轧制-热处理改性及规模化工程应用提供实验与理论支撑。

[关键词]304 奥氏体不锈钢; 冷轧工艺; 退火热处理; 异质结构; 强韧化机理

DOI: 10.33142/nsr.v3i3.20390

中图分类号: TG142.25

文献标识码: A

The Effect of Rolling and Heat Treatment on the Microstructure and Properties of 304 Austenitic Stainless Steel

SONG Wenpeng¹, CHEN Jing¹, ZHE Ma¹, WANG Lina¹, XING Wanli², XING Zhenguo^{1,2}, SHI Yindong^{1*}

1. Hebei Key Laboratory of Wear-resistant Metallic Materials with High Strength and Toughness, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei, 056038, China

2. Handan Huiqiao Compound Materials Technology Co., Ltd, Handan, Hebei, 056038, China

Abstract: 304 austenitic stainless steel is widely used in various industrial fields due to its excellent corrosion resistance, formability, and weldability. However, the yield strength of conventional solid solution 304 is relatively low, making it difficult to meet the requirements of heavy load operation, and traditional strengthening techniques generally suffer from the problem of strength plasticity inversion. The sample was prepared using a room temperature cold rolling process with an 80% reduction rate, and then subjected to annealing heat treatment at 400-700 °C for 60 minutes. The effect of annealing process on the microstructure and mechanical properties of austenitic stainless steel was systematically studied. Research has shown that a bimodal heterostructure with coexistence of unrecrystallized hard phase and recrystallized soft phase was prepared by holding at 650 °C for 60 minutes. The yield strength was 859.12 MPa, tensile strength was 891.21 MPa, and elongation at break was 16.27%, achieving excellent matching of strength and plasticity. The coupling of back stress strengthening and TRIP effect caused by this heterostructure effectively breaks through the traditional problem of strong plasticity inversion. This study provides experimental and theoretical support for the rolling heat treatment modification and large-scale engineering application of 304 stainless steel.

Keywords: 304 austenitic stainless steel; cold rolling process; annealing heat treatment; heterostructure; strengthening and toughening mechanism

引言

304 奥氏体不锈钢是 18Cr-8Ni 系亚稳态不锈钢, 凭借优异的耐蚀性、成型性与焊接性, 在石油化工、核电装备、海洋工程等领域应用广泛^[1-4]。但是商用 304 不锈钢屈服强度仅有 200~300MPa, 在重载、高压条件下

易发生严重塑性变形, 限制了其在高端市场的应用^[1,2,4]。而传统的细晶强化、固溶强化、加工硬化等强化技术, 存在强度-塑性倒置的矛盾, 无法实现高强度与高塑性的协同匹配^[5-9]。据统计, 由于金属材料强度与塑性不匹配造成的失效, 每年的经济损失约数百亿元, 因此实现 304

不锈钢强塑性协同优化具有重要工程价值^[10-12]。

异质结构调控是突破强塑性倒置关系的有效途径,相较于高压扭转、机械研磨等制备方法,轧制-退火工艺是钢铁领域成熟、低成本且可规模化应用的生产技术^[13-18]。研究表明,大压下率的冷轧钢板可通过严重塑性变形诱发马氏体相变、晶粒细化、错增殖位等,从而大幅提高 304 强度;后续的精准退火可以调控马氏体的逆相变和晶粒的再结晶过程,从而实现软硬两相共存的异质结构^[19-21]。异质结构材料依托背应力强化与 TRIP 效应耦合机制,可以突破传统均质材料的性能极限。但是关于轧制-退火工艺协同调控异质结构演化、两相耦合强韧化机理的研究仍然不够完善,缺乏完整的“工艺-组织-性能-机制”关联体系^[22-28]。

