

Inconel 617 镍基合金冷轧变形后晶界分布特征研究

曹峰华¹, 张浩杰¹, 马广才², 余鸣亮³, 胡红磊¹

(1. 上海电机学院 机械学院, 上海 201306; 2. 中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016;

3. 浙江联大锻压有限公司, 浙江 温州 325207)

摘要: Inconel 617 合金是一种 Ni-Cr-Co-Mo 强化的镍基高温合金。以 Inconel 617 合金为研究对象, 采用电子背散射衍射技术分析其冷轧变形后的晶界分布特征。结果表明: 通过 15% 冷轧变形, 随后在 1200 °C 保温 1 h, 再以 5 °C · min⁻¹ 的冷却速度冷却至 700 °C 保温 8 h 后取出水冷的形变退火控冷热处理工艺, 可在合金中获得 70% 以上的 $\Sigma 3^n$ 晶界, 同时将剩余部分平直随机晶界转变为锯齿晶界。其中, $\Sigma 3$ 、 $\Sigma 9$ 和 $\Sigma 27$ 晶界的比例分别为 63.6%、4.5% 和 2.3%, 锯齿晶界的平均振幅为 0.72 μm 。协同引入两类特殊晶界, 将进一步提高特殊三叉晶界的比例, 为改善材料性能提供了新的思路, 并揭示了 Inconel 617 合金锯齿晶界的形成与晶界析出的间断分布的 Mo_6C 和 Cr_{23}C_6 型碳化物钉扎晶界有关。

关键词: Inconel 617 合金; $\Sigma 3^n$ 晶界; 锯齿晶界; 三叉晶界; 碳化物; 冷轧变形

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.12.026

中图分类号: TG161

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 12-0182-06

Study on grain boundary distribution characteristics for Inconel 617 Ni-based alloy after cold rolling deformation

Cao Fenghua¹, Zhang Haojie¹, Ma Guangcai², Yu Mingliang³, Hu Honglei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3. Zhejiang Lianda Forging Co., Ltd., Wenzhou 325207, China)

Abstract: Inconel 617 alloy is a Ni-Cr-Co-Mo reinforced nickel-based high-temperature alloy. For Inconel 617 alloy, the grain boundary distribution characteristics after cold rolling deformation was analyzed by using electron backscatter diffraction (EBSD) technology. The results indicate that through the heat treatment process of deformation annealing and controlled cooling which has 15% cold rolling deformation, followed by holding at 1200 °C for 1 h, and then cooling to 700 °C at a cooling rate of 5 °C · min⁻¹ and holding for 8 h, and taking out for water cooling, more than 70% of $\Sigma 3^n$ grain boundaries are obtained in the alloy, and the remaining straight random grain boundaries are transformed into serrated grain boundaries simultaneously. Among them, the proportions of $\Sigma 3$, $\Sigma 9$ and $\Sigma 27$ grain boundaries are 63.6%, 4.5% and 2.3%, respectively, and the average amplitude of serrated grain boundaries is 0.72 μm . The collaborative introduction of two types of special grain boundaries further increases the proportion of special trifurcated grain boundaries and provides new ideas for improving the material properties. At the same time, it is revealed that the formation of serrated grain boundaries in Inconel 617 alloy is related to the pinning grain boundaries of Mo_6C and Cr_{23}C_6 carbides with intermittent distribution which are precipitated at the grain boundaries.

Key words: Inconel 617 alloy; $\Sigma 3^n$ grain boundary; serrated grain boundary; trifurcated grain boundary; carbide; cold rolling deformation

镍基高温合金常作为重要结构材料而被广泛应

用于严苛环境中, 如燃气轮机、超超临界火力发电厂 (Advanced Ultra Super Critical Power Plants, A-USC)、超高温反应堆 (Very High-temperature Reactors, VHTR) 以及航空航天等^[1-2]。镍基合金锻件的研制已成为国际上新产品研究开发的热点和重点。Inconel 617 合金是一种 Ni-Cr-Co-Mo 强化的镍基高温合金, 因其具有较好的组织稳定性^[3]、优异的耐腐蚀性能^[4]、抗高温氧化性能^[5]和抗高温蠕变疲劳性能^[6-7], 成为高温关键部件的重要候选材料。合

收稿日期: 2023-04-22; 修订日期: 2023-08-03

基金项目: 上海市“科技创新行动计划”自然科学基金资助项目 (21ZR1424600); 上海市科委地方院校能力建设三年行动计划 (23010500800)

