

引用格式: 陈璇, 乔建英, 李海斌, 等. 热轧工艺对不锈钢复合板焊缝组织及残余应力的影响[J]. 热加工工艺, 2025, 54(24): 27-35.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.25031144

<http://www.rjggy.net> rjggy@vip.163.com

热轧工艺对不锈钢复合板焊缝组织 及残余应力的影响

陈璇^{1,2}, 乔建英³, 李海斌^{1,2}, 智俊杰³, 帅美荣^{1,2}, 王建梅⁴

(1. 太原科技大学 高端重型机械装备研究院, 山西 太原 030024; 2. 太原科技大学 先进不锈钢国家重点实验室, 山西 太原 030024; 3. 山西成双法兰股份有限公司, 山西 忻州 035499; 4. 山西工程技术学院, 山西 阳泉 045000)

摘要:通过轧制真空复合板,分析热轧工艺对304不锈钢焊缝微观组织及残余应力的影响,压下率分别为:0%、10%、20%、30%、30%/20%。结果表明:随着轧制压下率的增加,晶粒分布逐渐均匀,平均晶粒直径由150.3 μm 减小至77.9 μm ;部分大角度晶界转变为小角度晶界(LAGB),LAGB占比由62.0%增加至89.6%;LAGB阻碍位错运动,使得位错在LAGB处聚集,几何必需位错密度由 $1.32 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$ 增加至 $3.61 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$;位错密度的增加导致材料内部晶格畸变程度增加,材料内部应力状态发生改变,残余应力由23.7 MPa的残余拉应力转变为114.3 MPa的残余压应力。

关键词:304不锈钢焊缝;真空热轧;微观组织;几何必需位错密度;残余应力

中图分类号: TG335.11

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2025)24-0027-09

Effect of Hot Rolling Process on Microstructure and Residual Stress of Stainless Steel Clad Plate Weld

CHEN Xuan^{1,2}, QIAO Jianying³, LI Haibin^{1,2}, ZHI Junjie³, SHUAI Meirong^{1,2}, WANG Jianmei⁴

(1. High-end Heavy Machinery and Equipment Research Institute, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Shanxi Chengshuang Flange Co., Ltd., Xinzhou 035499, China; 4. Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000, China)

Abstract: The influence of hot rolling process on the microstructure and residual stress of 304 stainless steel welds was investigated using a rolling vacuum composite plate, with rolling reduction ratios set at 0%, 10%, 20%, 30%, and 30%/20%. The results show that, as the rolling reduction ratio increases, the grain distribution becomes progressively uniform, and the average grain size diminishes from 150.3 μm to 77.9 μm ; a portion of high-angle grain boundaries transforms into low-angle grain boundaries (LAGB), with the proportion of LAGB rising from 62.0% to 89.6%; these LAGB impede dislocation movement, causing dislocations to accumulate at the LAGB, and the density of geometrically necessary dislocations increases from $1.32 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$ to $3.61 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$; the increased dislocation density leads to greater lattice distortion within the material, altering its internal stress state, resulting a stress transition from residual tensile stress of 23.7 MPa to residual compressive stress of 114.3 MPa.

Key words: 304 stainless steel weld; vacuum hot rolling; microstructure; geometrically necessary dislocation density; residual stress

现代工业领域, 不锈钢复合板因其卓越的耐腐

蚀性和良好的加工性能而备受青睐, 常被用于抵御高温、高压环境下的输送设备, 在法兰连接件的生产中也崭露头角^[1-3]。然而, 在不锈钢复合板制备过程中, 界面处易发生氧化产生脆性氧化物杂质, 使其结合强度降低^[4]。为降低甚至消除以上缺陷, 采用焊接性能较为优异的 ER304 不锈钢焊丝对复合板四周进行钨极惰性气体保护焊(TIG)焊合密封, 并抽真空使其内部成为封闭系统, 之后按照指定工艺对其

收稿日期: 2025-03-11 修回日期: 2025-07-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875382); 太原市关键核心技术攻关“揭榜挂帅”项目(2024TYJB0114); 忻州市重点研发计划项目(20240103)

作者简介: 陈璇, 男, 硕士, 主要研究方向: 不锈钢复合板焊缝轧制工艺;
E-mail: chenxuan_2023@163.com

通讯作者: 李海斌, 男, 副教授, 博士, 主要研究方向: 轧制工艺与装备;
E-mail: lihaibin@tyust.edu.cn

进行轧制。不锈钢焊缝起着板材之间的连接作用,更是真空复合板轧制的关键步骤。焊缝使复合板成为独立系统而与周围环境隔绝,还具有密封作用。在热轧过程中可防止复合板界面氧化,大大提高了板材之间的结合率和结合强度。现有研究大多针对复合板结合界面进行开展,而对复合板四周焊缝的研究鲜有报道。焊缝区域经历了液态到固态的转变,熔化后重新凝固的焊缝作为分析区域,与复合板覆板的304不锈钢板外观明显不同,并且焊缝区显微组织的晶粒更为粗大^[5-6]。因此,焊缝作为独立的研究单元,其微观组织及力学性能的研究尤为重要。304不锈钢焊缝因其固有的微观结构特征,可能存在组织不均匀、气孔、晶粒粗大等缺陷,在后续的加工和使用过程中出现耐腐蚀性较差、拉伸残余应力较高等较差的性能^[7]。Minh等^[8]通过TIG焊接304不锈钢时发现降低焊接电流有助于避免产生气孔。Liu等^[9]采用熔化极惰性气体保护焊的方式焊接304奥氏体不锈钢和Q235B碳钢,发现相较于母材区,焊缝区受热输入的影响,导致晶粒尺寸粗大和显微硬度低。李雨等^[10]采用TIG焊接304不锈钢,发现焊缝区晶粒粗大和焊接接头拉伸性能较差等问题,通过在TIG焊接过程中引入超声振动的方式,实现了晶粒细化,并有效提高了焊缝硬度、抗拉强度和屈服强度。Ogundimu等^[11]发现焊接电流相同时,相较于熔化极惰性气体保护焊,经TIG焊所得的304不锈钢焊接接头抗拉强度更高。

热轧作为一种重要的金属塑性加工方法,能够有效地改善材料的微观结构,从而提高其整体性能。为解决晶粒粗化现象,Yang等^[12]通过热轧不锈钢/碳钢液固结合层状复合材料,实现了晶粒细化。Ren等^[13]采用冷喷涂和热轧工艺相结合的方式制造出了具有优异的微观组织和机械性能的Mg-Al复合板。Ha等^[14]通过热轧304不锈钢,发现热轧可以细化微观结构,有助于形成稳定的钝化膜并加速钝化,以此显著提高了304不锈钢的局部抗腐蚀能力。吴跃等^[15]通过研究轧制对Super304H耐热钢的影响,发现轧制变形量越大,纳米级MX相越弥散,对晶界迁移的钉扎作用越强,进而对晶粒生长的抑制作用越明显。许海平等^[16]通过提升卷取温度,使得X80M热轧带钢晶粒尺寸增大,大角度晶界占比增加,位错密度降低,进而导致屈服强度和抗拉强度降低。潘龙等^[17]通过研究电流脉冲对45钢的影响,发现残余应

