

形变热处理调控哈氏合金C276的晶界特征分布

马朝阳¹, 张晓峰¹, 刘廷光¹, 杨光昌²

1. 北京科技大学国家材料服役安全科学中心 北京 100083

2. 北京科技大学土木与资源工程学院 北京 100083

摘要: 哈氏合金C276为层错能较低的面心立方金属材料, 适用于晶界工程技术, 有可能通过控制晶界网络结构来进一步提高其抗晶间腐蚀性能。基于晶界工程技术理念, 研究了通过形变热处理(TMP)来调控哈氏合金C276的晶界特征分布的工艺方法。结果显示: 经过3%~7%冷轧和1150℃保温10min处理后, C276合金中的低 Σ CSL晶界比例达到70%以上, 其中主要是 $\Sigma 3$ 晶界(孪晶界), 形成了“由互为 $\Sigma 3$ 取向关系的晶粒”构成的大尺寸的晶粒团簇, 平均晶粒团簇尺寸达到110 μm 以上, 获得了较好的晶界工程处理效果。

关键词: 哈氏合金C276; 形变热处理; 重位点阵晶界; $\Sigma 3$ 晶界; 晶粒团簇

Grain boundary character distribution of hastelloy C276 modified by thermo-mechanical processing

MA Chaoyang¹, ZHANG Xiaofeng¹, LIU Tingguang¹, YANG Guangchang²

1. National Center for Materials Service Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Department of Civil Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: Hastelloy C276 is a face-centered cubic metal material with low stacking fault energy, which is suitable for grain boundary engineering. It is possible to further improve its intergranular corrosion resistance by controlling the grain boundary network structure. Based on the concept of grain boundary engineering, this paper studies the procedure of thermo-mechanical processing (TMP) to control the grain boundary characteristic distribution of Hastelloy C276. The results show that after 3%~7% cold rolling and 1150℃ holding for 10min, the proportion of low- Σ CSL grain boundaries in the C276 alloy reaches more than 70%. The $\Sigma 3$ boundaries (twin boundaries) occupy most of the CSL boundaries, resulting in the formation of large grain-clusters which are composed of grains with mutual $\Sigma 3$ orientation relationship. The average grain cluster size reaches more than 110 μm , and a good grain boundary engineering treatment effect is obtained.

Keywords: hastelloy C276; thermo-mechanical processing; CSL boundaries; $\Sigma 3$ boundary; grain-cluster

1 序言

研究发现, 材料中的晶界具有不同的抗晶间腐蚀能力, 有些晶界表现出比其他晶界更强的抗晶间

腐蚀能力。因此, WATANABE^[1]于20世纪80年代提出了“晶界设计与控制”的构想, 通过降低材料中性能差的晶界比例来提高材料的抗晶间腐蚀性能。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金-北京科技大学青年教师学科交叉研究项目(FRF-IDRY-22-015)资助。

第一作者: 马朝阳, 硕士研究生, 主要研究方向为晶界工程与腐蚀疲劳, E-mail: 13148042538@163.com。

通信作者: 刘廷光, 博士, 副研究员, 主要研究方向为核电材料服役安全, E-mail: tgliu@ustb.edu.cn。

到了90年代, LICHTEBERGER等^[2, 3]和RANDLE^[4, 5]通过大量研究将这一构想变成了现实, 发展为“晶界工程”(Grain Boundary Engineering, GBE)研究领域。在以黄铜、镍基合金、铝合金及奥氏体不锈钢等为主的中低层错能面心立方结构金属中, 通过合适的形变和热处理工艺, 称为形变热处理(Thermo-Mechanical Processing, TMP)^[6], 能够显著提高材料中的特殊结构晶界所占比例, 一般指 $\Sigma \leq 29$ 的低 Σ 重位点阵(Coincidence Site Lattice, CSL)晶界^[4]。CSL是描述晶界结构的主要模型, 该模型的提出可以追溯到1926年提出的晶体点阵旋转重合的概念^[7]。该概念设想了两个相同晶体结构的点阵在空间中互相延伸, 当这两个点阵之间的取向关系(轴角对 $[uvw]/\theta$)满足特定值时, 两个点阵中的阵点会发生周期性重合, 构成一个超点阵, 这种特殊的超点阵称为重位点阵(CSL)。如果某一晶界两侧的晶粒满足特定取向关系, 它们的晶体点阵向对方内部延伸时, 这两个点阵之间会发生周期性重合, 构成CSL, 也称超点阵^[4], 这样的晶界称为CSL晶界, 用重位阵点在原点阵中的密度的倒数进行量化描述, 即 Σ 值。 Σ 值越小, 表示重合的晶格阵点越多, 且 Σ 值仅取奇数。基于CSL模型, 特殊晶界一般指 $\Sigma \leq 29$ 的CSL晶界。与随机晶界相比, CSL晶界具有较高的共格阵点密度, 原子结构上的自由体积更小^[4], 晶界能更低这种晶界在抵抗原子偏聚、原子扩散、第二相析出以及晶间开裂等问题方面表现出更强的抗力, 是晶界工程处理期望获得的理想晶界。

