

## 控冷处理对锻造 Inconel 617 合金晶界组织的影响

曹峰华<sup>1</sup>, 张浩杰<sup>1</sup>, 马广才<sup>2</sup>, 余鸣亮<sup>3</sup>, 胡红磊<sup>1</sup>

(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 分析测试中心, 辽宁 沈阳 110016;

3. 浙江联大锻压有限公司, 浙江 温州 325207)

**摘要:** 以锻造 Inconel 617 合金为研究对象, 通过控冷处理在合金中引入锯齿晶界, 在消除锻造残余内应力的同时, 实现组织优化; 分析了冷却速度对锯齿晶界的影响, 揭示了晶界碳化物的类型及结构特征, 阐明了锯齿晶界的形成原因。结果表明: 控冷处理是获得锯齿晶界的必要环节, 且冷却速度越慢, 越有利于锯齿晶界的形成。通过将合金在 1200 ℃ 保温 1 h 后以 5 ℃ · min<sup>-1</sup> 的冷却速度冷却至 700 ℃ 再水冷, 可在合金中引入锯齿晶界, 其中锯齿晶界的平均振幅为 0.8 μm。此外, 锯齿晶界的形成与晶界碳化物有着密切的联系, 其主要表现为两种不同的形成机制: 一种为晶界的一部分被碳化物钉扎, 碳化物之间的晶界发生迁移形成锯齿晶界; 另一种为板状碳化物沿晶界生长诱使晶界弯曲。

**关键词:** Inconel 617 合金; 热处理; 锯齿晶界; 碳化物; 晶界迁移; 冷却速度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.006

**中图分类号:** TG156.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 10-0038-08

## Effect of controlled cooling treatment on grain boundary structure for forged Inconel 617 alloy

Cao Fenghua<sup>1</sup>, Zhang Haojie<sup>1</sup>, Ma Guangcai<sup>2</sup>, Yu Mingliang<sup>3</sup>, Hu Honglei<sup>1</sup>

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

2. Analysis and Test Center, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

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

**Abstract:** For forged Inconel 617 alloy, the serrated grain boundary was introduced into the alloy by controlled cooling treatment to eliminate residual internal stress and achieve structural optimization, and the influences of cooling speed on serrated grain boundaries were analyzed. Then, the types and structural characteristics of carbides at grain boundary were revealed, and the formation reasons of serrated grain boundary were clarified. The results show that the controlled cooling treatment is a necessary step to obtain serrated grain boundaries, and the slower the cooling speed is, the more conducive to formation of serrated grain boundaries. By holding the alloy at 1200 ℃ for 1 h, cooling it to 700 ℃ at a cooling speed of 5 ℃ · min<sup>-1</sup>, and then water cooling, the serrated grain boundaries can be introduced into the alloy, where the average amplitude of the serrated grain boundaries is 0.8 μm. In addition, the formation of serrated grain boundaries is closely related to the carbides at grain boundary, which are mainly manifested by two different formation mechanisms. One is that part of the grain boundary is pinned by carbides, and the grain boundaries between carbides migrate to form serrated grain boundaries. The other is the growth of plate-shaped carbides along the grain boundaries to induce bending of the grain boundaries.

**Key words:** Inconel 617 alloy; heat treatment; serrated grain boundary; carbide; grain boundary migration; cooling speed

以锻造为基础的热加工工艺一直是高温合

金<sup>[1]</sup>、镁合金<sup>[2]</sup>、钛合金<sup>[3-4]</sup>以及合金钢<sup>[5-6]</sup>等金属材料最为常用的制备工艺手段。其作为高端装备等重点产业的上游配套环节, 在先进制造业集群中发挥着重要作用。锻件的力学性能一般优于铸件, 这主要是由于锻造过程中可消除冶炼时所产生的疏松等缺陷, 优化微观组织; 同时, 能够在锻件中形成完整的金属流线, 故常在机械负载高、工作环境严苛的条件下应用。为保证材料具有较高的塑性、较低的变形抗力, 热锻常在再结晶温度以上进行,

收稿日期: 2023-07-23; 修订日期: 2023-09-06

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, 21010500800)

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

通过再结晶将粗大的铸态组织变成细小的晶粒组织。然而，由于锻件不同区域变形参数的差异，对微观组织缺乏控制，给锻件的力学性能带来不良的影响。因此，需要借助锻后热处理来消除锻造过程中产生的残余内应力，改善内部组织。

Inconel 617 合金是一种 Cr-Mo-Co 强化的镍基高温合金，因其在 700~750 ℃ 条件下仍具备良好的高温持久蠕变性能以及高温稳定性等，成为超超临界火力发电机组高温关键部件的重要候选材料<sup>[7-8]</sup>。学者们针对其热成形工艺开展了大量的研究：朱怀沈等<sup>[9]</sup>揭示了 Inconel 617 合金动态再结晶微观组织演变规律，并根据合金的热加工性能制定了锻造工艺，完成了锻造试制；田仲良等<sup>[10]</sup>研究了固溶处理对 Inconel 617 合金组织及性能的影响，指出随着固溶温度提高，合金的高温性能降低；杨康等<sup>[11]</sup>借助 Gleeble-3500 实验机研究了 Inconel 617 合金在不同温度及应变速率条件下的再结晶行为，建立了再结晶行为与变形参数之间的关系，为控制锻件的晶粒尺寸提供指导。然而，有关 Inconel 617 合金锻后热处理的研究却较少。

