

# 高性能镍基粉末高温合金中 $\gamma'$ 相 形态致锯齿晶界形成机理研究

Formation Mechanism of Serrated Grain Boundary  
Caused by Different Morphologies of  $\gamma'$  Phases  
in a High-performance Nickel-based  
Powder Metallurgy Superalloy

杨万鹏<sup>1</sup>, 胡本芙<sup>1</sup>, 刘国权<sup>1,2</sup>, 吴 凯<sup>1</sup>

(1 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083;

2 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

YANG Wan-peng<sup>1</sup>, HU Ben-fu<sup>1</sup>, LIU Guo-quan<sup>1,2</sup>, WU Kai<sup>1</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, University of Science  
and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 State Key Laboratory  
for Advanced Metals and Materials, University of Science  
and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**摘要:** 采用光学显微镜、场发射扫描电子显微镜和透射电子显微镜, 系统研究了低错配度的第三代高性能粉末高温合金 (FGH98I) 在热处理条件下由合金晶界上  $\gamma'$  相不同析出行为造成的锯齿晶界。结果表明: 在晶界上析出  $\gamma'$  相形态不同是锯齿晶界形成的主导因素。热处理时固溶冷却速率不同, 晶界上析出的  $\gamma'$  相数量、尺寸和形态不同, 对晶界锯齿形状有强烈影响。当冷却速率由 0.1 °C/s 增大至 10.8 °C/s 时, 晶界锯齿振幅由 4.02  $\mu\text{m}$  变为 0.63  $\mu\text{m}$ , 锯齿的波长则随冷却速率增大而变大。 $\gamma'$  相形态失稳的不同形状和尺寸是造成晶界锯齿振幅大小的主要因素。晶界两侧分布着不同密度的  $\gamma'$  相颗粒, 也可使晶界发生位移形成波浪式小振幅锯齿晶界。根据实验结果, 提出了有关锯齿晶界的形成模式。

**关键词:** 粉末高温合金;  $\gamma'$  相; 锯齿晶界

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2015.06.002

**中图分类号:** TG113.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2015)06-0007-07

**Abstract:** The formation of serrated grain boundaries as a result of different precipitation behaviors of  $\gamma'$  phases at the grain boundaries in the third generation high-performance nickel-based powder metallurgy superalloy (FGH98I) of very small lattice misfit between the precipitate phases and the matrix was systematically studied under varying heat treatment conditions, using optical microscope, field emission scanning electronic microscope and transmission electronic microscope. The results show that the dominant factor of formation of serrated grain boundaries is that the morphologies of  $\gamma'$  phases precipitate at the grain boundaries are different. The quantity, size and morphology of the  $\gamma'$  phases precipitate at the grain boundaries vary with different solution cooling rates of the heat treatment process, which has a strong influence on the formation of serrated grain boundaries. Amplitudes of the grain boundary serrations are found to decrease from 4.02  $\mu\text{m}$  to 0.63  $\mu\text{m}$  as cooling rates increase from 0.1 °C/s to 10.8 °C/s, however, the wavelength of the grain boundary serrations increases as cooling rates increase. Different morphologies and size of  $\gamma'$  phases which grow into morphology of unstable protrusion result in different amplitudes of the grain boundary serrations. Different densities of  $\gamma'$  particles distributing along the grain boundaries by both sides can drive the grain boundaries to move to produce the grain boundaries with small wavy serrations. Different formation modes of serrated grain boundaries are put forward based on our experiment results.

**Key words:** powder metallurgy superalloy;  $\gamma'$  phase; serrated grain boundary

新一代高推重比航空发动机用双晶粒组织粉末涡轮盘上不同工作区域具有不同的力学性能要求。为提高双晶粒组织涡轮盘轮缘粗晶组织的高温蠕变强度,阻止晶界上的裂纹和孔洞形核与长大是十分重要的,使轮缘粗晶粒呈锯齿状晶界对阻止晶界裂纹是十分有效的强化方法。Zhang 等指出 UDIMET 710 合金中锯齿晶界可降低高温下晶界移动速率,提高蠕变抗力<sup>[1]</sup>。Yao 等发现锯齿晶界的形成可减少三角晶界处的应力集中和增加晶界滑移距离,从而强化晶界<sup>[2]</sup>。Rice 等指出锯齿晶界可增加 Alloy10 合金抵抗高温蠕变断裂及疲劳裂纹扩展的能力<sup>[3]</sup>。Hong 等发现锯齿晶界可使 Nimonic 263 合金的空洞率及蠕变裂纹扩展速率更低,从而提高蠕变性能<sup>[4]</sup>。Yeh 等发现锯齿晶界可使 IN718 合金蠕变断裂寿命提高近 400h<sup>[5]</sup>。Carter 等指出锯齿晶界可明显提高 René 104 合金 700℃左右的蠕变变形抗力<sup>[6]</sup>。