力与位错密度成正比。

通过热轧工艺改善304不锈钢焊缝微观组织及整体性能鲜有报道,但该工艺对优化焊接质量起着至关重要的作用。本文以TIG焊所得304不锈钢焊缝为研究对象,进行不同压下率的热轧试验。通过电子背散射衍射和X射线衍射等试验所得数据,分别对晶粒直径、晶界角取向差、几何必需位错密度和残余应力等进行分析,研究不同热轧工艺下304不锈钢焊缝微观组织及残余应力演变规律,为改善304不锈钢焊缝微观组织及整体性能奠定基础。

1 试验材料及方法

试验采用直径为 $\phi 24\text{mm}$ 的ER304不锈钢焊丝作为原材料,成分为(wt%):18.3Cr、8Ni、0.76Mn、0.41Si、0.036C、0.023P、0.001S,余为Fe,与不锈钢板成分相近。通过TIG焊将复合板板坯四周焊合。不锈钢复合板上下表面为 $140\text{mm}\times 120\text{mm}\times 3\text{mm}$ 的304不锈钢,中间夹层为 $130\text{mm}\times 110\text{mm}\times 5\text{mm}$ 的Q235碳钢,焊缝厚度为5mm。为保证焊缝的密封能力,复合板四周的焊缝略微突起形成凸面,如图1所示。具体焊接工艺参数为:直流正接,焊接电流128A,焊接速度100mm/min,氩气纯度99.9%,氩气流量12.5L/min。焊合四周后,使用型号为2×Z-2的双级高速直联结构旋片式真空泵对板坯进行抽真空处理,直至真空环境达到 $6.7\times 10^{-2}\text{Pa}$ 时,用液压钳将烧红的抽真空管前后两端钳紧,再将管口进行焊接密封,使之成为独立的封闭系统。使用箱式加热炉将不锈钢复合板板坯加热至1250℃、保温20min后,采用轧辊直径320mm、辊长350mm的二辊可逆轧机制备复合板,具体轧制工艺为:轧制速度0.1m/s,压下率分别为:(I)0%、(II)10%、(III)20%、(IV)30%、(V)30%/20%。试样I经加热、保温后进行空冷,未进行轧制,作为基准试样,与其他轧制试样对比微观组织及残余应力的变化。在试验过程中,制作了3层、4层不同层数的不锈钢复合板板坯试样,研究压下率对它

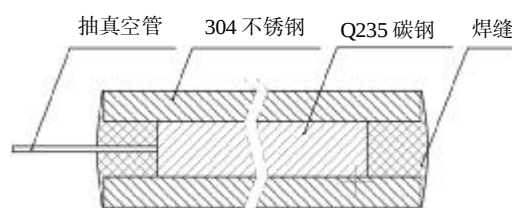


图1 不锈钢复合板坯示意图

Fig.1 Stainless steel composite slab diagram

们的影响,据此制定了以上轧制工艺。

试验完毕后,利用电火花线切割机沿复合板轧制方向仅切取复合板边缘 304 不锈钢焊缝作为分析试样。使用不同粒度的砂纸和不同目数的抛光布将试样表面进行机械磨抛至光滑镜面后,配制草酸溶液($10\% \text{H}_2\text{CrO}_4 + 90\% \text{H}_2\text{O}$)对试样表面进行电解腐蚀,电压为 30 V、电流为 1 A、电解时间为 20~55 s。使用安装在 Sigma 300 型扫描电镜上的电子背散射衍射仪(EBSD)、DX-2700BH 型 X 射线衍射仪等设备分析热轧工艺对不锈钢复合板焊缝显微组织及残余应力的影响。

2 试验结果

2.1 不锈钢焊缝晶粒

采用 EBSD 观察焊缝中部的微观形貌,得到不同

轧制工艺下的微观组织分布,如图 2 所示。由图 2 可看出:未轧制试样 I(图 2(a)),晶粒直径超过 $500 \mu\text{m}$ 的大晶粒较多,晶粒大小分布不均;压下率为 10% 的试样 II(图 2(b)),在轧制力的作用下晶粒变得细长,晶粒直径超过 $500 \mu\text{m}$ 的大晶粒有所减少,晶粒大小差异随之减小;压下率为 20% 的试样 III(图 2(c)),部分大晶粒内部出现了细小的晶粒;当压下率增大至 30% 时,试样 IV 中出现了细小晶粒的密集区域,且该区域分布在大晶粒附近(图 2(d));对于压下率为 30%/20% 的两道次轧制试样 V(图 2(e)),焊缝中部细小晶粒的聚集区域面积增大,仍分布在直径较大的晶粒附近,晶粒分布更加均匀。随着轧制压下率逐渐增大,晶粒尺寸逐渐变小,晶粒分布逐渐均匀。