作者简介: 曹峰华 (1985-), 男, 硕士, 实验员

E-mail: 383329008@163.com

通信作者: 胡红磊 (1990-), 男, 博士, 讲师

E-mail: huhl@sdju.edu.cn

金锻件的性能与锻件组织有着密切的联系, 其在使用过程中常发生与晶界有关的失效, 例如: 高温蠕变过程中, 晶界和三叉晶界处形成蠕变空洞, 从而发生沿晶开裂失效^[8]; 1000 ℃盐浴环境中, 合金沿着晶界发生高温热腐蚀^[9]等。这些与晶界有关的失效行为, 严重危害了合金的力学性能和服役寿命, 甚至导致安全事故。

晶界是结构相同、取向不同的晶粒之间的界面, 其与材料的诸多性能有着密切联系。Watanabe T^[10]从不同类型的晶界的性能各不相同的角度出发, 首次提出了晶界设计和控制的思想, 即通过在合金中引入高比例低 Σ 重合位置点阵 (Coincidence Site Lattice, CSL) 晶界, 调控晶界特征分布, 改善材料性能。其晶界类型主要分为两类, 一类为低 Σ CSL 晶界 ($\Sigma \leq 29$), 另一类为随机晶界 (Random Grain Boundary, RGB), 而低 Σ CSL 晶界在抗晶间腐蚀^[9, 11]、抑制沿晶裂纹萌生与扩展^[12-13]等方面均表现出优于随机晶界的特性。Deepak K^[14]通过晶界工程在 Inconel617 合金中降低随机晶界的比例, 打断随机晶界的网络连通性, 可提高合金的耐腐蚀能力, 降低热腐蚀深度以及合金元素的损耗。Telang A 等^[15]通过热机处理在镍基 600 合金中引入高比例低 Σ CSL 晶界和特殊三叉晶界, 有效抑制了晶界碳化物的析出, 阻碍沿晶裂纹的产生与扩展。对低 Σ CSL 晶界类型做进一步分析发现, $\Sigma 3^n$ ($n = 1, 2, 3$) 晶界占低 Σ CSL 晶界类型的绝大比例, 其中又以 $\Sigma 3$ 晶界的比例最大^[12]。然而, $\Sigma 3$ 晶界的比例并不能无止尽提高, 其比例一般不高于 $2/3$ ^[16], 因此, 合金中仍存在大量随机晶界, 限制了这一方法对材料性能的提升。

在保证合金中获得高比例 $\Sigma 3^n$ 晶界的基础上, 改善剩余随机晶界的性能, 是进一步提升材料性能的有效手段。研究发现, 通过控冷处理可在奥氏体合金或镍基高温合金中引入大量锯齿晶界, 且锯齿晶界多为随机晶界而非 $\Sigma 3$ 晶界^[17]。锯齿晶界因其结构特点表现出优于平直随机晶界的特性, 已成为抑制沿晶破坏的有效手段^[18]。Hong H U 等^[19-20]指出, 锯齿晶界可降低 263 合金的蠕变空洞形核率和沿晶裂纹扩展速率, 提高材料性能。Tang Y T 等^[21]认为在 Inconel 600 合金蠕变过程中, 锯齿晶界可以显著抑制沿晶裂纹的扩展, 提高材料的蠕变寿命。此外, 有关锯齿晶界的形成机理虽进行了大量的研究, 但尚无统一论。Lim Y S 等^[22]认为锯齿晶界的形成主要与晶界析出单一碳化物有关, 杨万鹏等^[23]认为

其与 γ' 相在晶界析出长大有关, 且形成机理随 γ' 相形状的不同而各不相同, Lee J W 等^[24]认为其与元素在晶界偏聚而导致晶界附近产生晶格畸变有关。

为此, 本文以 Inconel 617 合金为研究对象, 通过设计一种处理工艺, 在提高合金 $\Sigma 3^n$ 晶界比例的同时, 引入锯齿晶界, 实现两类晶界的协同调控, 并进一步提高特殊三叉晶界的比例, 为提升合金的相关性能提供支持, 同时揭示锯齿晶界的形成机理。

1 实验材料与方法

实验选用的合金为固溶态 Inconel 617 合金, 其成分见表 1。将固溶态的 Inconel 617 合金采用四辊冷轧机进行 15%冷轧变形, 随后参照图 1 对合金进行热处理。