有关锯齿晶界的形成机制研究有很多相关报道。早期,Koul, Henry 以及 Danfloy 等指出晶界  $\gamma'$  相移动会造成晶界片段位移和  $\gamma'$  相朝着晶界方向有取向的不对称生长,均与锯齿晶界的形成有关<sup>[7-9]</sup>。后来, Mitchell 和 Lu 等指出不同组织形态的  $\gamma'$  相以及细小分散的  $\gamma'$  相也会影响锯齿晶界的形成<sup>[10-12]</sup>。Jiang 等指出晶界析出的  $M_{23}C_6$  碳化物也影响锯齿晶界的形成<sup>[13]</sup>。近期,Hong 等认为晶界上 C、Cr 原子的不连续偏析可造成晶界应变,从而促进锯齿晶界的形成<sup>[14]</sup>。在第三代高性能镍基粉末高温合金中,锯齿晶界形成机制的研究鲜有报道,锯齿晶界不同形成机制之间的相互关联,以及形成锯齿晶界的主导因素和形成规律方面的研究尚有欠缺。为此需要进行系统深入的研究,以便通过调控热处理工艺技术获得锯齿晶界,提高双晶粒组织粉末涡轮盘的服役寿命,这将对实际生产具有重要指导意义。

## 1 实验材料与方法

实验材料为第三代新型镍基粉末高温合金 FGH98I,其化学成分(质量分数/%)为 C 0.04, Cr 12.90, Co 20.80, Mo 2.64, W 3.85, Al 3.57, Ti 3.53, Nb 1.51, Ta 1.65, B 0.027, Zr 0.043, Hf 0.20, Ni 余量。FGH98I 合金中  $\gamma'$  相固溶温度为 1170℃,  $\gamma'$  相含量约为 55%<sup>[15]</sup>。FGH98I 母合金为真空感应炉熔炼,采用等离子旋转电极方法制粉,经振动筛分和静电分离相结合的方法除去夹杂,使用 50~150 $\mu$ m 的粉末装入包套并封焊后,采用热等静压固结成型,然后经等温锻造获得细晶盘坯。

实验试样取自锻态盘坯,经 1190℃/1h 的固溶处理后分别以 0.1, 0.4, 1.4, 4.3℃/s 和 10.8℃/s 的冷却速率冷却。利用 Olympus 光学金相显微镜观察显微组织,化学浸蚀剂为  $CuSO_4$  (10g) +  $HCl$  (50mL) +  $H_2O$  (50mL);采用 SUPRA-55 场发射扫描电子显微镜观察试样晶界形貌,电解抛光剂为  $H_2SO_4$  (20%) +  $CH_3OH$  (80%),电解浸蚀剂为  $H_3PO_4$  (170mL) +  $H_2SO_4$  (10mL) +  $CrO_3$  (15g);采用 JES-2100 型透射电子显微镜观察显微组织结构,TEM 用减薄试样用电解双喷法制成,双喷液为高氯酸(10%) + 正丁醇(65%) + 乙醇(25%),电解电压为 50~70V,电解电流为 30~50mA,电解温度用液氮控制在 -30℃。表征锯齿晶界的几何特征用锯齿波长(wavelength)和最大振幅(amplitude)如图 1 所示,并可计算出表征晶界弯曲程度的晶界曲率(Grain Boundary Curvature Ratio, GBCR),它等于晶界的总路径长度与晶界两点间最短直线距离的比值。锯齿晶界特征是对每个冷速下至少 30 张照片中的晶界进行测量来获得。锯齿晶界表征的特征参数和  $\gamma'$  相的等效直径采用 Image-ProPlus 软件来进行测量与统计。

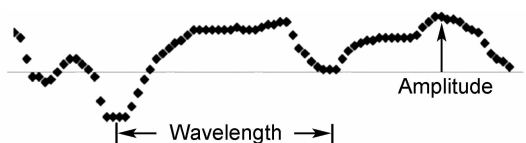


图1 晶界几何参数的示意图

Fig. 1 Schematic of geometry parameters of grain boundary

## 2 结果与分析

### 2.1 合金中直晶界和锯齿晶界形貌

图 2 所示为 FGH98I 合金经固溶热处理获得的直晶界和锯齿晶界的形貌。由图 2(a)可以看出晶界趋于笔直,晶粒形状较规则,晶界无明显析出物;图 2(b)为锯齿晶界形貌,晶界呈圆形弧状峰和波浪形峰,晶粒呈多角的形态,晶界上有明显析出物存在。表 1 给出不同冷速下晶界锯齿的平均振幅、平均波长和晶界曲率(GBCR)的测量值,可以看出晶界锯齿状的程度随冷却速率的变化而改变,较慢的冷速使锯齿的振幅更大而波长更小,晶界曲率变大,这说明晶界的弯曲程度更大;反之,在较高冷速下,晶界的弯曲程度降低,晶界趋向平直。