为进一步定量分析奥氏体晶粒尺寸随轧制压下

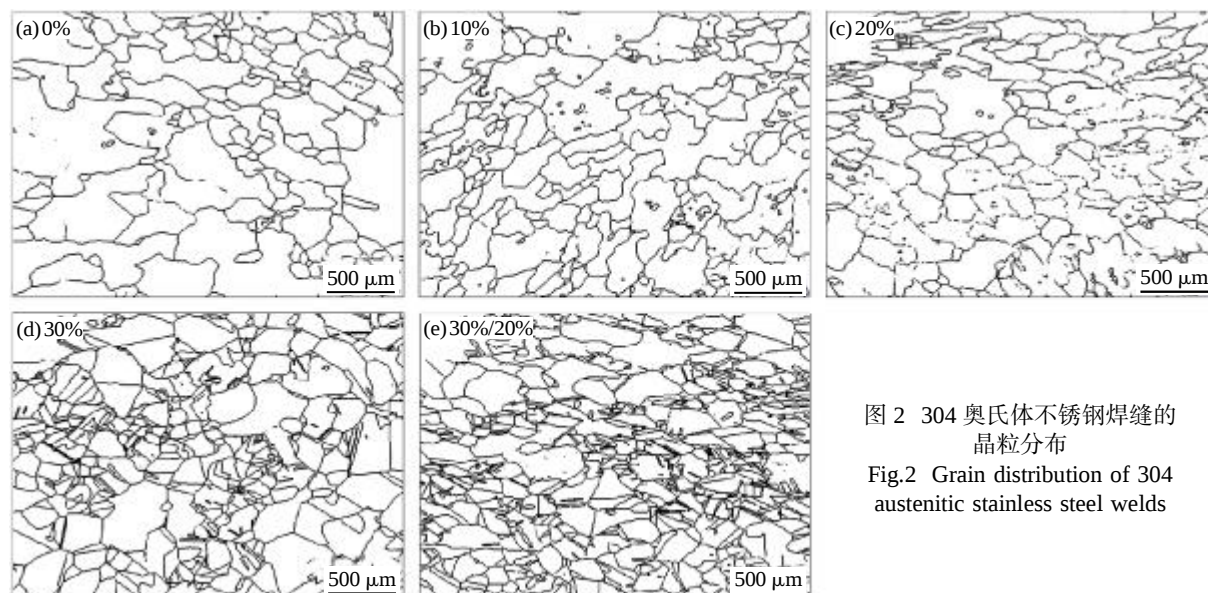


图 2 304 奥氏体不锈钢焊缝的晶粒分布
Fig.2 Grain distribution of 304 austenitic stainless steel welds

率的变化趋势,使用 AZtecCrystal 软件对不同轧制工艺下的不锈钢焊缝试样 EBSD 数据中的晶粒直径进行分析^[18],得到图 3 所示的晶粒直径分布图。

由图 3 可知,未轧制试样 I 晶粒较为粗大且分布不均匀,晶粒直径差异较为明显,最大晶粒直径大于 $800 \mu\text{m}$,晶粒直径在 $50 \mu\text{m}$ 以下的占比大于 10%, $200 \mu\text{m}$ 以上的占比小于 25%。当压下率为 10% 时,在轧制力的作用下,材料发生塑性变形导致晶粒细化,但因塑性变形程度较低,整体晶粒直径仍较大,最大晶粒直径大于 $725 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ 以下的占比大于 25%, $200 \mu\text{m}$ 以上的占比小于 20%。随着轧制压下率的逐渐增加,材料塑性变形程度逐渐增大,当压下率增加至 30%/20% 时,最大晶粒直径减小至 $500 \mu\text{m}$

以下, $50 \mu\text{m}$ 以下的占比大于 40%, $200 \mu\text{m}$ 以上的占比小于 5%。试验结果可知,晶粒直径基本符合高斯分布。由测量结果计算得到各试样平均晶粒直径,结果见表 1。根据各试样平均晶粒直径与标准差得到误差棒图(图 3(f))。由图 3(f)可知:随着轧制压下率由 0% 增加至 30%/20%,标准差逐渐降低,晶粒分布更加均匀,平均晶粒直径由 $150.3 \mu\text{m}$ 逐渐减小至 $77.9 \mu\text{m}$ 。

2.2 晶界角取向差

各试样晶界取向差分布如图 4 所示。试样 I 的小角度晶界(LAGB)较少,主要位于晶粒内部,大晶粒内部 LAGB 较多(图 4(a)矩形框内),小晶粒内部 LAGB 较少(六边形框内仅有一条 LAGB);试样 II(图

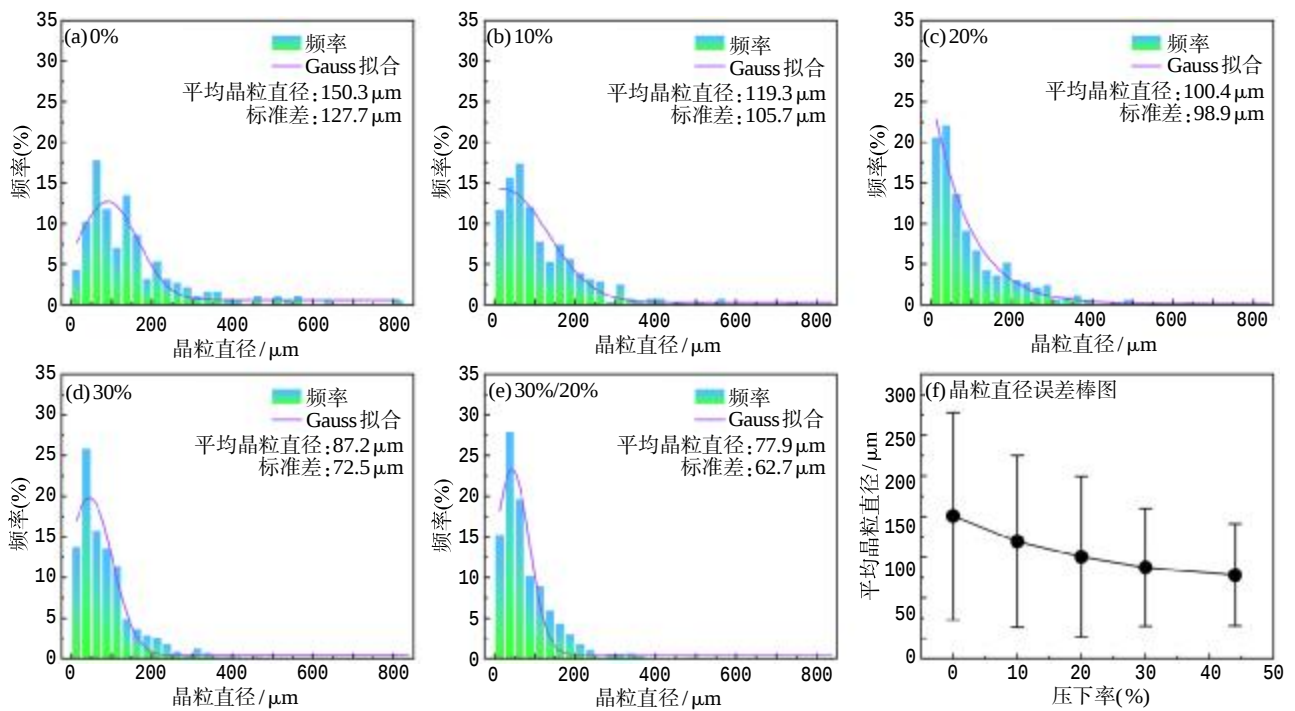


图3 奥氏体晶粒直径分布及变化趋势

Fig.3 The distribution and variation trend of austenite grain size

表1 不同热轧工艺下 304 不锈钢的相关计算结果
Tab.1 Related calculation results of 304 stainless steel under different hot rolling processes

试样编号	I	II	III	IV	V
平均晶粒直径 $D/\mu\text{m}$	150.3	119.3	100.4	87.2	77.9
小角度晶界占比 $R(\%)$	62.0	74.3	78.3	84.4	89.6
几何必需位错密度 $\rho^{\text{GND}}/10^{13} \text{ m}^{-2}$	1.32	1.88	1.96	2.8	3.61
残余应力 σ_r/MPa	23.7	-29.9	-50.6	-84.1	-114.3