表 1 实验用 Inconel 617 合金的化学成分 (%, 质量分数)
Table 1 Chemical compositions of Inconel 617 alloy for experiment (%, mass fraction)

Cr	Co	Mo	Fe	Mn	Si	Al	Ti	C	Ni
21.6	11.1	8.84	1.86	0.62	0.4	1.33	0.47	0.08	余量

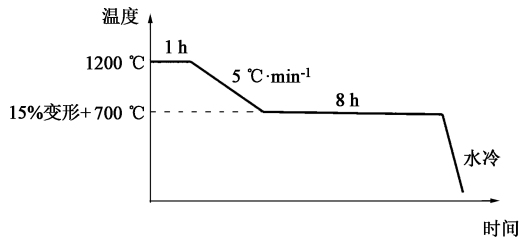


图 1 工艺流程示意图
Fig. 1 Schematic diagram of process flow

采用线切割切取试样, 分别使用 200#~2000#砂纸依序对样品进行研磨, 使用 2.5 μm 金刚石抛光膏和 0.05 μm SiO_2 悬浮液对试样表面进行抛光, 获得光滑表面。采用带有电子背散射衍射 (Electron Backscatter Diffraction, EBSD) 功能的 ZEISS MERLIN 扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 对材料的组织结构进行分析, 并通过 Channel 5 构建组织取向分布图, 依照 Brandon 准则 $\Delta\theta = 15^\circ\Sigma^{-1/2}$ ^[25] 区分晶界类型, 计算不同晶界的比例。

2 结果与讨论

2.1 $\Sigma 3^n$ 晶界特征分布

图 2 为合金组织的晶粒取向分布、晶界特征分

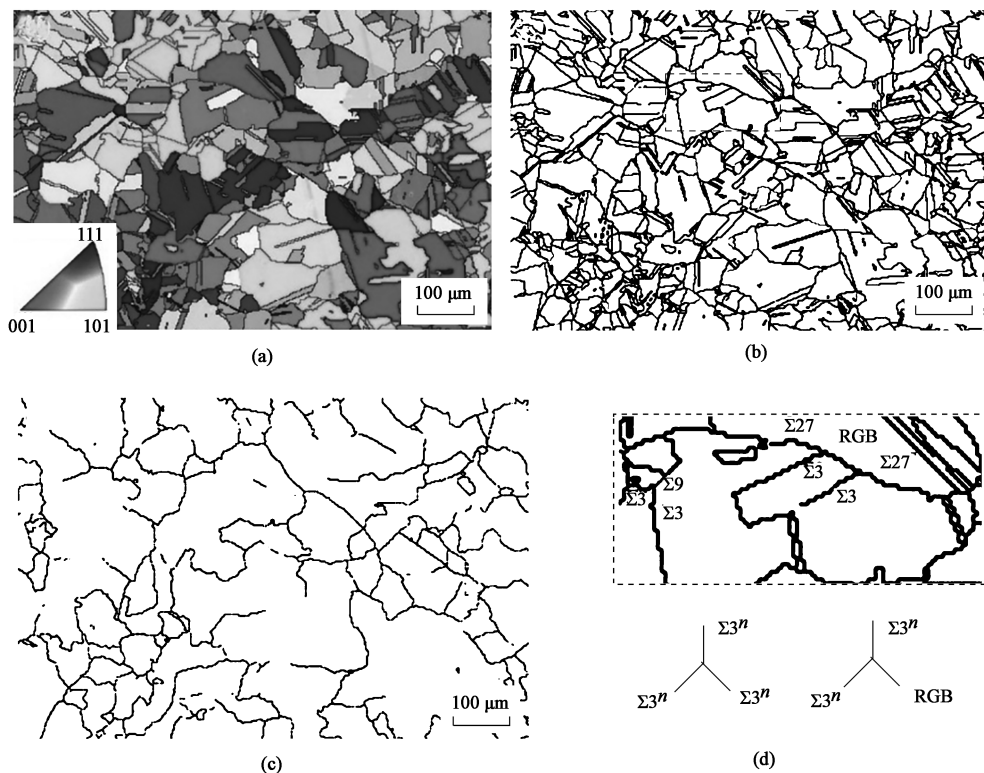


图 2 形变退火控冷处理后合金的晶界

(a) 晶粒取向分布 (b) 晶界分布特征 (c) 随机晶界网络 (d) 图 2b 中虚框处特殊三叉晶界

Fig. 2 Grain boundaries of alloy after deformation annealing and controlled cooling treatment

