

GH720Li 时效态合金一次 γ' 相的微观形态和三维 EBSD 表征

韩小磊^{1,2,3}, 杜志伟^{1,2,3}, 车 聪^{1,2,3}, 彭永刚^{1,2,3}, 贾荣光^{1,2,3}, 李 婷^{1,2,3}, 李 聪^{1,2,3}

(1. 有研科技集团有限公司 国家有色金属及电子材料分析测试中心, 北京 101407)

(2. 国合通用测试评价认证股份公司, 北京 101407)

(3. 国标(北京)检验认证有限公司, 北京 101407)

摘 要: GH720Li 合金是航空发动机涡轮盘首选材料。采用扫描电子显微镜 (SEM)、透射电子显微镜 (TEM)、能谱仪 (EDS) 对 GH720Li 双时效态合金中 3 种 γ' 相的微观形貌、结构和微区成分进行了研究。基于聚焦离子束-电子束双束系统并应用 EBSD-EDS 联用技术对合金 γ 相和一次 γ' 相进行了分析, 并应用 Avizo 软件对一次 γ' 相进行了三维重构。获得了合金一次 γ' 相的三维形态以及形态参数, 给出了一次 γ' 相的体积分数, 并与二维切片的分析结果进行了对比。结果表明, 合金基体相和一次 γ' 相都存在大量的 $\Sigma 3$ 孪晶界。一次 γ' 相在三维尺度上存在多种形态, 一些较大尺寸 γ' 相在二维截面上呈现不连续分布。三维 EBSD 可更全面反映一次 γ' 相的真实形态。一次 γ' 相三维信息的获得为改进合金的热处理工艺提供了依据。

关键词: GH720Li 合金; 3D EBSD; γ' 相; 一次 γ' 相

中图分类号: TG146.1⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)04-1410-09

航空发动机的性能直接影响航空器的飞行能力和安全可靠, 因此对应用在航空发动机上的高温合金材料的性能提出了更高的要求^[1]。GH720Li 合金是一种高强度、耐腐蚀、沉淀强化型镍基高温合金, 具有较高的高温强度、良好的抗蠕变、抗疲劳和抗氧化性能, 适合在 650~750 °C 长期工作, 是先进航空发动机涡轮盘的首选材料^[2-8]。

镍基高温合金优异的高温力学性能与 γ' 相有密切联系, 其在基体 γ -Ni 相上共格析出具有 $L1_2$ 结构, 在一些镍基高温合金中 γ' 相体积分数甚至高达 65%, 高体积分数的 γ' 相可以使镍基高温合金获得较好的强化效果^[9-10]。 γ' 相作为高温合金的主要强化相, 其体积分数、形态、尺寸分布、化学成分等将直接影响合金的综合性能^[11-12]。热处理制度是影响高温合金中 γ' 强化相的重要因素, 固溶时效温度、保温时间和冷却速度等都会对合金中 γ' 相的数量、尺寸、形态分布产生重要影响^[13-14]。通过热处理获得多模态的 γ' 相有利于高温合金获得优异的综合性能^[15]。高温合金热处理过程中 γ' 相的析出行为以及 γ' 相形态对高温合金性能的影响是研究的热点。Jackson 和 Reed^[16] 研究表明

UDIMET 720Li 合金中存在基体 γ 相, 一次、二次和三次 γ' 相。Carter^[17] 的研究表明 γ' 相高的体积分数可为合金提供良好的析出强化效果, 但也会使合金的变形抗力提高, 热塑性下降, 热加工窗口变窄。有研究表明粗大的 γ' 相相对提高高温合金的蠕变性能和疲劳裂纹扩展有益, 而细小的 γ' 相则有利于提升合金的抗拉强度和抗疲劳强度^[18]。刘健等人^[19] 研究认为 γ' 相的尺寸决定了位错与 γ' 相的相互作用机制, 决定了合金的蠕变行为。Grant 等人^[20] 研究了 γ' 相的尺寸对高温合金动态应变时效性能的影响。大部分研究论述了 γ' 相二维形态对高温合金性能的影响, 但由于二维形态只展示了 γ' 相在某平面上的截面, 并不能全面反映 γ' 相的真实形态。有研究者应用双束电镜研究了高温合金中 γ' 相的 3D 形态, 但其分析区域较小^[21-22]。Child^[23] 应用 3D EBSD 技术研究了 720Li 合金的 γ/γ' 相结构, 并分析了实验参数对于分析结果的影响, 但受离子束加工效率或 EBSD 扫描速度限制, 其测试步长较大, 测试切片面积较小。随着双束电镜、EBSD 和 EDS 数据采集效率和自动化水平的提升, 较大面积、较小步长、较多切片的三维 EBSD 分析成为可能。三维 EBSD 已

收稿日期: 2022-03-03

基金项目: 国家工业和信息化部资助国家新材料测试评价平台建设项目 (TC170A5SU-1)

作者简介: 韩小磊, 男, 1982 年生, 博士, 高级工程师, 有研科技集团有限公司国家有色金属及电子材料分析测试中心, 北京 101407, 电话: 010-82241375, E-mail: hanxiaolei@gbtcgroup.com

成为一种重要的高通量材料分析技术。

本工作采用扫描电镜 (SEM)、透射电镜 (TEM)、高角度环形暗场扫描透射 (HAADF) 和能谱仪 (EDS) 研究了 GH720Li 镍基高温合金空冷时效状态 γ' 相的微观组织, 并基于 FIB-SEM 系统, 应用 EBSD-EDS 联用技术采集获得了近百个合金切片的 EBSD 数据, 应用 Avizo 软件对数据进行了三维重构, 获得了微米级一次 γ' 相的真实三维形态, 为优化合金的热处理制度提供理论依据。