4(b))的大晶粒内部的LAGB较多,矩形框内LAGB较长,部分晶粒内部出现点状LAGB(三角形框内);试样III(图4(c))的点状LAGB数量明显增多(三角形框内);随着变形量增大,试样IV(图4(d))的图中LAGB数量急剧增加,椭圆形框内的LAGB方向与轧制方向基本一致(图中横向为轧制方向);两道次轧制的试样V(图4(e)),密集的LAGB区域明显增多,且LAGB的方向性为短程有序,与轧制方向相同的LAGB的长度明显低于前者(椭圆形框内)。

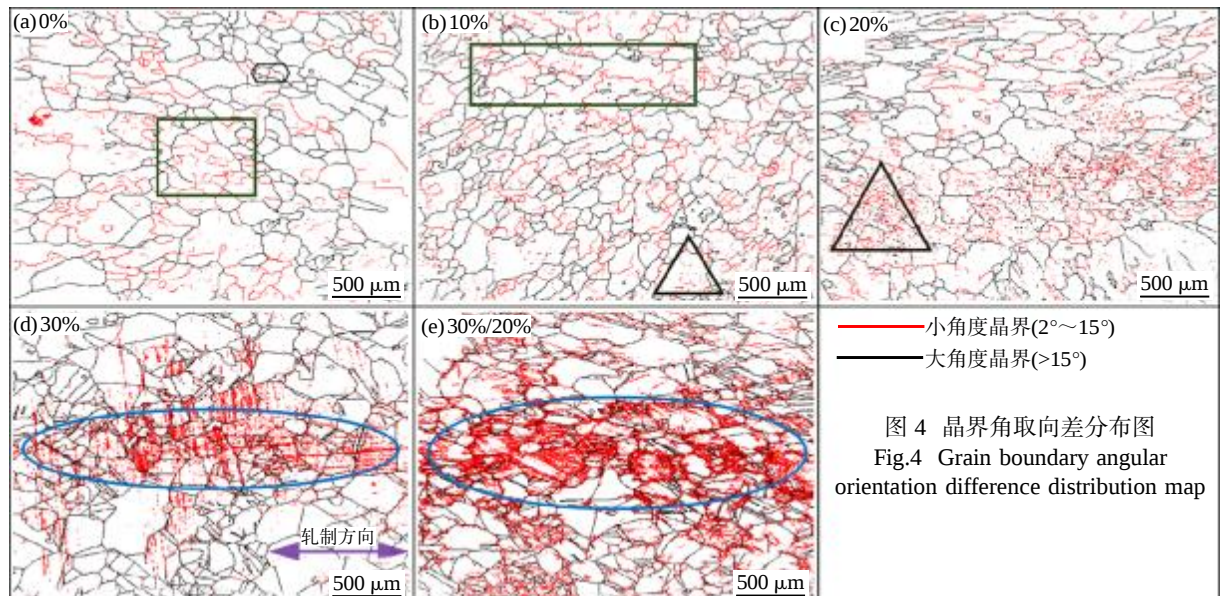


图4 晶界角取向差分布图
Fig.4 Grain boundary angular orientation difference distribution map

其原因为大晶粒相较于其他晶粒处于不稳定状态,在塑性变形过程中,粗大的晶粒内部较易形成小角度晶界,随着晶粒不断细化,LAGB 数量不断增多。一道次轧制的压下率增加,LAGB 沿滑移方向产生,其长度较长,而两道次轧制,滑移方向发生改变,LAGB 长度有所减小。LAGB 的形成可以进一步阻碍晶粒生长,实现晶粒细化,以此形成良性反馈系

统。相较于大角度晶界(HAGB),LAGB 的晶格错配度较低,原子排列较为有序,所具备的晶界能量较低,具有较高的稳定性,有助于提高材料整体强度、硬度和耐腐蚀性^[19-21]。

为进一步定量分析 HAGB、LAGB 数量随轧制压下率变化趋势,统计了各轧制工艺下的晶界角取向差数量,结果如图 5 所示。

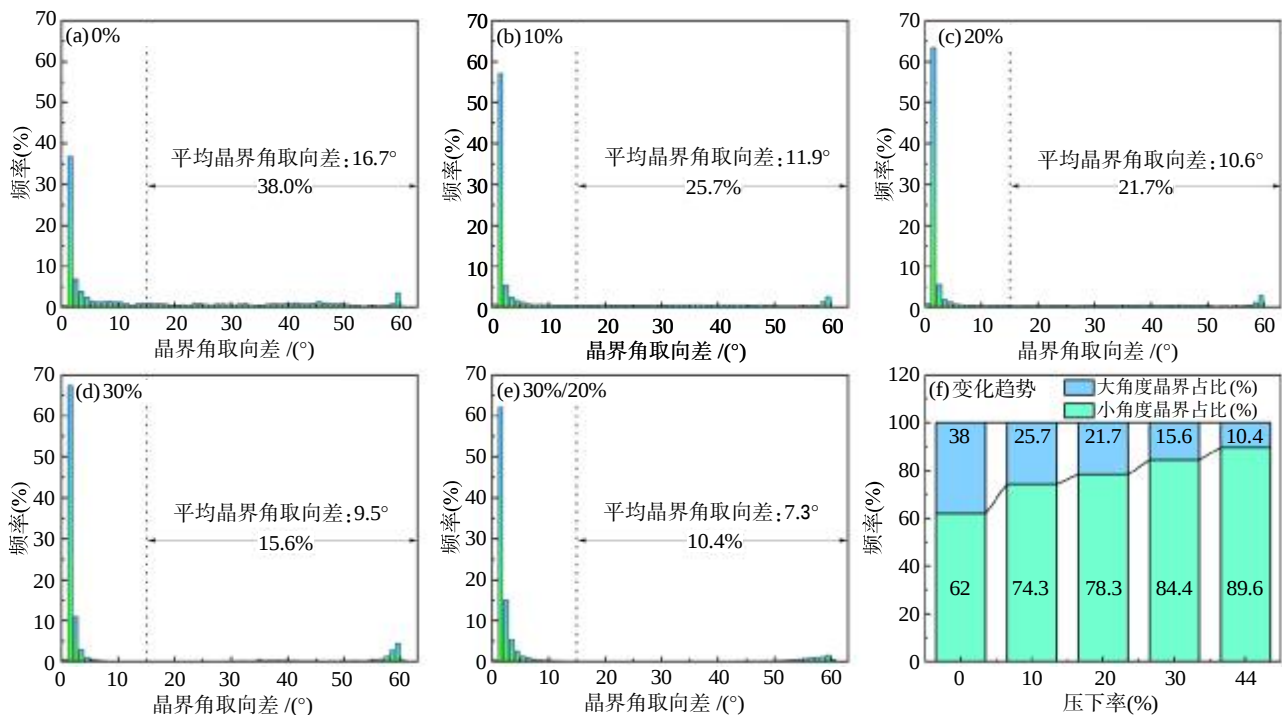


图 5 晶界角取向差频率分布直方图

Fig.5 Histograms of grain boundary angular orientation difference frequency distribution