哈氏合金是一种镍基耐腐蚀合金, 具有卓越的耐蚀性和高温性能, 在化工、核设施、航天及生物制药等领域具有广泛应用。C276作为哈氏合金的代表性牌号之一^[8, 9], 属于镍-钼-铁-钨系合金, 在恶劣化学环境下表现出优异的耐磨性和耐蚀性, 适用于制造各种化学设备, 如反应器、换热器、仪器、管道和阀门等。C276合金具有优异的加工性能, 支持多种成形和精密加工方式, 包括冷加工、热加工和机械加工, 并适合焊接、钎焊和铆接等连接方式, 满足复杂结构的使用需求。目前对哈氏合金C276已经开展了比较广泛的研究。DHANANCHEZIAN^[10]通过对哈氏合金C276进行液氮冷却, 以比较切削区域的温度、切削力分量、表面粗糙度参数及切屑形

态, 从而验证在深冷条件下哈氏合金C276切削性能的优越性。ZHANG等^[11]对哈氏合金C276在800℃下进行不同时间的老化处理, 以深入研究短期时效对该镍-铬-钼基高温合金析出行为和腐蚀特性的影响, 并基于研究结果提出了改善哈氏合金C276热加工工艺的建议。SINGH等^[12]则通过对哈氏合金C276在不同冷却条件和输入参数下进行试验, 深入研究其切削性能在各种冷却环境中的表现。对哈氏合金的晶界工程技术研究也有不少报道。ZHANG等^[13]通过对哈氏合金C276进行不同的冷轧处理, 并进行不同时间的固溶退火, 探讨了不同应变条件及退火工艺对合金晶界特征分布的影响, 并认为晶界特征分布优化对提升哈氏合金性能具有关键作用。ZHANG等^[14]在另外一项研究中分析了形变热处理对C276合金晶界特征分布和随机晶界网络连通性的影响, 认为非共格 $\Sigma 3$ 晶界对打断随机晶界网络连通性发挥重要作用。GUO等^[15]分析了C276合金经不同压下量热轧后 $\Sigma 3$ 和 $\Sigma 9$ 晶界的偏差角分布, 并用“五参数法”研究了晶界面取向, 揭示了 $\Sigma 3$ 和 $\Sigma 9$ 晶界经热轧后偏离标准取向的机理。

本文针对哈氏合金C276开展晶界工程技术研究, 探索通过形变热处理来调控哈氏合金C276显微组织的规律性及最佳处理工艺参数。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

本研究所用试验材料为哈氏合金C276, 其化学成分见表1。

表1 哈氏合金C276化学成分(质量分数)(%)

Ni	Mo	Cr	Fe	W	Mn
61.881	15.882	13.315	5.736	2.988	0.389

首先, 使用线切割切取3.79mm厚的试样, 多道次冷轧至0.96mm, 冷轧压下量为74.7%。将轧制后的C276试样密封在真空石英管中, 真空度为 1×10^{-3} Pa。将密封在石英管中的C276试样放入管式炉中进行退火处理, 退火温度为1150℃, 保温时间10min, 计时到后取出石英管放入自来水中并迅速砸破石英管, 试样水淬冷却, 得到始态样品, 编号记为SS; 然后, 对始态试样再次进行不同工艺的形变热处理(TMP), 冷轧压下量分别为3.1%、5.0%、6.5%、8.9%、11.5%、20.8%。将冷轧后的

