

# TA15 钛合金显微组织对超声探伤底波衰减的影响

宋韦韦, 李本江, 宋增金, 李增乐, 张洪静, 焦娟娟, 吕正风, 程仁策

(山东南山铝业股份有限公司, 山东 龙口 265713)

**摘要:** 针对 TA15 钛合金 T 形截面环锻件探伤时局部出现的底波衰减现象, 进行了显微组织与超声波衰减关系的研究。利用光学显微镜对底波衰减强度不同区域进行了显微组织对比, 利用电子背散射衍射 (EBSD) 技术表征不同超声底波强度区域  $\alpha$  相的晶体取向分布及规律, 并对晶体取向占比进行了统计, 探讨了底波衰减的根本原因。结果表明, 底波衰减部位对应的条状  $\alpha$  相数量多, 其方向与超声波传递方向平行, 这些条状  $\alpha$  相对应 (0001) 晶面, 导致超声波的传播方向与晶体  $c$  轴垂直, 材料散射作用较强, 底波衰减明显。此外, 底波衰减部位  $\beta$  转变组织中次生片状  $\alpha$  相呈杂乱交错排列, 也会降低探伤水平。

**关键词:** TA15 钛合金; 显微组织; 晶体取向; 超声波探伤; 底波衰减

中图分类号: TG146. 23; TG115. 285

文献标识码: A

文章编号: 1009-9964(2021)03-035-06

## Correlation between TA15 Titanium Alloy Microstructures and the Ultrasonic Wave Attenuation during the Material Ultrasonic Detection Process

Song Weiwei, Li Benjiang, Song Zengjin, Li Zengle, Zhang Hongjing, Jiao Juanjuan, Lv Zhengfeng, Cheng Rence  
(Shandong Nanshan Aluminum Co., Ltd., Longkou 265713, China)

**Abstract:** Correlation between microstructures and the corresponding ultrasonic wave attenuation of T-section TA15 titanium alloy forging ring was studied, as ultrasonic wave attenuation phenomenon occurred locally during ultrasonic defect detection process. Optical microscope was used to compare the microstructural differences related to wave attenuation intensity. The electron backscattered diffraction (EBSD) technology was used to characterize the distribution of crystal orientations corresponding to  $\alpha$  phase with different bottom wave signal areas, and the proportion of each orientation has been counted to help discuss the root cause of bottom wave attenuation. The results show that the strong ultrasonic attenuation region pertains a higher number of strip-shaped  $\alpha$  phase, mean well these strip-shaped  $\alpha$  phase's elongation direction is parallel to the ultrasonic transmission direction. These strip-shaped  $\alpha$  corresponds to the (0001) crystal plane, resulting in ultrasonic wave propagation direction perpendicular to the crystal  $c$ -axis, material having a strong scattering effect and causing ultrasonic bottom wave attenuation more obvious. In addition, the secondary  $\alpha$  lamellae of the  $\beta$ -transformation structure at the bottom wave attenuation site are arranged disorderly, which will also worsen the ultrasonic detection result.

**Key words:** TA15 alloy; microstructure; crystal orientation; ultrasonic defect detection; bottom wave attenuation

TA15 钛合金是一种典型的近  $\alpha$  钛合金, 具有比强度高、热稳定性好、抗蠕变性能优异和可焊性强等优点, 被大量应用于航空航天工业中关键零部件的制造, 例如应用于发动机的各种叶片、机匣, 飞机的各种钣金件、梁、接头、大型壁板、环锻件、

焊接承力框等<sup>[1]</sup>。由于航空类产品的可靠性与人身安全有着高度关联性, 同时由于材料和零件使用环境和载荷条件的极端苛刻, 对其产品的完整性要求也是极为严格。因此, 航空无损检测技术成为保证航空产品完整性和可靠性的重要手段<sup>[2]</sup>。超声波检验对于钛合金是一个重要的质量控制手段, 生产厂和航空厂都用超声探伤检测进行质量控制。