### 2.2 晶界 $\gamma'$ 相析出对锯齿晶界的影响

图 3 为合金经固溶热处理以不同冷速冷却后的显微组织。由图 3 TEM 像可见锯齿晶界的形成和晶界

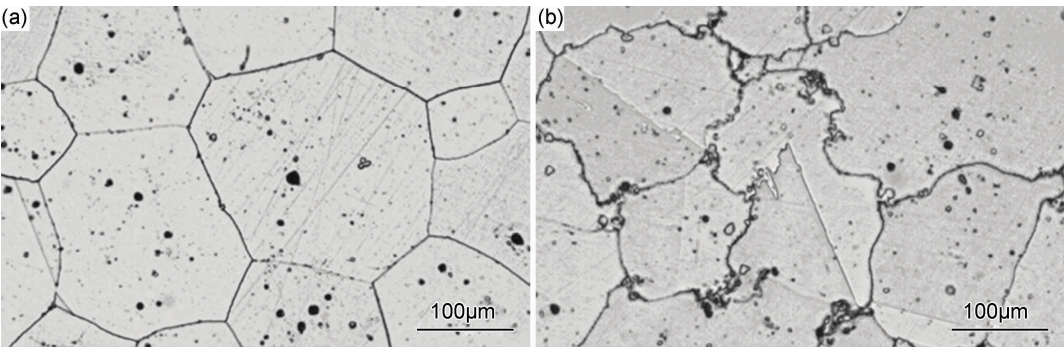


图 2 合金中的直晶界和锯齿晶界

(a)冷速为 10.8℃/s 合金中的直晶界;(b)冷速为 0.4℃/s 合金中的锯齿晶界

Fig.2 Straight grain boundaries and serrated grain boundaries in the alloys

(a)straight grain boundaries in the alloy cooled at 10.8℃/s;(b)serrated grain boundaries in the alloy cooled at 0.4℃/s

表 1 合金经 1190℃/1h 固溶热处理不同冷速下的特征晶界参数

Table 1 Characteristic grain boundary parameters measured as a function of cooling rate of the 1190℃/1h solution heat treatment

Cooling rate/(℃ · s <sup>-1</sup> )	Amplitude/μm	Wavelength/μm	GBCR
0.1	4.02	0.44	6.77
0.4	2.61	0.86	5.10
1.4	0.98	2.26	2.28
4.3	0.64	6.41	1.08
10.8	0.63	15.74	1.02

上析出的  $\gamma'$  相有直接关系。图 3(a) 所示每个锯齿都和 一个或几个晶界  $\gamma'$  相毗连, A、B 两个晶粒晶界的两面发生了凹下和凸起, 晶界上每一个凸起处都对应着

一个  $\gamma'$  相, 这些晶界  $\gamma'$  相尺寸不同, 如  $\gamma'_1$  尺寸较大 (约 533.47nm), 中等尺寸  $\gamma'_2$  (约 340.92nm) 和  $\gamma'_3$  (约 190.40nm), 以及小尺寸  $\gamma'_4$  (约 133.37nm) 和  $\gamma'_5$  (约 76.46nm), 且发现锯齿的平均振幅与沿着晶界位置上的析出物尺寸有直接关系。图 3(b) 中显示的锯齿晶界是由靠近晶界两侧形核的  $\gamma'$  相造成, 如图 3(b) 中的  $\gamma'_1$  和  $\gamma'_4$  在左侧,  $\gamma'_2$  和  $\gamma'_3$  在右侧, 且  $\gamma'$  相近似圆形,  $\gamma'$  相所对应锯齿的振幅相差较大。图 3(c) 中显示了一段晶界上同时存在两个或多个近似圆形的  $\gamma'$  相( $\gamma'_1$  和  $\gamma'_2$ ) 造成的锯齿晶界, 即  $\gamma'_1$  和  $\gamma'_2$  共同造成了一个凸起的晶界, 说明形成锯齿晶界不一定只能是一个  $\gamma'$  相, 而可以是两个或多个不同形状的  $\gamma'$  相。

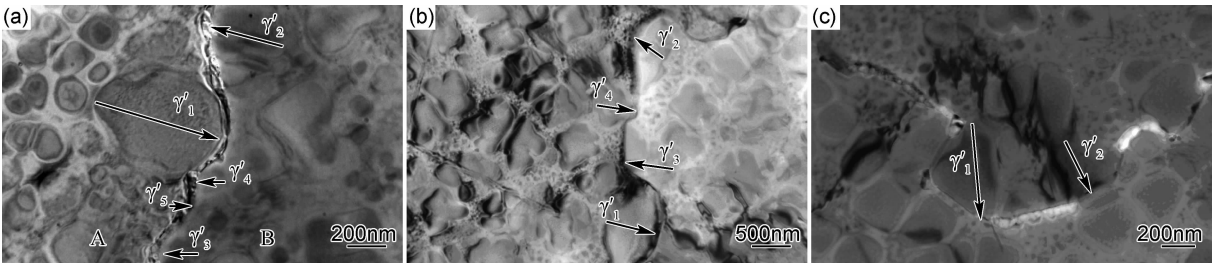


图 3 合金经固溶热处理以 1.4℃/s (a), (b) 和 4.3℃/s (c) 冷却后的显微组织

Fig. 3 Microstructure of the alloys cooled at 1.4℃/s (a), (b) and 4.3℃/s (c) after the solution heat treatment

