

文章编号: 1673-5196(2020)04-0001-05

热轧变形量对铝热法制备的 2507 双相不锈钢组织和力学性能的影响

喇培清, 石 玉, 汪科良, 盛 捷, 李正宁, 周学渊

(兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 对铝热反应制备的微纳结构 2507 双相不锈钢在 1 000 °C 下进行了变形量为 40%、60% 和 80% 的轧制处理. 利用 X 射线衍射仪(XRD)、光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)研究其轧制态显微组织. 采用万能拉伸试验机和布洛维光学硬度计测试其力学性能. 测试结果表明: 轧制过程中, 奥氏体和铁素体沿轧制方向被拉长, 且奥氏体向铁素体转变. 随着轧制变形量的增加, 纳米晶平均晶粒尺寸变化不大, 但体积分数减小. 1 000 °C 下轧制变形量为 40%、60% 和 80% 后的屈服强度分别为 232、284、456 MPa, 抗拉强度分别为 533、577、582 MPa, 硬度分别为 325、330、337 HV, 延伸率分别为 12.5%、11.1% 和 11.5%.

关键词: 2507 双相不锈钢; 微纳结构; 轧制; 强度

中图分类号: TG142.1 文献标志码: A

Effect of hot rolling deformation on microstructure and mechanical properties of 2507 duplex stainless steel prepared via the aluminothermic reaction

LA Pei-qing, SHI Yu, WANG Ke-liang, SHENG Jie, LI Zheng-ning, ZHOU Xue-yuan

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: The 2507 duplex stainless steel with nano/micro-crystalline structure prepared by the aluminothermic reaction was subjected to a rolling treatment at 1 000 °C with 40%, 60% and 80% deformation. The microstructure of the as-rolled state was investigated by X-ray diffraction (XRD), optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), and transmission electron microscopy (TEM). The mechanical properties were measured by using a universal tensile testing machine and a Brook field optical hardness measuring instrument respectively. All measured results show that the rolling process makes austenite and ferrite phases elongated along the rolling direction and the transformation of austenite to ferrite happens in the steel as a result. With increase of rolling deformation, the nanocrystalline size does not change too much, while volume fraction of the nanocrystalline decreases. The yield strength of the steel is about 232, 284, 456 MPa, tensile strength is about 533, 577, 582 MPa, hardness is 325, 330, 337 HV, elongation takes 12.5%, 11.1% and 11.5% when the steel was rolled at 1 000 °C with 40%, 60% and 80% deformation, respectively.

Key words: 2507 duplex stainless steel; micro/nano-crystalline structure; rolling; strength

奥氏体(γ)-铁素体(α)双相不锈钢是指金相组织由 γ 和 α 两相组成的不锈钢. 在固溶组织中 γ 和 α 大约各占一半, 一般情况下较少相的含量也要在 30% 以上^[1-2]. 2507 钢作为第三代双相不锈钢的典型代表, 研发于 20 世纪 80 年代, 这一超级双相不

锈钢提高了合金元素的含量, 较好地平衡了 γ 和 α 相的比例. 通过热处理的方法能使两相比接近 1 : 1, 同时强度得到极大提高. 这种钢的含碳量极低, 加工性能和焊接性能良好, 同时耐局部腐蚀和应力腐蚀的能力较强, 因此得到了较为广泛应用^[3-4].

轧制是将金属坯料通过一对旋转轧辊的间隙(各种形状), 其因受轧辊的压缩成型, 使材料截面减小, 长度增加的压力加工方法, 这是钢材最常用的型

收稿日期: 2018-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(51561020)

作者简介: 喇培清(1971-), 男, 甘肃临夏人, 教授, 博导.

材生产方式.轧制不仅可以制备出板带等各种型材,还可以优化钢锭的铸造组织,细化钢材的晶粒,改善材料内部的显微组织,并消除铸造显微组织的缺陷,从而使钢材力学性能得到改善^[5-6].这种改善主要是晶粒沿轧制方向被拉长,形成择优取向,从而使钢材在一定程度上各向异性.铸造时形成的气孔、微裂纹和疏松,也可在高温和压力作用下被焊合,从而提高材料的力学性能^[7].对常规粗晶粒($> 1 \mu\text{m}$)金属的轧制已有大量的文献报道,但是很少有关于纳米晶金属轧制的相关文献.纳米晶金属的热稳定性和热变形机理尚未得到很好的理解,需要更多的实验研究.