收稿日期: 2020-09-09

通信作者: 宋韦韦(1988—), 女, 博士, 工程师。

钛合金缺陷的种类大致分为冶金缺陷(如夹杂、偏析)、工艺缺陷(如过热、变形不足、裂纹)和组织缺陷。在应用超声波检验钛合金冶金质量时,材料组织不同所产生的反射信号有明显差异。针对TA15钛合金锻件在超声C扫描后,局部出现底波衰减严重,未出现杂波的情况,采用光学金相法并结合电子背散射衍射(EBSD)技术,揭示不同显微组织和晶体取向分布对超声波衰减的影响。

## 1 实验

TA15钛合金在 $T_{\beta} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度进行墩粗和模锻,经退火处理和机加工后获得T形截面的锻环,如图1所示。

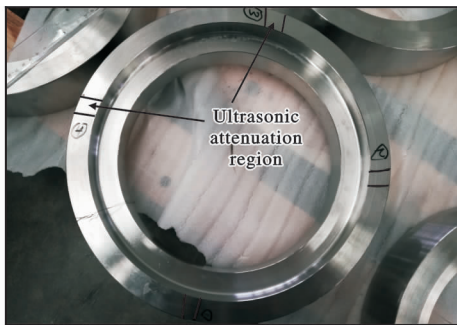


图1 TA15钛合金锻环俯视图

Fig. 1 Top view of TA15 titanium forging ring

采用频率为5.0 MHz纵波聚焦探头,对加工后的锻环外环面周向进行了超声探伤检测,发现局部区域出现底波损失严重现象,底波强度衰减量超过50%,但并未发现任何杂波缺陷信号。图2为TA15钛合金锻环外环面周向超声探伤底波周向C扫描结果,纵坐标为环锻件的高度,横坐标为环锻件的周向角度,不同颜色代表收集的底波强度与原始发射波强度的比值。通过观察发现,底波强度衰减部位距环锻件高向中心线2~8 mm,距离中心线6 mm位置底波衰减量最大,并以扁平椭圆状呈对称式分布于锻环内。在锻环超声探伤底波正常和衰减部位,分别截取T形试片进行低倍组织的观察和分析,并在此2块试片不同部位截取试样进行显微组织、晶体取向分析,取样位置如图3所示。使用配比为 $V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=5:20:75$ 腐蚀液对金相试样进行腐蚀处理后,采用光学显微镜观察显微组织,并使用Image J软件统计初生等轴 $\alpha$ 相体积分数和次生片状 $\alpha$ 相尺寸。采用EDAX电子背散射衍射

(EBSD)系统对材料的晶体取向进行数据采集,试样制备时使用标乐Vibromet 2振动抛光机对样品进行去应力抛光处理,并采用OIM软件进行晶体取向分析。

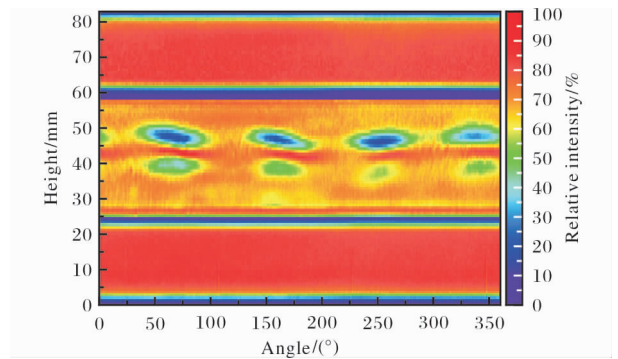


图2 TA15钛合金锻环外环面周向超声探伤底波C扫描结果

Fig. 2 Ultrasonic bottom wave C scan result for the outer circumferential surface of TA15 titanium alloy ring

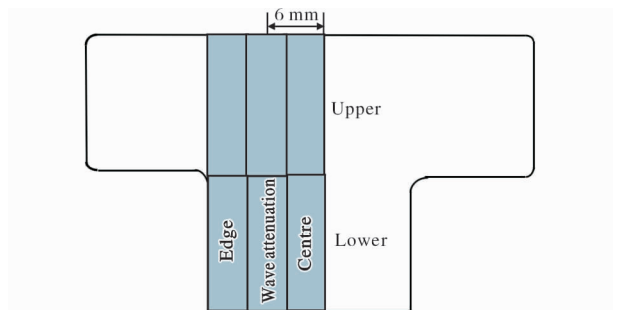


图3 T形截面取样部位示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sampling positions from T-section specimen