因此,本文以商用 304 奥氏体不锈钢为研究对象,通过 80%压下率室温冷轧工艺,结合不同温度退火工艺,系统研究了工艺参数对材料组织和力学性能的影响,揭示了异质结构的形成机制与强韧化机理,确定了最优工艺窗口,为高性能 304 不锈钢的工业化制备与应用提供技术支撑。

1 实验材料与方法

1.1 实验原材料

实验采用固溶态 304 奥氏体不锈钢热轧板材(上海冶锐特种合金集团),原始厚度为 5.0mm,化学成分(质量分数):C 0.04, Si 0.38, Mn 1.16, Cr 18.24, Ni 8.02, P 0.029, N 0.005。

1.2 试样制备与实验方案

实验采用二辊可逆冷轧机进行室温多道次冷轧,单道次压下量约 0.2~0.3mm,总压下率 80%。最终试样厚度约 1.0mm,轧制全程无中间退火。将冷轧后板材切割为标准拉伸试样,然后采用箱式马弗炉进行热处理。固定保温时长为 60min,分 400℃、500℃、600℃、650℃、700℃ 五组退火温度,出炉后空冷,同时准备未退火冷轧试样作为参照组,具体的工艺方案如表 1 所示。选取最优工艺参数,分别进行 3%、5%、10%预拉伸试验,研究变形过程中组织与性能动态演变规律。

表 1 室温冷轧压下率为 80%试样的热处理工艺表格

试样编号	退火温度	保温时间	冷却方式
CR	-	-	-
CR-400	400℃	60min	空冷
CR-500	500℃	60min	空冷
CR-600	600℃	60min	空冷
CR-650	650℃	60min	空冷
CR-700	700℃	60min	空冷

1.3 表征与测试方法

试样经过线切割、镶嵌、打磨、抛光后,采用王水溶液($\text{HCl}:\text{HNO}_3=3:1$)腐蚀 15~30s,清洗吹干,然后利用奥林巴斯光学显微镜进行金相组织观察。采用 WDW-20T 型电子万能试验机进行力学性能测量,拉伸速度 0.025mm/s。每个工艺测试 3 个试样,数据取平均值,保证数据准确性。

2 结果与分析

2.1 冷轧工艺对不锈钢组织与性能的影响

2.1.1 微观组织特征

原始 304 组织如图 1(a1-c1)所示,为均匀等轴奥氏体组织,晶界清晰,无变形缺陷与第二相析出。经 80%大压下率冷轧后,如图 1(a2-c2)所示,原始等轴晶粒被压扁、拉长,形成沿轧制方向连续分布的致密纤维状组织,原始晶界完全消失。晶粒内部产生大量剪切带与形变条带,形成丰富的变形亚结构。经计算,冷轧后试样内部 α' -马氏体体积分数约为 80%,是基体主要组成相。残余奥氏体以岛状、条带状分布于马氏体界面处,为后续退火再结晶提供形核核心。

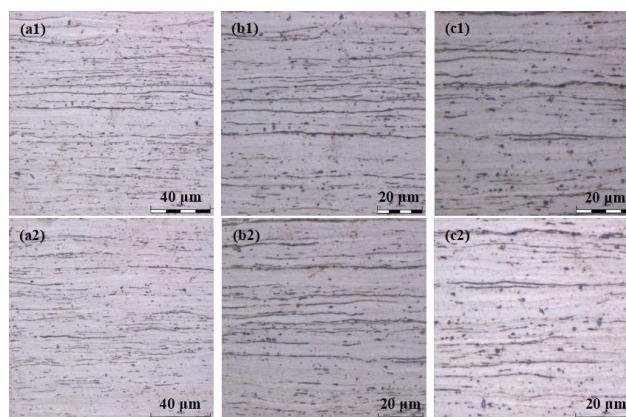


图 1 80%压下率初始试样金相照片

(a1,a2) 2000X, (b1,b2) 3000X, (c1,c2) 4000X

304 不锈钢形变诱导相变遵循“奥氏体 $\rightarrow\epsilon$ -马氏体 $\rightarrow\alpha'$ -马氏体”的演变路径,大压下率提供的应变能足够充足,促进了位错增殖与剪切带的形成,大幅度推动马氏体相变进程,最终提高了基体的强度硬度。