本文以铝热反应铸造的微纳结构 2507 双相不锈钢为研究对象.由于铝热反应铸造时的快速凝固使铸件内部存在微孔洞,导致材料力学性能低^[8],通过热轧来改善力学性能.热轧变形量是轧制过程中很重要的一个参数,会影响轧制过程中钢的组织 and 力学性能,所以本文研究了轧制变形量对铝热反应铸造的微纳结构 2507 不锈钢显微组织和力学性能的影响,然后分析其组织与性能之间的关系.

1 材料与方法

铸态 2507 不锈钢通过铝热反应制备.有关制备的详细过程已报道^[9].其化学组成为 $w(\text{Cr}) = 24.5\%$, $w(\text{Ni}) = 6.6\%$, $w(\text{Mo}) = 4.3\%$, $w(\text{Mn}) = 0.1\%$, $w(\text{Al}) = 1.1\%$, $w(\text{C}) = 0.08\%$ 和 Fe 余量.将合成铸锭的上表面和下表面抛光,然后用线切割机切割成 $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的条状试样以便进行轧制.将该条状试样置于电阻加热炉中加热至 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 且保温 10 min .然后在两辊冷热轧机(郑州光华机械总厂生产)上轨制,主电机功率: 60 kW , 最大轧制力: 220 kN , 进行多次轧制,轧辊转速为 15 r/min , 轧制速度为 0.4 m/min , 每次压下量为 0.15 mm .试样厚度分别从 5 mm 变至 $3, 2, 1 \text{ mm}$, 对应的轧制变形量分别为 40% 、 60% 和 80% .轧制后的试样在空气中自然冷却.

轧制样品相组成分析在日本理学 Rigaku D/max-2400 型 X 射线衍射仪上进行测试和数据采集,采用 Cu K_α 辐射,并用石墨单色器除去 K_β , 工作电压和电流分别为 40 kV 和 150 mA , 阶梯扫描步长(2θ)为 0.02° , 每步计数时间为 2 s , 2θ 在 $30^\circ \sim 110^\circ$ 扫描.金相分析使用 10 mol/L 的电解腐蚀液腐蚀,电压 15 V , 时间 15 s , 然后在 Mef3 型光学金相显微镜上观察样品的金相组织.利用 JSM-6700F 扫描电镜对材料进行微观形貌观察.利用 JEM2010 透射电镜对 2507 双相不锈钢的组织进行表征,操作电

压为 200 kV , 透射电镜的制样过程如下:用线切割机将试样切成长 1 mm 厚的薄片,将其机械减薄至 0.05 mm , 用冲片器压成 $\phi 3 \text{ mm}$ 的圆片,然后用双喷电解仪进行电解减薄,所用电解液体积分数为 2% 的高氯酸酒精溶液.

拉伸性能的测试:根据国标 GB/T 228—2002 金属材料室温拉伸试验的技术要求,拉伸试样用线切割机加工,切割方向为轧制方向,标距部分尺寸为 $0.8 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$.实验在 AT10t 试验机上进行,拉伸速度为 0.2 mm/min .相同条件测 3 个样品以保证实验数据的准确性.实验都取三组测试数据的平均值.在 HBRVU-187.5 型布洛维氏光学硬度计上测定硬度.硬度测试中加载载荷是 298 N , 加载时间是 12 s , 实验的最终硬度值取 5 个点的平均值.

2 结果分析

2.1 显微组织

图 1 是微纳结构 2507 双相不锈钢在 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 轧制变形量为 40% 、 60% 和 80% 的 XRD 图谱,轧制样品均由 γ 和 α 组成.利用 XRD 定量分析方法谢乐公式(式 1)计算可知,变形量为 40% 、 60% 和 80% 的铁素体晶粒尺寸分别为 $22, 21, 25 \text{ nm}$, 奥氏体晶粒尺寸分别为 $27, 29, 29 \text{ nm}$.

$$d = K\lambda / B \cos \theta \quad (1)$$

式中: d 为平均晶粒尺寸; K 为常数 0.9 ; λ 为特征 X 射线波长; B 为由晶粒细化引起的衍射线变宽时衍射峰的半高宽; θ 为衍射角.