试样再次密封在石英管中进行1150℃保温10min处理,采用同样的方式进行水淬冷却,得到6种处理状态的试样,试样编号分别记为TMP3、TMP5、TMP7、TMP9、TMP12和TMP21。

2.2 微观组织表征

使用电子背散射衍射(EBSD)对C276合金始态试样(SS)和形变热处理(TMP)的6种试样进行微观组织表征。首先将试样在金相砂纸上机械研磨至2000#,然后进行电解抛光,电解液为20% HClO_4 +80% CH_3COOH (体积分数),在室温下用40V直流电抛光约60s,得到平整光亮无应变层的抛光表面。使用配备在ZEISS EVO18场发射扫描电子显微镜(SEM)上的Oxford Instruments EBSD对样品表面微区进行取向分析,扫描步长设为2 μm 。使用HKL-Channel 5软件对EBSD数据进行取向成像和晶界特征分析,采用Palumbo-Aust标准判定CSL晶界类型^[16]。

3 结果与分析

3.1 晶界网络

大量的低 Σ CSL晶界($\Sigma \leq 29$)是晶界工程处理材料的典型显微组织特征,其中主要为 $\Sigma 3$ 晶界,即孪晶界^[5]。CSL晶界具有比随机晶界更强的抗晶间损伤能力,比如在晶间应力腐蚀开裂^[17, 18]、晶间腐蚀^[19]、氢脆^[20]等环境促进的开裂过程中表现出更强的抗晶间开裂性能,尤其 $\Sigma 3$ 晶界甚至被认为对晶间腐蚀免疫, $\Sigma 9$ 和 $\Sigma 27$ 等高阶 $\Sigma 3$ 晶界的抗晶间腐蚀表现也较为突出。图1所示为EBSD测得的哈氏合金C276始态试样和6种TMP试样的晶界网络分布,使用不同颜色区分显示不同 Σ 值的CSL晶界。从图1可看出,变形热处理(TMP)前后的试样中都含有大量的 $\Sigma 3$ 晶界,但不同的是,始态试样SS(见图1a)中的 $\Sigma 3$ 晶界绝大部分呈直线形貌,且一个晶粒内的孪晶界大多构成一组平行孪晶界;而经过变形热处理(TMP)后试样中的 $\Sigma 3$ 晶界构成形貌更加复杂的网络,尤其是TMP3(见图1b)、TMP5(见图1c)和TMP7(见图1d)这3个试样,且在这3个试样中形成了更多的 $\Sigma 9$ 、 $\Sigma 27$ 晶界,但它们的晶粒尺寸相对于始态试样变大;而形变量更大的3个试样,TMP9(见图1e)、TMP12(见图1f)和TMP21(见图1g),它们的晶粒尺寸和孪晶界形貌均与始

态试样较接近。

使用Channel 5软件分析EBSD数据可统计得到试样的各类型CSL晶界的百分比,如图2所示。从图2可看出,哈氏合金C276经不同工艺形变热处理后的晶界特征分布显著不同,与始态试样(SS)相比,变形热处理(TMP)试样的低 Σ CSL晶界比例受冷轧变形量影响,冷轧变形3%~7%试样经退火处理后的低 Σ CSL晶界比例达到约73%,比始态试样提高约10%;而经更大变形量冷轧($\geq 9\%$)及退火处理后试样的低 Σ CSL晶界比例降低到62%以下,并表现出随冷轧变形量增加,低 Σ CSL晶界比例逐渐降低的趋势,与始态试样相比,低 Σ CSL晶界比例处于相同甚至更低的水平。