2.1.2 力学性能与强化机制

80%冷轧试样的力学性能呈现典型的高强低塑特征,如图 2 所示,屈服强度为 1471.18MPa、抗拉强度为 1534.54MPa,比原始态样品有大幅度提升,但断后伸长率仅为 4.15%,拉伸曲线无明显塑性变形阶段,易发生脆性断裂。

冷轧态试样高强度主要来源于三重强化机制：一是加工硬化，大塑性变形使位错密度大约提升了3个数量级，高密度位错相互缠结形成了位错胞、位错墙，大大提高了位错运动阻力；二是相变强化，硬质相 α' -马氏体取代塑性奥氏体相成为基体主相，同时相变体积膨胀产生界面内应力，进一步阻碍位错运动；三是细晶强化，晶粒经过变形破碎与相变细化形成亚微米级晶粒与纳米马氏体板条晶粒，依据Hall-Petch公式实现细晶强化。三重机制协同作用实现高强度，但过度加工硬化耗尽塑性储备，导致材料强塑性失衡。

2.2 退火温度对组织与性能的调控规律

2.2.1 微观组织阶段性演变特征

退火温度是调控冷轧态不锈钢组织演变的核心工艺，随温度升高，试样组织呈现出三个阶段的演变规律，如图3所示：

(1) 低温回复阶段（400~500℃）（图a1-c1）：该区间原子扩散能力弱，仅发生位错滑移、攀移与重排，位错密度小幅度降低，无明显马氏体逆相变与再结晶行为。基体仍以纤维状变形组织与马氏体相为主，组织形貌与冷轧态无明显差别，残余内应力轻微释放。

(2) 相变再结晶阶段（600~650℃）（图a2-c3）：该区间为马氏体逆相变与奥氏体再结晶区间。形变储能充分释放， α' -马氏体持续逆转变为奥氏体，同时变形奥氏体发生再结晶形核长大。650℃退火后，纤维变形流线基本消失，形成未再结晶硬质变形相+再结晶软质奥氏体相的双峰异质结构，两相均匀交错分布，组织稳定性最优。

(3) 晶粒均匀化阶段（700℃）（图a3-c3）：马氏体逆相变与再结晶完全完成，基体转变为均匀等轴奥氏体组织，晶粒发生明显长大，异质结构完全消失，组织回归均质状态。