1 实验

研究对象为采用锻造方式加工的双时效态 GH720Li 合金, 试样切取自合金圆柱半径一半位置。采用 JSM-7900F 扫描电子显微镜、Talos F200X 透射电镜及能谱仪对合金中的 γ' 相的形态、分布和微区成分进行了分析。采用双喷电解减薄方法制备透射电镜样品, 电解液为 10% 高氯酸+90% 乙醇溶液, 电流为 50 mA 左右, 温度控制在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

应用 Scios Dual Beam 双束系统对样品进行了离子束加工, 同时应用 EBSD 和 EDS 探头采集 3D EBSD-EDS 数据。离子束的加速电压为 30 kV, 电流为 30 nA, 离子束加工方向与观察平面垂直, 使用摇摆球磨 (rocking milling) 功能消除离子束加工的窗帘效应, 每间隔 200 nm 采集一次 EBSD-EDS 数据, 切片面积为 $51.48\text{ }\mu\text{m}\times 49.78\text{ }\mu\text{m}$, 采集步长为 $0.12\text{ }\mu\text{m}$, 连续采集了 89 个切片的 EBSD 数据。EBSD 采集的水平方向设为 X 方向, 采集的竖直方向设为 Y 方向, 离子束的加工方向为 Z 方向。应用 EBSD 采集软件 TEAM 中的 Chi-Scan 功能模块, 利用 γ' 相和基体 γ 相成分差异对两相进行分离, 采用 OIM 软件对 XY 面各层数据进行分析, 输出各层的 EBSD 分析数据, 应用 Avizo 软件对 EBSD 数据进行了三维重构。采用 3D 重构软件中的 Align 功能对图片的位置进行微调, 以消除各层之间在 FIB 制样过程中产生的微小位置偏移。在 3D 重构过程中, 去除了体积小于 450 个像素的 γ' 相, 在应用单层数据进行平面 EBSD 分析时, 去除了面积小于 60 个像素的 γ' 相。应用 Avizo 软件的 Label Analysis 功能导出每个连续的 γ' 相的体积、表面积、球形度等形态参数。

2 结果及分析

2.1 GH720Li 合金中 γ' 相的二维显微组织

GH720Li 合金横截面 (与圆柱底面平行) 和纵截面 (与圆柱底面垂直) 的显微组织如图 1 所示, 由图 1 可见合金横截面与纵截面 γ' 相的尺寸和形态差异不大。GH720Li 合金 γ' 相的微观组织如图 2、图

3 所示, 图 2a 为背散射电子像, 图 2b 为高位二次电子像, 图 3 为 γ' 相的 STEM-HAADF 像。可以观察到合金中 γ' 相呈三模态分布, 存在一次 γ' 相、二次 γ' 相和三次 γ' 相。其中一次 γ' 相的尺寸在 $1\sim 5\text{ }\mu\text{m}$, 形态以椭

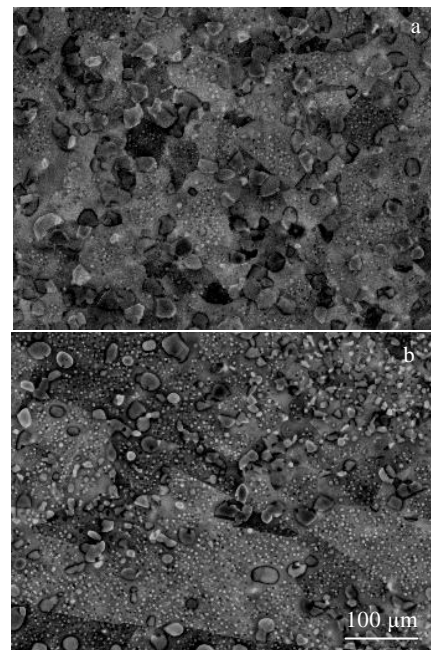


图 1 GH720Li 合金横截面与纵截面的显微组织
Fig.1 Microstructures of GH720Li in transverse (a) and longitudinal (b) section

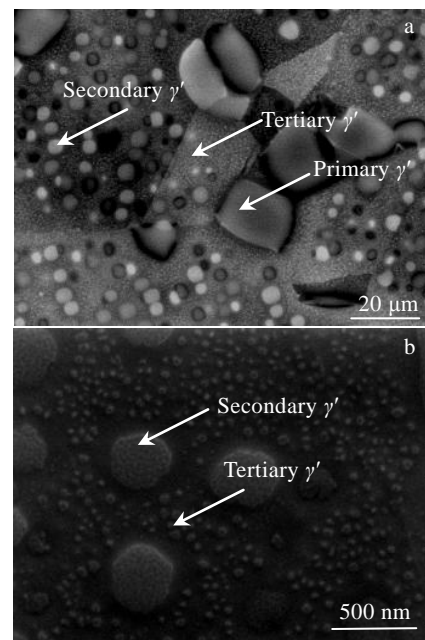


图 2 GH720Li 合金 γ' 相的形态
Fig.2 Morphologies of γ' phase in GH720Li alloy: (a) backscatter electron image and (b) secondary electron image

圆形和不规则的多边形为主，一次 γ' 相在锻造过程中形成，在后续的固溶处理过程中未完全溶解，其主要分布在基体相的晶界处，对晶界起钉扎作用，使晶粒细化。二次 γ' 相在基体中弥散分布，其尺寸在 100 nm~1 μm 之间，体积分数较大，为主要强化相，二次 γ' 相形状接近正方形。而三次 γ' 相大部分在 50 nm 以下，一些较小的三次 γ' 相在 10 nm 以下，三次 γ' 相主要在时效过程中析出，起补充强化作用。在一次 γ' 相周围存在 1~2 μm 宽的无 γ' 相析出带，如图 3a 所示。一次 γ' 相在析出过程中消耗了周围的 Ti、Al 等溶质原子，使二次 γ' 相在一次 γ' 相周边难以析出，形成无二次 γ' 相析出带，过多的一次 γ' 相会降低二次 γ' 相的强化效果。在无二次 γ' 相析出带中，存在较多的三次 γ' 相。