图2还显示,CSL晶界中绝大部分为 $\Sigma 3$ 晶界(孪晶界),高阶孪晶界($\Sigma 9 + \Sigma 27$)的含量也较高,它们统称为孪晶相关晶界($\Sigma 3^n$ 晶界),而其他低 Σ CSL晶界(指除了 $\Sigma 3$ 、 $\Sigma 9$ 、 $\Sigma 27$ 之外的其他 $\Sigma \leq 29$ 的CSL晶界)的比例很低。 $\Sigma 3$ 晶界及 $\Sigma 9 + \Sigma 27$ 晶界的含量随冷轧变形量的变化规律与低 Σ CSL晶界类似,在3%~20%冷轧变形范围内,它们的占比都随冷轧变形量增加而降低,不同的是TMP处理试样的 $\Sigma 9 + \Sigma 27$ 晶界比例都明显高于始态试样,而经9%~20%冷轧和退火处理后试样的 $\Sigma 3$ 晶界比例反而低于始态试样,这说明冷轧变形量是决定TMP处理后试样晶界特征分布的关键因素。

由图2可知,C276合金经形变热处理后形成的高比例低 Σ CSL晶界中主要是 $\Sigma 3^n$ 晶界,这一结果与晶界工程处理过程中的晶界网络演化机制密切相关。已有研究提出了几种晶界网络演化模型,包括 $\Sigma 3$ 再激发模型^[5]、晶界分解机制^[21]以及晶粒团簇的形核与长大模型^[22, 23]等。根据晶粒团簇的形核与长大模型^[23, 24],晶粒团簇是在TMP过程中由单一晶核长大生成的,在再结晶前沿晶界迁移过程中发生了多重孪晶,依次形成了第一代、第二代及更高代次的孪晶,从而构成了孪晶链。因此,由图2可知,TMP处理试样中形成了高比例的 $\Sigma 3^n$ 晶界,表现为大尺寸的“互有 $\Sigma 3^n$ 取向关系晶粒构成的团簇”这一显微组织。该组织称为“晶粒团簇”^[25-27],是由多个晶粒组成的连通的区域,或者认为是由一个孪晶链构成的,其内的所有晶粒之间互有 $\Sigma 3^n$ 取向关系,因此团簇内部的晶界均为 $\Sigma 3^n$ 类型,这正