研究发现，Inconel 617 合金在高温服役过程中常发生与晶界有关材料性能退化，如晶间腐蚀<sup>[12]</sup>和晶间应力腐蚀开裂<sup>[13]</sup>等，这将对生产安全带来严重的危害。晶界锯齿化是采用适当的控冷热处理制度，将平直晶界转变为锯齿状晶界，其对性能有着重要的影响。Tang Y B 等<sup>[14]</sup>发现在 Inconel 600 合金中引入锯齿晶界可将 815 ℃/70 MPa 和 900 ℃/40 MPa 工况环境下材料的蠕变寿命提升 40% 以上。Kim H P 等<sup>[15]</sup>指出锯齿晶界可有效抑制 Inconel 600 合金应力腐蚀开裂。有关锯齿晶界的形成机理，国内外学者开展了大量的研究，目前研究结果较为分散。Tang Y T 等<sup>[16]</sup>指出 Inconel 600 合金锯齿晶界的形成主要与晶界碳化物析出有关。Qiu C L 等<sup>[17]</sup>发现镍基合金 RR 1000 锯齿晶界的形成主要是其析出不同形状的  $\gamma'$  相导致的。Hu H L 等<sup>[18]</sup>也在铁镍基合金 J100 上得出了相同的结论。与之不同，Lee J W 等<sup>[19]</sup>则认为锯齿晶界的形成与析出相无关，主要是由于元素在晶界偏聚产生的应变能差导致的。Turner M 等<sup>[20]</sup>通过选择不同比例的 Cr、Mo 和 Zr 合金开展实验证实了该结论。

本文以锻造 Inconel 617 合金为研究对象，通过控冷热处理工艺在合金中引入锯齿晶界，分析冷却速度对合金锯齿晶界的影响，并揭示了锯齿晶界形成原因，为 Inconel 617 镍基高温合金制定锻后热处

理工艺和实现组织控制提供指导。

1 实验材料与方法

本实验选用锻态 Inconel 617 合金，其成分如表 1 所示。将锻态合金材料加工为  $\Phi 8\text{ mm}\times 4\text{ mm}$  的圆柱试样，并采用 Gleeble-3800 热模拟实验机以  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  的加热速度加热至 1200 ℃ 并保温 1 h，随后取出水冷（固溶处理）；控冷处理则是将圆柱试样加热至 1200 ℃ 并保温 1 h 后，以不同的冷却速度冷却至 700 ℃，随后水冷至室温，具体工艺路线如图 1 所示。

表 1 Inconel 617 合金的化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of Inconel 617 alloy  
(%, mass fraction)

Cr	Co	Mo	Fe	Mn	Si	Al	Ti	C	Ni
21.5	11.2	8.8	1.9	0.6	0.4	1.3	0.5	0.08	余量

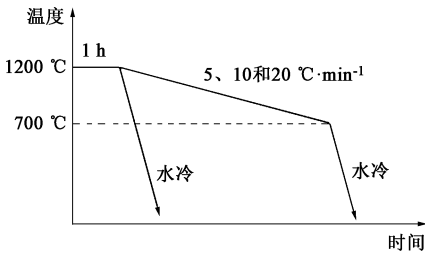


图 1 热处理工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of heat treatment process

采用常规手段对试样的径向表面进行研磨，为观察晶界处碳化物的微观形貌，采用 2.5  $\mu\text{m}$  金刚石抛光膏和 0.05  $\mu\text{m}$  的二氧化硅悬浮液对试样表面进行抛光来替代电解抛光，以消除研磨过程中产生的表面残余应力，获得光滑的表面。采用带有电子背散射衍射（Electron Backscattered Diffraction, EBSD）探头和透射锯齿衍射（Transmission Kikuchi Diffraction, TKD）功能的 ZEISS MERLIN Compact 型场发射扫描电子显微镜（Scanning Electrom Microscope, SEM）观察试样的微观组织和晶界析出相的尺寸与分布。