GH720Li 中的基体 γ 相为 fcc 结构， γ' 相为 Li_2 结构。图 4 为 γ' 相的电子衍射花样， γ' 相的电子衍射花样较亮点与 γ 相的衍射斑点一致，但在 (100)、(010) 及 (110) 等位置出现超点阵斑点，这是 γ' 相中不同原子的有序排列形成的。 γ 相和 γ' 相各晶面产生的菊池带之间的角度完全一致，只依据菊池花样信息无法将 γ

相和 γ' 相区分。图 5 和图 6 为 γ' 相的元素面分布，展示了一次 γ' 相、二次 γ' 相和三次 γ' 相和基体 γ 相的元素组成，由元素面分布结果可知，3 种不同尺寸的 γ' 相元素组成一致，为富 Ni、Al、Ti 相，而基体 γ 相相比 γ' 相，其 Cr、Co 的含量相对较高。可采用 EBSD-EDS 联用技术同时采集合金的菊池花样和能谱，应用 EBSD 采集软件中的 Chi-Scan 功能依据相成分的差异对两相进行分离。合金中的二次 γ' 相和三次 γ' 相尺寸在 1 μm 以下，其尺寸小于扫描电镜能谱的空间分辨率，EBSD-EDS 联用技术不能将其准确识别。

2.2 GH720Li 合金中 γ' 相的三维表征

图 7 展示了 GH720Li 合金的菊池花样质量图 (IQ)、反极图面分布图 (IPF) 和相分布图 (phase map)。通过 EBSD-EDS 识别的一次 γ' 相与 IPF 图中色块的轮廓线是基本吻合的，受能谱空间分辨率限制，一些区域的轮廓线出现较小程度的偏离，但对一次 γ' 相的形态和大小影响较小。由图 7b、7c 可观察到合金中的一次 γ' 相在 γ 相的晶内和晶界均有分布，大部分一次 γ' 相与 γ 相不存在特定的取向关系。在图 7e、7f 中，观察到基体 γ 相的晶粒内存在与其取向一致的一

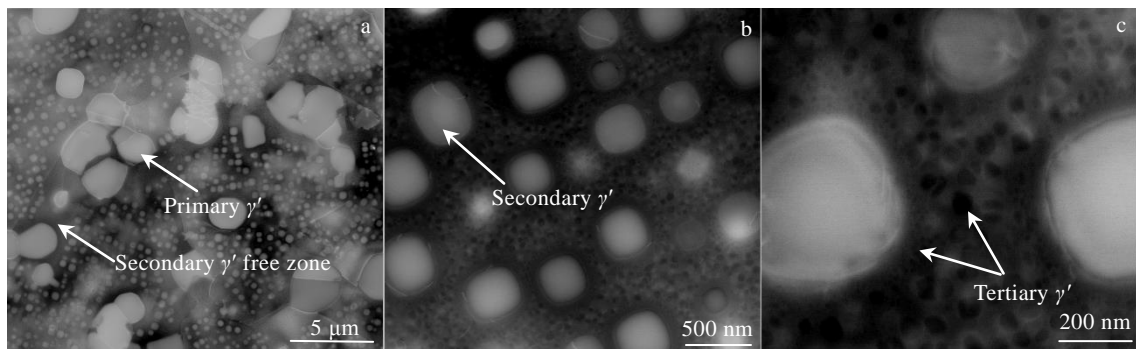


图 3 GH720Li 合金 γ' 相的 STEM-HAADF 像

Fig.3 STEM-HAADF images of γ' phase of GH720Li alloy

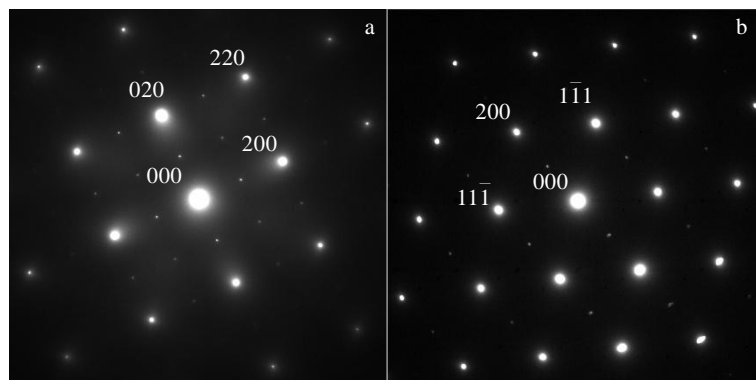


图 4 GH720Li 中一次 γ' 相的电子衍射花样

Fig.4 Electronic diffraction patterns of primary γ' phase: (a) [001] zone axis and (b) [011] zone axis

