

TA15 钛合金双态组织特征对超声波探伤的影响

王 哲¹, 冉 兴^{2,3}, 翟江波¹, 冯晓艳¹, 张 帅¹, 蔡 松¹

(1. 陕西宏远航空锻造有限责任公司, 陕西 咸阳 713801; 2. 清华大学 机械工程系, 北京 100084;

3. 中航重机股份有限公司, 贵州 贵阳 550005)

摘要: 针对 TA15 钛合金在服役过程中由于显微组织缺陷问题而引起灾难性事故的现象, 采用光学显微镜 (OM) 和超声波探伤设备对 TA15 钛合金锻件在不同热加工条件下的双态组织特征与超声波探伤杂波水平之间的关系进行研究。结果表明: TA15 钛合金超声波探伤杂波水平受初生 α_p 相含量、形貌和片层 α 相片层厚度的双重影响, 随着初生 α_p 相的增加及形貌均匀分布, 超声波探伤杂波水平降低。TA15 钛合金显微组织中出现粗大且排列整齐的片层 α 相, 导致探伤杂波水平较高, 而杂乱细小的片层 α 相导致探伤杂波水平降低。当 TA15 钛合金锻件的显微组织中出现条带状 α 相组织时, 该部位超声波探伤杂波水平明显升高, 热加工过程中应避免该组织形成。

关键词: TA15 钛合金; 双态组织; 超声波探伤; 杂波; α 相

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.009

中图分类号: TG139

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 05-0052-05

Influence of duplex microstructure characteristic for TA15 titanium alloy on ultrasonic flaw detect

Wang Zhe¹, Ran Xing^{2,3}, Zhai Jiangbo¹, Feng Xiaoyan¹, Zhang Shuai¹, Cai Song¹

(1. Shaanxi Hongyuan Aviation Forging Co., Ltd., Xianyang 713801, China; 2. Department of Mechanical Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. AVIC Heavy Machinery Co., Ltd., Guiyang 550005, China)

Abstract: For the phenomenon of catastrophic accidents caused by microstructure defects for TA15 titanium alloy during service process, the relationship between duplex microstructure characteristics and ultrasonic flaw detection clutter level of TA15 titanium alloy forgings under different hot working conditions was investigated by optical microscope (OM) and ultrasonic flaw detection equipment. The results show that the ultrasonic flaw detection clutter level of TA15 titanium alloy is affected by the content and morphology of primary α_p phase and the thickness of lamellar α phase. With the increasing of primary α_p phase and uniform distribution of morphology, the ultrasonic flaw detection clutter level decreases. The appearance of coarse and orderly arranged lamellar α phase in the microstructure of TA15 titanium alloy results in higher flaw detection clutter level, while the lower flaw detection clutter level caused by disordered and fine lamellar α phase. When the banded α phase structure appears in the microstructure of TA15 titanium alloy forgings, the ultrasonic flaw detection clutter level of this part increases significantly. So the appearance of the structure should be avoided in the hot working process.

Key words: TA15 titanium alloy; duplex microstructure; ultrasonic flaw detect; clutter; α phase

钛合金具有比强度高、耐高温和耐腐蚀性好等优点, 广泛应用于航空、航天、船舶、化工等领域^[1-3]。TA15 钛合金因较高的室温和中温强度、抗蠕变性能、良好的焊接性能以及长时工作温度可达 500 ℃, 而被广泛应用于航空、航天结构件上^[4-6]。但零件在服役过程中, 常出现一些由于材料内部组

织缺陷而引起的灾难事故^[7]。钛合金表面损伤 (粗糙度、刀口等) 和内部缺陷 (块状 α 相或条状分布的不均匀 α 相等) 具有较大敏感性, 因此, 无损检测可作为钛合金零件服役的一个重要保障^[8]。