2 结果与讨论

2.1 冷却速度对锯齿晶界的影响

图 2 为锻态及固溶处理（1200 ℃/1 h+水冷）后 Inconel 617 合金组织的反极图（Inverse Pole Fig-

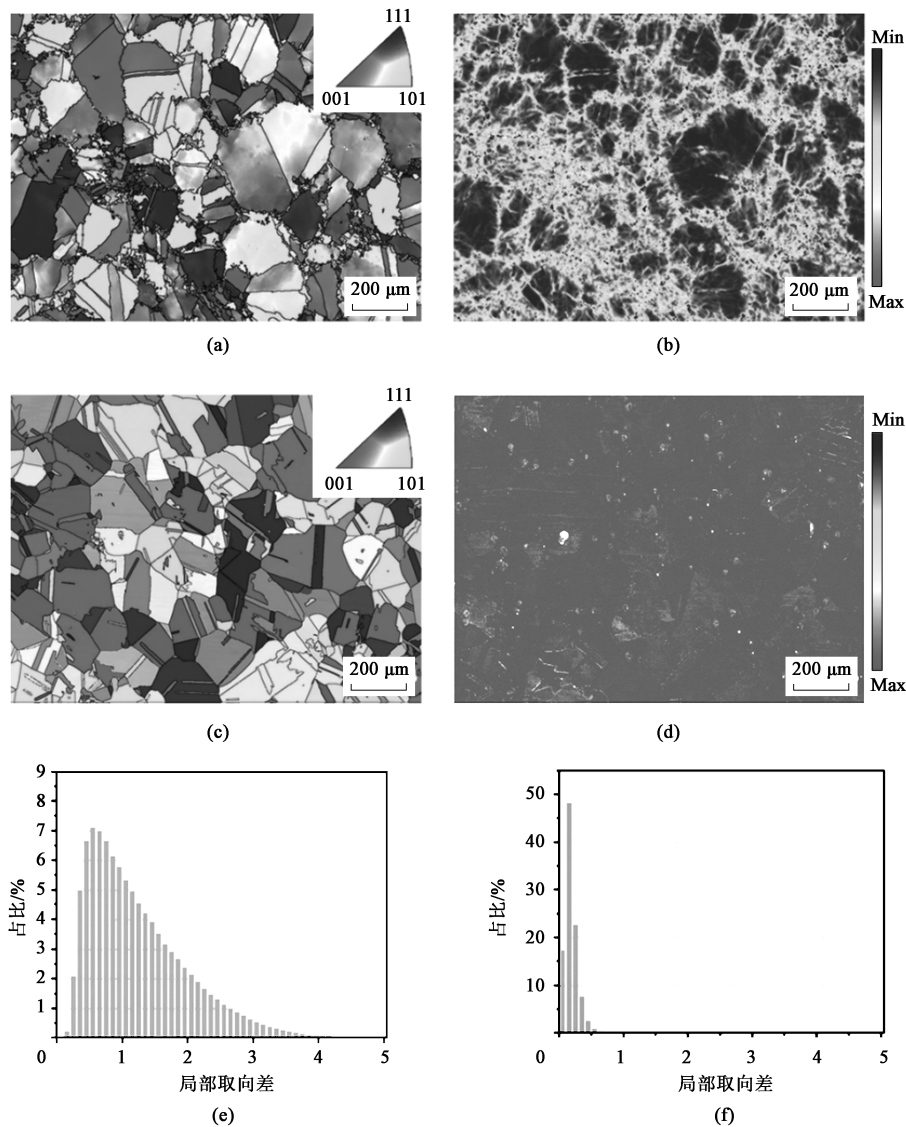


图 2 Inconel 617 合金的反极图及局部取向差结果

(a) 锻态, 反极图 (b) 锻态, 局部取向差 (c) 固溶, 反极图 (d) 固溶, 局部取向差  
(e) 锻态, 局部取向差分布 (f) 固溶, 局部取向差分布

Fig. 2 IPF and LM results of Inconel 617 alloy

(a) Forged state, IPF (b) Forged state, LM (c) Solution treatment, IPF (d) Solution treatment, LM  
(e) Forged state, LM distribution (f) Solution treatment, LM distribution

ure, IPF) 及局部取向差 (Local Misorientation, LM) 结果。IPF 结果反映不同的晶粒取向, 局部取向差结果反映组织的应力分布。由图 2a 可知, 锻态 Inconel 617 合金主要为平均晶粒尺寸为  $9.1 \mu\text{m}$  的细晶粒和尺寸为数百微米的粗晶粒构成的双峰晶粒组织, 其中细晶粒主要围绕粗晶粒分布 (将取向差  $\geq 15^\circ$  的大角度晶界定义为粗晶粒)。此外, 由图 2b 和图 2e 可知, 锻态 Inconel 617 合金组织存在较大的残余应力, 且应力主要集中在细晶粒处, 显然这对合金的力学性能是不利的。相反地,

由图 2d 和图 2f 可知, 在  $1200^\circ\text{C}$  保温  $1 \text{ h}$ , 可有效消除锻造过程中产生的残余应力, 晶粒组织取向随机分布, 合金组织不存在织构, 平均晶粒尺寸为  $42.6 \mu\text{m}$ 。

对不同冷却方式及不同冷却速度条件下的合金组织进行分析, 发现其晶界特征并不相同, 结果如图 3 所示。由图 3a 可知, 锻态 Inconel 617 合金经固溶处理 ( $1200^\circ\text{C}/1 \text{ h} + \text{水冷}$ ) 后, 其晶界呈平直状, 且晶界上并无析出相。这主要是由于在  $1200^\circ\text{C}$  保温时, 合金中的元素充分固溶, 水淬过程的冷却速度