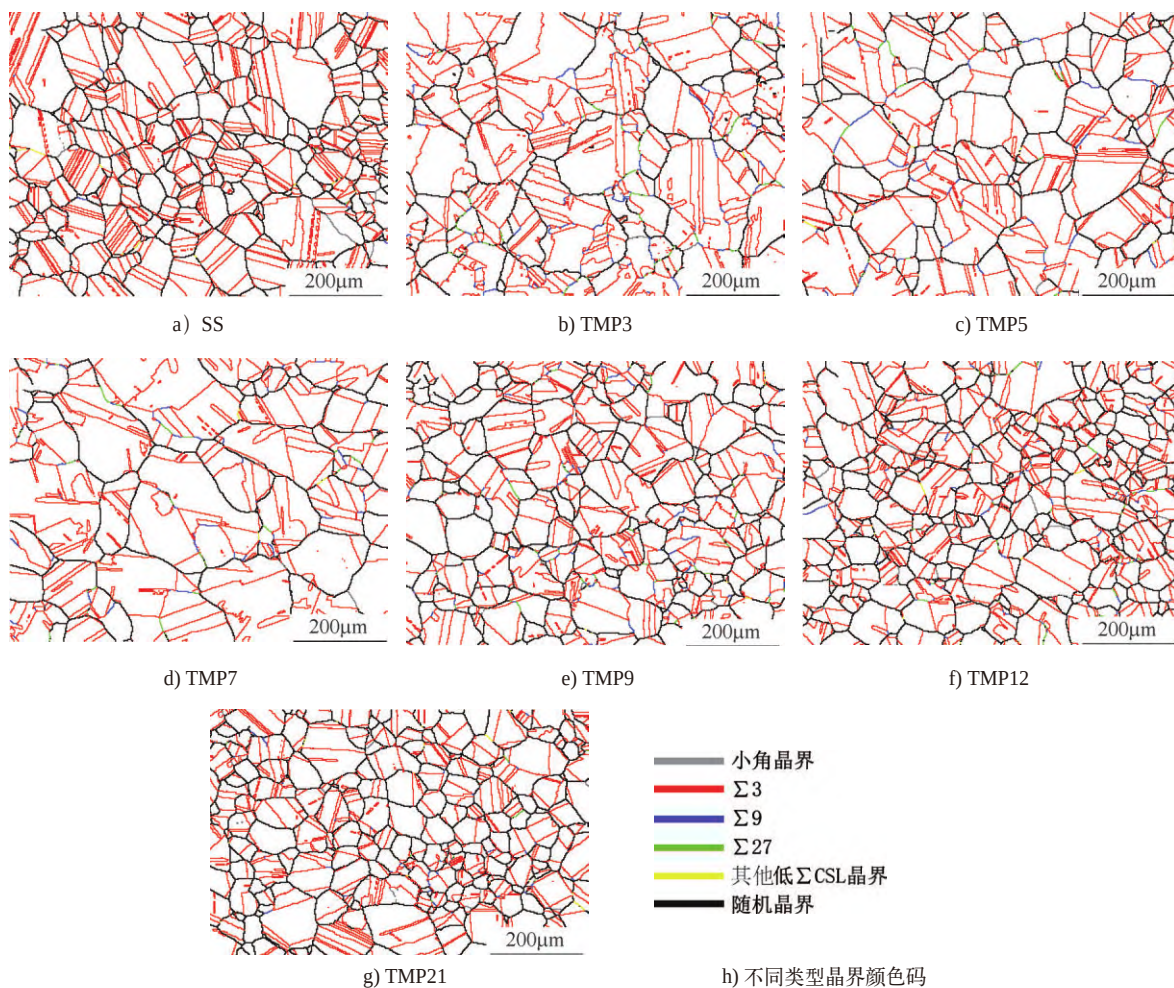


图1 始态试样 (SS) 及经过不同工艺形变热处理 (TMP) 试样的EBSD晶界类型分布

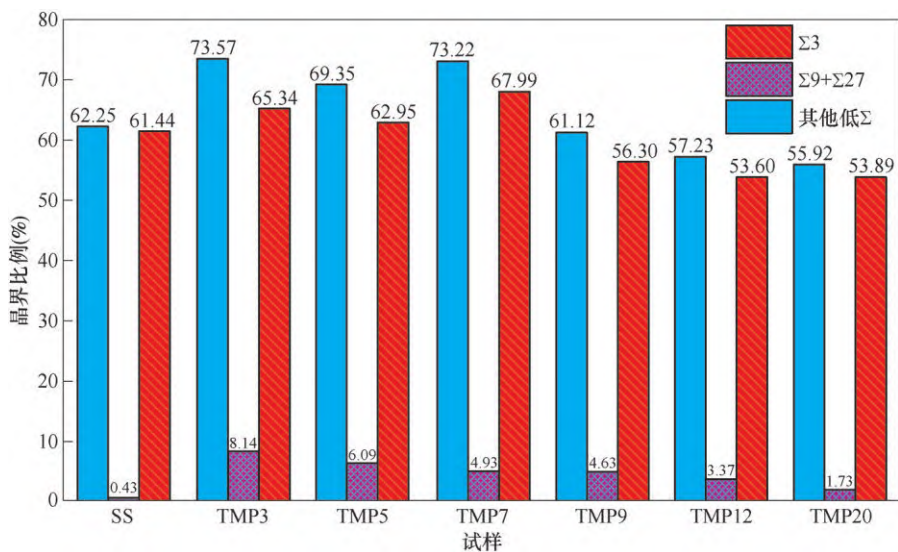


图2 哈氏合金C276始态试样 (SS) 及经不同工艺形变热处理 (TMP) 试样的CSL晶界百分比直方图

是TMP处理试样中的CSL晶界主要是 $\Sigma 3^n$ 晶界的原因。晶粒团簇的外围晶界则是晶体取向上随机形成的，一般是随机晶界。

3.2 晶粒与晶粒团簇尺寸

通过对图1和图2的分析可知，经变形热处理 (TMP) 的哈氏合金C276中形成了互有 $\Sigma 3^n$

($n=1, 2, 3, \dots$)取向关系晶粒构成的大尺寸晶粒团簇,晶粒尺寸也发生了变化。利用Channel 5软件中的等效圆直径法统计各个样品的平均晶粒尺寸 d 和平均晶粒团簇尺寸 D ,结果如图3所示。本研究中南晶记为晶粒进行统计尺寸。由图3可看出,在3%~7%的冷轧范围内,TMP试样的平均晶粒尺寸随着冷轧程度的增加而增大,这可能与孪晶形成的概率有关。在这一变形范围内,较低的冷轧变形量有助于孪晶的形成^[28],而较大的变形量则更易导致晶界迁移,从而直接促使晶粒长大。然而,经过更大冷轧变形处理的试样,其平均晶粒尺寸随着变形量的增加而减小,这主要是由于形变量对再结晶形核率的影响所致。这表明冷轧程度对晶粒尺寸的影响存在一定的规律性。