(a) Orientation distribution of grain (b) Distribution characteristics of grain boundary (c) Random grain boundary network

(d) Special trifurcated junction for dashed box in Fig. 2b

布和随机晶界网络结果。图 2a 中不同灰度代表不同的晶粒取向, 经过形变退火控冷热处理后, 晶粒取向呈随机取向分布, 合金组织并不存在织构。图 2b 中不同灰度代表不同的晶界类型, 不同类型晶界的比例见表 2。其中, $\Sigma 3$ 晶界的比例为 63.6%, 与其极限值接近, 另外 $\Sigma 9$ 和 $\Sigma 27$ 晶界的比例分别为 4.5% 和 2.3%, 随机晶界的比例为 29.6%。由图 2c 可知, 通过形变退火控冷热处理, 随机晶界的网络连通性被打断, 随机晶界呈不连续分布。这主要是由于提高合金 $\Sigma 3^n$ 晶界比例的同时, 引入了诸如 $\Sigma 3^n$ - $\Sigma 3^n$ - $\Sigma 3^n$ 、 $\Sigma 3^n$ - $\Sigma 3^n$ -RGB 的特殊三叉晶界, 打断了随机晶界的网络连通性 (图 2d)。大量实验已证明非连续随机晶界网络结构可显著抑制沿晶裂纹扩展^[26-27]。

表 2 形变退火控冷处理后合金中不同类型晶界的比例

Table 2 Proportions of different types of grain boundaries in alloy after deformation annealing and controlled cooling treatment

晶界类型	$\Sigma 3$	$\Sigma 9$	$\Sigma 27$	随机晶界 (RGB)
比例/%	63.6	4.5	2.3	29.6

2.2 锯齿晶界特征分布

经过形变退火控冷处理后, 合金中仍存在约 29.6% 的随机晶界。由图 3a 可知, 合金经形变退火控冷处理后形成锯齿晶界。区别于选取最大振幅作为锯齿晶界振幅的方法^[23], 本文采用快速傅里叶变换对锯齿晶界进行处理, 分析锯齿晶界的特征, 分析过程如图 3 所示, 其主要步骤为: (1) 对锯齿晶界进行水平矫正处理 (图 3a); (2) 获取锯齿晶界曲线 (图 3b), 其中纵坐标为锯齿晶界到直线的距离; (3) 为反映锯齿晶界的形貌特征, 通过快速傅里叶变换, 将锯齿晶界转变为不同的特征正弦波, 如图 3c 所示; (4) 去除周期为 1 的正弦波 (图 3c 中方框所示), 并选取振幅大于 $0.2 \mu\text{m}$ 且排名前三的正弦波 (图 3c 中圆圈所示), 计算锯齿晶界的平均振幅。本文借助以上处理方法, 选取 50 条典型锯齿晶界进行统计计算, 得出锯齿晶界的平均振幅约为 $0.72 \mu\text{m}$ 。