超声波探伤检验作为一种重要的无损检测技术应用较为广泛, 当超声波穿过不同声抗介质时会发生反射和透射现象^[9]。通过对材料显微组织特征与超声杂波水平关系的研究, 揭示了显微组织对探伤杂波的影响机理, 并在不破坏材料的情况下, 通过对杂波和衰减的分析, 获得材料的均匀性和显微组织信息^[10]。近些年, 科研人员对钛合金显微组织与超声杂波水平进行了相关研究, 马小怀等^[11-12]对零件表面粗糙度及超声波探头频率对杂波的影响进行

收稿日期: 2021-04-06; 修订日期: 2021-07-08

基金项目: 两机重大专项基础研究 (J2019-VII-002)

作者简介: 王 哲 (1987-), 男, 博士, 高级工程师

E-mail: tianchenzhe@163.com

通信作者: 冉 兴 (1968-), 男, 博士研究生, 研究员

E-mail: 2560680637@qq.com

研究,认为杂波水平与零件表面粗糙度、探头频率以及晶粒大小和取向均有关。胡宗式^[13]认为杂波为组织不均匀性的表现,但不均匀组织是产生杂波的充分非必要条件。李华等^[14]对 TC4 钛合金显微组织与超声波探伤杂波的影响关系进行了研究,发现不均匀区域晶粒取向变化是产生杂波的根本原因。

目前,国内学者对 TA15 钛合金热变形、组织及性能的演变关系进行了深入研究,而对该合金初生 α_p 相含量和片层 α 相形态对 TA15 钛合金的探伤杂波水平的影响的研究报道较少。本文通过对 TA15 钛合金显微组织与超声波探伤杂波水平进行研究,得出

TA15 钛合金显微组织与超声波探伤的关系,为制定 TA15 钛合金锻件热加工工艺提供重要的指导意义。

1 试验材料及方法

试验采用经 3 次真空自耗电弧熔炼的 TA15 钛合金铸锭,铸锭经 β 相区开坯和 $(\alpha+\beta)$ 相区锻造为直径为 $\Phi 300$ mm 的棒材,化学成分见表 1。采用淬火金相法测得相变温度 T_β 为 998 $^\circ\text{C}$ 。图 1 为棒材显微组织,由图 1 可知,TA15 钛合金棒材中初生 α_p 相分布于 β 相基体上,含量约为 55%,呈球状或蠕虫状,形态均匀。

表 1 TA15 钛合金棒材化学成分(%,质量分数)
Table 1 Chemical compositions of TA15 titanium alloy bar(%, mass fraction)

Al	V	Mo	Zr	C	Fe	Si	O	N	H	Ti
6.83	2.26	1.81	2.22	0.006	0.047	0.024	0.11	0.006	0.0025	余量

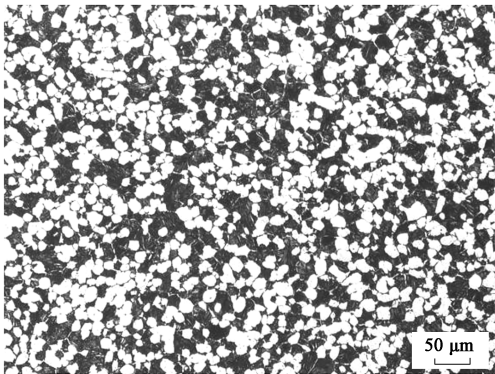


图 1 TA15 钛合金棒材显微组织
Fig. 1 Microstructure of TA15 titanium alloy bar

试验采用 TA15 钛合金棒材经 3 种锻造温度($(T_\beta-15)$ 、 $(T_\beta-30)$ 和 $(T_\beta-50)$ $^\circ\text{C}$)进行锻造后获得的自由锻件,再经 850 $^\circ\text{C}$ 退火后沿厚度方向进行超声波探伤,所用波型为纵波,频率为 10 MHz,对比平底孔直径为 $\Phi 0.8$ mm 的人工缺陷。沿锻件厚度方向分层取样后,在光学显微镜下观察不同杂波水平部位的显微组织,采用线切割对不同杂波水平位置进行取样。金相试样经预磨、抛光后采用体积比为 $V(\text{HF}):V(\text{HNO}_3):V(\text{H}_2\text{O})=1:3:6$ 的 Kroll 腐蚀剂进行侵蚀,采用 Leica DMI 3000M 型金相显微镜进行组织观察。