变形热处理(TMP)试样中形成大尺寸的晶粒团簇显微组织对材料的耐蚀性有着重要影响^[29-31]。由图3还可看出,C276合金经3%~7%冷轧和退火处理后,试样的平均晶粒团簇尺寸都达到100 μm 以上,远大于始态试样的61.05 μm 。但随着冷轧变形量的进一步增大,TMP处理试样的平均晶粒团簇尺寸则会下降,变形量达到 $\geq 12\%$ 时,变形热处理(TMP)后试样的晶粒团簇平均尺寸与始态试样处于相同水平。另外,图3中的误差棒显示晶粒团簇和晶粒尺寸的波动范围都很大,表明晶粒团簇和晶粒尺寸的分布都不均匀。

为了实现良好的抗晶间腐蚀性能和力学性能,需要在晶界工程处理中形成大尺寸的晶粒团簇,

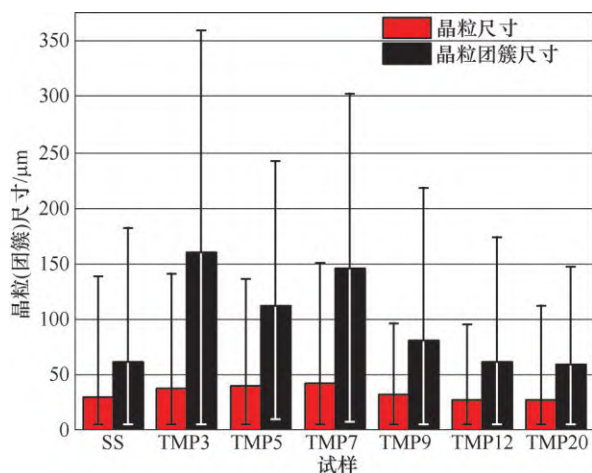


图3 哈氏合金C276始态试样(SS)及经不同工艺变形热处理(TMP)试样的平均晶粒尺寸 d 和晶粒团簇平均尺寸 D

同时保持较细的晶粒尺寸。可以通过平均晶粒团簇尺寸与平均晶粒尺寸比值的平方,即 $(D/d)^2$ 值,来近似地表示晶粒团簇内部的平均晶粒数。该参数可以反映显微组织中是否形成了以大尺寸“ $\Sigma 3$ ”取向关系晶粒的团簇”为特征的晶界网络分布,同时试样仍具有较小的晶粒尺寸。 $(D/d)^2$ 值的分布与TMP形变量的分布以及低 Σ CSL晶界比例的分布一致,如图4所示。这表明,为了通过TMP处理获得高比例的低 Σ CSL晶界和较高的 $(D/d)^2$ 值,需要选择合适的冷轧处理工艺,其中3%~7%的冷轧变形量较为适宜。