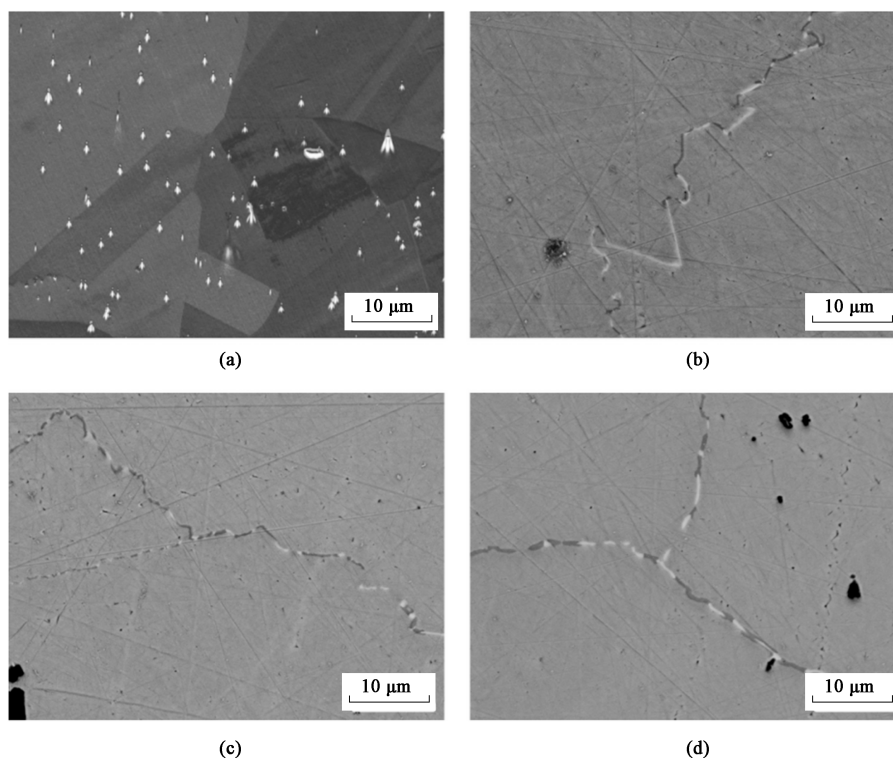


图 3 不同热处理下晶界的背散射电子图像

(a) 1200 °C/1 h, 水冷 (b) 1200 °C/1 h, 5 °C · min<sup>-1</sup> 冷却至 700 °C, 水冷

(c) 1200 °C/1 h, 10 °C · min<sup>-1</sup> 冷却至 700 °C, 水冷 (d) 1200 °C/1 h, 20 °C · min<sup>-1</sup> 冷却至 700 °C, 水冷

Fig. 3 Back-scattered electron (BSE) diagrams of grain boundaries under different heat treatments

(a) 1200 °C/1 h, water cooling (b) 1200 °C/1 h, cooling to 700 °C at cooling rate of 5 °C · min<sup>-1</sup>, water cooling

(c) 1200 °C/1 h, cooling to 700 °C at cooling rate of 10 °C · min<sup>-1</sup>, water cooling

(d) 1200 °C/1 h, cooling to 700 °C at cooling rate of 20 °C · min<sup>-1</sup>, water cooling

较快,析出相来不及在合金中析出。不同的是,在 1200 °C 保温 1 h,随后以不同的冷却速度 (5 和 10 °C · min<sup>-1</sup>) 冷却至 700 °C,水冷至室温,其晶界呈锯齿状,伴随着晶界处有大量的析出相析出,且不同冷却速度条件下,锯齿晶界的振幅并不相同 (图 3b 和图 3c);当冷却速度达到 20 °C · min<sup>-1</sup> 时,晶界虽有析出相析出,但锯齿晶界振幅较小 (图 3d)。由图 3 可知,Inconel 617 合金中的锯齿晶界主要是在缓冷过程中引入的,且冷却速度越快,越不利于锯齿晶界的形成。

为进一步确定不同冷却速度条件下锯齿晶界的特征,采用快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 方法对锯齿晶界进行处理,其主要步骤为: (1) 绘制一条直线连接图 3b 和图 3c 中锯齿晶界首尾,并以此直线为基准对锯齿晶界进行水平矫正处理; (2) 获取锯齿晶界的坐标参数,绘制曲线 (图 4a 和图 4b); (3) 对曲线进行快速傅里叶变换,将锯齿晶界转变为一组频率不同、振幅不同的正

弦波,其中纵坐标为振幅 (图 4c 和图 4d)。为减小误差,一般将频率为 1 的正弦波去掉 (图 4c 和图 4d 中圆圈处),并选取振幅大于 0.2 μm 且排名前 3 的正弦波,求其振幅平均值作为该锯齿晶界的平均振幅。不同冷却速度条件下锯齿晶界的振幅如表 2 所示,其值为每种状态下 20 条锯齿晶界的平均值,由表 2 可知,冷却速度越慢,锯齿晶界的平均振幅越大,晶界锯齿化越显著。

## 2.2 锯齿晶界的形成机理

由图 3 可知,锯齿晶界上主要分布有两类析出相,且两类析出相呈间断分布。透射锯齿衍射 (Transmission Kikuchi Diffraction, TKD) 结果证实晶界上的两类碳化物分别为 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 和 Mo<sub>6</sub>C (图 5)。其中,Mo<sub>6</sub>C 具有面心立方结构,点阵常数与 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 相近,且两者与 Inconel 617 合金基体具有相同的 FCC 结构<sup>[21]</sup>。然而,晶界析出碳化物并不是锯齿晶界形成的充分条件。由图 6a 可知,右侧晶界伴随着大量颗粒状碳化物析出 (箭头所指),但该晶界仍