2 试验结果与分析

2.1 TA15 钛合金显微组织与超声波探伤杂波关系

图 2 为 3 种锻造温度条件下的 TA15 钛合金锻件采用平底孔直径为 $\Phi 0.8$ mm 的 A 型脉冲反射式

超声波检测的探伤结果以及其对应的显微组织,由图 2 可知,TA15 钛合金在 $(\alpha+\beta)$ 相区的锻造显微组织均为双态组织,由球状初生 α_p 相和片层 α 相组成,但由于锻造温度不同,初生 α_p 相含量、片层 α 相厚度以及形貌差异较大。

图 2a 中探伤结果显示:距离上表面约 88~100 mm 处的中心层的杂波水平为 -6 dB,局部杂波水平为 -4~-2 dB;该区域显微组织中初生 α_p 相含量约为 15%,片层 α 相呈长棒状分布且排列整齐(图 2b)。图 2c 中探伤结果显示:距离上表面约 76~90 mm 处的中心层的杂波水平为 -4~-6 dB;该区域显微组织中初生 α_p 相含量约为 25%且其尺寸较图 2b 中大,片层 α 相同样呈长棒状分布且排列整齐,尺寸较图 2b 中略小(图 2d)。图 2e 中探伤结果显示:距离上表面约 78~92 mm 处的中心层的杂波水平为 -6 dB,其他部位的杂波水平为 -9~-12 dB;该区域显微组织中初生 α_p 相含量约为 40%且其尺寸较图 2b 和图 2d 中大,片层 α 相呈细小针状分布,且排列杂乱(图 2f)。

2.2 TA15 钛合金双态组织特征对超声波探伤杂波水平的影响机理

表 2 为 TA15 钛合金经不同锻造温度锻造后双态组织特征与杂波水平的影响关系,可以发现,随着 TA15 钛合金双态组织中初生 α_p 相含量的增加、片层 α 相厚度的减小,杂波水平逐渐降低。当 TA15 钛合金双态组织中初生 α_p 相含量为 15%时,超声波探伤杂波水平较高,为 -4~-2 dB;而当初生 α_p 相含量增加至 40%时,超声波探伤杂波水平降低,