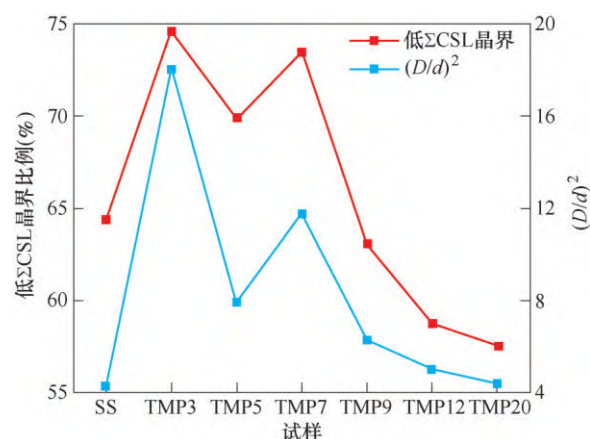


图4 SS及TMP试样中晶粒团簇的平均晶粒数与低 Σ CSL晶界比例关系

4 结束语

基于晶界工程技术理念,本文研究了调控哈氏合金C276的晶界特征分布的形变热处理(TMP)工艺方法,主要研究结论如下。

1) 在经过3%~7%的冷轧和1150 $^{\circ}\text{C}$ 保温10min处理后,C276合金中的低 Σ CSL晶界比例达到了70%以上,其中主要是 $\Sigma 3$ 晶界(孪晶界)。这种处理形成了由互为 $\Sigma 3$ 取向关系的晶粒构成的大尺寸晶粒团簇,平均晶粒团簇尺寸超过110 μm 。若进一步增加形变量,则会导致变形热处理(TMP)后试样的 Σ CSL晶界比例和晶粒团簇尺寸均降低。

2) 在经过3%冷轧和1150 $^{\circ}\text{C}$ 保温10min处理后,C276合金表现出最佳的晶界工程处理效果,具备较强的抗晶间腐蚀性能。

参考文献:

- [1] WATANABE T. Approach to grain boundary design for strong and ductile polycrystals[J]. Res

- Mechanica, 1984, 11 (1) : 47-84.
- [2] PALUMBO G, KING P J, AUST K T, et al. Grain boundary design and control for intergranular stress-corrosion resistance[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, 25 (8) : 1775-1780.
- [3] LEHOCKEY E, LIMOGES D, PALUMBO G, et al. On improving the corrosion and growth resistance of positive Pb-acid battery grids by grain boundary engineering[J]. Journal of Power Sources, 1999, 78 (1-2) : 79-83.
- [4] RANDLE V. The Role of the Coincidence Site Lattice in Grain Boundary Engineering[M]. Cambridge : Cambridge University Press, 1996.
- [5] RANDLE V. Twinning-related grain boundary engineering[J]. Acta Materialia, 2004, 52 (14) : 4067-4081.
- [6] ALYOUSIF O M. On the influence of thermo-mechanical process history on stress corrosion cracking of solution annealed type 304 stainless steel[J]. Nuclear Materials and Energy, 2021, 29: 101074.
- [7] KRONBERG M, WILSON U F. Secondary recrystallization in copper [J]. JOM, 1949, 1 (8) : 501-514.
- [8] ATAPEK H, TÜMER M, ÇELIKKOL E, et al. Microstructural, mechanical and corrosion behavior of UNS S31803/Hastelloy C-276 dissimilar metal welds[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2023, 40: 129-141.
- [9] MEHTA M V, VORA J J, CHAUDHARI M D. A review of challenges to hastelloy-C series weld overlay; Recent Advances in Mechanical Infrastructure: Proceedings of ICRAM 2020[C]. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2021: 157-172.
- [10] DHANANCHEZIAN M. Study the machinability characteristics of Nicked based Hastelloy C-276 under cryogenic cooling[J]. Measurement, 2019, 136: 694-702.
- [11] ZHANG C, LIN L, CHEN R, et al. Grain boundary engineering and its effect on intergranular corrosion resistance of a Ni-Cr-Mo based C276 superalloy[J]. Crystals, 2022, 12 (11) : 1625.
- [12] SINGH G, AGGARWAL V, SINGH S. Experimental investigations into machining performance of Hastelloy C-276 in different cooling environments[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2021, 36 (15) : 1789-1799.
- [13] ZHANG X Y, ZHONG J, GUO S L, et al. Control of deformation and annealing process to produce incoherent $\Sigma 3$ boundaries in Hastelloy C-276 alloy[J]. Nuclear Materials and Energy, 2021, 27: 100944.
- [14] ZHANG X, GUO S, ZHONG J. Microevolution of grain boundary character distribution in Hastelloy C-276 during the annealing process[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 1534-1541.
- [15] GUO S, ZHANG X, ZHONG J, et al. Study on deviation distribution of $\Sigma 3$ and $\Sigma 9$ boundaries in Hastelloy C-276 superalloy with different hot rolling reductions[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 2007-2017.
- [16] PALUMBO G, AUST K T. Structure-dependence of intergranular corrosion in high purity nickel[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1990, 38 (11) : 2343-2352.
- [17] WEST E, WAS G. IGSCC of grain boundary engineered 316L and 690 in supercritical water[J]. Journal of Nuclear Materials, 2009, 392 (2) : 264-271.
- [18] GERTSMAN V, BRUEMMER S M. Study of grain boundary character along intergranular stress corrosion crack paths in austenitic alloys[J]. Acta Materialia, 2001, 49 (9) : 1589-1598.
- [19] TELANG A, GILL A S, ZWEIACKER K, et al. Effect of thermo-mechanical processing on sensitization and corrosion in alloy 600 studied by SEM-and TEM-Based diffraction and orientation imaging techniques[J]. Journal of Nuclear Materials, 2018, 505: 276-288.
- [20] BECHTLE S, KUMAR M, SOMERDAY B P, et al. Grain-boundary engineering markedly reduces susceptibility to intergranular hydrogen embrittlement