经统计,各试样小角度晶界所占比例见表 1。未轧制试样小于 2°的晶界角取向差占比相对较少,大角度晶界占比和平均晶界取向差较大。对于单道次轧制试样,轧制压下率由 10%增加至 30%,晶界取向差小于 2°所占的比例逐渐增加,大角度晶界占比和平均晶界角取向差逐渐减小。压下率为 30%/20%的两道次轧制试样,小于 2°的取向差数量有所减少,但 2°~15°的取向差有所增加,平均晶界角取向差有所减小,小角度晶界占比仍处于增加趋势。此外,304 不锈钢焊缝随轧制压下率的增加,平均晶粒直径由 150.3 μm 减小至 77.9 μm,大角度晶界占比由 38%减小至 10.4%,小角度晶界占比由 62.0%增加至 89.6%,平均晶界角取向差由 16.7°减小至 7.3°。

2.3 几何必需位错密度

晶界角取向差影响几何必需位错密度^[22],为进一步分析晶界角取向差中小角度晶界对几何必需位错密度的影响,研究者常用平均取向差(KAM)研究

几何必需位错密度,KAM 值增加,几何必需位错密度增大^[23],两者间成正比,可用式(1)表示^[24-25]。

$$\rho^{\text{GND}} = 2\text{KAM}_{\text{ave}}/lb \quad (1)$$

式中: ρ^{GND} 为几何必需位错密度;KAM_{ave}为测量区域的平均 KAM 值;l 为 EBSD 所设定的扫描步长;b 为 Burger 矢量,其中奥氏体不锈钢取值 0.254 nm^[26]。

通过 EBSD 数据得到不同轧制工艺下不锈钢复合板焊缝区域的 KAM 分布,如图 6 所示。未轧制试样 KAM 值较低。对于轧制试样,在热轧过程中,小角度晶界可以阻碍位错运动,使得位错在小角度晶界处聚集。304 不锈钢焊缝在轧制力的作用下发生塑性变形,在热力耦合作用下使得位错在晶格中移动和增殖,进而导致几何必需位错密度的增加。几何必需位错密度在小角度晶界附近较大,对于晶粒内部,位错之间发生相互作用形成缠结,限制位错进一步运动,导致位错在晶粒内部区域也较为集中。随着轧制压下率的增加,晶粒内部应力水平提高,小角度

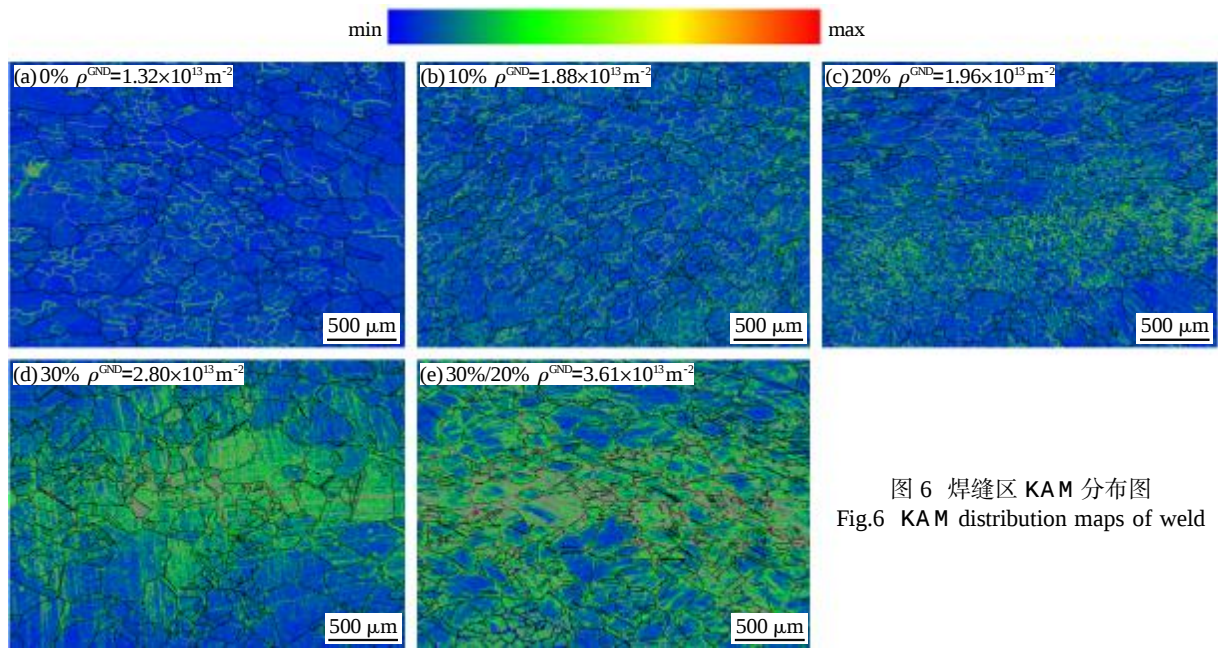


图6 焊缝区 KAM 分布图
Fig.6 KAM distribution maps of weld

晶界所占比例增加,新产生的小角度晶界作为新的位错源被激活,进而产生新的位错。小角度晶界还可作为位错移动的障碍,导致位错在晶界处形成堆积,进而增加几何必需位错密度,而位错在晶界处的积累会进一步导致小角度晶界的形成,以此小角度晶界与几何必需位错密度之间形成良性反馈系统。

在 EBSD 系统中,每个测量点的 KAM 值为该点与周围点的 KAM 平均值,根据式(2)、(3)进行计算^[27-28]:

$$KAM_{ave} = \exp \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln KAM_i \right] \quad (2)$$

$$KAM_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |KAM_j - KAM_i| \quad (3)$$