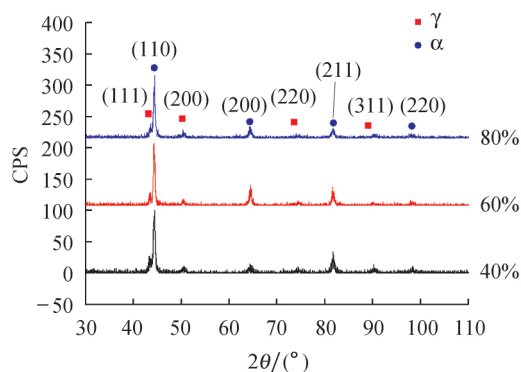


图 1 微纳结构 2507 双相不锈钢在 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 不同轧制变形量下的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of the micro/nano-crystalline structured 2507 duplex stainless steel with different rolling deformation

图 2 是微纳结构 2507 双相不锈钢在 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 不同轧制变形量下的光学金相组织,可以看出,2507 双相不锈钢主要由两相组成,白色为 γ , 黑色为 α .当

试样轧制后,两相均被拉长.

图 3 是微纳结构 2507 双相不锈钢在 1 000 °C 不同轧制变形量的 SEM 照片.从图上可以看出材料主要由深灰色 γ 和浅灰色 α 组成,还有黑色析出物.当轧制变形量大于 60%时,两相沿着轧制方向被明显拉长,使用 Image Pro Plus 统计 10 张 SEM 照片,统计 γ 和 α 体积分数,轧制变形量为 40%、60% 和 80% 的 γ 体积分数分别为 48%、49% 和 37%, α

体积分数为 52%、51% 和 63%,随着轧制变形量的增加, γ 体积分数呈减少趋势.

图 4~6 分别为 2507 双相不锈钢在 1 000 °C 变形量为 40%、60% 和 80% 的 TEM 照片,各图 a 为明场像,b 为暗场像,c 为选区电子衍射.从明场像可以看出,不同变形量轧制钢的组织均有黑色纳米晶和白色亚微米晶,且晶粒细小.暗场像中白色的亮点也证实了纳米晶的存在.选区电子衍射为连续环

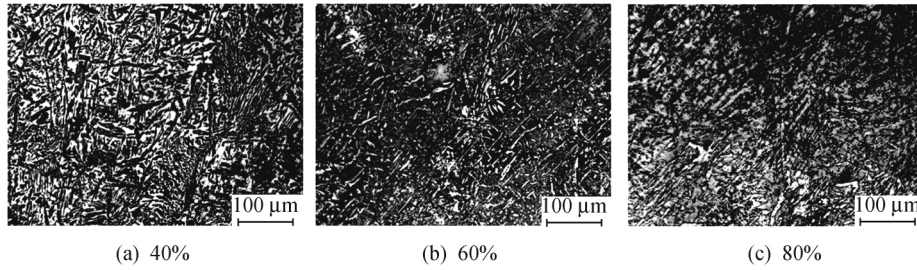


图 2 微纳结构 2507 双相不锈钢在 1 000 °C 不同轧制变形量下的 OM 组织

Fig.2 OM microstructure of the micro/nano-crystalline structured 2507 duplex stainless steel with different rolling deformation

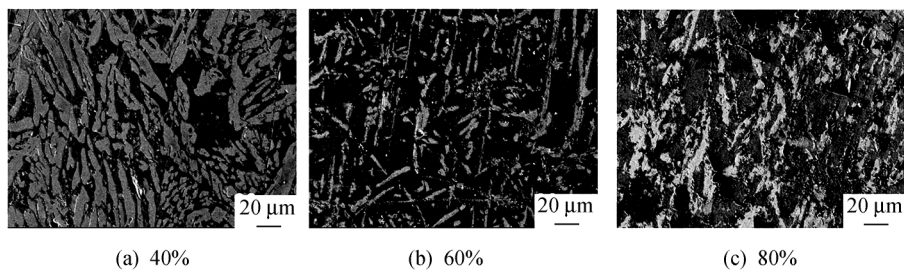


图 3 微纳结构 2507 双相不锈钢在 1 000 °C 不同轧制变形量下的 SEM 组织

Fig.3 SEM microstructure of the micro/nano-crystalline structured 2507 duplex stainless steel with different rolling deformations

