

# 叶片用小规格 TC4 棒材的组织 and 织构研究

李 磊<sup>1</sup>, 韩飞孝<sup>2</sup>, 周 敏<sup>3</sup>, 史蒲英<sup>2</sup>, 杨海瑛<sup>1</sup>, 尹雁飞<sup>1</sup>

(1. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

(2. 西部超导材料科技股份有限公司, 陕西 西安 710018)

(3. 无锡航亚科技股份有限公司, 江苏 无锡 214142)

**摘 要:** 采用径锻加工方式制备叶片用  $\Phi 30$  mm 的小规格 TC4 合金棒材, 并使用金相显微镜、XRD 衍射仪及电子背散射 (EBSD) 技术研究棒材边部到心部的显微组织、物相组成和微观织构, 并分析组织和织构对棒材力学性能一致性以及超声探伤杂波水平的影响。结果表明, 径锻棒材内部晶粒得到充分细化, 从边部到心部晶粒尺寸逐渐增大, 径锻棒材的  $\beta$  转变片层组织被破碎。棒材中含有少量等轴状  $\beta$  相晶粒, 分布在  $\alpha_p$  的晶界和  $\beta$  转变组织中。棒材边部为  $\{0001\} \langle 10\bar{1}0 \rangle$  板织构,  $R/2$  和心部为  $\langle 10\bar{1}0 \rangle //$  轴向的丝织构, 且棒材的织构强度从边部到心部逐渐减弱。棒材抗拉和屈服强度的变异系数仅为 0.24% 和 0.29%, 具有优异的一致性。径锻加工小规格 TC4 棒材的超声波杂波水平为  $\Phi 0.8 \sim 9$  dB, 相对于轧制棒材杂波升高, 这与径锻棒材显微组织不均匀区域的晶体取向变化有关。

**关键词:** TC4 合金; 径锻; 织构

中图分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)11-3909-06

TC4(Ti-6Al-4V) 合金是美国 1954 年研制成功的 Ti-Al-V 系  $\alpha+\beta$  型钛合金, 已广泛应用于航空、航天、兵器、汽车、能源、医疗器械及体育用品等领域。全球 TC4 合金半成品的产量占各种钛合金产量的一半以上, 在航空航天工业中超过 70%。TC4 合金在航空发动机中主要用于制造风扇和压气机盘、叶片、机匣等零件, 以及各种类型的紧固件<sup>[1-3]</sup>。

航空发动机叶片的工作条件极为复杂和苛刻, 承受着巨大的气动应力、离心应力和温度负荷作用<sup>[4]</sup>。因此, 各国对航空发动机叶片用棒材制定了更为严格的标准, 提高了棒材的组织、力学性能和探伤的要求。例如, 在 GJB494A-2008《航空发动机压气机叶片用钛合金棒材规范》中, 要求转子叶片用 TC4 棒材的初生  $\alpha$  相含量不低于 30%, 小规格棒材 ( $\Phi \leq 50$  mm) 的抗拉强度和屈服强度均高于国标 (GB 2965-2007) 和其他军标 (GJB 2218A-2008)。另外, 叶片用棒材的探伤要求更加严格, 静子叶片用小规格棒材 ( $\Phi \leq 45$  mm) 的超声波检测杂波水平不大于  $\Phi 0.8 \sim 9$  dB, 转子叶片用棒材杂波水平不大于  $\Phi 0.8 \sim 12$  dB。然而, TC4 棒材的力学性能、超声波杂波水平不仅与棒材的微观组织有关<sup>[5-7]</sup>, 而且受到棒材织构的影响<sup>[8-12]</sup>。李华等人研究了 TC4 合金显微组织对超声波探伤杂波水平的影响, 发现探伤杂波水平较高

区域呈现出明显的显微组织不均匀性, 不均匀区域显微组织晶体取向变化是产生杂波的根本原因<sup>[7]</sup>。M. Humbert 等人在研究 IMI834 合金的超声波检测时, 发现发射波强度与样品中的织构宏区有关, 这是因为超声波在沿晶格  $c$  轴方向传播速度更快<sup>[8]</sup>。骆雨萌等人发现 930 °C 热轧 TC4 钛合金均具有显著的力学性能各向异性, 这与板材中形成的  $\{0001\} \langle 10\bar{1}0 \rangle$  板织构有关<sup>[9]</sup>。由此可见, 钛合金的组织 and 织构与其力学性能和超声探伤杂波水平有密切关系。