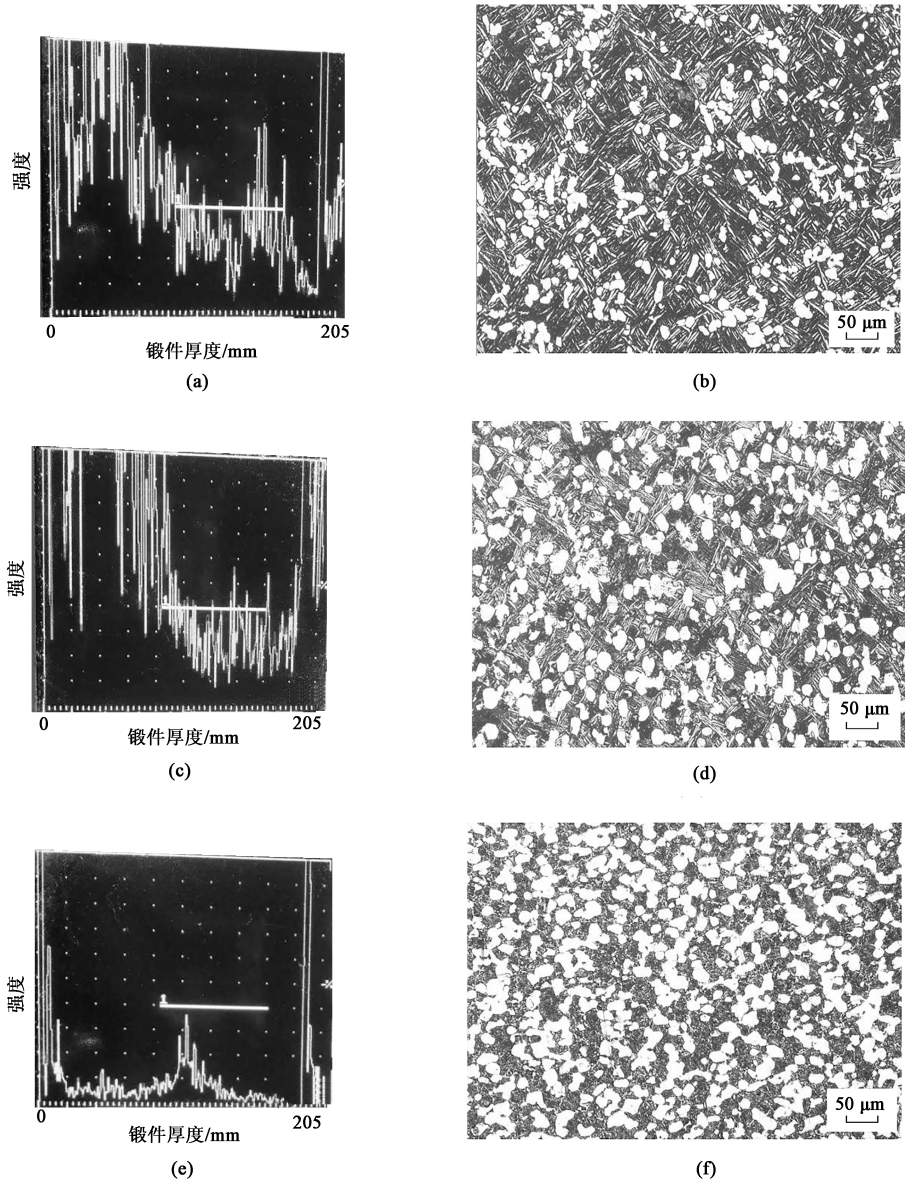


图 2 不同锻造温度下 TA15 钛合金锻件的探伤结果及其显微组织

(a) (T_{β} -15) °C 下的探伤结果 (b) (T_{β} -15) °C 下的显微组织 (c) (T_{β} -30) °C 下的探伤结果
(d) (T_{β} -30) °C 下的显微组织 (e) (T_{β} -50) °C 下的探伤结果 (f) (T_{β} -50) °C 下的显微组织

Fig. 2 Flaw detection results and microstructures of TA15 titanium alloy forgings under different forging temperatures

(a) Flaw detection result of (T_{β} -15) °C (b) Microstructure of (T_{β} -15) °C (c) Flaw detection result of (T_{β} -30) °C
(d) Microstructure of (T_{β} -30) °C (e) Flaw detection result of (T_{β} -50) °C (f) Microstructure of (T_{β} -50) °C

表 2 TA15 钛合金双态组织特征与杂波水平的影响关系
Table 2 Influence relationship between duplex microstructure characteristic and clutter level of TA15 titanium alloy

锻造温度/°C	初生 α_p 相含量/ %	片层 α 相平均 厚度/ μm	杂波水平/dB
T_{β} -15	15	3.2	-4~-2
T_{β} -30	25	2.5	-6
T_{β} -50	40	1.0	-12

为-12 dB。当片层 α 相平均厚度为 3.2 μm 时，超

声波发生散射，导致杂波水平较高，为-4~-2 dB；而片层 α 相平均厚度为 1.0 μm 时，导致杂波水平较低，为-12 dB。

超声波在传播过程中若 α 相形貌远小于超声波波长，则其对超声波影响较小；而当 α 相形貌与超声波波长相当或远大于超声波波长时，则发生散射、反射或透射等现象^[15]。超声波在穿过两种声阻抗不同的介质时发生反射，其反射系数与声阻抗系数有关^[16]。