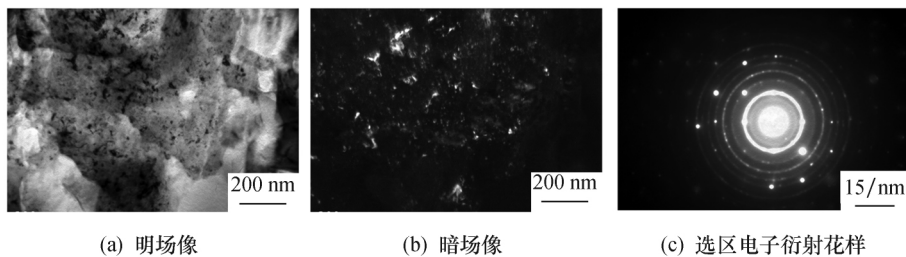


图 4 微纳结构 2507 双相不锈钢在 1 000 °C 下 40% 轧制变形量的 TEM 图

Fig.4 TEM images of the micro/nano-crystalline structured 2507 duplex stainless steel with 40% rolling deformation at 1 000 °C

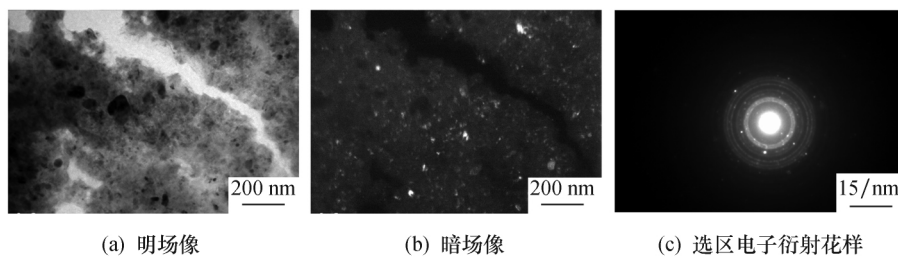


图 5 微纳结构 2507 双相不锈钢在 1 000 °C 下 60% 轧制变形量的 TEM 图

Fig.5 TEM images of the micro/nano-crystalline structured 2507 duplex stainless steel with 60% rolling deformation at 1 000 °C

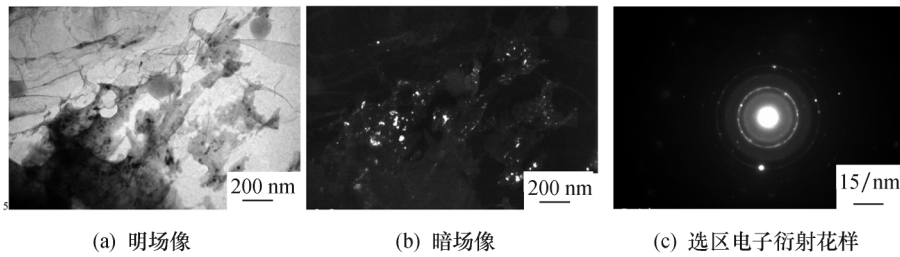


图 6 微纳结构 2507 双相不锈钢在 1 000 °C 下 80% 轧制变形量的 TEM 图

Fig.6 TEM images of the micro/nano-crystalline structured 2507 duplex stainless steel with 80% rolling deformation at 1 000 °C

状,表明不同取向晶粒的存在.衍射环上的明亮斑点表明钢在轧制过程中产生了择优取向.利用 IP-WIN6 软件对暗场像中纳米晶晶粒尺寸和体积分数进行统计,结果如图 7 所示,当轧制变形量分别为 40%,60% 和 80% 时,对应纳米晶的晶粒尺寸分别为 34,32,32 nm,纳米晶的体积分数分别为 17.1%,15.2% 和 6%.随着轧制变形量的增大,纳米晶体积分数减少.

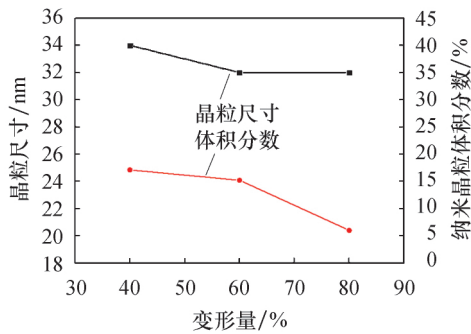
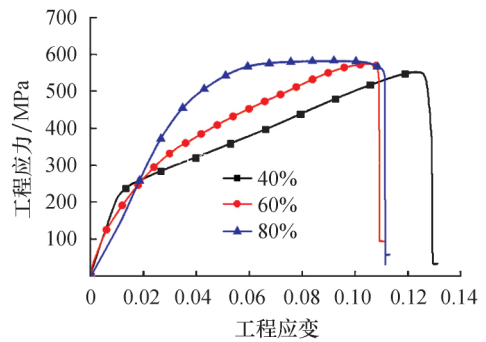