钛合金的组织 and 织构受到加工工艺和热处理工艺的影响。目前, 对于小规格 TC4 合金棒材, 多采用轧制或径锻方式制备。棒材轧制过程耗时短、效率高, 但是轧制加工过程的温升快, 且变形过程中棒材各部位存在变形量差异, 力学性能的一致性低于径锻棒材<sup>[13]</sup>。棒材径锻过程中 (图 1), 4 个锻锤高速往复锤击棒材, 棒材受到冲击载荷快速变形, 这种变形方式可以精确控制变形量, 获得直径更加均匀的高精度棒材<sup>[14]</sup>。然而, 目前尚无关于径锻棒材组织 and 织构对其力学性能一致性和超声探伤杂波水平影响的研究。本研究采用两火径锻工艺制备叶片用  $\Phi 30$  mm 的 TC4 合金小规格棒材, 对棒材横截面和轴截面边部到心部的组织演变进行分析。使用 EBSD 技术研究径锻棒材轴截面各位置的显微组织, 分

收稿日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金 (51201138); 陕西省国际科技合作计划 (2022KW-41)

作者简介: 李 磊, 男, 1983 年生, 博士, 高级工程师, 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86250729, E-mail: lilei@c-nin.com

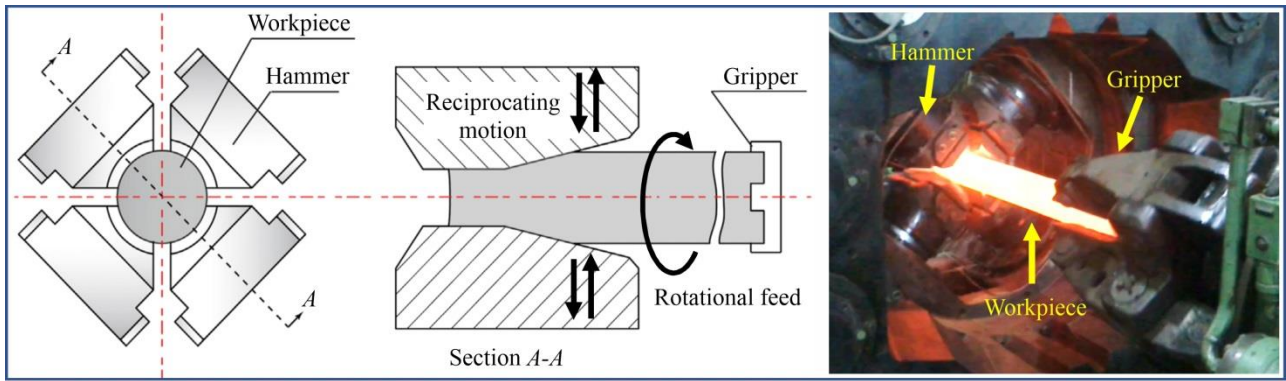


图 1 棒材径锻加工示意图

Fig.1 Schematic diagram of radial forging processing

析边部到心部的组织强度和类型的变化规律，揭示棒材组织与热加工受力状态的关系以及对力学性能一致性和超声探伤杂波水平的影响规律。

### 1 实验

实验坯料是西部超导材料科技股份有限公司采用三次真空自耗电弧炉熔炼，并经过多次锻造的 TC4 合金棒材 ( $\Phi 95\text{ mm}$ )。实验坯料的化学成分如表 1 所示。实验坯料的  $\beta$  相转变温度 ( $T_\beta$ ) 为  $995\text{ }^\circ\text{C}$ 。坯料棒材横截面显微组织如图 2 所示，为典型的双态组织，初生等轴  $\alpha$  相含量超过 65%。

棒材加工：将坯料棒材 ( $\Phi 95\text{ mm}$ ) 通过两火径锻加工成小规格棒材，加工过程为  $\Phi 95\text{ mm} \rightarrow \Phi 55\text{ mm} \rightarrow \Phi 32\text{ mm}$ ，加工温度均为  $940\text{ }^\circ\text{C}$ ，然后机械加工成  $\Phi 30\text{ mm}$