图 4 所示 SEM 像为合金经固溶热处理以 0.4℃/s 冷却后的显微组织。从图 4(a) 中可以看出晶内  $\gamma'$  相呈方形或树枝状等不规则形状, 晶界上  $\gamma'$  相尺寸相对较大且沿晶界分布, 形状不规则似树枝状生长; 图 4(b) 也示出了晶界上  $\gamma'$  相呈不稳定长出的不规则形状。上述结果表明固溶热处理后以 0.4℃/s 慢冷时, 会促使  $\gamma'$  相的形态发生变化,  $\gamma'$  相朝晶界面生长, 造成了锯齿晶界。

2.3 晶界上  $\gamma'$  相扇形组织对晶界锯齿状形成的影响

本合金中常常出现  $\gamma'$  相扇形组织<sup>[15, 16]</sup> 如图 5 所

示。从图 5(a) 可以看出合金中晶界上分布有  $\gamma'$  相扇形组织, 晶界呈较大的锯齿状, 即晶界锯齿的凹面都对应分布着  $\gamma'$  相扇形组织。图 5(b) 为图 5(a) 的局部放大图, 可以看出  $\gamma'$  相扇形组织除了在晶界形成之外, 尤其是在多个晶界交汇的位置, 如三角晶界处比较发达, 对锯齿晶界的形成影响很大。图 5(c) 为 TEM 照片, 可以清晰地看出扇形结构中手指状二次  $\gamma'$  相枝晶朝着晶界不对称的生长, 且大致和晶界垂直, 使得晶界产生了较大振幅的锯齿。

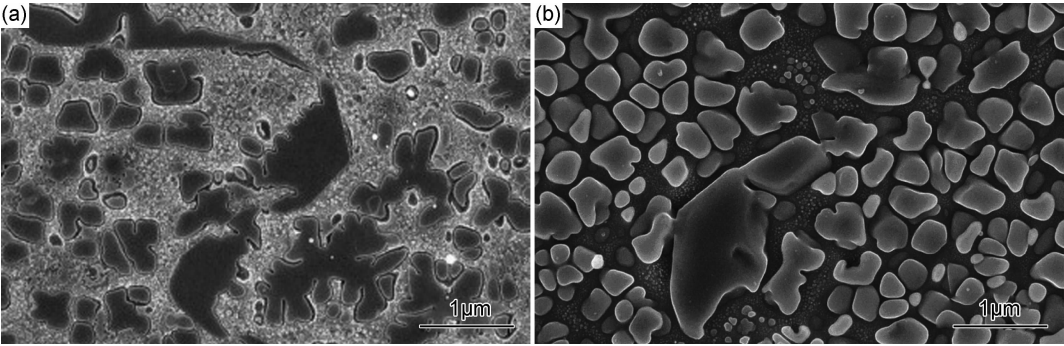


图 4 合金经固溶热处理以 0.4℃/s 冷却后的晶界处  $\gamma'$  相形貌  
(a)锯齿晶界上树枝状  $\gamma'$  相;(b)锯齿晶界上不规则形状  $\gamma'$  相

Fig. 4 Morphology of  $\gamma'$  phases at the grain boundary in alloy cooled at 0.4℃/s after the solution heat treatment  
(a)serrated grain boundary and dendritic  $\gamma'$  phase;(b)serrated grain boundary and irregular  $\gamma'$  phase

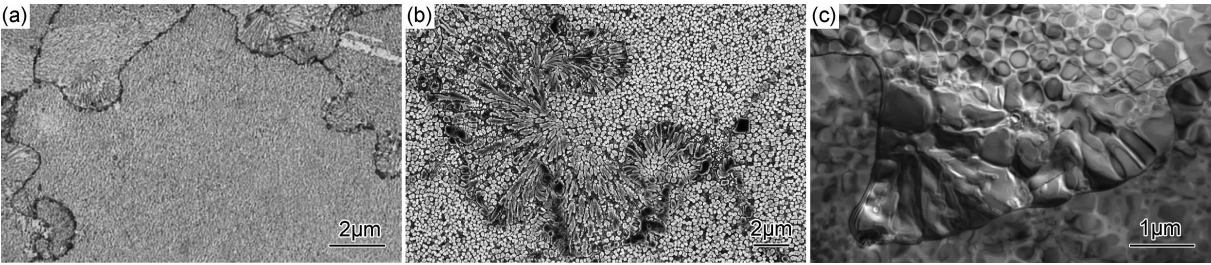


图 5 合金经固溶热处理以 0.1℃/s 冷却后的  $\gamma'$  相扇形组织  
(a)金相显微照片;(b)SEM 显微照片;(c)TEM 显微照片

Fig. 5 Morphology of the  $\gamma'$  fan-type structures in alloy cooled at 0.1℃/s after the solution heat treatment  
(a)OM micrograph;(b)SEM micrograph;(c)TEM micrograph

2.4 晶界无大尺寸析出相时的锯齿晶界

图 6 所示 TEM 图像为合金经固溶热处理快冷(10.8℃/s)冷却后的显微组织。由图 6 可以看出晶界上并无大尺寸的析出相,而晶界却呈小锯齿状,但可发现晶界处分布着不同密度的小尺寸  $\gamma'$  相颗粒。