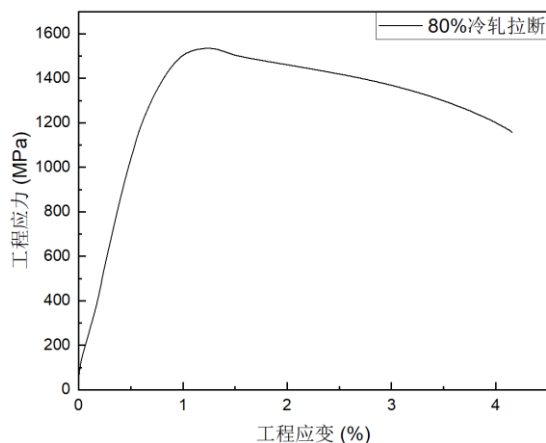


图2 80%冷轧态 304 不锈钢的室温拉伸工程应力-应变曲线

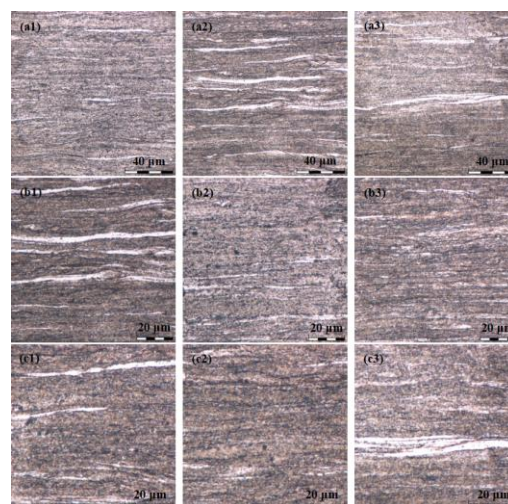


图3 80%压下率后经650℃退火试样的不同倍数金相照片
(a1,a2,a3) 2000X, (b1,b2,b3) 3000X, (c1,c2,c3) 4000X

2.2.2 力学性能演变规律及最优工艺筛选

退火温度对材料力学性能的调控呈现显著的阶段性特征，强度随温度升高持续下降，塑性同步稳步提升，如图4所示：

400~500℃低温退火后，试样屈服强度维持在1600MPa以上，塑性仅小幅改善，断后伸长率不足2%，强塑性匹配极差，仅实现残余应力释放，未突破强塑性倒置困境；600℃退火后，马氏体大量逆转变、再结晶晶粒大量生成，屈服强度降至1093.70MPa，断后伸长率提升至3.51%，强塑性显著提升，强塑性失衡问题初步改善；650℃退火后，材料综合性能达到最优，屈服强度859.12MPa、抗拉强度891.21MPa、断后伸长率16.27%，相较于冷轧态，塑性提升近4倍，强度仍远高于原始固溶态，强塑性达14.51GPa%；700℃退火后，塑性大幅提升至45.87%，但屈服强度骤降至385.83MPa，高强度优势完全丧失，无法满足重载工况需求。

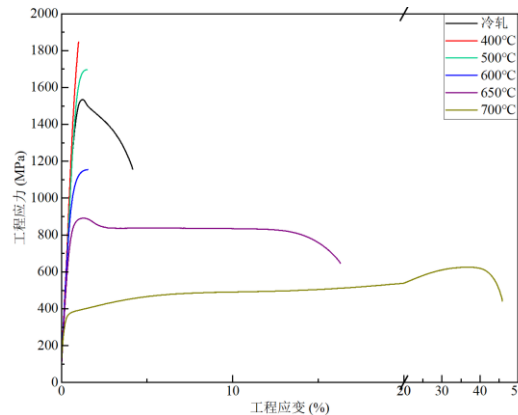


图4 80%冷轧态 304 不锈钢未经热处理和不同退火温度的室温拉伸工程应力-应变曲线

结合工程需求,650℃、保温 60min 为最优工艺参数,该工艺下可稳定构筑异质结构,实现高强度与高塑性的协同匹配,且工艺参数适配工业生产线,具备规模化应用潜力。

2.3 最优工艺试样变形动态响应规律

对 650℃退火试样分别开展 3%、5%、10%梯度预拉伸试验,探究异质结构变形机制。如图 5 所示,低预拉伸量(3%)下,奥氏体晶粒仅轻微拉长,组织无明显形变

缺陷,变形以弹性协调为主,背应力初步建立;如图 6 所示,中等预拉伸量(5%)下,软质奥氏体相率先发生塑性变形,晶粒沿拉伸方向明显拉长,滑移带开始生成,TRIP 效应逐步激活;如图 7 所示,高预拉伸量(10%)下,基体形成明显纤维流变组织,滑移带与形变条带贯穿晶粒,残余奥氏体持续发生马氏体相变,马氏体体积分数稳步提升。