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}, \quad t = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

式中: R 为声波反射率; t 为声波透射率; Z_1 为基体声阻抗; Z_2 为介质声阻抗。

TA15 钛合金经 $(\alpha+\beta)$ 相区锻造后形成双态组织, α 相形貌为球状初生 α_p 相和片层 α 相, 基体为 β 相, 因此, Z_1 为 β 相声阻抗, Z_2 为初生 α_p 相及片层 α 相声阻抗。当超声波传播到 α 相和 β 相界面时, 由于 α 相为密排六方 (hcp) 结构, 球状初生 α_p 相择优取向不明显, 而片层 α 相具有较强的横向织构, 择优取向较强^[17-18]。而 β 相为体心立方 (bcc) 结构, 超声波发生反射, 较强织构的片层 α 相与弱取向的球状初生 α_p 相交替出现, 形成杂波。当球状初生 α_p 相含量较少且分布不均匀时, 超声波发生较大散射, 形成较高的杂波水平, 随着球状初生 α_p 相含量的增加及分布均匀, 超声波在传播过程中散射程度降低, 其杂波水平也降低。

当材料中出现孪晶或片层状组织时, 超声波震动引起片层组织与基体在界面处发生交互作用, 部分超声波能量转化为热能^[19-20]。因此, 超声波在具有较大且排列整齐的片层 α 相中传播时的超声波衰减程度较高, 超声波形成的杂波信号较大, 杂波水平较高;

而在细小杂乱的片层 α 相中传播时, 散射程度较小, 杂波水平也较低。

2.3 TA15 钛合金条带状 α 相组织对超声波探伤杂波水平的影响

本实验在对 TA15 钛合金锻件进行探伤时发现部分区域探伤杂波水平异常升高、出现杂波满屏的现象 (图 3a), 为判定此类信号为何种缺陷导致的反射信号, 对该部位进行定位切片观察其显微组织, 发现其显微组织为存在明显的条带状 α 相的双态组织 (图 3b)。这主要是由于: TA15 钛合金原材料棒材中存在微区偏析或在后续锻造过程中由于局部变形不均匀导致产生条带状 α 相组织, 进行超声波探伤检测时, 超声波在传播过程中遇到不同声阻抗的界面 (不均匀的条带组织) 时发生反射, 入射波产生反射和衰减影响了反射信号强度, 脉冲信号发生改变, 超声波束的散射与界面间反射波叠加而产生杂波, 导致严重的超声波信号衰减, 在该处超声波探伤出现杂波满屏的现象。由此可以得出, 显微组织中出现不均匀的条带状 α 相组织是造成该区域较高杂波水平的主要原因。因此, TA15 钛合金在熔炼或锻造过程中应尽量避免由于微区偏析或局部形变不均匀而生成的条带状 α 相组织, 从而引起探伤杂波异常升高。

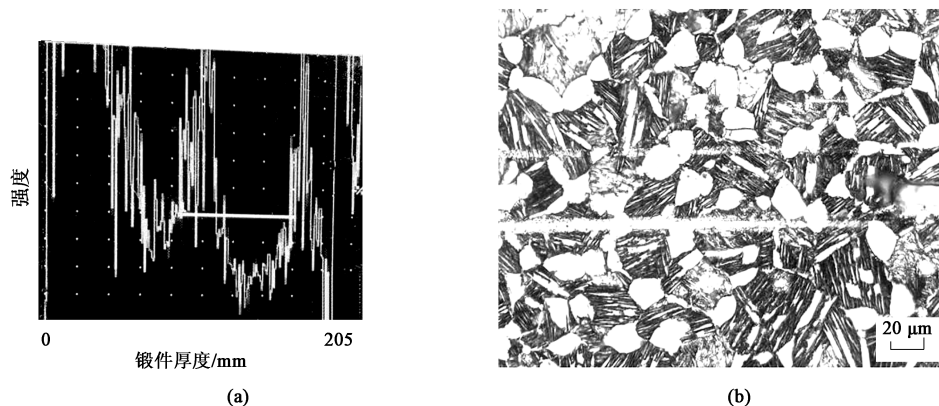


图3 TA15 钛合金条带状 α 相组织的超声波探伤结果 (a) 和显微组织 (b)