## 2 实验结果

### 2.1 低倍组织结果

TA15钛合金锻环底波衰减试样和正常试样的低倍组织如图4所示。锻件流线走向沿着截面轮廓边缘分布,未发现流线不顺、涡流、穿流现象。此外,参考GB/T 5168—2008“高低倍组织检验方法”标准<sup>[3]</sup>,确定锻环的低倍组织为模糊晶,未发现宏观偏析、夹杂、裂纹等低倍缺陷,2块试片低倍组织无明显差异。

### 2.2 显微组织观察

在TA15钛合金锻环T形截面低倍试片上,按照图3所示取样方式,在截面的上端和下端分别切取3块试样,对应着中心位置、底波衰减(距中心6 mm处)、边部位置。

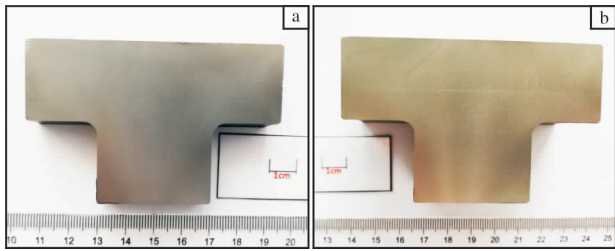


图4 TA15 钛合金锻环底波衰减试样和正常试样的低倍组织

Fig. 4 Macrostructures of TA15 titanium alloy forging ring:

- (a) the ultrasonic bottom wave attenuation specimen;  
(b) the normal ultrasonic bottom wave specimen

图5为底波衰减和正常试样T形截面上端不同位置对应的金相照片。从图5可以, 2块试片上端试样显微组织没有差异, 均为典型的双态组织, 由初生 $\alpha$ 相和 $\beta$ 转变组织组成, 不同部位 $\beta$ 转变组织中次生片状 $\alpha$ 相厚度和长度相近。

图6为底波衰减和正常试样T形截面下端不同位置对应的金相照片。从图6可以看出, 底波衰减试样, 从中心到边部, 组织逐渐由双态组织向双套组织转变<sup>[4]</sup>, 中心部位 $\beta$ 转变片状 $\alpha$ 相, 片状 $\alpha$ 相厚度为 $1.6\ \mu\text{m}$ , 长度为 $9.4\ \mu\text{m}$ ; 底波衰减部位片状 $\alpha$ 相厚度为 $1.11\ \mu\text{m}$ , 长度为 $5.16\ \mu\text{m}$ , 片状 $\alpha$ 相交无规律排列, 且存在竖直分布的条状 $\alpha$ 相; 边部位置, 在 $\beta$ 转变组织中析出了比初生 $\alpha$ 相更为细小

的近等轴形 $\alpha$ 相, 组织为典型的双套组织。超声底波正常试片T形截面下端部位, 从中心部位到边部均由等轴初生 $\alpha$ 相和 $\beta$ 转变组织形成的双态组织构成, 中心部位和距中心 $6\ \text{mm}$ 处, 二次片状 $\alpha$ 相的厚度为 $0.98\ \mu\text{m}$ , 长度为 $7.25\ \mu\text{m}$ ,  $\beta$ 转变组织中局部片状 $\alpha$ 相呈规则平行排列; 边部区域,  $\beta$ 转变组织中片状 $\alpha$ 相厚度为 $1.02\ \mu\text{m}$ , 长度为 $6\ \mu\text{m}$ , 次生片状 $\alpha$ 相平行排列, 此外 $\beta$ 转变组织中析出近等轴状的 $\alpha$ 相。底波衰减和正常试样T形截面不同部位初生 $\alpha$ 相尺寸无明显差异, 体积分数均在 $20\% \sim 24\%$ 之间。