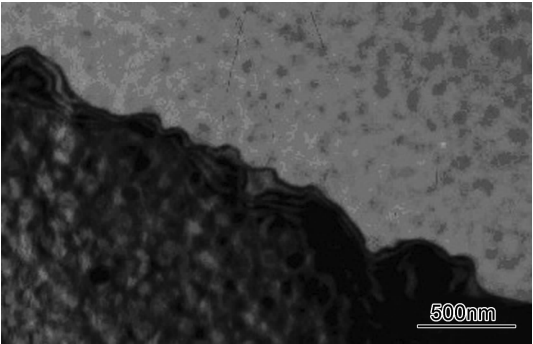


图 6 合金经固溶热处理以 10.8℃/s 冷却后的显微组织  
Fig. 6 Microstructure of the alloy cooled at 10.8℃/s after the solution heat treatment

2.5 分析讨论

随着飞机燃气涡轮发动机出口温度的提高,高温下使用的合金组织中晶界往往是合金失效的薄弱环

节。工程应用实践表明,以  $\gamma'$  相强化的镍基粉末高温合金,经过热处理工艺技术获得锯齿状晶界是晶界强化的有效工程手段。本文实验结果表明,合金热处理过程中强化相  $\gamma'$  相的析出是锯齿晶界形成的重要因素。

根据文献[17]并结合本实验所得结果,建立起 FGH98I 合金中的  $\gamma'$  相析出形态连续冷却转变曲线如图 7 所示。图 7 中示出了不同冷速下析出的  $\gamma'$  相不同形态及其造成的锯齿状晶界,可知锯齿晶界的形成受固溶冷却速率强烈影响。不论采用何种冷速,只要过饱和固溶体发生脱溶分解,晶界有析出相,则总能得到不同程度的锯齿状晶界。随着合金固溶冷却速率不同,析出相  $\gamma'$  相形态是可变的,由  $\gamma'$  相的析出导致的锯齿状晶界的表征参量是不同的(如表 1 所示),锯齿晶界的形成机制也是相异的。本研究根据实验结果,提出以下关于锯齿状晶界的形成模式。

2.5.1  $\gamma'$  相长大造成的锯齿晶界模式

合金自固溶温度冷却时,首先在晶界上发生不均匀形核,析出不同尺寸的  $\gamma'$  相如图 3(a)和图 3(c)所示。由图 3(a)和图 3(c)可以发现每个锯齿都和一个或几个与晶界毗连的  $\gamma'$  相析出有关,而晶界  $\gamma'$  相的长



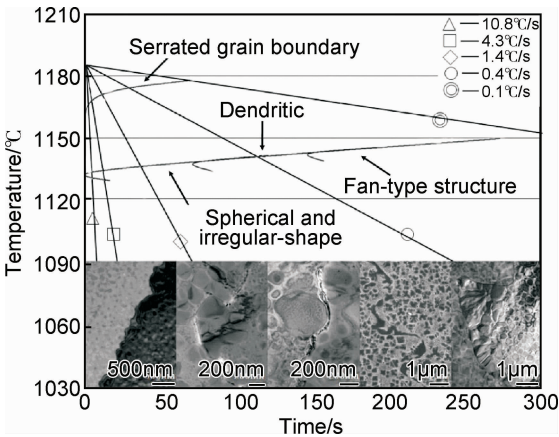


图 7 合金  $\gamma'$  相析出形态连续冷却转变曲线及相应的锯齿晶界形态

Fig. 7 Continuous cooling transformation curves of different morphologies of  $\gamma'$  phases and corresponding serrated grain boundaries

大速率决定于基体中溶质元素的过饱和度,同时也与沿着晶界内界面溶质原子的扩散有关。在  $\gamma'$  相长大过程中, $\gamma'$  相与晶界接触的  $\gamma'/\gamma$  相界面会使晶界发生共格应变的松弛,激发晶界成为容易接纳溶质原子的收集区(collector plates),溶质原子将有两种传输模式:一种是从过饱和和基体区域至接触的晶界,称为点阵原子扩散流;另一种是沿非共格晶界溶质原子的快速扩散流。由于向非共格界面的总溶质原子流比向共格面要多,所以  $\gamma'$  相向晶界一侧长大的总体积比向相反方向长大的要大得多,这样流向  $\gamma'/\gamma$  相界面的溶质原子流将引起  $\gamma'$  相垂直晶界方向长大推动晶界移动,形成锯齿状晶界。此类锯齿晶界形成的示意图如图 8 所示,其中箭头表示溶质原子传输方向:A 为过饱和和  $\gamma$  固溶体向  $\gamma'$  相的扩散,B 为沿晶界的快速扩散。