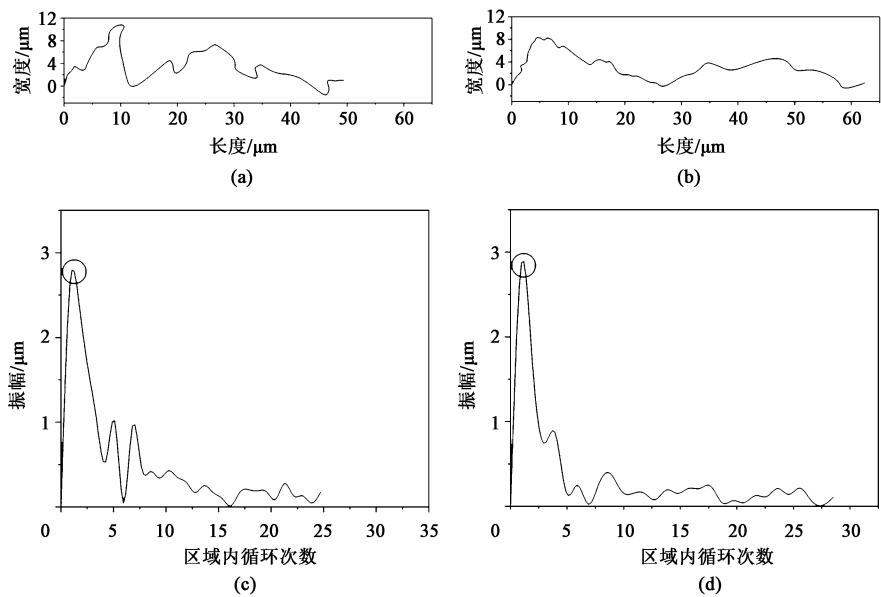


图 4 锯齿晶界快速傅里叶变换分析结果

(a) 5 °C · min<sup>-1</sup>, 锯齿晶界形状 (b) 10 °C · min<sup>-1</sup>, 锯齿晶界形状 (c) 5 °C · min<sup>-1</sup>, 锯齿晶界频率-振幅谱  
(d) 10 °C · min<sup>-1</sup>, 锯齿晶界频率-振幅谱

Fig. 4 FFT analysis results on serrated grain boundary

(a) 5 °C · min<sup>-1</sup>, shape of serrated grain boundary (b) 10 °C · min<sup>-1</sup>, shape of serrated grain boundary  
(c) 5 °C · min<sup>-1</sup>, amplitude-frequency spectrum of serrated grain boundary (d) 10 °C · min<sup>-1</sup>, amplitude-frequency of serrated grain boundary

表 2 不同冷却速度下锯齿晶界的平均振幅

Table 2 Average amplitudes of serrated grain boundary under different cooling speeds

热处理状态	平均振幅/μm
1200 °C/1 h+5 °C · min <sup>-1</sup> 冷却至 700 °C+水冷	0.80
1200 °C/1 h+10 °C · min <sup>-1</sup> 冷却至 700 °C+水冷	0.50

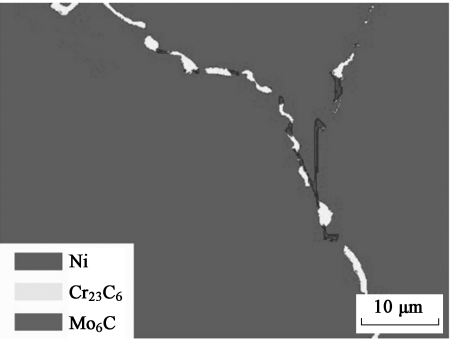


图 5 基体及锯齿晶界的析出相

Fig. 5 Recipitated phases at matrix and serrated grain boundary

保持平直且并未形成锯齿晶界；不同地，当晶界析出平板状碳化物时，晶界发生弯曲，转变为锯齿晶界（图 6a 中左侧晶界）。进一步地，由晶界析出相能谱结果（图 6b）可知，晶界上的白色析出相为 Mo<sub>6</sub>C，而相邻黑色析出相为 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>。

图 7 为包含锯齿晶界的晶粒 IPF 及界面类型结果。由图 7 可知，锯齿晶界主要在大角度晶界上形成，而孪晶晶界则不发生晶界锯齿化。这主要是由于孪晶晶界相较于一般大角度晶界，具有更多的有序结构，其晶界能较低<sup>[22]</sup>。由 Mclean D 等<sup>[23]</sup>溶质原子晶界偏聚公式可知，Cr、Mo 等元素不易于在孪晶界上发生偏聚，使得碳化物不易在其上析出、长大，导致孪晶晶界一般不发生晶界锯齿化。

进一步分析，Inconel 617 合金中锯齿晶界的形成机制主要有两种。一种机制是两种碳化物间的晶界迁移促使晶界锯齿化，该机制解释了图 7 中锯齿晶界的形成原因。由图 7 可知，两碳化物间形成了锯齿晶界，这主要是由于在缓冷过程中晶粒发生长大，伴随着晶界迁移，其中下方晶界向上方晶粒迁移，左侧晶界向右侧晶粒迁移。一方面晶界碳化物起到钉扎作用，与碳化物接触的晶界保持不动；另一方面，两碳化物之间的晶界仍发生迁移，当碳化物对晶界的迁移阻碍力与晶界的迁移力相抵消时，晶界迁移将停止，从而在碳化物之间形成锯齿晶界。然而，图 6a 中右侧晶界上虽然存在颗粒状碳化物，但是碳化物密度过高，相邻碳化物之间的间距较小，使得晶界迁移较困难，故晶界仍保持平直，并未形成锯齿晶界。