### 2.3 不同部位晶体取向观察

图7为底波衰减试样T形截面下端中心、底波衰减及边部区域对应的反极图, 图中不同颜色代表不同的晶体取向。本研究中由于 $\beta$ 相的体积分数小于 $5\%$ , 而且分布在片状 $\alpha$ 相中间,  $\beta$ 相对超声衰减的影响可以被忽略, 重点关注 $\alpha$ 相的晶体取向分布情况。中心部位晶体取向随机分布(图7a), 初生 $\alpha$ 相晶粒多为 $(0001)$ 晶面, 但是条状 $\alpha$ 相和次生片状组织多为交叉分布。底波衰减部位 $(0001)$ 晶面的晶粒较多(图7b), 且竖直分布, 对应着条状 $\alpha$ 相。边部试样各晶体取向分布均匀(图7c), 并未出现聚集分布现象,  $(2\bar{1}\bar{1}0)$ 晶面较多, 对应着 $\beta$ 组织中析出的等轴 $\alpha$ 相。

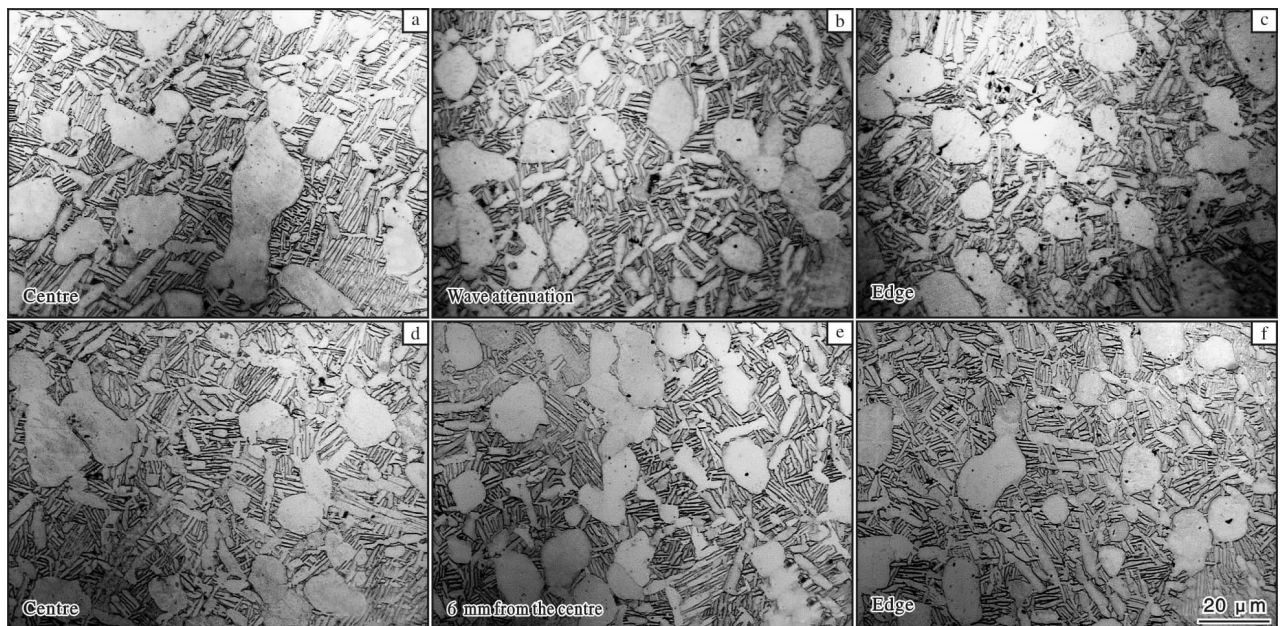


图5 底波衰减和正常试样T形截面上端不同位置对应的金相照片

Fig. 5 Metallographic structures corresponding to different positions at the upper of T-section:

- (a~c) the bottom wave attenuation specimens; (d~f) normal specimens

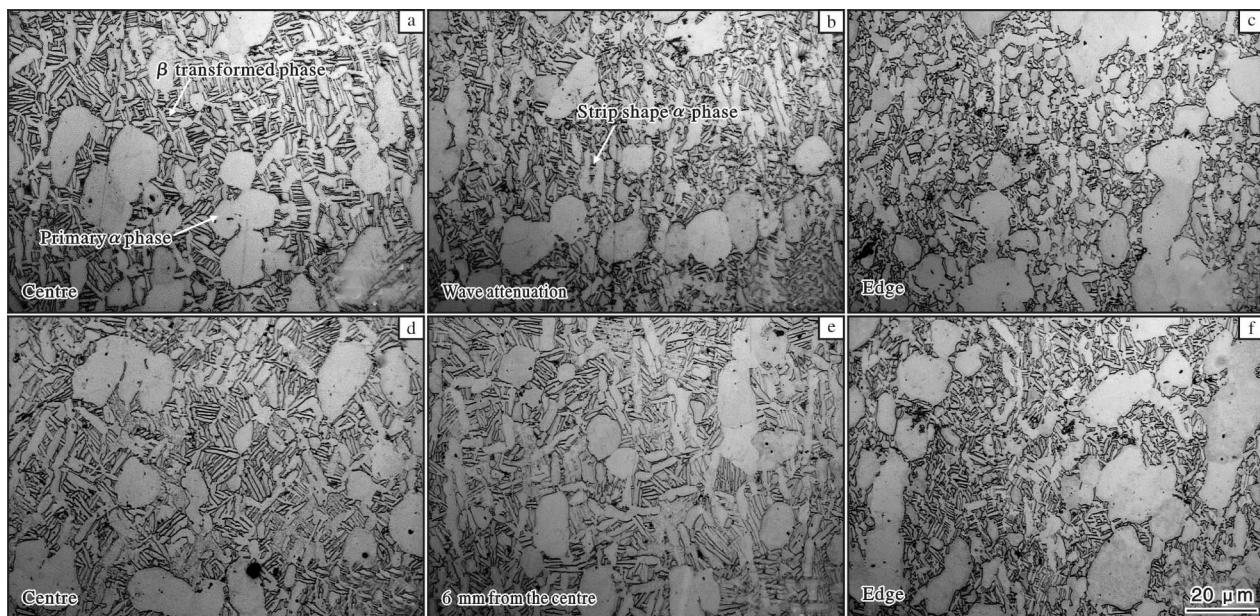


图6 底波衰减和正常试样T形截面下端不同位置对应的金相照片

Fig. 6 Metallographic structures corresponding to different positions at the lower of T-section:  
(a~c) the bottom wave attenuation specimens; (d~f) normal specimens

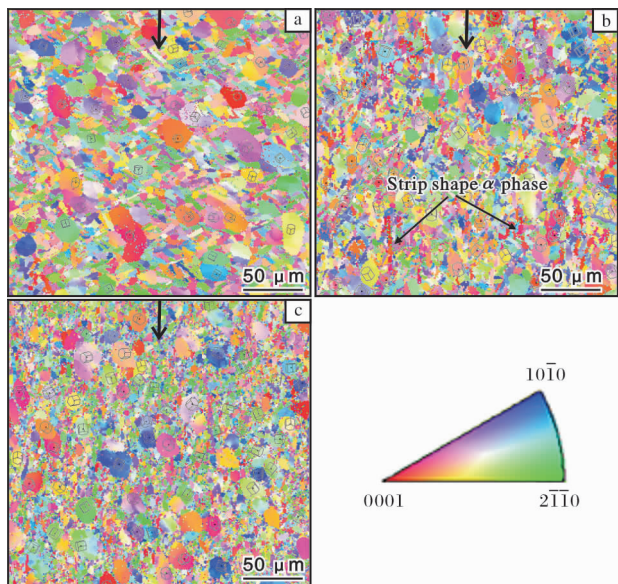


图7 底波衰减试样T形截面不同部位对应的反极图

Fig. 7 Inverse pole figures corresponding to different positions of T-section of bottom wave attenuation specimens:  
(a) central region; (b) strong bottom wave attenuation region; (c) edge region; black arrows indicate ultrasonic wave detection direction

为了便于观察晶体取向分布及不同晶体取向与超声波入射方向的对应关系,把图7中趋于(0001)、(10 $\bar{1}0$ )、(2 $\bar{1}\bar{1}0$ )晶面的晶粒组织分别用红色、蓝色和绿色表示,得到如图8所示的晶体取向分布图。

各部位不同晶体取向的晶面占比统计结果如图9所示。锻环中心部位(图8a~8c), (0001)、(10 $\bar{1}0$ )、(2 $\bar{1}\bar{1}0$ )晶面对应的晶粒组织呈交叉分布,且与超声波入射束无平行和垂直关系,3种晶面的面积占比分别为0.320、0.325和0.355。底波衰减部位(图8d~8f),条状 $\alpha$ 相对应(0001)晶面,与超声波入射束平行,(2 $\bar{1}\bar{1}0$ )晶面 $\alpha$ 相分布较为分散,3种晶面的面积占比分别为0.345、0.357和0.299。边部位置(图8g~8i),(2 $\bar{1}\bar{1}0$ )晶面最多,晶面占比为0.438,(0001)、(10 $\bar{1}0$ )晶面占比分别为0.289、0.273。