小规格成品棒材。对成品棒材进行  $700\text{ }^\circ\text{C} \times 75\text{ min}$  AC 的退火处理，并进行显微组织和力学性能取样，取样位置如图 3 所示。在棒材横截面 (1#) 和轴截面 (2#) 的边部 (E)、R/2 处 (M) 和心部 (C) 切取试样，经打磨抛光和腐蚀后，进行显微组织观察、XRD 物相分析和微观组织检测。显微组织观察在 Olympus PMG3 光学显微镜完成，XRD 使用布鲁克 D8 衍射仪检测，EBSD 分析使用 TESCAN MAIA3 扫描电镜和 NordlysNano 探测器。棒材力学性能样品在 R/2 处取 4 个样品进行测试和对比，并计算棒材强度的变异系数，研究棒材内部的性能一致性。室温拉伸测试使用 INSTRON5985 万能试验机完成。棒材通支进行水浸超声探伤检测，使用 USPC7100 型探伤仪，ISS/G/C 10MHz 探头， $\Phi 0.8\text{ mm}$  平底孔标块进行检测。

表 1 TC4 坯料棒材的化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 original bar

Main composition				Impurity			
Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
Bal.	6.53	4.30	0.03	0.016	0.008	0.0038	0.18

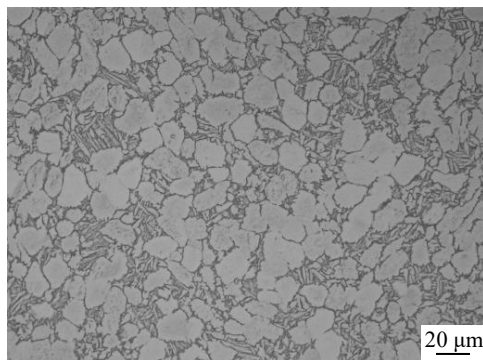


图 2 TC4 坯料棒材的显微组织

Fig.2 Microstructure of TC4 original bar

### 2 结果与分析

#### 2.1 径锻 TC4 棒材边部到心部的显微组织

径锻 TC4 棒材的横截面和轴截面显微组织如

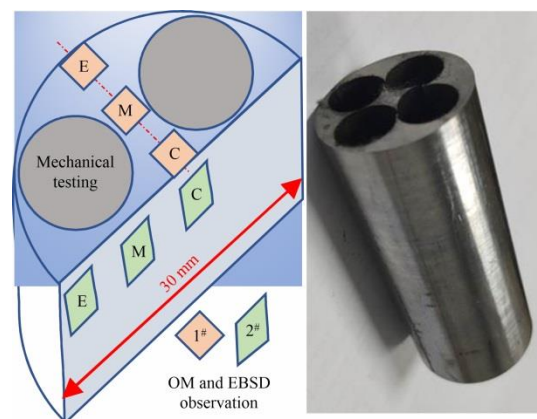


图 3 TC4 棒材的取样示意图

Fig.3 Sampling diagram of TC4 bar (1#-cross section, 2#-axial section; E-edge, M-R/2, and C-center)

图 4 所示,棒材的显微组织属于  $(\alpha+\beta)$  两相组织。轴截面不同区域均存在沿轴向拉长的初生  $\alpha$  相 ( $\alpha_p$ )。边部区域的  $\alpha_p$  含量略高于  $R/2$  和心部位置,这是由于棒材锻压过程中造成内部温升,心部温度高于边部,因此边部位置  $\alpha_p$  的含量较高。而变形过程中边部的变形量相对较大,因此边部位置  $\alpha_p$  的晶粒尺寸相对较小,且晶粒长径比较大。棒材  $R/2$  和心部的  $\alpha_p$  含量和形貌相近,表明温度和变形环境差别较小。相比于原始棒坯,径锻后的棒材边部到心部区域,组织得到了充分细化。值得注意的是径锻棒材  $\beta$  转变组织的形态与典型的片层结构有明显差异。片层结构的  $\beta$  转变组织是次生  $\alpha$  相 ( $\alpha_s$ ) 与  $\beta$  相依次叠层排布,而径锻工艺棒材显微组织中  $\beta$  转变组织片层结构发生扭曲,甚至断裂,  $\beta$  相以短棒或球状的形态存在。这是由于径锻加工时,每道次旋转给进材料耗时相对较长,造成棒材不同位置存在温度差异。当径锻加工至棒材另一端时,由于温降棒材中  $\beta$  相已经部分

转变成  $\beta$  转变组织。此时继续对棒材进行径向锻造,  $\beta$  转变组织中  $\alpha_s$  片层和  $\beta$  片层发生扭曲变形,甚至断裂,  $\beta$  相呈现短棒或球状形貌。

然而,成品棒材的异常  $\beta$  转变组织会在升温至叶片锻造温度(相变点下  $20\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ )时会发生相变,自然冷却后的组织为典型的片层状  $\beta$  转变组织。