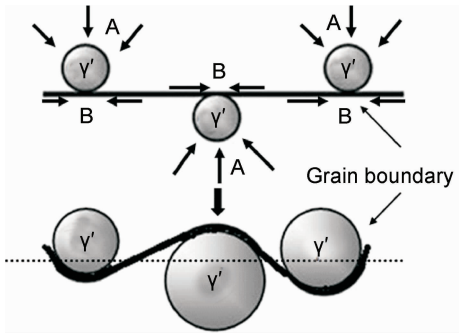


图 8 晶界  $\gamma'$  相长大造成锯齿晶界的示意图

Fig. 8 Schematic of formation of serrated grain boundaries caused by growth of  $\gamma'$  phases at the grain boundaries

2.5.2 晶界  $\gamma'$  相移动造成的锯齿晶界模式

一般情况下晶界锯齿的振幅与晶界上分布的  $\gamma'$

相尺寸相当(图 3(a),(c)),但在图 3(b)中  $\gamma'_1$  相和  $\gamma'_2$  相所对应锯齿的振幅比析出相尺寸要大,表明此时晶界锯齿并不是由晶界  $\gamma'$  相的长大所造成。结合 Koul 等<sup>[7, 18]</sup> 提出的基于晶界  $\gamma'$  相移动的理论, $\gamma'/\gamma$  相界面为共格界面,而  $\gamma'/$ 晶界界面为非共格界面,两种界面间的净应变能差,会提供一个驱动力使  $\gamma'$  相向晶界方向移动,使晶界呈锯齿状,随后  $\gamma'$  相的移动被晶界线张力所终止,如图 9 所示。在此理论中要求晶界  $\gamma'$  相尺寸达到一个最小临界尺寸才能发生  $\gamma'$  相的移动,由式(1)给出

$$r = \frac{3\gamma_{st}}{4\mu\delta^2}$$

(1)

式中: $\gamma_{st}$ 是由错配位错引起的畸变导致的界面能; $\delta$ 为析出相与基体间的错配度; $\mu$ 为基体剪切模量。FGH98I 合金在 1190~900℃ 范围内  $\delta = 0.0029$ ,  $\gamma_{st} = 0.1\text{N/m}$ ,  $\mu$  约为 10GPa<sup>[19]</sup>,由此得出在 FGH98I 中使  $\gamma'$  相发生移动的临界尺寸约为 0.8 $\mu\text{m}$ ,所以当  $\gamma'$  相尺寸大于临界尺寸时,晶界  $\gamma'$  相可以发生移动造成锯齿晶界。由图 3(b)测量得晶界上  $\gamma'_1$  相和  $\gamma'_2$  相的等效直径分别为 1.1453 $\mu\text{m}$  和 0.8388 $\mu\text{m}$ ,都超过了  $\gamma'$  相可移动的临界尺寸,因此可以发生由晶界  $\gamma'$  相移动造成局部晶界迁移产生锯齿晶界。

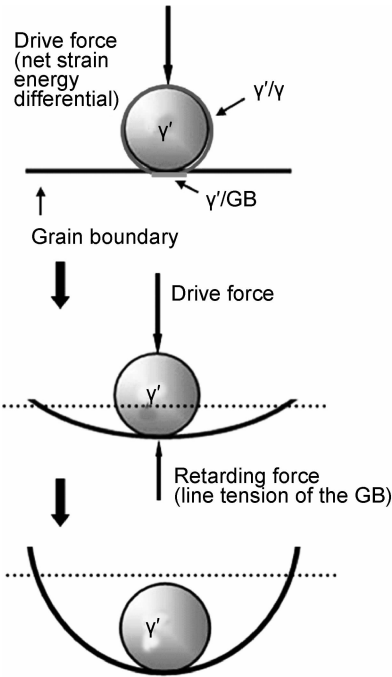


图 9 晶界  $\gamma'$  相移动造成锯齿晶界的示意图

Fig. 9 Schematic of formation of serrated grain boundaries caused by movement of  $\gamma'$  phases at the grain boundaries

2.5.3  $\gamma'$  相不稳定长出形态造成的锯齿晶界模式

合金在固溶热处理后慢冷时, $\gamma'$  相的形态发生失

稳,可推动晶界产生锯齿。通过 TEM 观察,树枝状  $\gamma'$  相是从母相  $\gamma'$  相任何部位长出,它与  $\gamma'$  相间不存在相界面也无晶格错配关系(图 4)。这种长出的形态根本原因是在足够的过饱和度条件下,晶界处局部溶质原子不均匀分布,发生点扩散效应,可为  $\gamma'$  相不稳定长出提供足够的溶质原子,同时沿着晶界的内界面溶质原子扩散较快,造成  $\gamma'/\gamma$  相界面的不稳定而出现  $\gamma'$  相不稳定长出形态(unstable protrusion structure), $\gamma'$  相朝晶界面生长,造成了锯齿晶界。此类锯齿晶界形成的示意图如图 10 所示,其中箭头表示溶质原子传输方向:A 和 C 分别为过饱和  $\gamma$  固溶体向晶界和  $\gamma'$  相的扩散,B 为沿晶界的快速扩散。