式中: KAM_i 为测量点*i*的 KAM 值; KAM_j 为测量点*j*周围点的 KAM 值。

经测量可得,不同轧制工艺下试样 KAM 趋势分布如图 7 所示。将所求得的 KAM 平均值代入式(1)计算出各试样的几何必需位错密度,结果见表 1。随着

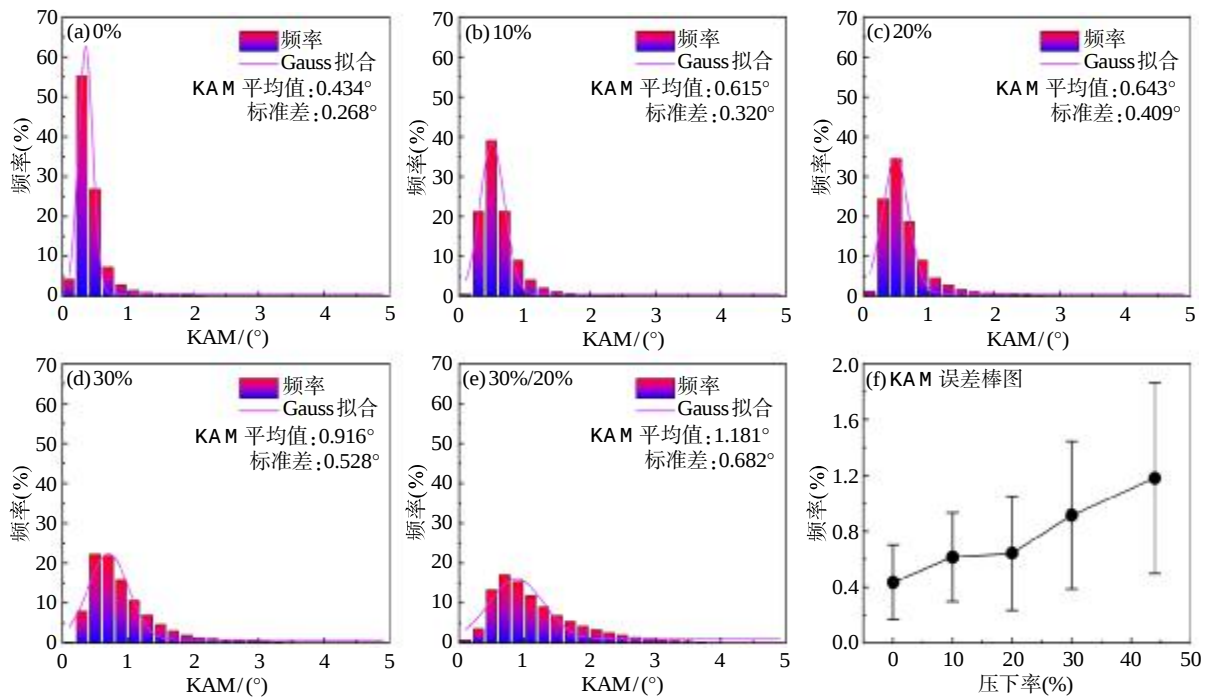


图7 试样的 KAM 分布直方图
Fig.7 Histograms of KAM distribution of samples

轧制压下率的增加,KAM 平均值和标准差均逐渐增大,变形均匀性逐渐增加。几何必需位错密度随轧制压下率的增加而增加,与小角度晶界及 KAM 变化趋势相一致,与平均晶界角取向差变化趋势相反,随着轧制压下率由 0%增加至 30%/20%,平均晶界角取向差由 16.7°减小至 7.3°,小角度晶界占比由 62.0%增加至 89.6%,KAM 平均值由 0.434°增加至 1.181°,几何必需位错密度由 $1.32 \times 10^{13} \text{m}^{-2}$ 增加至 $3.61 \times 10^{13} \text{m}^{-2}$ 。

2.4 几何必需位错密度对残余应力的影响

采用 X 射线衍射应力仪对 304 奥氏体不锈钢焊缝进行应力测试,试验选取{111}晶面所对应的奥氏体峰位来测定残余应力。测试采用 Cu 靶,扫描角度为 43°~44.5°,步进角度为 0.02°,扫描速度为 3s 每步,管电压为 40kV,管电流为 40mA。根据设备的使用方法,对焊缝试样的整个表面及近表面进行测试,在 0°、15°、25°、35°、45°等 5 种不同的衍射晶面测量方位角 ψ ,作为计算残余应力的基础参数。首先,根据残余应力与 X 射线弹性系数的关系式^[29]:

$$\sigma_r = K \cdot M \quad (4)$$

式中: σ_r 为残余应力值; K 为应力系数; M 为 X 射线弹性系数。

K 受到所选晶面在无应力的情况下对应的衍射角(θ_0)的影响, K 与 θ_0 的关系由式(5)计算:

$$K = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\pi}{180} \cot \theta_0 \quad (5)$$

式中: E 为弹性模量,取值 200 GPa; ν 为泊松比,取值 0.25^[30]。

M 由 $\sin^2(\psi)$ 法计算,见式(6):

$$M = \frac{\partial 2\theta}{\partial \sin^2(\psi)} \quad (6)$$

由 X 射线衍射应力仪测量结果,得到各试样 2θ 及 $\sin^2(\psi)$ 之间的线性关系与残余应力变化趋势(图 8)。由图 8 可以得到 M 值,代入式(4)计算出各试样残余应力,计算结果见表 1。为进一步分析轧制压下率对残余应力方向的影响,对 304 不锈钢焊缝残余应力数据进行拟合(图 9),得到式(7)残余应力 σ_r 与轧制压下率 ε 之间的关系:

$$\sigma_r = 209.423 \cdot e^{-\varepsilon/42.935} - 188.25 \quad (7)$$

由式(7)计算得出,当压下率为 5%时,残余拉应力与残余压应力平衡;当压下率大于 5%时,表现为残余压应力,反之表现为残余拉应力。未轧制试样表现为 23.7 MPa 的残余拉应力;轧制试样在热力耦合的作用下发生塑性变形,材料内部应力状态发生改变,当轧制压下率为 10%时,试样表现为 29.9 MPa 的残余压应力;随着轧制压下率逐渐增加至 30%/20%,残余压应力增加至 114.3 MPa。残余拉应力往往对材料产生不利影响,而残余压应力可以有效提高材料的力学性能、疲劳寿命和强度等^[31]。因此,随着轧制压下率的增加,残余压应力不断增大,焊缝质量不断提高。