图 4 为锯齿晶界的形貌及元素分布结果。由图 4 可知, 经过形变退火控冷处理后, 锯齿晶界上存在 Mo、Cr 和 C 元素的富集。进一步地, 如图 5 所

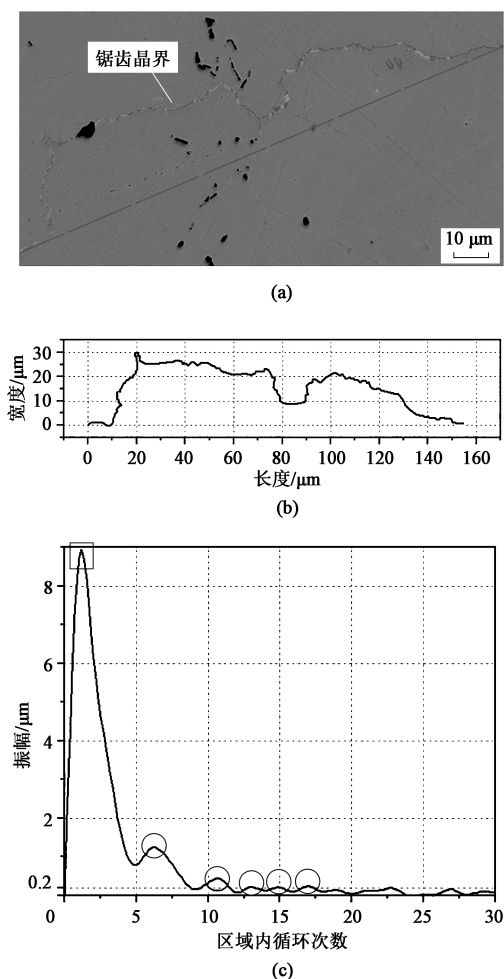


图 3 锯齿晶界快速傅里叶变换分析结果
(a) 锯齿晶界形貌 (b) 锯齿晶界形状曲线
(c) 锯齿晶界频率-振幅谱

Fig. 3 Analysis results of Fast Fourier Transform (FFT) for serrated grain boundary

- (a) Morphology of serrated grain boundary
(b) Shape curve of serrated grain boundary
(c) Spectrum of amplitude-frequency for serrated grain boundary

示, EBSD 结果表明锯齿晶界上析出两类碳化物, 分别为 Mo_6C 和 Cr_{23}C_6 , 且两类碳化物呈间断式分布。显然, 两类碳化物在晶界析出, 钉扎晶界是导致锯齿晶界形成的主要原因。还需注意的是, 由图 5 可知, 碳化物主要在随机晶界上析出, 导致锯齿晶界主要在随机晶界上形成, 而 $\Sigma 3$ 晶界并不发生弯曲。分析其原因, 这与元素在不同晶界上的偏聚和扩散行为有关。首先, 随机晶界相较于 $\Sigma 3^n$ 晶界, 其晶界错配度高, 导致随机晶界的晶界能高于 $\Sigma 3^n$ 晶界。元素在晶界的偏聚浓度可通过式 (1) 计算^[28]:

$$C_b \approx C_0 \exp(E_b/kT) / [1 + C_0 \exp(E_b/kT)] \quad (1)$$

式中: C_b 为元素在晶界的偏聚浓度; C_0 为元素在基

体中的偏聚浓度; k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度; E_b 为元素与晶界的结合能, 其与晶界能有关, 晶界能越高, E_b 越大。

由此可知, 随机晶界相较于 $\Sigma 3^n$ 晶界来说, 其晶界能高, 故 Mo、Cr 等元素在随机晶界上的偏聚浓度高于 $\Sigma 3^n$ 晶界。其次, 元素在随机晶界上的扩散速度高于 $\Sigma 3^n$ 晶界^[29], 即随机晶界可将更多的 Mo 和 Cr 元素输送至锯齿晶界处。综上, 随机晶界相较于 $\Sigma 3^n$ 晶界更利于 Cr_{23}C_6 和 Mo_6C 碳化物的析出与长大, 故导致晶界锯齿化主要发生在随机晶界上。

2.3 三叉晶界分布特征

Inconel 617 合金为面心立方金属, 其层错能较低, 合金形变后, 在退火过程中易形成退火孪晶界 ($\Sigma 3$ 晶界); 同时, 退火过程中晶界将发生迁移, 不同类型晶界相遇后发生交互作用, 并按照交互分解准则形成新的晶界:

$$\Sigma A + \Sigma B \rightarrow \Sigma(A \times B) \quad (2)$$

$$\Sigma A + \Sigma B \rightarrow \Sigma(A/B) \quad (3)$$

式中: A 、 B 为晶界重合位置点阵的 Σ 数值。

当两个 $\Sigma 3$ 晶界相遇时会在合金中形成 $\Sigma 9$ 晶界, 而 $\Sigma 3$ 晶界与 $\Sigma 9$ 晶界相遇时会形成 $\Sigma 27$ 晶界或 $\Sigma 3$ 晶界。这一方面很好地解释了 $\Sigma 3^n$ 晶界比例的提升; 另一方面, 新晶界的形成可在合金中引入形如 $\Sigma 3$ - $\Sigma 3$ - $\Sigma 9$ 或 $\Sigma 3$ - $\Sigma 9$ - $\Sigma 27$ 型特殊三叉晶界, 打断随机晶界的网络连通性。一般地, 将含有两条及以上 $\Sigma 3^n$ 晶界的三叉晶界称为特殊三叉晶界, 研究表明其可显著抑制沿晶裂纹扩展^[26-27], 但合金仍存在部分 3RGB 或 2RGB- $\Sigma 3^n$ 型三叉晶界。裂纹在外力的作用下沿随机晶界扩展, 当遇到含有两条及以上随机晶界的三叉晶界后, 裂纹发生偏转, 并沿着另一条随机晶界继续发生扩展 (图 6a), 最终导致断裂。相应地, 经形变退火控冷热处理后, 合金中部分随机晶界转变为锯齿晶界, 当裂纹扩展遇到锯齿晶界后, 锯齿晶界相较于平直随机晶界, 其对裂纹扩展的阻力增加, 使得裂纹扩展被抑制, 可显著提高 3RGB 或 2RGB- $\Sigma 3^n$ 型三叉晶界对裂纹扩展的抑制作用 (图 6b)。显然, 在获得高比例 $\Sigma 3^n$ 晶界的基础上, 将剩余部分平直随机晶界转变为锯齿晶界, 可进一步提高特殊三叉晶界的数量。