此外,从图8不同晶面对应的三维晶体取向标定图可知,即使有的区域具有相同的(10 $\bar{1}0$ )、(2 $\bar{1}\bar{1}0$ )晶面,但晶体 $c$ 轴可能会相差90°,而(0001)晶面 $c$ 轴则始终是重合的。图8中,(10 $\bar{1}0$ )、(2 $\bar{1}\bar{1}0$ )、(0001)晶面对应的晶体 $c$ 轴与超声波入射束夹角分别为22.3°(或67.7°)、56.5°(或33.5°)、90°。

### 3 分析与讨论

多晶材料由许多离散的晶粒组成,每个晶粒均具有规则的原子排列结构,晶粒的弹性模量存在各向异性,而且晶体的取向也不同。当超声波穿过聚集的多晶体时,晶界会对超声波起到散射作用,超声波的衰减值和传播速度的改变与晶粒大小、形状、取向、以及各向异性有关<sup>[5]</sup>。钛合金中 $\alpha$ 相为密排

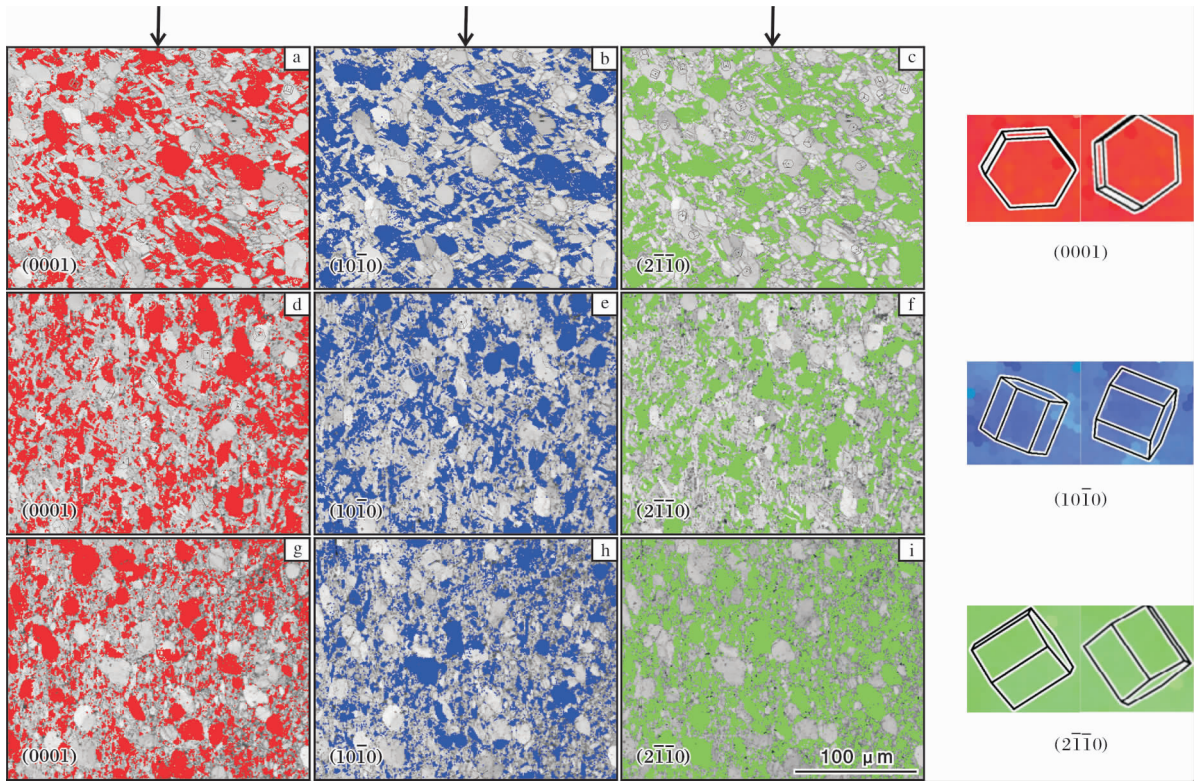


图8 T形截面不同部位的晶体取向分布图

Fig. 8 Crystal orientation distribution corresponding to different positions of T-section: (a~c) central region; (d~f) bottom wave attenuation region; (g~i) edge region