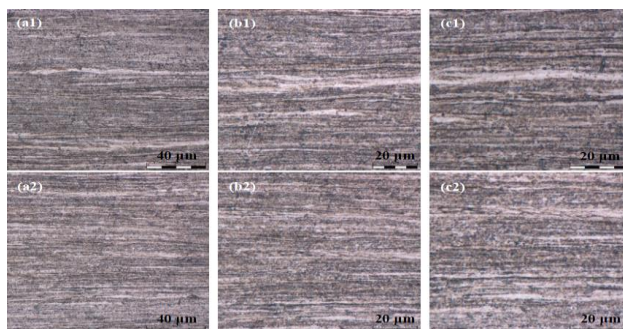


图 5 3%预拉伸量变形后的金相组织照片

(a1,a2) 2000X, (b1,b2) 3000X, (c1,c2) 4000X

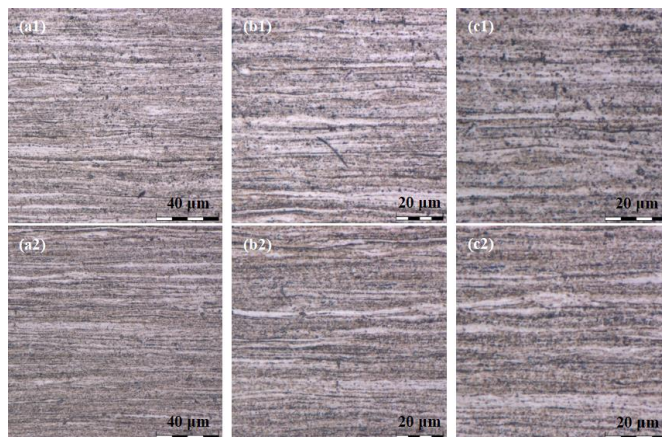


图 6 5%预拉伸量变形后的金相组织照片

(a1,a2) 2000X, (b1,b2) 3000X, (c1,c2) 4000X

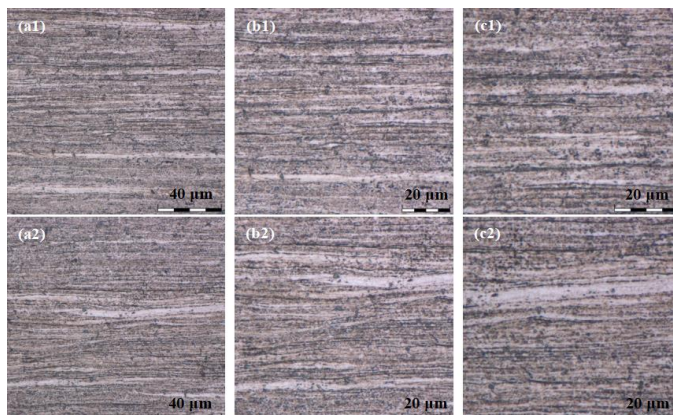


图 7 10%预拉伸量变形后的金相组织照片

(a1,a2) 2000X, (b1,b2) 3000X, (c1,c2) 4000X

力学性能测试表明,如图8所示,随预拉伸量提升,试样加工硬化率持续维持高位,无早期颈缩现象。异质结构可通过应变梯度调控,实现TRIP效应的持续稳定发生,在变形全过程同步发挥强化与增塑作用,保证材料塑性变形过程中组织与性能的稳定性。