3 结论

(1) 通过 15% 形变随后在 1200 °C 保温 1 h, 再

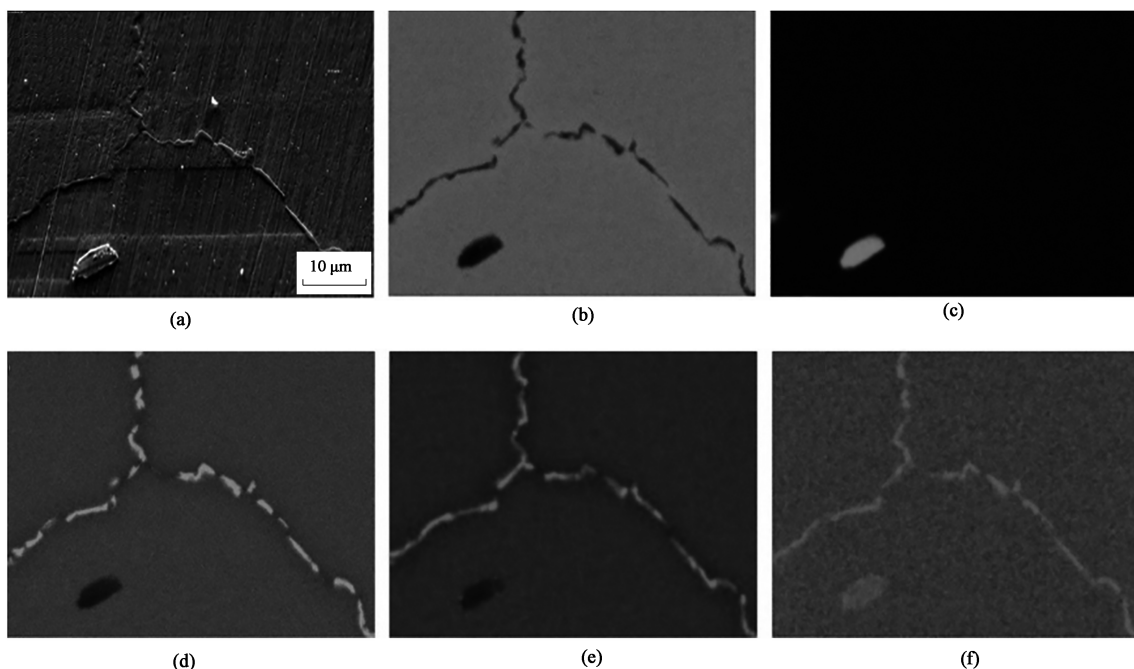


图 4 锯齿晶界的形貌及元素分布

(a) 晶界形貌 (b) Ni 元素 (c) Ti 元素 (d) Cr 元素 (e) Mo 元素 (f) C 元素

Fig. 4 Morphology and element distributions of serrated grain boundary

(a) Grain boundary morphology (b) Ni element (c) Ti element (d) Cr element (e) Mo element (f) C element

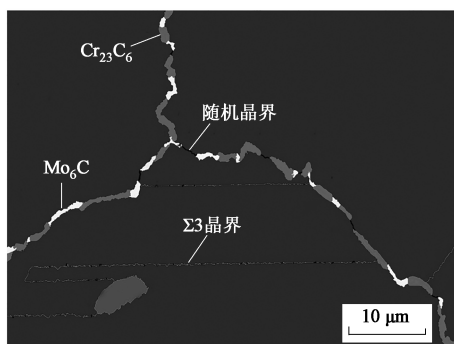


图 5 锯齿晶界 EBSD 结果

Fig. 5 EBSD result of serrated grain boundary

以 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 冷却至 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保温 8 h , 然后进行水冷处理, 可显著提高 Inconel 617 合金中的 $\Sigma 3^n$ ($n=1, 2, 3$) 晶界的比例, 同时引入大量锯齿晶界。