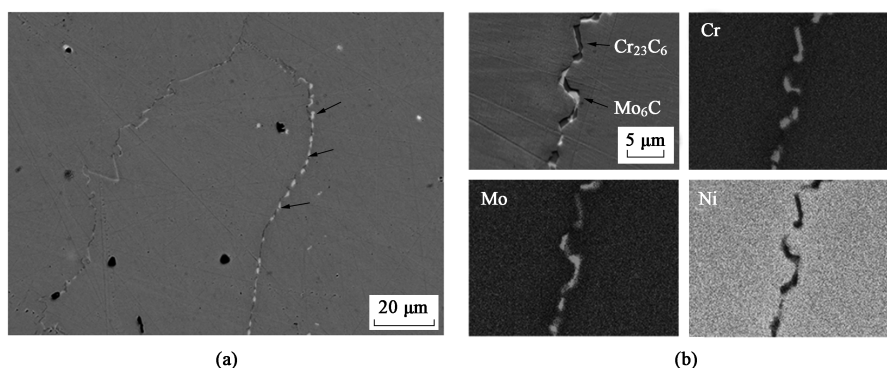


图 6 晶界碳化物分布结果  
(a) 背散射电子图像 (b) 能谱图  
Fig. 6 Distribution results of carbides at grain boundary  
(a) BSE diagram (b) EDS diagrams

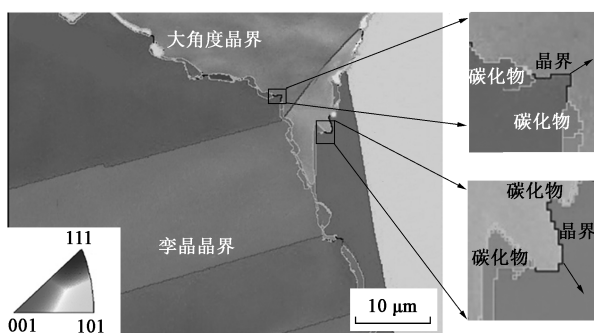


图 7 两种碳化物之间晶界迁移形成锯齿晶界  
Fig. 7 Serrated grain boundary formed by grain boundary migration between two carbides

另一种机制是碳化物沿晶界析出、长大, 形成板状碳化物, 促使锯齿晶界形成。图 8 为不同晶界碳化物的空间取向结果, 图 8b 和图 8c 中不同晶粒的 3D 取向模型在图 8e 中列出。由图 8b~图 8e 可知, 锯齿晶界上的  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和  $\text{Mo}_6\text{C}$  碳化物与其一侧晶粒保持相同的取向关系。图 8b 中下方的晶粒 1 与晶界上析出的  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  (晶粒 2 和晶粒 3) 的空间取向相同。同样地, 图 8c 中左侧的晶粒 4 与晶界析出相  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和  $\text{Mo}_6\text{C}$  (晶粒 5~晶粒 11) 呈相同的空间取向关系。这与文献 [24] 和文献 [25] 所述  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  可沿着与基体共有的惯习面  $\{111\}$  生长, 且基体中的  $\{111\}$  平面与  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  具有良好的原子对应关系, 并呈良好的共格关系的结论一致。控冷过程中, Cr、Mo 和 C 原子向晶界偏聚, 导致  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和  $\text{Mo}_6\text{C}$  碳化物在晶界上形核; 随着控冷过程的继续, 晶界碳化物沿着特定的方向长大, 形成板状碳化物, 当长大方向与晶界方向不一致时会带动晶界发生弯曲, 最终形成锯齿晶界。另外, 冷却速度对

锯齿晶界的影响主要体现在其对碳化物形核与长大过程的影响。首先, 冷却速度越慢, 越有利于碳化物形核。其次, 随着冷却速度的降低, 元素有充足的时间沿晶界扩散至碳化物处, 更有利于晶界碳化物的长大, 导致锯齿晶界的平均振幅增加。

### 3 结论

(1) 控热处理是锯齿晶界形成的必要条件, 随着冷却速度的加快, 锯齿晶界的振幅降低。

(2) 锯齿晶界一般在大角度晶界上形成, 而孪晶晶界一般不发生晶界锯齿化。

(3) 锯齿晶界上的碳化物为  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和  $\text{Mo}_6\text{C}$ , 其与基体存在特定的取向关系。

(4) 提出了两种锯齿晶界形成机制: 第 1 种为晶界一部分被碳化物钉扎, 晶界其余部分在控冷过程中仍发生迁移, 最终在两碳化物之间形成锯齿晶界; 第 2 种为晶界板状碳化物沿晶界生长, 诱使晶界锯齿化。Inconel 617 合金控冷过程中两种机制同时发生, 且第 2 种机制占主导作用。