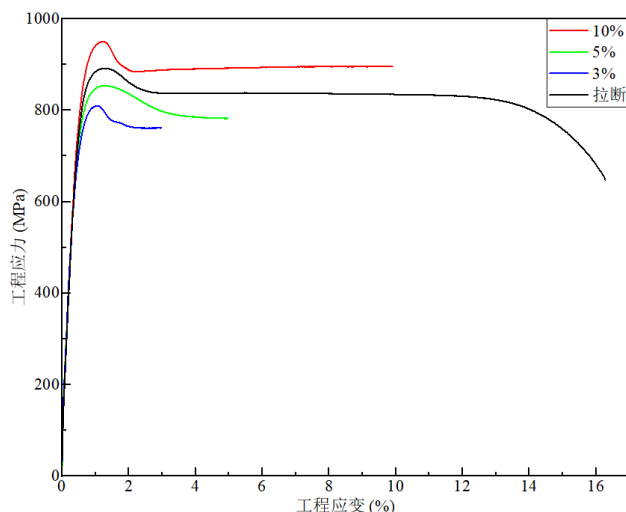


图8 不同预拉伸量下试样的室温拉伸工程应力-应变曲线

3 强韧化机理分析

3.1 异质结构背应力强化机制

异质结构的强化效应来源于软硬两相变形不协调产生的背应力强化。650℃-60min退火试样中,再结晶奥氏体软相与未再结晶变形硬相的力学性能差异显著,拉伸变形时,软相优先发生塑性滑移,硬相仍处于弹性变形阶段,两相界面产生应变梯度。为协调变形,界面处大量位错持续增殖、塞积,形成反向内应力(背应力)。背应力可有效阻碍软相塑性变形,提升软相屈服强度,产生均质材料不具备的额外强化效果,是异质结构材料维持高强度的主要原因,对整体屈服强度的贡献占比可达30%~50%。

3.2 背应力与TRIP效应耦合增塑机制

304不锈钢的亚稳态奥氏体具备显著的TRIP效应,可与异质结构背应力强化形成协同耦合作用,彻底突破强塑性倒置困境。传统均质不锈钢TRIP效应集中于变形中后期,相变过程短暂,增塑效果有限;而异质结构可通过两相应变分配,使塑性应变集中于软质奥氏体相,在较低宏观应变下激活马氏体相变。

拉伸变形全过程中,残余奥氏体持续发生应变诱导马氏体相变,新生硬质马氏体可进一步强化基体,同时相变体积膨胀产生的位错增殖效应,持续提升材料加工硬化率,有效抑制应变局部化与早期颈缩。背应力强化保障材料高强度,持续TRIP效应保障材料高塑性,二者耦合实现304

不锈钢强塑性协同优化。

4 结论

(1) 80%压下率冷轧可使304不锈钢产生纤维状变形组织,诱发80%体积分数 α' -马氏体相变,通过加工硬化、相变强化、细晶强化三重机制实现超高强度(1471.18MPa),但塑性基本丧失,呈现典型的强塑性倒置特征。

(2) 退火温度可精准调控冷轧态不锈钢组织演变与性能匹配:400~500℃低温退火仅发生位错回复,性能无明显优化;600~650℃可构筑软硬两相共存的双峰异质结构,实现强塑性协同提升;700℃退火组织完全均匀化,高强度优势消失。最优工艺为650℃保温60min,试样屈服强度859.12MPa、断后伸长率16.27%,综合性能最优。

(3) 异质结构强韧化核心为背应力强化与TRIP效应耦合机制:两相变形不协调产生的背应力提供额外强化效果,持续稳定的TRIP效应提升加工硬化率、抑制颈缩失效,有效破解传统不锈钢强度-塑性倒置难题,可为高性能304不锈钢工业化改性应用提供理论支撑。

基金项目:本研究得到了河北省自然科学基金重点项目(A类)(E2025402139)、河北省中央引导地方科技发展基金项目(246Z1004G)的资助。

[参考文献]

- [1]陆世英.不锈钢概论[M].北京:化学工业出版社,2013.
- [2]周慧,李锡栋.固溶处理对304奥氏体不锈钢组织和性能的影响[J].热加工工艺,2018,47(24):234-235.
- [3]刘振宇,李成刚,赵岩,等.节约型双相不锈钢组织性能控制与制造技术[J].鞍钢技术,2016(2):1-8.
- [4]季艳娇.退火温度对304不锈钢显微组织和力学性能的影响[J].理化检验-物理分册,2026,62(2):12-17.
- [5]卢柯.梯度纳米结构材料[J].金属学报,2015,51(1):1-10.
- [6]Wu X L, Yang M X, Yuan F P, et al. Combining gradient structure and TRIP effect to produce austenite stainless steel with high strength and ductility[J].Acta Materialia, 2016(112):337-346.
- [7]Zhu Y, Wu X. Perspective on hetero-deformation induced (HDI)hardening and back stress[J]. Materials Research Letters,2019,7(10):393-398.
- [8]钟云波,时培建.多级层片异构设计构筑超高强塑性金属材料[J].金属学报,2025,61(11):1593-1602.
- [9]李建生.层状异质结构金属材料制备及力学性能研究[D].南京:南京理工大学,2020.
- [10]Li J S, Fang C, Liu Y F, et al. Deformation mechanisms