(2) 锯齿晶界形成原因主要与两类碳化物在晶界间断分布、钉扎晶界有关; 由于随机晶界相较于 $\Sigma 3^n$ 晶界更利于 Mo 和 Cr 元素的偏聚与扩散, 因此, Mo_6C 和 Cr_{23}C_6 更易于在随机晶界上析出、长大, 致使锯齿晶界主要在随机晶界上形成。

(3) 采用形变退火控冷处理可进一步提升 Inconel 617 合金特殊三叉晶界的数量, 实现晶界特征分布的进一步优化, 为改善材料性能提供新的思路。

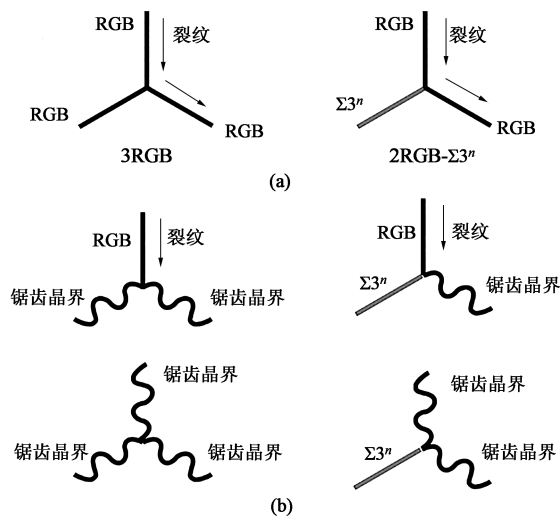


图 6 不同三叉晶界对沿晶裂纹扩展影响的示意图

(a) 常规三叉晶界 (b) 特殊三叉晶界

Fig. 6 Schematic diagrams for influence of different trifurcated junctions on intergranular crack propagation

(a) Normal trifurcated junctions (b) Special trifurcated junctions

参考文献:

- [1] 肖刚锋, 张义龙, 夏琴香, 等. 镍基高温合金锥筒形件拉深旋压时成形质量及组织性能研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (9): 190-196.