#### 参考文献:

- [1] Jiang Y L, Chen H N, Wu C Z, et al. Thermal ductility and hot cracking for 70 mm thick forge plate and rolling plates of nickel alloy 690 [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48 (3): 0758-0764.
- [2] 李振兴, 王学军. 镁基汽车电池合金的锻造工艺及组织性能 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 15-20.  
Li Z X, Wang X J. Forging process and microstructure properties of Mg-based automotive battery alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 15-20.
- [3] 齐铭, 安震, 张凯, 等. 热处理对锻压 TA15 钛合金棒组织和

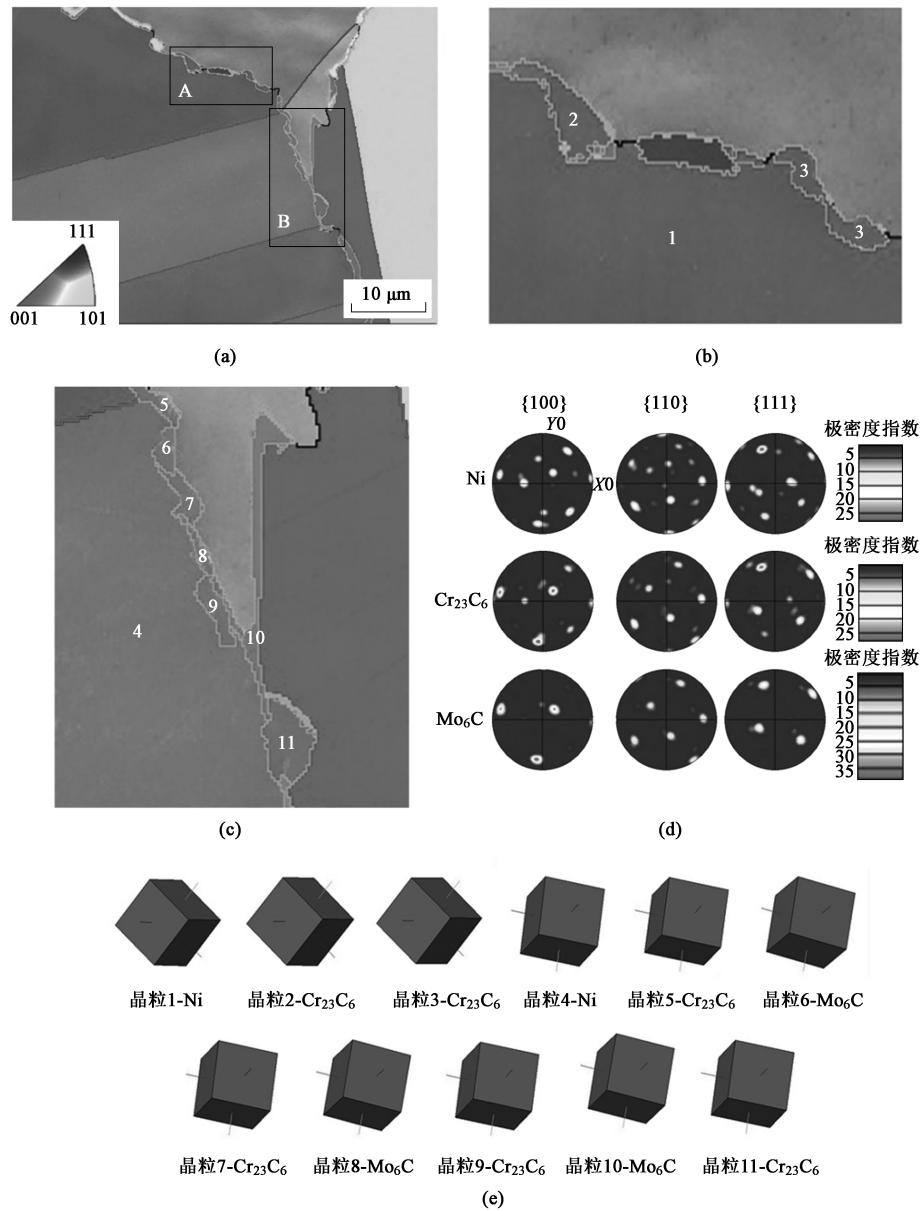


图 8 晶界碳化物结构特征

(a) 基体与晶界碳化物取向分布图 (b) 局部放大图 A (c) 局部放大图 B (d) 基体 Ni、Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 和 Mo<sub>6</sub>C 的极图 (e) 3D 取向模型

Fig. 8 Structural characteristics of carbides at grain boundary

(a) IPF of matrix and carbides at grain boundary (b) Partial enlarged image A (c) Partial enlarged image B

(d) PF of Ni, Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> and Mo<sub>6</sub>C (e) 3D orientation model

性能的调控 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (8): 193-199.

Qi M, An Z, Zhang K, et al. Regulation of heat treatment on microstructure and properties of forged TA15 titanium alloy bar [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (8): 193-199.

[4] 赵民权, 王媛, 董健, 等. TC11 合金大圆精锻棒材低倍暗斑分析及挽救措施 [J]. 金属热处理, 2022, 47 (5): 266-269.