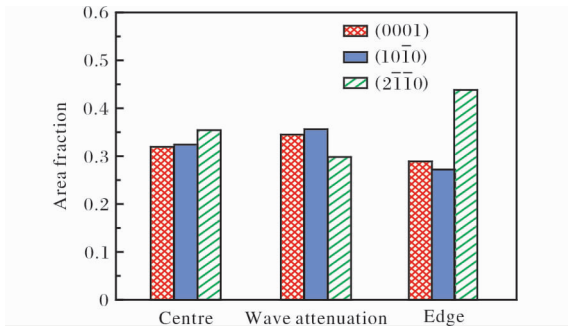


图9 T形截面不同部位对应的晶体取向面积占比  
Fig. 9 Area fraction of crystal orientation for different positions of T-section

六方结构, 具有明显的各向异性。对于钛单晶,  $\alpha$  相弹性模量随受力方向与  $c$  轴之间的夹角  $\gamma$  的增加而降低,  $c$  轴方向的弹性模量相比  $a$  轴方向高出约 30%, 如图 10 所示<sup>[6]</sup>。此外, 对于含有 6% Al(质量分数, 下同)的  $\alpha$  钛单晶, 不同方向的弹性模量如表 1 所示, 沿  $c$  轴方向的弹性模量  $C_{33}$  为 163 GPa, 沿基面的弹性模量  $C_{11}$  为 136 GPa, 导致超声波纵波速率在 2 种不同取向面的传播速度有较大差异<sup>[7]</sup>。但是按照各晶体取向所占比例进行不同区域弹性模

量的计算, 锻环中心、底波衰减、边部的弹性模量均为 143 GPa, 并无明显差异, 所以超声底波损失并不是由于弹性模量不匹配导致。

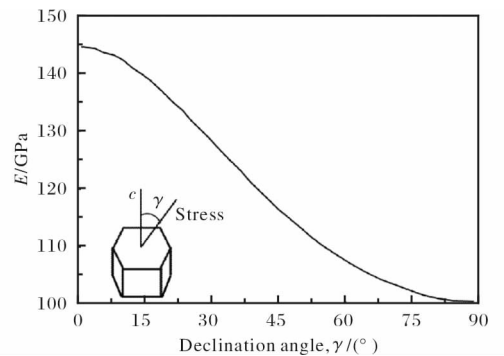


图10  $\alpha$ -Ti 单晶弹性模量随倾角  $\gamma$  变化图<sup>[6]</sup>  
Fig. 10 Elastic modulus change with  $\gamma$  angle of  $\alpha$ -Ti single crystal

表1 Ti-6%Al  $\alpha$  钛单晶弹性模量矩阵元值 (GPa)<sup>[7]</sup>  
Table 1 Elastic modulus matrix element value of Ti-6%Al  $\alpha$  titanium single crystal

$C_{11}$	$C_{33}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{23}$	$C_{44}$
136	163	78	68.5	57.9	40.6

超声波的衰减系数与材料的微观织构也有密切关系,材料微观织构较强的区域,声波衰减量大,而微观织构不明显的区域,声波衰减较小。此外,当超声波传播方向与微观织构平行(伸长方向)时,超声衰减系数相比与微观织构垂直时增加了1倍,对于近 $\alpha$ 型钛合金,衰减系数由0.12 db/mm(平行)变为0.06 db/mm(垂直)<sup>[7]</sup>。Blodgett 研究发现,具有密排六方晶格的 $\alpha$ 相,当超声波传播方向垂直于 $c$ 轴时,会出现较明显的声波衰减,这是由于该位向使得散射作用较显著;而当超声波的传播方向平行于 $c$ 轴时,反射波强度较大<sup>[8]</sup>。