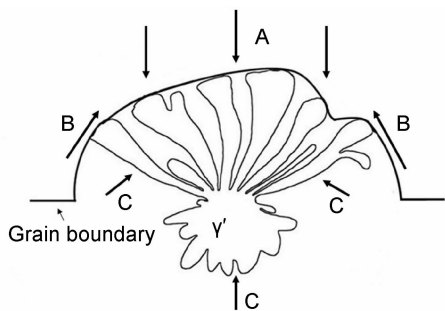


图 10 晶界树枝状  $\gamma'$  相长大造成锯齿晶界的示意图

Fig. 10 Schematic of formation of serrated grain boundaries caused by growth of dendritic  $\gamma'$  phases at the grain boundaries

#### 2.5.4 $\gamma'$ 相扇形组织发展造成的锯齿晶界模式

在 FGH98I 这类低错配度合金中,在一定热处理条件下常常观察到  $\gamma'$  相扇形组织形成<sup>[10, 15, 16]</sup>。如图 5 所示为  $\gamma'$  相扇形组织形貌,是由二次  $\gamma'$  相枝晶和其间的  $\gamma$  基体组成, $\gamma'$  相扇形组织的发展包括手指状二次  $\gamma'$  相枝晶的长大和枝晶分叉的发展:前者手指状枝晶的向前长大,取决于冷却时晶界  $\gamma'$  相在不同冷却温度区间形成的  $\gamma'$  相中 Al、Ti 浓度不同,即高温析出  $\gamma'$  相中 Al、Ti 浓度高而低温析出  $\gamma'$  相中的 Al、Ti 浓度相对较低,在  $\gamma'$  相内部出现了 Al、Ti 浓度梯度,促使 Al、Ti 发生定向扩散形成  $\gamma'$  相定向长大推动晶界迁移,正如实验发现扇形组织中二次  $\gamma'$  相枝晶臂朝着晶界不对称的生长,推动晶界造成锯齿晶界,且此时锯齿的振幅也较大(图 5(c))。其示意图如图 11 所示,其中箭头表示溶质原子传输方向:A 为沿晶界的快速扩散,B 为  $\gamma'$  相内部由 Al、Ti 浓度梯度引起的短程扩散,C 为过饱和  $\gamma$  固溶体向  $\gamma'$  相扇形组织的扩散。

#### 2.5.5 晶界无大尺寸析出相时造成锯齿晶界模式

当晶界上没有大尺寸析出相存在也能够产生晶界

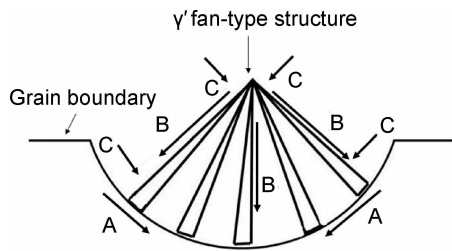


图 11 晶界  $\gamma'$  相扇形组织造成锯齿晶界的示意图

Fig. 11 Schematic of formation of serrated grain boundaries caused by  $\gamma'$  fan-type structure at the grain boundaries

锯齿,但实验发现晶界近旁分布着不同密度的  $\gamma'$  相,如图 6 所示。由于  $\gamma'$  相与基体呈共格析出,当晶界两侧  $\gamma'$  相颗粒密度不同时,会沿着晶界区域造成不同程度的共格应变,甚至会发生共格应变场重叠,增加应变场强度,使晶界两侧产生点阵畸变;由于不规则的点阵畸变使晶界处的某一部分处于被压或是被拉的状态,为了释放这种不平衡的应变能会在晶界附近产生一定的驱动力,触发晶界形成锯齿状。由于这种驱动力不足以促使大振幅锯齿的形成,晶界会发生小位移,因此常以小波浪锯齿状形式出现,其示意图如图 12 所示。

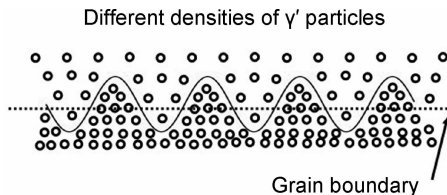


图 12 晶界两侧  $\gamma'$  相密度不同造成锯齿晶界的示意图

Fig. 12 Schematic of formation of serrated grain boundaries caused by different densities of  $\gamma'$  phases distributing along both sides of the grain boundaries

### 3 结论

(1)高性能镍基粉末高温合金在热处理固溶冷却过程中  $\gamma'$  相的析出行为敏感于固溶冷却速率,是造成锯齿状晶界的主导因素。

(2)锯齿晶界是在过饱和固溶体固溶冷却过程中  $\gamma'$  相的析出阶段形成的,锯齿的波长随冷速增加而变大,振幅随冷速增加而降低,本研究冷速 0.1~10.8℃/s 范围内晶界锯齿振幅为 4.02~0.63 $\mu\text{m}$ ,冷却速度对锯齿振幅起重要作用。