- in metallic materials[J]. Acta Materialia, 2009, 57 (14) : 4148-4157.
- [21] KUMAR M, SCHWARTZ A J, KING W E. Microstructural evolution during grain boundary engineering of low to medium stacking fault energy fcc materials[J]. Acta Materialia, 2002, 50 (10) : 2599-2612.
- [22] XU S, WU X, HAN E, et al. Crack initiation mechanisms for low cycle fatigue of type 316Ti stainless steel in high temperature water[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 490 (1-2) : 16-25.
- [23] LIU T, XIA S, LI H, et al. The highly twinned grain boundary network formation during grain boundary engineering[J]. Materials Letters, 2014, 133: 97-100.
- [24] XIA S, ZHOU B, CHEN W, et al. Effects of strain and annealing processes on the distribution of $\Sigma 3$ boundaries in a Ni-based superalloy[J]. Scripta Materialia, 2006, 54 (12) : 2019-2022.
- [25] GERTSMAN V Y, HENAGER C H. Grain boundary junctions in microstructure generated by multiple twinning[J]. Interface Science, 2003, 11: 403-415.
- [26] XIA S, ZHOU B, CHEN W. Effect of single-step strain and annealing on grain boundary character distribution and intergranular corrosion in Alloy 690[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43: 2990-3000.
- [27] XIA S, ZHOU B, CHEN W. Grain cluster microstructure and grain boundary character distribution in alloy 690[J]. Metallurgical and Materials Transactions: A, 2009, 40: 3016-3030.
- [28] LIU T, XIA S, ZHOU B, et al. Effect of initial grain sizes on the grain boundary network during grain boundary engineering in Alloy 690[J]. Journal of Materials Research, 2013, 28 (9) : 1165-1176.
- [29] LIND J, LI S F, KUMAR M. Twin related domains in 3D microstructures of conventionally processed and grain boundary engineered materials[J]. Acta Materialia, 2016, 114: 43-53.
- [30] FUJII T, SUZUKI M, SHIMAMURA Y. Susceptibility to intergranular corrosion in sensitized austenitic stainless steel characterized via crystallographic characteristics of grain boundaries[J]. Corrosion Science, 2022, 195: 109946.
- [31] XIA S, LI H, LIU T G, et al. Applying grain boundary engineering to Alloy 690 tube for enhancing intergranular corrosion resistance[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 416 (3) : 303-310.

MW 20241031

(下转第104页)

- [26] CUNHA C F A, DE OLIVEIRA G J, DE CARVALHO H M B. A new approach to reduce the carbon footprint in resistance spot welding by energy efficiency evaluation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119 (9) : 6503-6520.
- [27] 崔厚学, 刘昌雄, 孙志强, 等. 轻量化铝合金车身连接技术及其评价[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (4) : 13-16.
- [28] PODRŽAJ P, SIMON I S. Resistance spot welding control based on fuzzy logic[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52: 959-967.
- [29] LI W, DANIEL C, GA G. A comparative study of single-phase AC and multiphase DC resistance spot welding[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005 (3) : 583-589.
- [30] NAGASATHYA N, BOOPATH S R, SANTHAKUMARI A. MFDC-An Energy efficient adaptive technology for welding of thin sheets: International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability[C]. USA: IEEE, 2013: 901-906.
- [31] ZHOU K, CAI L L. On the development of nugget growth model for resistance spot welding[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115 (16) : 45-75.

MW 20240904