图 7 微纳结构 2507 双相不锈钢在 1 000 °C 下不同变形轧制量的纳米晶晶粒尺寸和体积分数统计图

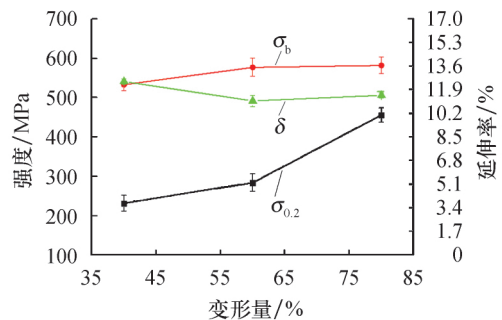
Fig.7 Nanocrystalline size and the volume fraction of the micro/nano-crystalline structured 2507 duplex stainless steel with different rolling deformation at 1 000 °C

2.2 力学性能

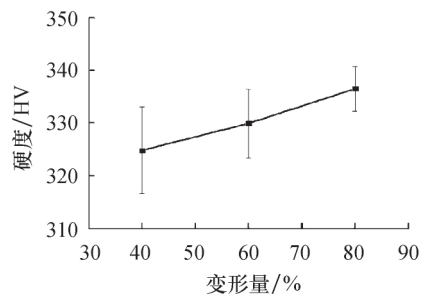
图 8 为微纳结构 2507 双相不锈钢在 1 000 °C 不同轧制变形量的力学性能,其中图 8a 为轴向拉伸工程应力-应变曲线,图 8b 为样品的抗拉强度、屈服强度和延伸率的变化趋势图,图 8c 为硬度变化图.从图 8b,c 看出,随轧制变形量的增加,屈服强度、抗拉强度和硬度都呈增加趋势.轧制变形量为 40%、60% 和 80% 的屈服强度分别为 232、284、456 MPa,抗拉强度分别为 533、577、582 MPa,硬度分别为 325、330、337 HV.轧制变形量为 40%、60% 和 80% 的延伸率分别为 12.5%、11.1% 和 11.5%,延伸率随轧制变形量的增加基本不变.



(a) 应变-应力曲线



(b) 强度和延伸率



(c) 变形量-硬度关系

图 8 微纳结构 2507 双相不锈钢在 1 000 °C 不同变形量轧制下的力学性能

Fig.8 Mechanical properties of the micro/nano-crystalline structured 2507 duplex stainless steel with different rolling deformation at 1 000 °C

3 分析讨论

微纳结构 2507 双相不锈钢在 1 000 °C 不同变形量轧制时,随轧制变形量的增加, γ 向 α 转变.这

是由于在 500~1 600 °C 温度对双相不锈钢进行热加工时, γ 的晶体缺陷密度增高, 会有利于铁素体形核^[10]. 具体可分为以下几方面: 1) 由于形变, γ 晶粒形状发生变化, 晶粒被压扁拉长, 单位体积中的晶界面积增大, 增多了 α 形核的位置; 2) 晶界处塞积大量位错, 为 γ - α 形核提供了有利的热力学条件, 增大单位面积上的形核率; 3) 晶界内形成的变形带也塞积大量位错, 增多了 γ - α 形核位置, 增大了形核率. 随着变形量的增大, 形核位置也随之增加, 因此随着轧制变形量的增加, γ 体积分数减少, α 体积分数增大. 实验观察到的结果是 γ 的体积分数分别为 48%、49% 和 37%, 与分析相吻合. 也和其他文献的报道相一致^[11].

微纳结构 2507 双相不锈钢热轧时, 除了发生相变, 晶粒结构也会发生变化. 这种变化基本上分为两大类: 第一, 在热轧过程中, 微米晶中产生的位错密度通过交滑移和攀移的方式运动, 使部分位错消失, 部分重新排列, 产生动态多边形化甚至再结晶而细化晶粒. 第二, 在热轧过程中, 纳米晶晶粒的变化与传统的粗晶不同, 纳米晶变形时, 晶粒内部难以储存位错, 所以很难实现动态多边形化. 另外, 纳米晶中高密度的晶界存储了大量晶界焓为晶粒长大提供了强大的驱动力. 因此, 纳米晶的结构细化变得更加困难, 在热机械作用下, 晶粒合并长大. 在这两种机制的作用下, 晶粒分布均匀且纳米晶体积分数减少^[12].