## 2.2 径锻 TC4 棒材相结构分析

### 2.2.1 XRD 物相分析

图 5 为 TC4 径锻棒材轴截面边部和心部的 XRD 图谱,图中可明显观察到  $\alpha$  相和  $\beta$  相的衍射峰。PDF[44-1288]中  $(10\bar{1}1)\alpha$  是最强峰,  $(0002)\alpha$  峰强与  $(10\bar{1}1)\alpha$  的比例是 30%。径锻棒材边部和心部位置的  $\alpha$  相的衍射峰最强峰为  $(0002)\alpha$  峰,表明棒材从边部到心部均存在择优取向。这种择优取向与棒材加工变形过程有关。棒材径锻变形过程受到锤头沿径向的高速锤压,原子在直径方向相互挤压,具有最大晶面间距的  $(10\bar{1}0)\alpha$

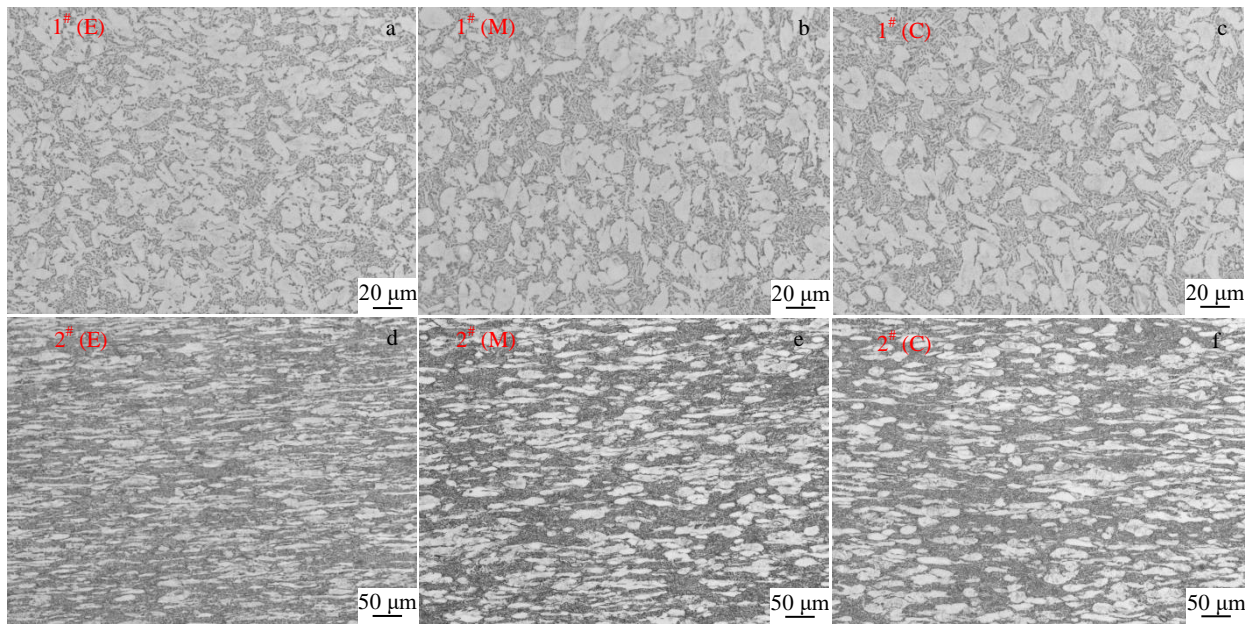


图 4 TC4 棒材横截面 1#和轴截面 2#样品显微组织

Fig.4 Microstructures of cross section 1# (a-c) and axial section 2# (d-f) samples of TC4 bar: (a, d) E, (b, e) M, and (c, f) C

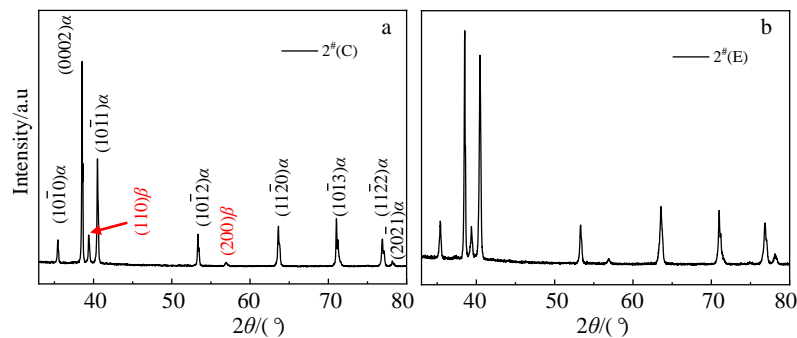


图 5 TC4 棒材轴截面边部和心部样品的 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of sample 2# edge (a) and 2# center (b) for TC4 bar