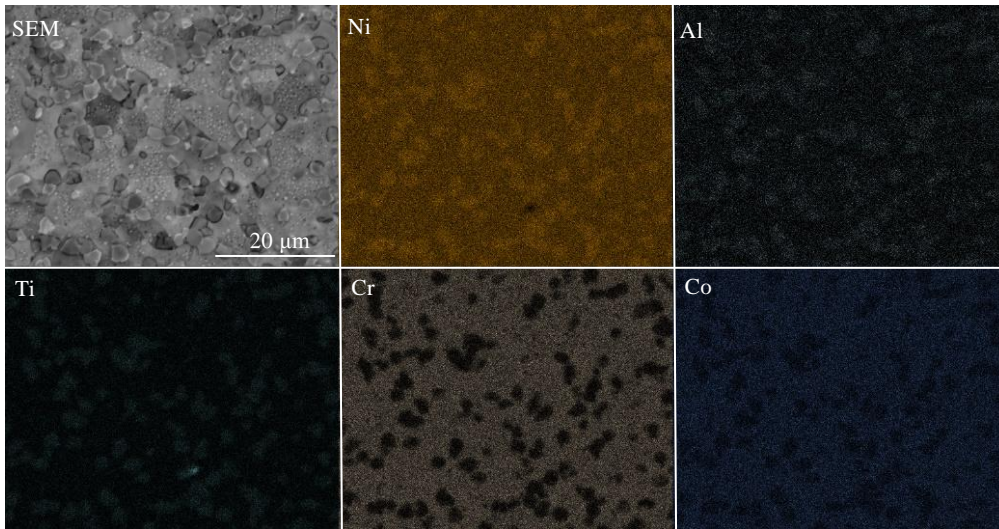


图 5 GH720Li 合金的 SEM 像和 EDS 元素面扫描

Fig.5 SEM image and EDS element mappings of GH720Li alloy

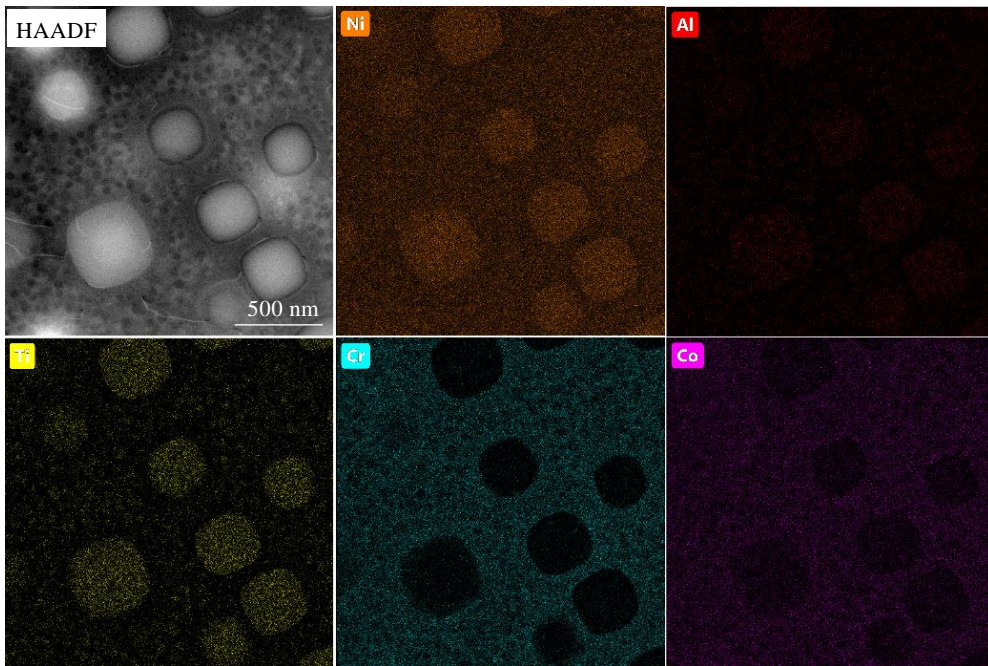


图 6 GH720Li 合金的 TEM 像和 EDS 元素面扫描

Fig.6 TEM image and EDS element mappings of GH720Li alloy

次 γ' 相 (箭头所指), 在对应的 IQ 图 7d 中观察到模糊的衬度与一次 γ' 相对应, 但并未观察到明显边界, 此一次 γ' 相与基体相应存在共格关系, 但这种共格关系在本论文研究合金中不是普遍存在的。图 8 为 γ 相和一次 γ' 相中晶界的取向差分布统计图, 由图可见 γ 相和一次 γ' 相均存在较多的 60° 晶界, 占比超 30%, 这是因为合金的 γ 相和一次 γ' 相均存在较多的观察到合金的基体 γ 相和一次 γ' 相存在大量旋转角为 60° 旋转轴为 $\langle 111 \rangle$ 的 $\Sigma 3$ 孪晶界, 在图 7c 和图 7f 中, 将 $\Sigma 3$

孪晶界用粗线表示, 其他晶界用细线表示。

选取了 EBSD 测试的等间隔切片对一次 γ' 相的形态和晶粒进行了分析, 二维晶粒重构图如图 9 所示。一次 γ' 相的颗粒尺寸、晶粒尺寸、面积分数等参数列于表 1, 并依据圆形成度 $= 4\pi A/P^2$ (A 为颗粒面积, P 为颗粒周长) 计算了一次 γ' 相的颗粒圆形成度。由图 8 可以看出一次 γ' 相一般由 1~5 个晶粒组成, 其平均圆形成度较低, 其多切片的平均面积分数为 18.8%。

应用 Avizo 软件对相分布图进行了三维重构, 重

构过程中去除了体积大于 450 个像素的 γ' 相，这些体积较小的相的主要是二次 γ' 相，由于能谱空间分辨率的限制，EBSD-EDS 分析无法准确识别二次 γ' 相的边界。本研究应用三维 EBSD 只对一次 γ' 相进行分析，因此去除这些尺寸较小的点是合理的。

图 10 为 GH720Li 合金一次 γ' 相的三维渲染图，图 11 展示了合金中一次 γ' 相 3 个平面的渲染图。由三维渲染图可得出，一次 γ' 相的形态在 3 个不同展示面上无明显差异。计算得到一次 γ' 相的体积分数为 18.6%，与表 1 通过 5 个切片计算的面积分数平均值 18.8% 基本一致。结果表明，多区域取平均值的平面 EBSD 测试方法，同样可以得到较为准确的一次 γ' 相体积分数值。