Xiao G F, Zhang Y L, Xia Q X, et al. Research on forming

- quality, microstructure and properties for Ni-based superalloy conical-cylindrical parts during deep-drawing spinning [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (9): 190–196.
- [2] 王岩, 谷宇, 王珏, 等. 铸态镍基高温合金 GH4698 热变形行为 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (11): 250–254.
- Wang Y, Gu Y, Wang J, et al. Hot deformation behavior of as-cast Ni-based superalloy GH4698 [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (11): 250–254.
- [3] 方军, 吴敏, 张涛, 等. GH4169 高温合金螺栓热锻成形工艺 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (3): 8–22.
- Fang J, Wu M, Zhang T, et al. Hot forging process on superalloy GH4169 bolt [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (3): 8–22.
- [4] Gui Y, Liang Z, Shao H, et al. Corrosion behavior and lifetime prediction of VM12, Sanicro 25 and Inconel 617 in supercritical carbon dioxide at 600 °C [J]. *Corrosion Science*, 2020, 175: 108870.
- [5] Athreya C N, Deepak K, Kim D, et al. Role of grain boundary engineered microstructure on high temperature steam oxidation behaviour of Ni based superalloy alloy 617 [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 778: 224–233.
- [6] Patel B, Patle B K, Paturi U M R. Experimental investigation of fatigue life of Inconel 617 at elevated temperature [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 38: 3125–3130.
- [7] Zhong Y, Liu X, Lan K C, et al. On the biaxial thermal creep-fatigue behavior of Ni-base alloy 617 at 950 °C [J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 139: 105787.
- [8] Mo K, Lyu W, Tung H M, et al. Biaxial thermal creep of alloy 617 and alloy 230 for VHTR applications [J]. *Journal of Engineering Materials & Technology*, 2016, 138: 021502.
- [9] Bhuyan P, Paliwal M, Sarma V S, et al. Precipitate evolution during aging and its individual role on high-temperature hot corrosion response in alloy 617 [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 871: 159499.
- [10] Watanabe T. An approach to grain boundary design of strong and ductile polycrystals [J]. *Res Mechanica*, 1984, 11 (1): 47–84.
- [11] Gao J, Tan J B, Wu X Q, et al. Effect of grain boundary engineering on corrosion fatigue behavior of 316LN stainless steel in boric acid and lithium high-temperature water [J]. *Corrosion Science*, 2019, 152: 190–201.
- [12] Hu H, Zhao M, Chen S, et al. Effect of grain boundary character distribution on hydrogen embrittlement in Fe-Ni based alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 780: 139201.
- [13] Zhu H H, Pan Q L, Zhang K Y, et al. The difference in fatigue crack growth induced by internal and external hydrogen in selective laser melted 304L stainless steel [J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 163: 107052.
- [14] Deepak K, Mandal S, Athreya C N, et al. Implication of grain boundary engineering on high temperature hot corrosion of alloy 617 [J]. *Corrosion Science*, 2016, 106: 293–297.
- [15] Telang A, Gill A S, Kumar M, et al. Iterative thermomechanical processing of alloy 600 for improved resistance to corrosion and stress corrosion cracking [J]. *Acta Materialia*, 2016, 113: 180–193.
- [16] Randle V. Twinning-related grain boundary engineering [J]. *Acta Materialia*, 2004, 52 (14): 4067–4081.
- [17] Bhuyan P, Reddy K V, Pradhan S K, et al. A potential insight into the serration behaviour of Sigma 3 (n) ($n \leq 3$) boundaries in alloy 617 [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 248: 122919.
- [18] Jeong C Y, Kim K J, Hong H U, et al. Effects of aging temperature and grain size on the formation of serrated grain boundaries in an AISI 316 stainless steel [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2013, 139 (1): 27–33.
- [19] Hong H U, Kim I S, Choi B G, et al. The effect of grain boundary serration on creep resistance in a wrought nickel-based superalloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 517 (1–2): 125–131.
- [20] Hong H U, Jeong H W, Kim I S, et al. A study on the formation of serrated grain boundaries and its applications in nimonic 263 [J]. *Materials Science Forum*, 2010, 638: 2245–2250.
- [21] Tang Y T, Wilkinson A J, Reed R C. Grain boundary serration in nickel-based superalloy Inconel 600: Generation and effects on mechanical behavior [J]. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2018, 49 (9): 4324–4342.
- [22] Lim Y S, Kim D J, Hwang S S, et al. $M_{23}C_6$ precipitation behavior and grain boundary serration in Ni-based alloy 690 [J]. *Materials Characterization*, 2014, 96: 28–39.
- [23] 杨万鹏, 胡本英, 刘国权, 等. 高性能镍基粉末高温合金中 γ' 相形态致锯齿晶界形成机理研究 [J]. *材料工程*, 2015, 43 (6): 7–13.
- Yang W P, Hu B F, Liu G Q, et al. Formation mechanism of serrated grain boundary caused by different morphologies of γ' phases in a high-performance nickel-based powder metallurgy superalloy [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2015, 43 (6): 7–13.
- [24] Lee J W, Turner M, Hong H U, et al. A new observation of strain-induced grain boundary serration and its underlying mechanism in a Ni-20Cr binary model alloy [J]. *Materials Characterization*, 2018, 135: 146–153.
- [25] Brandon D G. The structure of high-angle grain boundaries [J]. *Acta Metallurgica*, 1966, 14 (11): 1479–1484.
- [26] Kumar R, Arora A, Mahajan D K. Hydrogen-assisted intergranular fatigue crack initiation in metals: Role of grain boundaries and triple junctions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48 (43): 16481–16500.
- [27] Ogawa Y, Okazaki S, Takakuwa O, et al. The roles of internal and external hydrogen in the deformation and fracture processes at the fatigue crack tip zone of metastable austenitic stainless steels [J]. *Scripta Materialia*, 2018, 157: 95–99.
- [28] Mclean D. *Grain Boundaries in Metals* [M]. Oxford UK: Clarendon Press, 1957.
- [29] Minkwitz C, Herzig C, Rabkin E, et al. The inclination dependence of gold tracer diffusion along a $\Sigma 3$ twin grain boundary in copper [J]. *Acta Materialia*, 1999, 47 (4): 1231–1239.