晶面发生偏转，最终转至平行于棒材横截面方向。而  $\alpha$  相晶粒的  $c$  轴偏转至与锤压方向一致，导致样品 XRD 图谱中出现强(0002) $\alpha$  衍射峰。另外，边部样品 2<sup>#</sup>(E) 的 (10 $\bar{1}$ 1) $\alpha$  衍射峰相对于心部明显增强，这是因为轴截面边部样品的受力不均匀，沿径向的压力大于法向，而心部样品的径向和法向受力一致。

### 2.2.2 EBSD 物相分析

图 6 是使用 EBSD 技术绘制的 TC4 棒材组织。图中可见蓝色的  $\beta$  相晶粒呈等轴状，晶粒尺寸小于 5  $\mu\text{m}$ ，主要分布在  $\alpha_p$  的晶界和  $\beta$  转变组织中。 $\beta$  晶粒数量占比为 1.8%，面积占比为 0.35%。

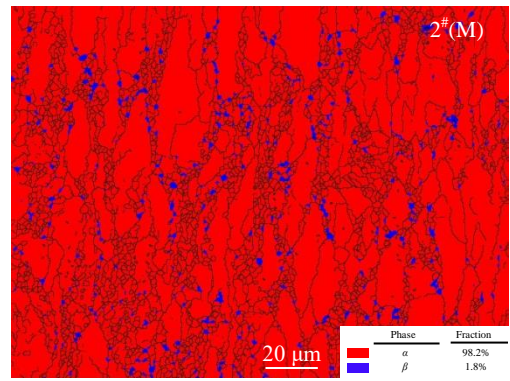


图 6 TC4 棒材 2<sup>#</sup>(M) 样品 EBSD 组织

Fig.6 EBSD map of 2<sup>#</sup>(M) sample for TC4 bar

## 2.3 径锻 TC4 棒材边部到心部的组织演变

### 2.3.1 IPF 分析

图 7 为径锻 TC4 棒材轴截面边部 (2<sup>#</sup>(E)) 和心部 (2<sup>#</sup>(C)) 分别在轴向 (AD)，径向 (RD) 和法向 (ND) 的 IPF 图。图中可见，除沿轴向拉长的  $\alpha_p$  晶粒外，边部和心部样品的  $\beta$  转变组织被完全破碎成细小的等轴晶粒，这与图 4 中的显微组织图片一致。从 AD 方向的 IPF 图中可见，边部样品绝大部分  $\alpha_p$  晶粒取向转变为 (01 $\bar{1}$ 0) 垂直于 AD，心部样品部分  $\alpha_p$  晶粒由于变形量相对较小，(01 $\bar{1}$ 0) 晶面尚未偏转至垂直 AD 方向，但是这些  $\alpha_p$  晶粒多处于转向的过渡阶段。这是由于棒材在受到高速冲击载荷时，棒材发生塑性变形，形成大量孪晶和小角度晶界，造成了 (0001) 晶面偏转<sup>[15-17]</sup>。这种偏转的程度与棒材不同位置吸收的冲击载荷和变形量有直接关系，棒材边部承受了更多的冲击载荷和塑性变形，因此其展现了更大程度的择优取向。棒材中细小等轴状  $\beta$  转变组织在终锻时，由于边部温度较低， $\beta$  转变组织晶粒取向多为 (01 $\bar{1}$ 0) 和 ( $\bar{1}$ 2 $\bar{1}$ 0) 垂直于 AD，以及少

量相变形成的 (0001) 取向的晶粒。

由于 RD 方向与锤压变形方向一致，边部样品的晶粒主要受到径向变形，绝大部分晶粒发生转向，晶粒 (0001) 晶面转至与 RD 方向垂直<sup>[15]</sup>。而心部样品 RD 和 ND 方向的受力和变形一致，因此，在 RD 和 ND 方向心部样品 (0001) 和 ( $\bar{1}$ 2 $\bar{1}$ 0) 取向的晶粒比例相近。这与图 5a 中所示的 XRD 图谱一致，除了强(0002) $\alpha$  衍射峰外，其余衍射峰强度的相对比例与 PDF[44-1288]相近。而由于棒材边部沿 RD 和 ND 方向受力和变形不同，因此，晶粒取向也呈现了多样性。