微纳结构 2507 双相不锈钢在 1 000 °C 变形量 40%、60% 和 80% 轧制后, 材料的强度逐渐提高, 这和硬度的变化趋势保持一致. 根据硬度和强度的经验换算关系式^[13]:

$$\sigma_b = 9.8 \times \left(\frac{2\ 463\ 622}{3\ 031 - H_V} - 801.633 \right) \quad (2)$$

计算得到材料的抗拉强度分别为 1 066、1 083、1 106 MPa, 硬度换算的强度远高于材料的实际抗拉强度. 这主要是由于铝热反应法制备的微纳结构合金内部有微量的气孔与夹杂, 轧制变形后组织中的部分气孔、疏松等缺陷消失, 夹杂物或脆性相的形态及分布得以改善, 再加上轧制使晶粒分布均匀, 材料的力学性能得到显著提高. 但夹杂物或脆性相依然会恶化材料的拉伸性能, 降低材料的抗拉强度. 而夹杂物或脆性相对材料的硬度影响不明显. 所以由硬度和强度的经验换算关系式得到的抗拉强度大于材料的实际抗拉强度. 材料在 1 000 °C 不同变形量轧制后, 微米晶中位错的作用与纳米晶体积分数的减少对延伸率的影响相互抵消, 延伸率基本不变.

4 结论

1) 热轧变形量 40%、60% 和 80% 下, 2507 双相不锈钢的 γ 相和 α 相都沿轧制方向拉长, 且轧制过程中发生 γ 向 α 转变. 2) 随着热轧变形量的增加, 钢中纳米晶体积分数逐渐减小. 3) 热轧变形量为 40%、60% 和 80% 后钢的屈服强度分别为 232、284、456 MPa; 抗拉强度分别为 533、577、582 MPa; 硬度分别为 325、330、337 HV; 延伸率分别为 12.5%、11.1% 和 11.5%. 总体材料强度提高, 延伸率基本保持不变.

参考文献:

- [1] 吴 玖. 双相不锈钢 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [2] CHARLES J, CHEMELLE P, 胡锦涛, 等. 双相不锈钢的发展现状及未来市场趋势 [J]. 世界钢铁, 2011, 11(6): 50-61.
- [3] ABBAS EGHLEMI, MORTEZA SHAMANIAN, KEYVAN RAEISSI. Effect of current type on microstructure and corrosion resistance of super duplex stainless steel claddings produced by the gas tungsten arc welding process [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 244(244): 45-51.
- [4] 陆世英. 超级双相不锈钢和高镍耐蚀合金 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [5] 傅绪鑫. 稀土元素 Ce 对超级双相不锈钢组织与热加工性能的影响 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [6] MANIKANDA SUBRAMANIAN K, CHANDRAMOHAN P, RAVISANKAR B. Influence of texture on the mechanical properties of hot rolled duplex stainless steels [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2011, 64(6): 519-534.
- [7] 盛 捷, 喇培清, 任军强, 等. SEM 原位观察双尺度纳米晶 304 不锈钢的断裂行为 [J]. 兰州理工大学学报, 2019, 45(2): 16-21.
- [8] LA P, WEI F, LU X, *et al.* Effect of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of bulk 316L stainless steel with nano- and micro-crystalline dual phases [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(11): 5236-5244.
- [9] 汪科良. 微纳结构 2507 双相不锈钢的制备及其力学性能轧制调控 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
- [10] CALVO J, JUNG I H, ELWAZRI A M, *et al.* Influence of the chemical composition on transformation behaviour of low carbon microalloyed steels [J]. Materials Science & Engineering A, 2009, 520(1/2): 90-96.
- [11] KINGKLANG S, UTHAISANGSUK V. Investigation of hot deformation behavior of duplex stainless steel grade 2507 [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48(1): 95-108.
- [12] SHI Y, LA P, HAN Y, *et al.* Rolling tuning microstructure and tensile properties of nano/microcrystalline 304 stainless steel [J]. Modern Physics Letters B, 2019, 33(28): 1950344 (1-12).
- [13] 王庆山. 黑色金属强度-硬度换算经验公式 [J]. 理化检验: 物理分册, 1995, 31(2): 39-40.