通过三维 EBSD 重构，在分析区域内共获得 779 个独立不连接的一次 γ' 相（体积大于 450 个像素）的形态参数，包括一次 γ' 相的体积、表面积、等效球直径等。并依据球形度公式：

$$S_d = 4\pi \left(\frac{3V_p}{4\pi} \right)^{\frac{2}{3}} / S_p \quad (1)$$

式中， V_p 为颗粒体积， S_p 为颗粒表面积，计算了每个一次 γ' 相的球形度。选取了 4 个典型的一次 γ' 相分别在 XY、XZ 和 YZ 面上进行了展示，如图 12 所示，图 12 中一次 γ' 相的形状参数和分析区域一次 γ' 相颗粒平均形态参数列于表 2。由表 2 发现一些体积较小的一次 γ' 相球形度值较高，如 1 号和 2 号一次 γ' 相颗粒，而较大体积的一次 γ' 相球形度值相对较低，如 4 号一

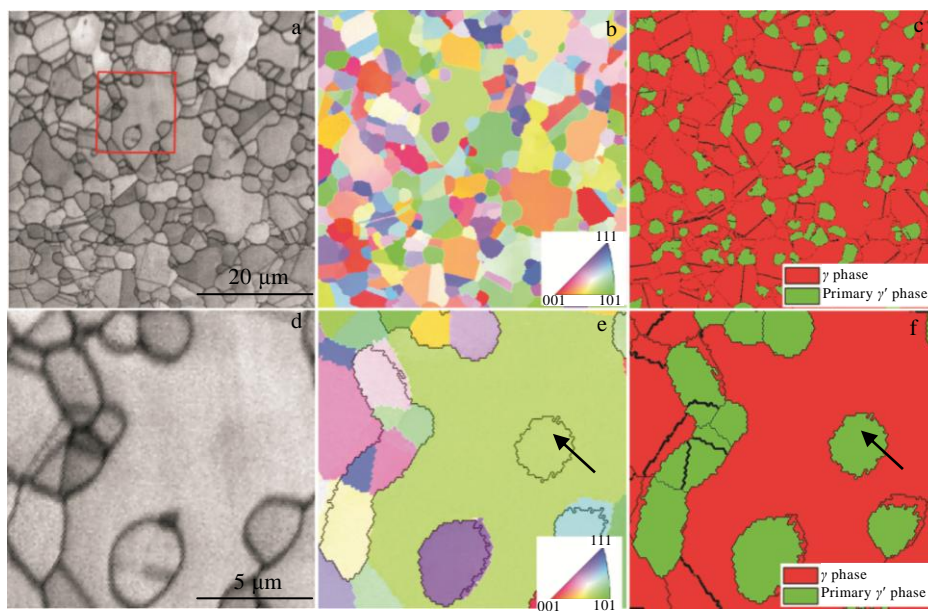


图 7 GH720Li 合金的 EBSD 分析图 (扫描区域为 110 μm×86 μm，扫描步长为 0.12 μm)

Fig.7 EBSD images of GH720Li alloy: (a) IQ map (image quality); (b) IPF map (inverse pole figure map); (c) phase map+grain boundary (fine line) +twin boundary (rough line); IQ (d), IPF (e), and phase (f) maps in the red frame marked in Fig.7a

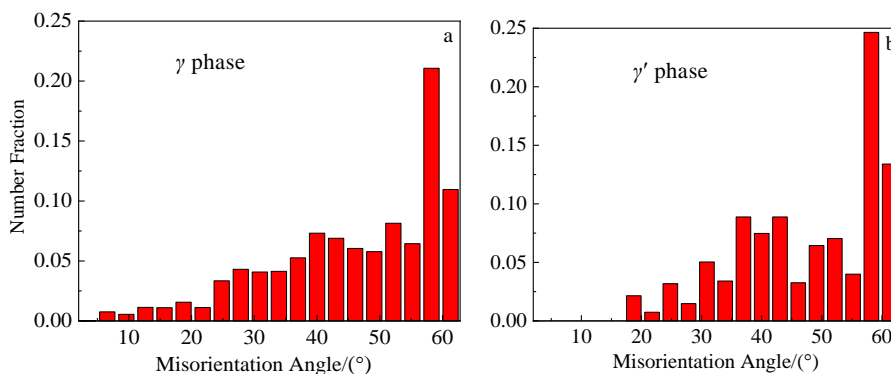


图 8 GH720Li 合金 γ 相和 γ' 相的 5°以上取向差角分布

Fig.8 Misorientation angle distribution ($\geq 5^\circ$) in γ phase (a) and γ' (b) phase of GH720Li alloy

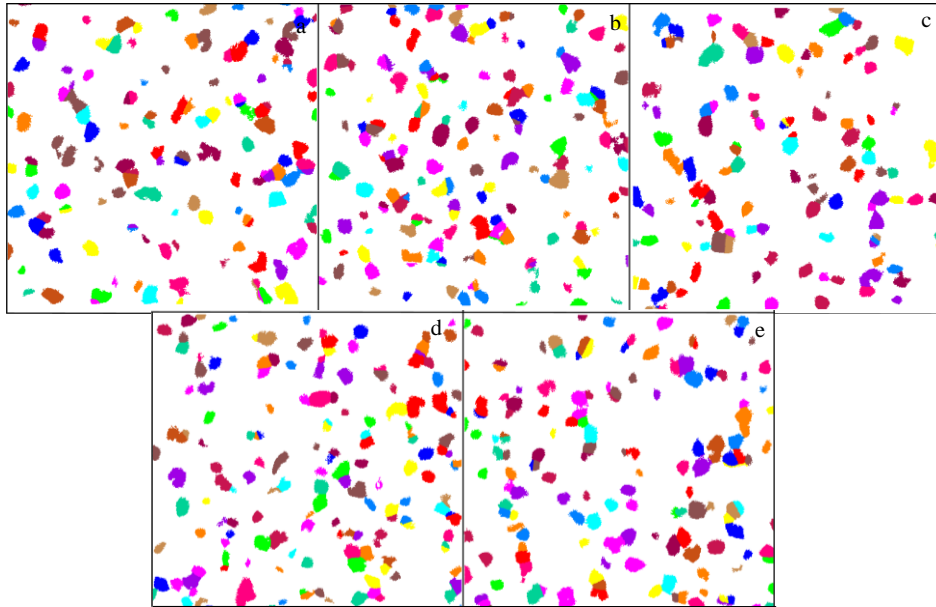


图 9 GH720Li 合金一次 γ' 相的二维晶粒重构图

Fig.9 Two dimensions unique grain color maps of primary γ' phases in GH720Li alloy (slice number a: 1; b: 23; c: 45; d: 67; e: 89)