Fig. 3 Ultrasonic flaw detection results (a) and microstructure (b) of band α phase structure for TA15 titanium alloy

3 结论

(1) 初生 α_p 相含量及分布对超声波探伤杂波水平具有重要影响, 随着初生 α_p 相的增加及分布均匀, 超声波探伤杂波水平降低。

(2) 粗大且排列整齐的片层 α 相导致探伤杂波水平较高, 杂乱细小的片层 α 相导致探伤杂波水平降低。

(3) TA15 钛合金锻件中条带状 α 相组织明显提高了超声波探伤杂波水平, 在热加工过程中应避免该组织的形成。

参考文献:

- [1] Yan Z, Guo H, Shi Z, et al. Microstructure evolution of TA15 titanium alloy subjected to equal channel angular pressing and subsequent annealing at various temperatures [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211 (8): 1364-1371.
- [2] 曹春晓. 航空用钛合金的发展概况 [J]. 航空科学技术,

- 2005, (4): 3-6.
- Cao C X. General development situation of titanium alloys for aviation [J]. Aeronautical Science & Technology, 2005, (4): 3-6.
- [3] 朱知寿. 新型航空高性能钛合金材料技术研究与进展 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- Zhu Z S. Research and Development of New-brand Titanium Alloys of High Performance for Aeronautical Applications [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2013.
- [4] 沙爱学, 李兴无, 储俊鹏. TA15 钛合金的普通退火 [J]. 稀有金属, 2003, 27 (1): 213-215.
- Sha A X, Li X W, Chu J P. Common annealing of TA15 alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2003, 27 (1): 213-215.
- [5] 曹京霞, 方波, 黄旭, 等. 微观组织对 TA15 钛合金力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2004, 28 (2): 362-364.
- Cao J X, Fang B, Huang X, et al. Effects of microstructure on properties of TA15 titanium alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28 (2): 362-364.
- [6] Wang Z, Wang X N, Zhu Z S. Characterization of high-temperature deformation behavior and processing map of TB17 titanium alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 692: 149-154.
- [7] 陈昌华. 钢锭和锻件超声波探伤缺陷分析 [M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2015.
- Chen C H. Ultrasonic Flaw Detection Defect Analysis of Steel Ingot and Forging [M]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2015.
- [8] 王哲, 王新南, 商国强, 等. 新型超高强韧钛合金热变形行为研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47 (3): 810-815.
- Wang Z, Wang X N, Shang G Q, et al. Hot deformation behavior of new high strength and toughness titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47 (3): 810-815.
- [9] 佟健, 邵文彬, 党永丰, 等. 钛合金棒材典型冶金次生缺陷超声波探伤波形特征分析 [J]. 钛工业进展, 2018, 35 (4): 40-43.
- Tong J, Tai W B, Dang Y F, et al. Characteristics analysis of ultrasonic flaw detection waveform for typical metallurgical secondary defects of titanium alloy bars [J]. Titanium Industry Progress, 2018, 35 (4): 40-43.
- [10] 毛江虹, 王建淦, 张谊, 等. 小规格钛棒材成分偏析缺陷的超声波检测 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20 (S1): 1024-1029.
- Mao J H, Wang J G, Zhang Y, et al. Ultrasonic inspection of composition segregation in small diameters titanium bars [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20 (S1): 1024-1029.