Zhao M Q, Wang Y, Dong J, et al. Macro-segregation analysis and rescue measure of TC11 alloy large round precision forged bar [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47 (5): 266-269.

[5] 于森. 锻造对 12Cr2Ni4A 钢棒料性能的影响 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (4): 74-77.

Yu M. Influence of forging on properties of 12Cr2Ni4A steel bar [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (4): 74-77.

[6] 张衡, 张迪, 刘馨宇, 等. 锻造及热处理工艺对耐磨钢组织及耐磨性能的影响 [J]. 金属热处理, 2022, 47 (7): 138-143.

Zhang H, Zhang D, Liu X Y, et al. Effect of forging and heat treatment on microstructure and wear resistance of wear-resistant steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47 (7): 138-143.

[7] 张涛, 郝丽婷, 田峰, 等. 700 °C 超超临界火电机组用高温材料研究进展 [J]. 机械工程材料, 2016, 40 (2): 1-6.

Zhang T, Hao L T, Tian F, et al. Research progress on high temperature materials for 700 °C ultra-supercritical coal-fired unit

[J]. Metal for Mechanical Engineering, 2016, 40 (2): 1-6.

[8] Rao C V , Srinivas N C S , Sastry G V S , et al. Effect of micro-structure on work hardening behaviour of IN-617 alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2021, 800: 800.

[9] 朱怀沈, 聂义宏, 赵帅, 等. 镍基 617 合金动态再结晶微观组织演变与预测 [J]. 材料工程, 2018, 46 (6): 80-87.

Zhua H S, Nie Y H, Zhao S, et al. Microstructure evolution and prediction of alloy 617 during hot deformation based on dynamic recrystallization [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46 (6): 80-87.

[10] 田仲良, 陈正宗, 何西扣, 等. 固溶处理对超超临界电站用镍基耐热合金组织及性能的影响 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (3): 97-102.

Tian Z L, Chen Z Z, He X K, et al. Effect of solution treatment on microstructure and mechanical properties of heat-resisting Ni-based alloy used for ultra-supercritical power plant [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45 (3): 97-102.

[11] 杨康, 祝志超, 张雪姣, 等. 镍基 617 合金的热变形和动态再结晶行为 [J]. 材料热处理学报, 2019, 40 (10): 151-157.

Yang K, Zhu Z Z, Zhang X J, et al. Hot deformation and dynamic recrystallization behavior of nickel-based alloy 617 [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2019, 40 (10): 151-157.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Tang Y B, Wilkinson A J, Reed R C. Grain boundary serration in nickel-based superalloy nconel 600: Generation and effects on mechanical behavior [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49 (9): 4324-4342.

[15] Kim H P, Choi M J, Kim S W, et al. Effect of serrated grain boundary on stress corrosion cracking of alloy 600 [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2018, 50 (7): 1131-1137.

[16] Tang Y T, Karamched P, Liu J, et al. Grain boundary serration in nickel alloy Inconel 600: Quantification and mechanisms [J]. Acta Materialia, 2019, (9): 352-366.

[17] Qiu C L, Andrews P. On the formation of irregular-shaped gamma prime and serrated grain boundaries in a nickel-based superalloy during continuous cooling [J]. Materials Characterization, 2013, 76: 28-34.

[18] Hu H L, Zhao M J, Song Y Y, et al. An approach to regulating grain boundary network by introducing high fraction of  $\Sigma 3^n$  and serrated grain boundaries simultaneously in Fe-Ni based alloy [J]. Materials Letters, 2022, 323: 132533.

[19] 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.

[20] Turner M, Hong H U, Lee J H, et al. On the role of alloying elements in the formation of serrated grain boundaries in Ni-based alloys [J]. International Journal of Materials Research, 2016, 107 (3): 229-238.

[21] 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.

[22] 秦升学, 王艳, 张弘斌, 等. 固溶处理对 GH99 合金组织的影响 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (8): 173-178.

Qin S X, Wang Y, Zhang H B, et al. Effect of solution treatment on microstructure of GH99 alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45 (8): 173-178.

[23] Mclean D. Grain Boundaries in Metals [M]. Oxford UK: Clarendon Press, 1957.

[24] Jiang L, Hu R, Kou H C, et al. The effect of  $M_{23}C_6$  carbides on the formation of grain boundary serrations in a wrought Ni-based superalloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 536: 37-44.

[25] 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.

+++++

欢迎订阅由中国机械工程学会和中国机械总院集团北京机电研究所有限公司主办的  
专业核心期刊 (2024 年)

刊名	刊期	页码	邮发代号	单价/元	全年/元	联系人	联系电话
《材料热处理学报》	月刊	200	82-591	60.00	720.00	付海峰	010-62914115, 82415080
《塑性工程学报》	月刊	230	80-353	40.00	480.00	薛红燕	010-62912592, 82415079
《金属热处理》	月刊	300	2-827	25.00	300.00	韩永珍	010-62935465, 82415083
《锻压技术》	月刊	240	2-322	25.00	300.00	林玉彤	010-62920652, 82415085

需要者可到当地邮局订阅, 如果因故漏订, 也可通过邮局汇款订阅, 汇款地址: 北京市海淀区学清路 18 号, 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司相应编辑部的联系人收, 邮编: 100083。