### 2.3.2 TC4 棒材组织分析

图 8 为径锻 TC4 棒材边部到心部样品的极图。棒材边部样品为典型的板织构，织构类型为 {0001}<10 $\bar{1}$ 0>。棒材 R/2 处和心部的织构类型相同，都为 <10 $\bar{1}$ 0>//AD 的丝织构。棒材的组织强度用均匀密度的倍数 (MUD) 表示，棒材边部、R/2 处和心部的 MUD 值分别为 9.18，

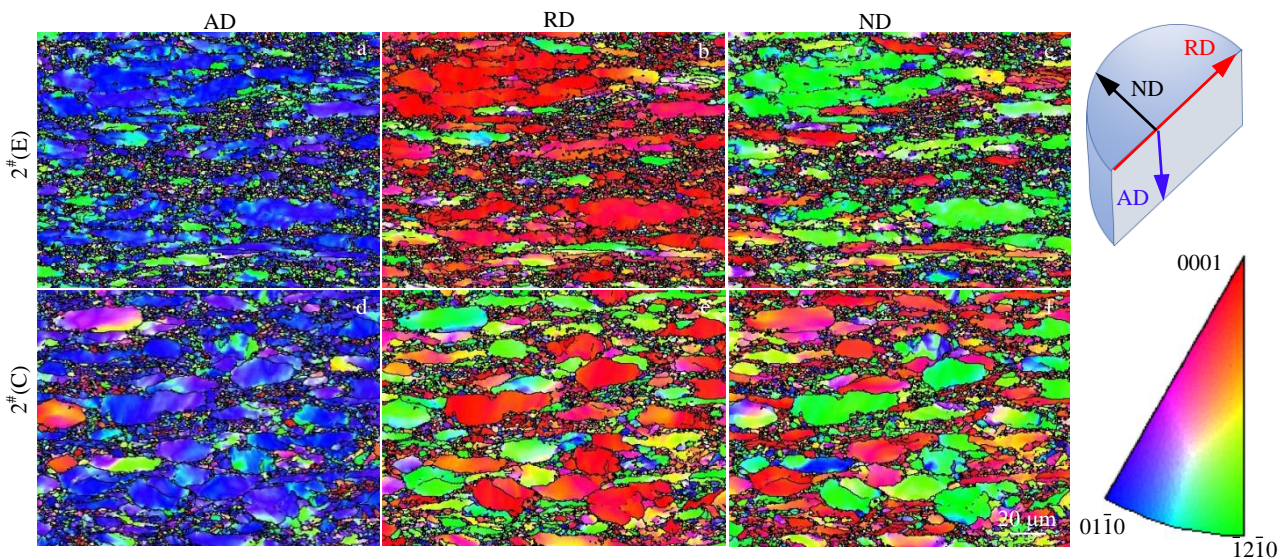


图 7 TC4 棒材轴截面边部和心部样品的 IPF 图

Fig.7 IPF map of sample 2<sup>#</sup>(E) and 2<sup>#</sup>(C) for TC4 bar: (a, d) axial AD, (b, e) radial RD, and (c, f) normal ND