表 1 一次 γ' 相的形态参数

Table 1 Morphometric parameters of primary γ' phases

Parameter	Slice 1	Slice 23	Slice 45	Slice 67	Slice 89	Average of 5 slices
Average grain size/ μm	1.93	1.82	1.94	1.79	1.86	1.87
Average particle size/ μm	2.40	2.43	2.52	2.37	2.41	2.43
Average particle area/ μm^2	5.45	5.49	5.78	5.18	5.59	5.50
Particle circularity	0.30	0.27	0.29	0.26	0.30	0.28
Area fraction/%	18.3	19.9	17.1	19.2	19.6	18.8

Note: average grain size and particle size are shown in equivalent circle diameter

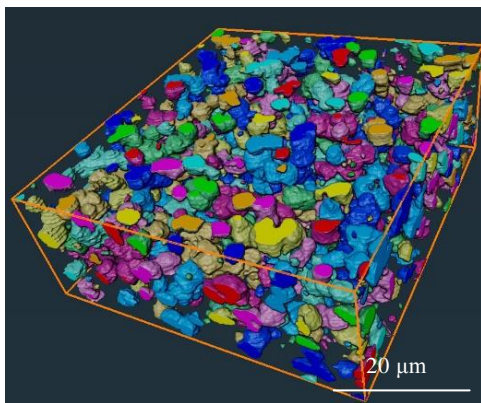


图 10 GH720Li 合金一次 γ' 相的三维渲染图

Fig.10 3D rendering map of primary γ' phase in GH720Li alloy

次 γ' 相颗粒。在形态上较大体积的一次 γ' 相可以认为是几个接近球形小颗粒的组合, 推测其是在固溶或长时效过程中, 一次 γ' 相长大而互相接触, 从而形成由多个晶粒组成的体积较大的一次 γ' 相, 如图 7e 中箭头所指的一次 γ' 相。

选取图 12 中的 4 号一次 γ' 相, 观察了其在 XY 面上等间距的 11 个截面, 截面如图 13a~13k 所示。在图 13c、13d、13h、13i、13j 中, 一次 γ' 相被分成 2~3 部分。这表明一个连续的 γ' 相在二维截面上可能呈现不连续分布, 在二维分析中有可能被误判为多个不同的 γ' 相。而三维 EBSD 通过重构平面数据, 获得了各一次 γ' 相的空间分布, 避免了在二维分析中对一次 γ' 相的错误分割, 更全面准确地表征 GH720Li 合金的一次 γ' 相的真实形态。