- [11] 马小怀, 刘京州, 张延生, 等. 钛合金超声波检测中杂波产生原因分析 [A]. 陕西省第九届无损检测年会陕西省机械工程学会无损检测分会论文集 [C]. 安康, 2004.
- Ma X H, Liu J Z, Zhang Y S, et al. Noise analysis during ultrasonic testing of titanium alloys [A]. Proceedings of the 9th Annual Conference of Shaanxi Province on Nondestructive Testing of Shaanxi Mechanical Engineering Society [C]. Ankang, 2004.
- [12] 马小怀, 赵喜明, 陈百锁, 等. 钛合金小直径棒材超声波探伤 [J]. 金属学报, 2002, 38 (3): 688-690.
- Ma X H, Zhao X M, Chen B S, et al. Ultrasonic testing of titanium alloy bars with small diameter [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38 (3): 688-690.
- [13] 胡宗式. 钛合金超声探伤中杂波与组织的关系 [J]. 钛工业进展, 2002, (6): 31-34.
- Hu Z S. Relationship between clutter and tissue in titanium ultrasonic flaw detection [J]. Titanium Industry Progress, 2002, (6): 31-34.
- [14] 李华, 马英杰, 邱建科, 等. TC4 钛合金显微组织对超声波探伤杂波水平的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42 (9): 1859-1863.
- 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.
- [15] 王小翔, 王俭, 李阁平. 热处理工艺对 TC4 中厚板超声波探伤水平的影响 [A]. 中国有色金属学会第十四届材料科学与合金加工学术年会论文集 [C]. 三亚, 2011.
- Wang X X, Wang J, Li G P. Effect of heat treatment process on ultrasonic flaw detection level for TC4 medium and thick plate [A]. Proceedings of the 14th Annual Conference on Materials Science and Alloy Processing of China Nonferrous Metals Society [C]. Sanya, 2011.
- [16] 鞠岩. 大直径 TC4 钛合金铸锭冒口超声波探伤方法 [J]. 钛工业进展, 2010, (3): 32-34.
- Ju Y. UT method for allocating ingot of TC4 titanium alloy [J]. Titanium Industry Progress, 2010, (3): 32-34.
- [17] 范艳霞, 何雪康, 吕琴. 大尺寸 TB6 钛合金超声波探伤浅析 [J]. 热处理技术与装备, 2018, 39 (1): 36-41.
- Fan Y X, He X K, Lyu Q. Brief analysis of ultrasonic flaw detection of large diameter titanium alloy TB6 [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2018, 39 (1): 36-41.
- [18] 董长升, 韩泽龙, 赵喜明, 等. 航空叶片用 TC11 合金棒材显微组织对超声波探伤杂波水平的影响 [J]. 金属学报, 2002, 38 (Z1): 667-669.
- Dong C S, Han Z L, Zhao X M, et al. Effect of the microstructure of TC11 alloy bars on ultrasonic clutter level [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38 (Z1): 667-669.
- [19] 焦鑫, 冯辉, 文宁, 等. 浅析钛合金板材中杂波和缺陷反射波的分辨 [A]. 陕西省第十三届无损检测年会论文集 [C]. 安康, 2012.
- Jiao X, Feng H, Wen N, et al. Analysis of the resolution of clutter and defect reflected waves in titanium alloy sheet [A]. Proceedings of the 13th Shaanxi Provincial Annual Conference on Nondestructive Testing [C]. Ankang, 2012.
- [20] 范兴义, 罗顺明. 钛合金环坯超声检测单显信号的实例分析 [A]. 西南地区第十一次无损检测学术年会暨 2011 年 (昆明) 国际无损检测仪器展览会论文集 [C]. 昆明, 2011.
- Fan X Y, Luo S M. Case analysis of titanium alloy ring blank ultrasonic detection of single explicit signal [A]. Proceedings of the 11th Annual Conference on Nondestructive Testing in Southwest China and 2011 (Kunming) International Nondestructive Testing Instrument Exhibition [C]. Kunming, 2011.