of 304L stainless steel with heterogeneous lamella structure[J].Materials Science and Engineering:A, 2019(742):409-413.

[11]秦礼华,李龙飞,杨王玥,等.退火工艺对冷轧 304 不锈钢组织与性能的影响[C].北京:中国钢铁年会,2011.

[12]张梅,孙国胜,秦崇烺,等.冷轧 304 不锈钢的马氏体逆相变及奥氏体再结晶行为[J].金属热处理,2021,46(7):51-55.

[13]Shi J T, Hou L G, Zuo J R, et al. Effect of cryogenic rolling and annealing on the microstructure evolution and mechanical properties of 304 stainless steel[J].International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2017(6):38-45.

[14]Wu X L, Jiang P, Chen L, et al. Extraordinary strain hardening by gradient structure[J].Proceedings of the National Academy of Sciences,2014,111(20):7197-7201.

[15]Romero-Resendiz L, El-Tahawy M, Zhang T, et al. Heterostructured stainless steel: Properties, current trends, and future perspectives[J].Materials Science and Engineering:R: Reports,2022(150):100691.

[16]Yang M, Pan Y, Yuan F, et al. Back stress strengthening and strain hardening in gradient structure[J].Materials Research Letters,2016,4(3):145-151.

[17]史金涛,侯龙刚,左锦荣,等.304 奥氏体不锈钢超低温轧制变形诱发马氏体转变的定量分析及组织表征[J].金属学报,2016,52(8):945-955.

[18]李美玲.深冷轧制 304 奥氏体不锈钢超细化机理及性能控制[D].沈阳:东北大学,2016.

[19]于帅,孙国胜.轧制温度对 304 不锈钢组织性能的影响[J].轧钢,2024,41(3):31-35.

[20]张慧云,郑留伟,梁伟.退火工艺对 304 奥氏体不锈钢的组织演变及氢脆行为的影响[J].中国腐蚀与防护学报,2025,45(2):438-448.

[21]艾峥嵘,于凯,吴红艳,等.超低温轧制 304 奥氏体不锈钢马氏体逆相变及组织表征[J].精密成形工程,2023,15(12):12-18.

[22]丰玉玺,陈丽芳,陈安源,等.敏化处理对 304 不锈钢板晶间腐蚀的影响[J].热处理技术与装备,2017,38(1):15-17.

[23]李毅.梯度结构金属材料研究进展[J].中国材料进展,2016,35(9):658-701.

[24]王松涛,王威,单以银,等.高强高韧高氮奥氏体不锈钢的热加工工艺[J].世界钢铁,2009(1):46-49.

[25]杨钊,黄建龙.304 奥氏体不锈钢应变诱发马氏体的研究[J].材料热处理学报,2012(3):104-109.

[26]刘文强,王丽君,张福成,等.超级奥氏体不锈钢发展及第二相调控研究现状[J].钢铁研究学报,2023,35(8):907-927.

[27]胡康祥,蔡珣,戎咏华.材料科学基础[M].上海:上海交通大学出版社,2010.

[28]徐祖耀.马氏体相变与马氏体[M].北京:北京科学出版社,1999.

作者简介:宋文鹏(1986—),博士,河北工程大学讲师,主要从事异构金属材料构筑与性能优化研究;*通讯作者:石银冬(1985—),博士,河北工程大学教授,主要从事异构金属材料强韧化及复合耐磨材料调控研究。