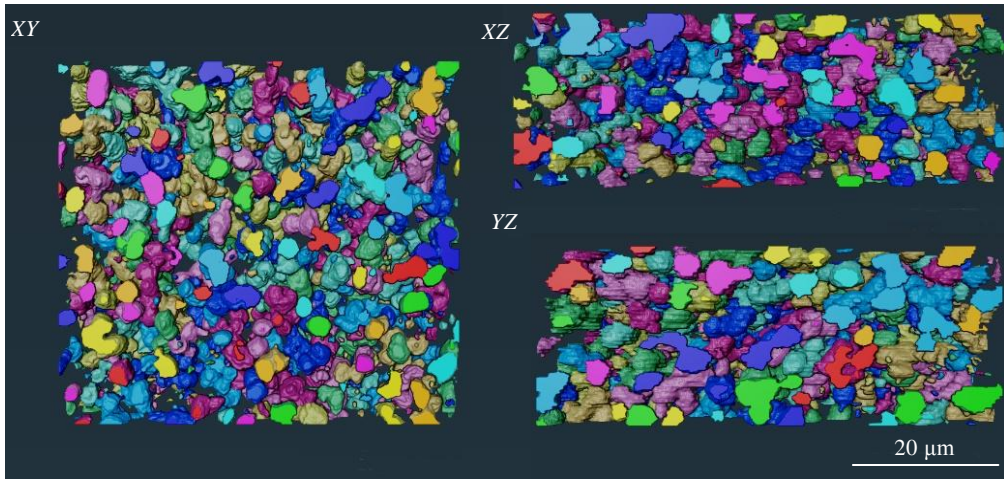


图 11 GH720Li 合金一次 γ' 相三维渲染图的三视图

Fig.11 Three-view diagram of primary γ' phase in GH720Li alloy

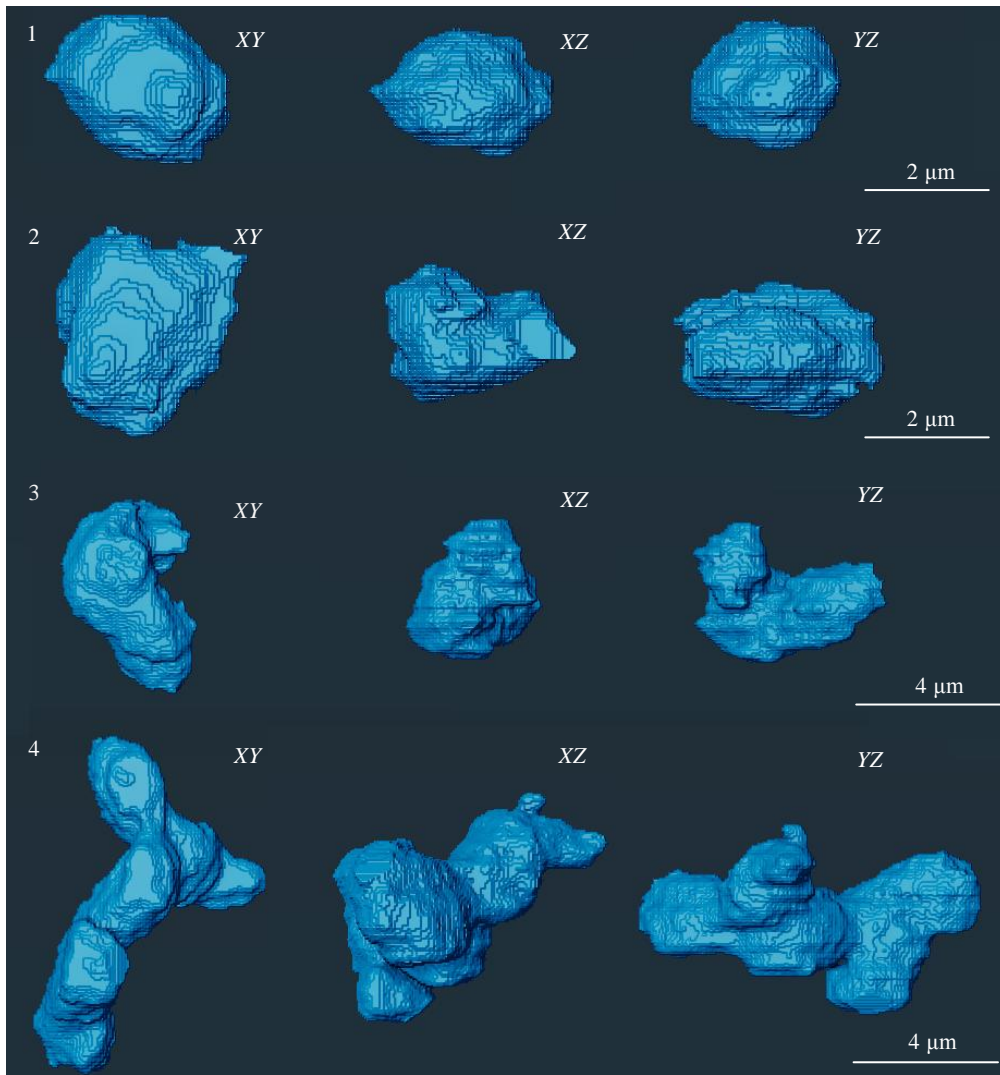
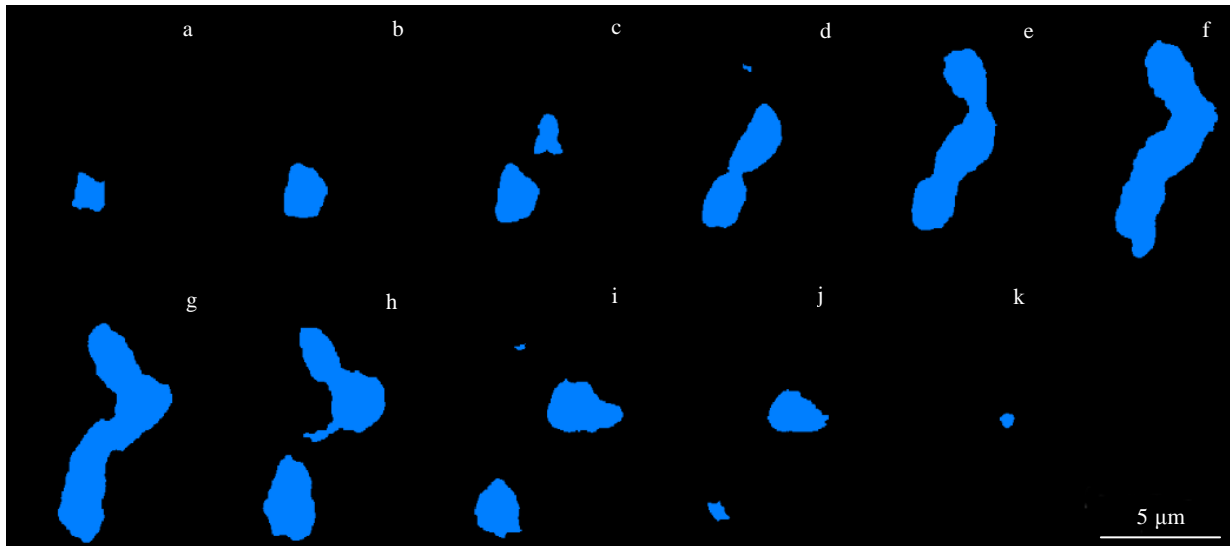


图 12 典型一次 γ' 相的 3 个方向展示

Fig.12 Display graphs of typical primary γ' phase in three directions

表2 图12中一次 γ' 相颗粒的体积、表面积、等效球直径和球形度Table 2 Volume, surface area, equivalent sphere diameter and spherical degree of primary γ' phase particles marked in Fig.12

Primary phase γ' particle	Volume/ μm^3	Surface area/ μm^2	Equivalent sphere diameter/ μm	Spherical degree
Particle 1	7.6	20.5	2.44	0.91
Particle 2	11.0	29.4	2.76	0.81
Particle 3	25.3	59.3	3.64	0.70
Particle 4	46.5	105.9	4.46	0.59
Average of 779 particles	10.3	27.9	2.13	0.76

图13 一次 γ' 相颗粒4在Z方向的形态演变Fig.13 Morphological process of No.4 primary γ' phase in Z direction (neighboring distance: 0.486 μm)