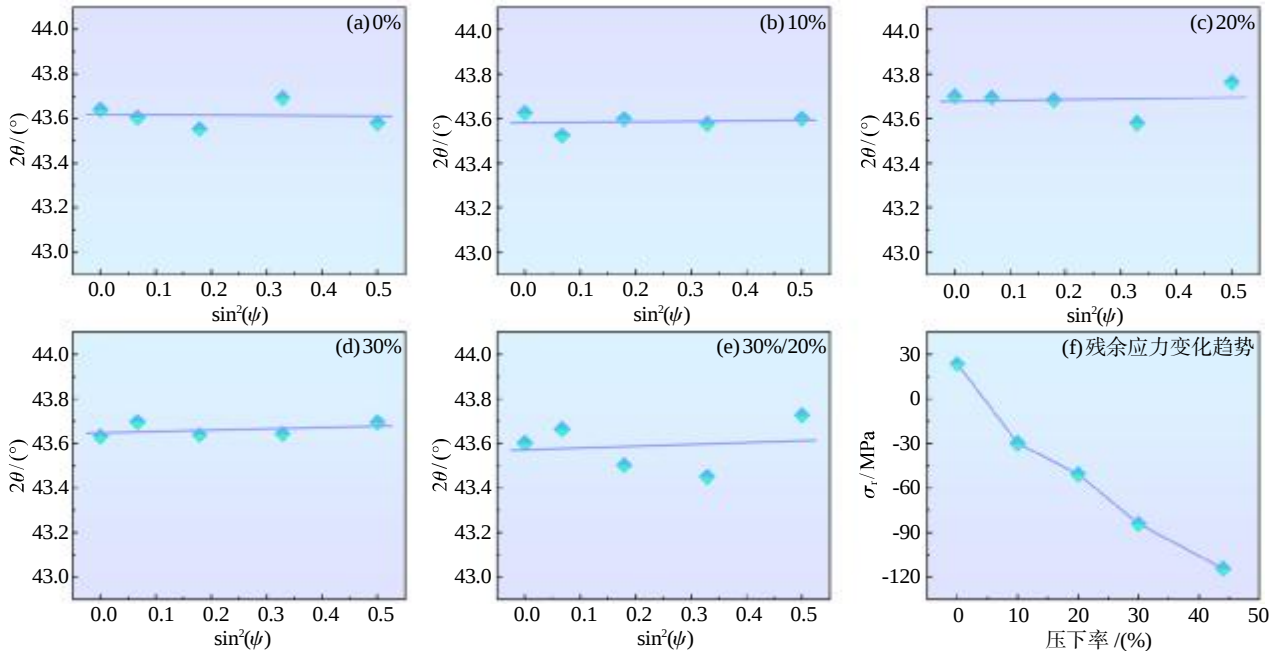


图 8 各试样 2θ - $\sin^2(\psi)$ 关系及残余应力变化趋势

Fig.8 The relation of 2θ - $\sin^2(\psi)$ and variation trend of residual stress of each sample

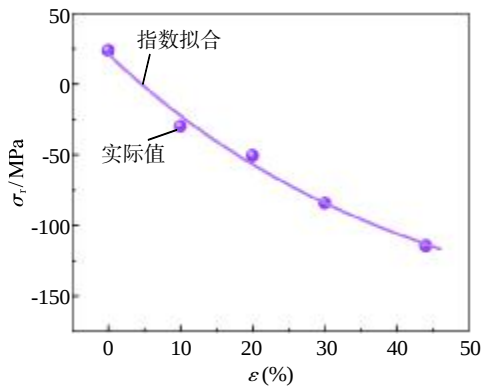


图9 σ_r 与 ε 之间的关系
Fig.9 The relationship between σ_r and ε

残余应力与几何必需位错密度之间的关系式^[32]为式(8):

$$\sigma_r = A G b \sqrt{\rho^{GND}} \quad (8)$$

式中: A 为常数; G 为剪切模量。

由式(8)可以得到残余应力与几何必需位错密度的平方根呈正相关。对不同热轧工艺下的残余应力和几何必需位错密度数据进行拟合(图 10),由结果可知两者之间具有较好的线性关系,与式(8)计算结果一致。

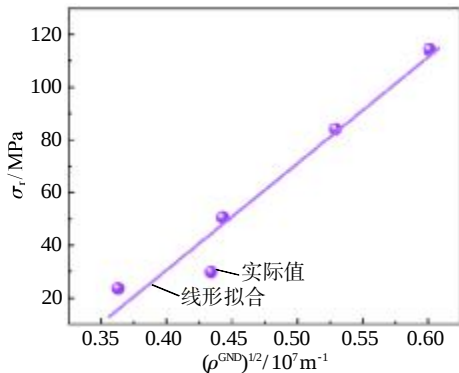


图 10 几何必需位错密度与残余应力的关系
Fig.10 The correlation between geometrically necessary dislocation density and residual stress

图 11 为不同热轧工艺下 304 不锈钢复合板焊缝小角度晶界占比(R)、几何必需位错密度与残余应力的关系图。由图 11 可知,随着轧制压下率由 0%增加至 30%/20%,304 不锈钢焊缝 R 由 62.0%增加至 89.6%,几何必需位错密度由 $1.32 \times 10^{13} \text{m}^{-2}$ 增加至 $3.61 \times 10^{13} \text{m}^{-2}$,残余应力由 23.7MPa 的拉应力转变为 114.3MPa 的压应力。材料在轧制力的作用下发生塑性变形,晶格中产生大量位错,通过滑移运动导致其数量增加,以至于局部晶格畸变致使应力集中,最终残余应力增加。

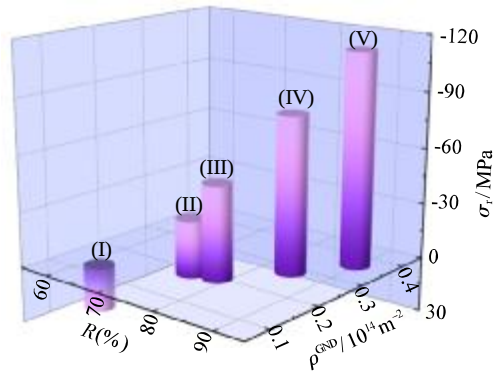


图 11 不锈钢焊缝 R 、 ρ^{GND} 与 σ_r 的关系
Fig.11 Relationship between R , ρ^{GND} and σ_r of stainless steel welds

3 结论

(1) 随着热轧压下率从 0%逐渐增加至 30%/20%, 304 不锈钢复合板焊缝的晶粒分布逐渐细化均匀,晶粒平均直径由 $150.3 \mu\text{m}$ 逐渐减小至 $77.9 \mu\text{m}$ 。

(2) 焊缝轧制后,不稳定的大角度晶界逐渐转变为较稳定的小角度晶界,随压下率的增加,小角度晶界占比由 62.0%逐渐增加至 89.6%,平均晶界角取向差由 16.7° 逐渐减小至 7.3° 。小角度晶界阻碍位错运动,使得位错在小角度晶界处聚集,几何必需位错密度由 $1.32 \times 10^{13} \text{m}^{-2}$ 逐渐增加至 $3.61 \times 10^{13} \text{m}^{-2}$ 。