(3) $\gamma'$  相形态失稳的形状和尺寸是造成晶界锯齿振幅大小的主要因素。

(4)晶界两侧分布着不同密度的  $\gamma'$  相颗粒,也可使晶界发生位移形成波浪式小尺寸锯齿晶界。

## 参考文献

- [1] ZHANG Y, MARQUIS F D S. Effects of grain boundary morphology and dislocation substructure on the creep behavior of Udimet 710 [A]. Superalloys 1996 [C]. Pennsylvania: TMS, 1996. 391—399.
- [2] YAO X X, FANG Y, KIM H T, et al. The microstructural characteristics in a newly developed nickel-base cast superalloy[J]. Mater Charact, 1997, 38(2): 97—102.
- [3] RICE D, KANTZOS P, HANN B, et al. PM alloy 10-A 700 °C capable nickel-based superalloy for turbine disk applications[A]. Superalloys 2008[C]. Pennsylvania: TMS, 2008. 139—148.
- [4] 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]. Mater Sci Eng: A, 2009, 517(1): 125—131.
- [5] YE H A C, LU K W, KUO C M, et al. Effect of serrated grain boundaries on the creep property of Inconel 718 superalloy[J]. Mater Sci Eng: A, 2011, 530: 525—529.
- [6] CARTER J L, ZHOU N, SOSA J M, et al. Characterization of strain accumulation at grain boundaries of nickel-based superalloys[A]. Superalloys 2012[C]. Pennsylvania: TMS, 2012. 43—52.
- [7] KOUL A K, GESSINGER G H. On the mechanism of serrated grain boundary formation in Ni-based superalloys[J]. Acta Metall, 1983, 31(7): 1061—1069.
- [8] HENRY M F, YOO Y S, YOON D Y, et al. The dendritic growth of  $\gamma'$  precipitates and grain boundary serration in a model nickel-base superalloy[J]. Metall Trans A, 1993, 24(8): 1733—1743.
- [9] DANFLOU H L, MACIA M, SANDERS T H, et al. Mechanisms of formation of serrated grain boundaries in nickel base superalloys[A]. Superalloys 1996[C]. Pennsylvania: TMS, 1996. 119—127.
- [10] MITCHELL R J, LI H Y, HUANG Z W. On the formation of serrated grain boundaries and fan type structures in an advanced polycrystalline nickel-base superalloy[J]. J Mater Process Technol, 2009, 209(2): 1011—1017.
- [11] LU X D, DENG Q, DU J H, et al. Effect of slow cooling treatment on microstructure of difficult deformation GH4742 superalloy[J]. J Alloys Compd, 2009, 477(1): 100—103.
- [12] LU X D, DU J H, DENG Q. Effect of slow cooling treatment on hot deformation behavior of GH4742 superalloy[J]. J Alloys Compd, 2009, 486(1): 195—198.
- [13] 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]. Mater Sci Eng: A, 2012, 536: 37—44.
- [14] HONG H U, KIM I S, CHOI B G. On the mechanism of serrated grain boundary formation in Ni-based superalloys with low  $\gamma'$  volume fraction [A]. Superalloys 2012 [C]. Pennsylvania: TMS, 2012. 53—61.
- [15] WU K, LIU G Q, HU B F, et al. Formation mechanism and coarsening behavior of fan-type structures in a new Ni-Cr-Co-based powder metallurgy superalloy[J]. J Mater Sci, 2012, 47(11): 4680—4688.
- [16] 胡本芙, 刘国权, 吴凯, 等. 新型镍基粉末高温合金  $\gamma'$  相扇形组织形成及演化行为研究[J]. 金属学报, 2012, 48(7): 830—836.  
HU Ben-fu, LIU Guo-quan, WU Kai, et al. Morphological changes behavior of fan-type structure of  $\gamma'$  precipitates in nickel-based powder metallurgy superalloys[J]. Acta Metall Sin, 2012, 48(7): 830—836.
- [17] 胡本芙, 刘国权, 吴凯, 等. 镍基粉末冶金高温合金中  $\gamma'$  相形态不稳定性研究[J]. 金属学报, 2012, 48(3): 257—263.  
HU Ben-fu, LIU Guo-quan, WU Kai, et al. Morphological instability of  $\gamma'$  phase in nickel-based powder metallurgy superalloys[J]. Acta Metall Sin, 2012, 48(3): 257—263.
- [18] KOUL A K, THAMBURAJ R. Serrated grain boundary formation potential of Ni-based superalloys and its implications[J]. Metall Trans A, 1985, 16(1): 17—26.
- [19] 吴凯, 刘国权, 胡本芙, 等. 合金元素对新型镍基粉末高温合金的热力学平衡相析出行为的影响[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(6): 719—727.  
WU Kai, LIU Guo-quan, HU Ben-fu, et al. Effect of alloy elements on the precipitation behavior of thermodynamic equilibrium phases in new type nickel-based P/M superalloys[J]. J Univ Sci Technol Beijing, 2009, 31(6): 719—727.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2013AA031601); 国家预研基金项目(9140A12070507QT0202)

收稿日期: 2014-08-11; 修订日期: 2014-11-25

通讯作者: 刘国权(1952—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事金属材料 and 合金设计的研究, 联系地址: 北京市海淀区学院路 30 号北京科技大学材料科学与工程学院(100083), E-mail: g. liu@ustb. edu. cn