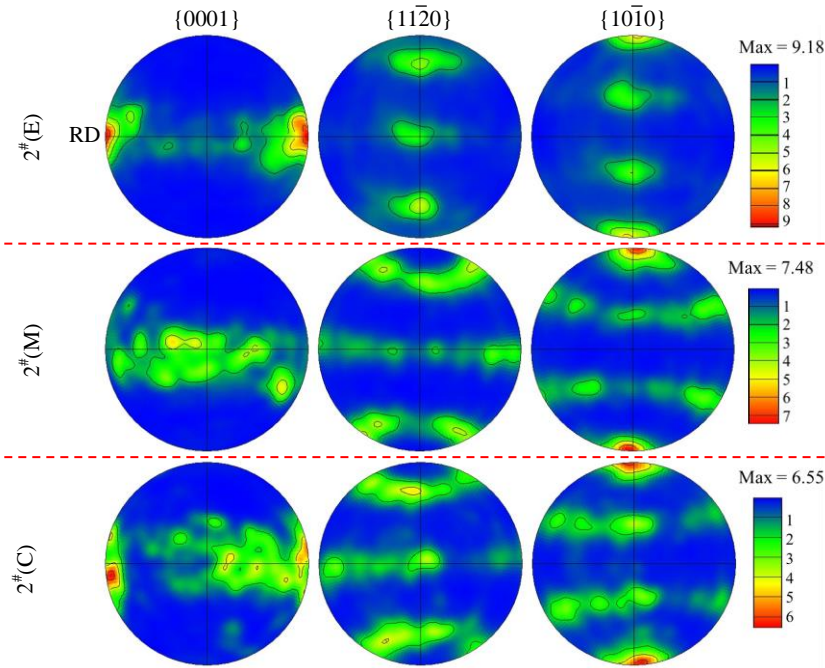


图 8 TC4 棒材 2#样品轴截面边部, R/2 处, 心部样品的极图  
Fig.8 Pole maps of sample 2#(E), 2#(M), and 2#(C) for TC4 bar

7.48, 6.55, 这表明棒材的织构强度从边部到心部逐渐减弱。径锻棒材的这种特殊的织构与轧制棒材有明显区别, 这与棒材的变形方式有密切关系。径锻棒材边部主要受到单向冲击压力作用, 因此形成了板织构, 而由于边部的变形量大, 边部晶粒在吸收冲击能量后发生偏转, 形成强织构。心部样品在 RD 和 ND 方向受力和变形情况相近, 因此容易形成丝织构, 而心部的变形量小于边部, 部分晶粒没有足够的能量进行转向, 因此织构强度相对减小。

### 2.4 力学性能测试分析

径锻棒材 R/2 处的 4 个样品室温力学性能如表 2 所示, 棒材的抗拉强度均值为 1036.25 MPa, 屈服强度的均值为 954.5 MPa。棒材抗拉强度和屈服强度的波动最大值为 7 MPa, 延伸率波动不超过 1%。根据表 2 数据计算径锻棒材抗拉强度和屈服强度的变异系数, 其变异系数分别为 0.24% 和 0.29%, 高于轧制工艺制备的棒材, 这与棒材加工方式的受力一致性有关。上述数据表明径锻工艺制备的棒材具有很好的力学性能一致性。

表 2 TC4 棒材的力学性能

Table 2 Mechanical properties of TC4 bars

$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%
1040	960	14.5	41
1034	959	15.0	40
1034	956	15.0	40
1037	953	15.0	42

### 2.5 超声探伤检测分析

将径锻 TC4 棒材进行超声波检测, 棒材的杂波水平为  $\Phi 0.8 \sim (9 \sim 12)$  dB, 满足静子叶片用 TC4 棒材超声波探伤要求。韩飞孝等人对不同变形量和加工温度对 TC4 径锻棒材超声波探伤杂波水平的影响进行了详细研究, 发现升高径锻温度和减小棒材变形量有利于超声探伤杂波水平的改善<sup>[18]</sup>。

李华等人的研究表明, TC4 合金显微组织对超声波探伤杂波水平有显著影响, 显微组织不均匀区域的晶体取向变化是产生杂波的根本原因<sup>[7]</sup>。当超声波检测径锻 TC4 棒材时, 超声波沿径向传播。径锻棒材从边部至心部具有很强的织构, 超声波在  $\alpha_p$  晶粒中传播可以减少杂波。但是, 由于径锻棒材的  $\beta$  转变组织为细小颗粒状, 分散在较大的  $\alpha_p$  晶粒之间, 组织呈现了不均匀的特性, 造成杂波增加。并且  $\beta$  转变组织多为相变织构, 晶粒之间取向不同, 进一步增加了超声波的杂波。因此, 径锻棒材的超声波杂波水平与轧制棒材相比略差。实验研究证明通过径锻+轧制的工艺既可以细化棒材晶粒尺寸, 又能够满足  $\Phi 0.8 \sim 12$  dB 的超声波探伤杂波水平要求<sup>[18]</sup>。

## 3 结 论

1) 径锻 TC4 棒材从心部至边部均得到有效的变形, 晶粒得到明显细化, 心部的晶粒尺寸略大于边部。 $\beta$  转变组织的片层结构发生扭曲变形和断裂,  $\beta$  相晶粒呈现短棒或球状。

2) 棒材边部为 $\{0001\}\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 板织构,  $R/2$  和心部为 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ //轴向上的丝织构, 且棒材的织构强度从边部到心部逐渐减弱。