(3) 根据残余应力与轧制压下率之间的拟合公式,可知压下率大于 5%时,试样由残余拉应力转变为残余压应力。未轧制的不锈钢焊缝为 23.7MPa 的残余拉应力,压下率由 10%逐渐增加至 30%/20%,残余压应力由 29.9MPa 增加至 114.3MPa。试验结果与理论计算结果一致。

参考文献:

- [1] 李宇航,井玉安,马旭,等. 采用线性摩擦焊制备 SUS304/Q235 不锈钢复合板研究[J]. 轧钢,2024,41(5):174-179.
- [2] 李亚新,刘元铭,王振华,等. 不锈钢/碳钢复合板纵波轧制搓轧变形机理[J]. 钢铁,2023,58(8):138-148.
- [3] 牛高林,李海斌,徐惠婷,等. 热轧 Q235 碳钢复合板有限元模拟及试验分析[J]. 热加工工艺,2024,53(24):28-33.
- [4] 蒋健博,厉文墨,刘芳芳,等. 不同真空度下轧制钛钢复合板的界面氧化行为[J]. 热加工工艺,2024,53(13):121-125.
- [5] Li H B, Zhang H M, Wang J M, et al. Interface layer deformation thickening analysis of hot rolling carbon steel-stainless steel clad plate [J]. Materials Research Express,2020,6(12):1265.
- [6] 牛高林. 热轧不锈钢复合板残余应力及组织演变机理[D]. 太原:太原科技大学,2024.

- [7] 钟世裕,邓宇,李远波,等. 错边量对 304 不锈钢氩弧焊端接头性能的影响[J]. 热加工工艺,2025,54(5):24-30.
- [8] Minh P S, Nguyen V T, Do T T, et al. Parameter optimization in orbital TIG welding of SUS 304 stainless steel pipe[J]. Metals,2023,14(1):5.
- [9] Liu J H, Li X H, Zhou Y J, et al. Microstructure and mechanical properties of active gas arc welding between 304 austenitic stainless steel and Q235B low carbon steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2022,31 (10): 8199.
- [10] 李雨,徐望辉,谢伟峰,等. 超声振动对 304 不锈钢窄间隙 TIG 焊接接头组织和力学性能的影响 [J]. 材料热处理学报,2023, 44(9):188-194.
- [11] Ogundimu E O, Akinlabi E T, Erinsho M F. Comparative study between TIG and MIG welding processes [J]. Journal of Physics:Conference Series,2019,1378(2):022074.
- [12] Yang Y H, Jiang Z Z, Chen Y T, et al. Interfacial microstructure and strengthening mechanism of stainless steel/carbon steel laminated composite fabricated by liquid-solid bonding and hot rolling [J]. Materials Characterization,2022,191:112122.
- [13] Ren Y P, Liu H H, Cui X Y, et al. An innovative and flexible approach to fabricate Mg/Al composite plates:cold spraying and hot rolling post-treatment [J]. Materials Science and Engineering A,2022,849:143515.
- [14] Ha H Y, Jang J H, Lee T H, et al. Enhancement of the resistance to localized corrosion of type 304 borated stainless steels through hot rolling[J]. Corrosion Science,2021,192:109798.
- [15] 吴跃,柴付方卓,王家庆,等. 高温软化和轧制对 Super304H 耐热钢晶粒长大的影响机理[J]. 热加工工艺,2025,54(5):96-100.
- [16] 许海平,史根豪,裴庆涛. 卷取温度对 X80M 热轧带钢微观组织及力学性能的影响[J]. 中国冶金,2024,34(7):113-121.
- [17] 潘龙,何闻,顾邦平. 电流脉冲对 45 碳钢试样位错密度和残余应力的影响[J]. 材料热处理学报,2015,36(S1):134-138.
- [18] Collins J, Taylor M, Scarlett A L, et al. Prior austenite grain measurement;a direct comparison of EBSD reconstruction, thermal etching and chemical etching [J]. Materials Characterization,2024,208:113656.
- [19] 方华婵,刘滩,朱佳敏,等. 微量铈和过渡元素对 Al-Zn-Mg-Cu 超强合金晶界特征和性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2019,29(7):1348-1359.
- [20] 何有洪,杨成,柴希阳,等. 终轧温度与终冷温度对 440 MPa 级船体钢组织与性能的影响[J]. 热加工工艺,2024,53(12):100-106.
- [21] Xu W, Xin Y C, Zhang B, et al. Stress corrosion cracking resistant nanostructured Al-Mg alloy with low angle grain boundaries[J]. Acta Materialia,2022,225:117607.
- [22] 许楠,张柏硕,齐天祥,等. HSn70-1 锡黄铜冷源辅助搅拌摩擦焊搅拌区的强化机制和应变硬化行为[J]. 焊接学报,2024,45 (1):17-22.
- [23] Serrano-Munoz I, Fernández R, Saliwan-Neumann R, et al. Dislocation structures after creep in an Al-3.85%Mg alloy studied using EBSD-KAM technique [J]. Materials Letters,2023,337: 133978.
- [24] 吴斯,李非凡,王学敏,等. 退火温度对转向架用低密度钢组织性能的影响[J]. 金属热处理,2024,49(6):8-16.
- [25] Zhang K, Liu X, Fan P, et al. Characterization of geometrically necessary dislocation evolution during creep of P91 steel using electron backscatter diffraction [J]. Materials Characterization,2023,195:112501.
- [26] He J Y, Ma Y, Yan D S, et al. Improving ductility by increasing fraction of interfacial zone in low C steel/304 SS laminates[J]. Materials Science and Engineering A,2018,726:288.
- [27] 吴飞飞,姜锋,路丽英,等. 5B70 铝合金大规格锻环不同位置的显微组织和位错密度[J]. 轻合金加工技术,2022,50(2):55-61.
- [28] 张婧,赵志博,辛文彬,等. 再结晶区变形后冷却速率对 Nb-V-Ti-N 微合金钢组织演变及力学性能的影响[J]. 材料热处理学报,2023,44(9):94-105.
- [29] 白伟,王文科,王智辉,等. 氢含量对氢化锆相结构和残余应力的影响[J]. 稀有金属,2024,48(1):138-144.
- [30] 高望峻,翟继婷,张卫文,等. 不锈钢网增强铅基非晶复合材料的压铸制备及力学性能[J]. 稀有金属材料与工程,2022,51 (11):4197-4206.
- [31] 王瑞鑫,陈超越,徐松哲,等. 激光增材制造中残余应力形成机理、表征及调控方法的研究进展[J]. 材料工程,2024,52(7): 15-32.
- [32] 卜家贺,冯露,张静. 残余应力及尺寸效应对纳米压痕力学性能的影响研究[J]. 应用力学学报,2020,37(6):2325-2331. 

欢迎订阅

欢迎赐稿