由图6和图7可知,该锻环底波衰减部位,条状 $\alpha$ 相具有较强的方向性,且条状相拉长方向平行于超声波的传播方向。由于底波衰减部位(0001)晶面的面积占比较高,且超声波的传播方向与 $c$ 轴是垂直的,导致该方向上的材料散射作用较强,底波衰减较明显。此外,底波衰减部位 $\beta$ 转变组织中次生片状 $\alpha$ 相长度为5.26  $\mu\text{m}$ ,明显小于中心部位长度,且无规律排列,也会影响探伤水平<sup>[9]</sup>。但是由于不同取向的晶粒并未出现显著聚集分布,所以并未发现较明显的反射波。锻环边部位置,虽然 $\beta$ 转变组织中析出的细小等轴 $\alpha$ 相较多,其 $\alpha$ 相主要为(2 $\bar{1}$ 10)晶面,其 $c$ 轴与超声波探测方向并不垂直,所以底波衰减小。对于锻环中心部位,由于其微观组织并未有明显的择优取向,组织均匀性高,超声探伤水平好<sup>[9]</sup>。

锻环T形截面中心到边部处显微组织的变化,主要是由于在模锻成形过程中,模具温度较低,而且锻件边部的变形量较大,导致越靠近边部,动态再结晶作用越明显,片状 $\alpha$ 转变为等轴 $\alpha$ 相的比例明显增大<sup>[10]</sup>。此外,底波衰减位置由于金属的温度相对较高,随着晶粒内部塑性变形程度增加和累积,整个晶粒将发生变形以适应外部载荷应力的作用,晶粒随着滑移系的开启发生转动过程时,晶粒被压扁或拉长,导致更多的(0001)和(10 $\bar{1}$ 0)晶面平行于T形截面<sup>[10,11]</sup>。

## 4 结 论

(1)TA15钛合金锻环超声检测中,底波衰减试样T形截面不同区域的显微组织存在差异,底波衰减部位出现与超声波平行的条状 $\alpha$ 相,且二次片状 $\alpha$ 相杂乱交错排列,组织一致性差。

(2)底波衰减部位条状 $\alpha$ 相对应着(0001)晶面,晶面的面积占比为0.345,超声波的传播方向与晶体 $c$ 轴垂直,导致该方向上的材料散射作用较强,底波衰减较明显。

## 参考文献 References

- [1] Sun Z C, He Y. Microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy under multi-step local loading forming [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2009, 523(1/2): 184 - 192.
- [2] Ai Y L, Liu L, He W, et al. Influence of microstructure of TC4 titanium alloy on ultrasonic velocity and attenuation [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 337: 719 - 723.
- [3] 中国有色金属工业协会.  $\alpha$ - $\beta$ 钛合金高低倍组织检验方法: GB/T 5168—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [4] 蔡建明, 曹春晓, 马济民, 等. TC11钛合金异常双态组织的形成及控制 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(S3): 517 - 521.
- [5] Li H, Ma Y J, Qiu J K, et al. Effect of microstructures on noise level in ultrasonic testing of TC4 titanium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(9): 1859 - 1863.
- [6] Bhattacharjee A, Pilchak A L, Lobkis O I, et al. Correlating ultrasonic attenuation and microtexture in a near-alpha titanium alloy [J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2011, 42: 2358 - 2372.
- [7] Kim J Y, Rokhlin S I. Determination of elastic constants of generally anisotropic inclined lamellar structure using line-focus acoustic microscopy [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, 126(6): 2998 - 3007.
- [8] Blodgett M P, Eylon D. The influence of texture and phase distortion on ultrasonic attenuation in Ti-6Al-4V [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2001, 20(1): 1 - 16.
- [9] Pilchak A L, Li J, Rokhlin S I, et al. Quantitative comparison of microtexture in near-alpha titanium measured by ultrasonic scattering and electron backscatter diffraction [J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2014, 45(10): 4679 - 4697.
- [10] Fan X G, Yang H, Gao P F, et al. Morphology development of elongated  $\alpha$  phases in hot working of large-scale titanium alloy plate [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(12): 3508 - 3516.
- [11] Gao P F, Yang H, Fan X G, et al. Microstructural features of TA15 titanium alloy under different temperature routes in isothermal local loading forming [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2012, 540: 245 - 252.