3) 棒材抗拉和屈服强度具有优异的一致性。径锻棒材的超声波杂波水平为  $\Phi 0.8\sim 9$  dB, 相比轧制棒材略差, 这是由于超声波在径锻棒材中不同取向的细小  $\beta$  转变晶粒中传播, 造成杂波升高。

#### 参考文献 References

- [1] Luo Shiyuan, Yao Junning, Li Jia *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2020, 9(6): 12 043
- [2] Pavlenko D, Dvirnyk Y, Przynsowa R. *Aerospace*[J], 2021, 8: 1
- [3] Li Bingqiang(李炳强), Ma Hui(马辉), Yang Wenjun(杨文军). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(1): 113
- [4] Pei Chuanhu(裴传虎), Li Zhenxi(李臻熙), Ding Jianshan(丁建山) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(S1): 118
- [5] Du Gang(杜刚), Sun Xiaoping(孙小平), Gao Yushe(高玉社) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(6): 1941
- [6] Ou Meigui(欧梅桂), Xia Qifan(夏麒帆), Song Hongchao(宋洪超) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(2): 638
- [7] Li Hua(李华), Ma Yingjie(马英杰), Qiu Jianke(邱建科) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(9): 1860
- [8] Humbert M, Moreau A, Uta N *et al.* *Acta Materialia*[J], 2009, 57(3): 708
- [9] Luo Yumeng(骆雨萌), Liu Jinshu(刘金旭), Li Shukui(李树奎) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(11): 2692
- [10] Li Renkai, Wang Huaming, Zheng Dongdong *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2022, 850: 143 556
- [11] Bhattacharjee A, Pilchak A L, Lobkis O I *et al.* *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2011, 42: 2358
- [12] Lan B, Lowe M, Dunne F P E. *Acta Materialia*[J], 2014, 63: 107
- [13] Gu B, Chekhonin P, Schaarschuch R *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2020, 825: 154 082
- [14] Huang Jianglin, Slater C D, Mandral A *et al.* *Procedia Engineering*[J], 2017, 207: 478
- [15] Li Lei, Jia Weiju, Vincent Ji. *Vacuum*[J], 2022, 506: 111 510
- [16] Pan Xinlei, Wang Xuede, Tian Zeng *et al.* *Journal of Alloy and Compounds*[J], 2021, 850: 156 672
- [17] Li Lei, Jia Weiju, Vincent Ji. *Surface and Coatings Technology*[J], 2022, 450: 129 010
- [18] Han Feixiao(韩飞孝), Sun Xiaoping(孙小平), Zheng Nianqing(郑念庆) *et al.* *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2022, 39(6): 7

## Microstructure and Texture of Small Size TC4 Bars for Blades

Li Lei<sup>1</sup>, Han Feixiao<sup>2</sup>, Zhou Min<sup>3</sup>, Shi Puying<sup>2</sup>, Yang Haiying<sup>1</sup>, Yin Yanfei<sup>1</sup>

(1. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(2. Western Superconducting Technologies Co., Ltd, Xi'an 710018, China)

(3. Wuxi Hyatech Co., Ltd, Wuxi 214142, China)

**Abstract:** The TC4 bar with a diameter of 30 mm for blades was prepared by radial forging. The microstructure, phase composition and texture of the bar from the edge to the center were tested by metallographic microscope, XRD and electron backscatter (EBSD) technology. The effects of the microstructure and texture on the uniformity of mechanical properties and the level of ultrasonic flaw detection clutter were analyzed. The experimental results show that the internal grains of radial forging bars are fully refined, and the grain size gradually increases from the edge to the center. The transformed  $\beta$  lamellar structure is broken during radial forging. The bar contains a small amount of equiaxed  $\beta$  grains, which distribute in  $\alpha_p$  grain boundary and transformed  $\beta$  structure. The texture of the edge is  $\{0001\}\langle 10\bar{1}0 \rangle$ . The texture at the  $R/2$  and the center is  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ //axial direction. The texture strength of the bar weakens gradually from the edge to the center. The coefficient of variation of tensile and yield strength of the bar are only 0.24% and 0.29%, respectively, which means excellent uniformity. The level of ultrasonic flaw detection clutter of small size TC4 bars is  $\Phi 0.8\sim 9$  dB, the clutter level is higher than the rolling bar. That is related to the change of crystal orientation in the non-uniform area of the microstructure of the radial forging bar.

**Key words:** TC4 alloy; radial forging; texture

Corresponding author: Li Lei, Ph. D., Senior Engineer, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86250729, E-mail: lilei@c-nin.com