3 结论

1) 合金基体相和一次 γ' 相存在大量旋转轴为 $\langle 111 \rangle$, 旋转角为 60° 的 $\Sigma 3$ 孪晶界。

2) 三维EBSD结果可展示一次 γ' 相各方向的形态, 计算得到一次 γ' 相的体积分数为18.8%, 与多个二维切片的平均结果相当。

3) 一次 γ' 相在三维尺度上有多种形态, 一些尺寸较大的一次 γ' 相在二维截面上呈现不连续分布。三维EBSD更全面准确地表征了合金中一次 γ' 相的真实形态。

致谢: 感谢赛默飞世尔科技(中国)有限公司上海纳米港和赛默飞公司高级应用工程师高海峰在实验方面给予的帮助。

参考文献 References

[1] Deng Wenkai(邓文凯), Xu Qinghao(徐晴昊), Jiang Liang(江亮). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2019, 29(5): 983

[2] Getsov L B, Semenov A S, Ignatovich I A. *International*

Journal of Fatigue[J], 2017, 97: 88

[3] Hu Dianyin(胡殿印), Ma Qihang(马琦航), Gao Ye(高晔) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(7): 2185

[4] Hu Dianyin, Ma Qihang, Shang Lihong *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 670: 17

[5] Ning Y D, Wang T, Fu M W *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 642: 187

[6] Liu Fangfang, Chen Jiayu, Dong Jianxin *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 651: 102

[7] Dong Chengli, Yang Shengkai, Peng Zichao *et al. Intermetallics*[J], 2021, 135: 107 226

[8] Yu Qiuying(于秋颖), Lan Bo(兰博), Zhang Mincong(张敏聪) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(4): 1227

[9] Sun Xiangshangyang(孙向尚扬), Zhao Yan(赵彦), Lu Xiaogang(鲁晓刚) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2018, 28(1): 116

[10] Yu Jinjiang, Sun Xiaofeng, Zhao Nairen *et al. Materials*

- Science and Engineering A*[J], 2007, 460-461: 420
- [11] Dai Xianchuang(戴贤创), Li Zhenfeng(李振锋), Chen Jiguang(陈继光) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2017, 27(2): 258
- [12] Li Hongyu, Song Xiping, Wang Yanli *et al. Journal of Iron and Steel Research, International*[J], 2009, 16(5): 81
- [13] Yu Qiuying(于秋颖), Zhang Maicang(张麦仓), Dong Jianxin(董建新). *Journal of University of Science and Technology Beijing*(北京科技大学学报)[J], 2013, 35(6): 763
- [14] Chen Jiayu(陈佳语), Yu Qiuying(于秋颖), Dong Jianxin(董建新) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(10): 2929
- [15] Hou Qiong(侯琼), Tao Yu(陶宇), Jia Jian(贾建) *et al. Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2020, 30(5): 38
- [16] Jackson M P, Reed R C. *Materials Science and Engineering A*[J], 1999, 259(1): 85
- [17] Carter J L W, Kuper M W, Uchic M D *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 605: 127
- [18] Mitchell R J, Lemsy J A, Ramanathan R *et al. Proceedings of the 11th International Symposium on Superalloys*[C]. Champion: TMS, 2008: 347
- [19] Liu Jian(刘健), Ye Fei(叶飞), Wang Xuqing(王旭青) *et al. Powder Metallurgy Technology*(粉末冶金技术)[J], 2021, 39(6): 499
- [20] Grant B M B, Feancis E M, Fonseca J Q *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 573: 54
- [21] MacSleyne J, Uchic M D, Simmons J P *et al. Acta Materialia*[J], 2009, 57: 6251
- [22] Uchic M D, Graef M D, Wheeler R *et al. Ultramicroscopy*[J], 2009, 109: 1229
- [23] Child D J, West G D, Thomson R C *et al. Ultramicroscopy*[J], 2012, 114: 1

Microstructure and Three-Dimension EBSD Characterization of γ' Phases in Aged GH720Li Alloy

Han Xiaolei^{1,2,3}, Du Zhiwei^{1,2,3}, Che Cong^{1,2,3}, Peng Yonggang^{1,2,3}, Jia Rongguang^{1,2,3}, Li Ting^{1,2,3}, Li Cong^{1,2,3}

(1. National Center of Analysis and Testing for Nonferrous Metals and Electronic Materials, GRINM Group Co., Ltd, Beijing 101417, China)

(2. China United Test and Certification Co., Ltd, Beijing 101417, China)

(3. Guobiao (Beijing) Testing and Certification Co., Ltd, Beijing 101417, China)

Abstract: GH720Li alloy is the preferred material for aero-engine turbine disk. The morphology, microstructure and micro-area composition of three kinds of γ' in GH720Li dual-aged alloy were investigated via combination of scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). γ phases and primary γ' phases were analyzed by EBSD-EDS method based on the focused ion beam/ electron microscopic system. 3D reconstruction of primary γ' phases was done by Avizo software. The shapes, morphometric parameters and volume fraction of primary γ' phases were given by the software and compared with the analysis results of 2D slice. The results show that there are a large number of $\Sigma 3$ twin boundaries in both γ phases and primary γ' phases. The primary γ' phases have multiple shapes from a three-dimensional perspective. The larger continuous primary γ' phases in three-dimensional space present discontinuous distribution in 2D slice sometimes. The real morphology of primary γ' phases can be represented comprehensively by 3D EBSD method instead of 2D method. 3D information of primary γ' provides the basis for heat treatment's improvement of GH720Li alloy.

Key words: GH720Li alloy; 3D EBSD; γ' phase; primary γ' phase

Corresponding author: Han Xiaolei, Ph. D., Senior Engineer, National Center of Analysis and Testing for Nonferrous Metals and Electronic Materials, GRINM Group Co., Ltd, Beijing 101417, P. R. China, Tel: 0086-10-82241375, E-mail: hanxiaolei@gbtcgroup.com