

TC4 板材组织特征与超声检测信号对应关系研究

王 铮^{1,2} 黄利军¹ 林立志^{1,3}

(1 北京航空材料研究院, 北京 100095)

(2 航空材料检测与评价北京市重点实验室, 北京 100095)

(3 中国航空发动机集团材料检测与评价重点实验室, 北京 100095)

文 摘 在大厚度板材在轧制过程中, 由于工艺控制不当易引起材料组织分布不均匀、粗大晶粒等问题, 本文针对 TC4 轧制板材研究超声检测信号对材料内部组织分布的表征情况。结果表明, 声波垂直于板材流线方向入射时, 声衰减分布均匀; 而平行入射时, 声衰减分布极不均匀, 呈条带状分布。为此, 对引起不同声波衰减的截面进行组织分析, 金相观察发现超声波衰减与材料内部 α 相的分布及形态有关: 声衰减小的区域, 材料内部等轴 α 相较多, 晶粒细小, 分布均匀; 声衰减大的区域, α 相被明显拉长。

关键词 钛合金, 微观组织, 超声检测, 声衰减

中图分类号: TG115. 28

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2022.06.013

Relationship Between Ultrasonic Signal and Microstructure of TC4 Titanium Alloy Plate

WANG Zheng^{1,2} HANG Lijun¹ LIN Lizhi^{1,3}

(1 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

(2 Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095)

(3 Key Laboratory of Science and Technology on Aeronautical Materials Testing and Evaluation
Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095)

Abstract In the rolling process of thick plates, it is easy to have problems of uneven distribution of material structure and coarse grains due to improper process control. In this paper, ultrasonic testing signal on the internal structure of TC4 rolled plate is studied. The results show that the sound attenuation distribution is uniform when the sound wave is incident perpendicular to the plate streamline direction. However, the distribution of sound attenuation is very uneven and stripped in stripe shapes when the incident wave is parallel. For this reason, the section structure with different acoustic attenuation is analyze. It is found that the ultrasonic attenuation is related to the distribution and morphology of α phase in the material: in the area where the sound attenuation is reduced, there are more equiaxed α phases in the material, and the grains are fine and evenly distributed; in the area with large acoustic attenuation, α phase is obviously elongated, the tissue distribution is not uniform, and there is stripe structure.

Key words Titanium alloy, Microstructure, Ultrasonic testing, Sound attenuation

0 引言

TC4 钛合金密度低, 在保持较高强度水平下具有韧性好、疲劳强度高和耐腐蚀等优异的综合性能, 适用于设计制造大型飞机主承力结构件^[1-4]。TC4 板材可用于制造大型飞机的框、舱、梁等结构, 大厚度板材在轧制过程中, 容易由于工艺控制不当引起材料组织分布不均匀、出现粗大晶粒等问题^[5-8]。

超声检测方法是金属材料内部质量的有效检测

手段, 对夹杂、空洞等体积型缺陷具有较好的检测效果。然而, 材料研制者希望超声检测方法能在检测体积型缺陷的同时进一步对材料整体组织特征进行评判, 从而降低由于材料晶粒粗大、组织不均匀等现象带来的使用风险。一直以来, 钛合金材料组织特征与超声检测信号的对应关系也是无损检测业内讨论的热门话题^[9-12]。材料内部组织分布不均匀及晶粒粗大现象, 会对入射声波产生散射和衍射作

收稿日期: 2021-06-22

第一作者简介: 王铮, 1978 年出生, 高工, 主要从事航空材料及制件的无损检测技术研究工作。E-mail: wangzhengln@sina.com

用^[13-15],由于产生的散射波和衍射波能量较弱,且传播方向随机,无规律可循,导致较难捕捉到可反映材料组织特征的散射波和衍射波信号。

本文以TC4轧制板材为研究对象,从声波衰减的角度研究超声底波衰减幅度对材料内部组织分布的表征情况。通过两个分别垂直、平行于板材轧制流线方向入射声波的底波衰减检测实验,同时结合不同底波衰减幅值对应截面的材料内部组织高低倍金相观察,得到材料内部 α 相的形态分布对材料衰减的影响规律。材料中 α 相形态分布会对材料后续热变形行为产生影响^[16],采用超声方法对材料中 α 相形态分布进行预判,对材料后续制造及使用具有积极意义。

1 实验

1.1 材料及设备参数

实验对象为在厚度70 mm的TC4轧制板材上切取的尺寸为88 mm×69 mm×69 mm的长方体试样,试样尺寸及其与板材的位置关系如图1所示。

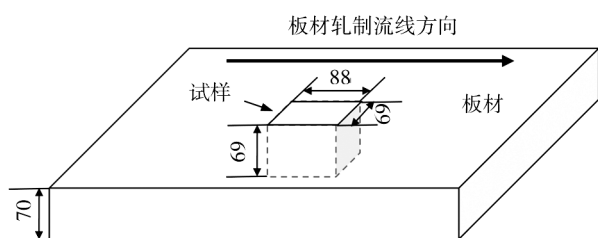


图1 实验用试样尺寸及其与板材的位置关系示意图

Fig. 1 Size of test sample and its position relationship with plate

检测系统采用SM-J6B-100水浸检测系统,配备USIP40超声检测仪,检测探头采用5 MHz水浸探头。

1.2 实验方法

实验方法为水浸式超声底波衰减检测方法,如图2所示,入射声束垂直于被检件表面,将组织良好部位的底波幅度调至检测仪显示屏满刻度的80%,保持仪器增益不变,采集与声波入射面平行的底面反射信号的幅度,借助机械系统对试样进行自动扫描检测,底面反射信号幅度以C扫描成像的方式显示。

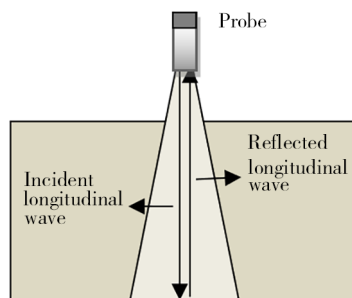


图2 检测方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test method

声波由两个相互垂直的表面入射,如图3所示,入射声束1垂直于板材的轧制流线方向,入射声束2平行于板材的轧制流线方向。入射声束1与入射声束2产生的底面反射回波声程相同。

实验得到声波沿试样两个相互垂直方向传播的底波幅度后,选取典型声波衰减部位进行解剖,在电子显微镜下观察其高低倍组织特征,分析超声检测底波信号衰减幅度与材料组织的对应关系。

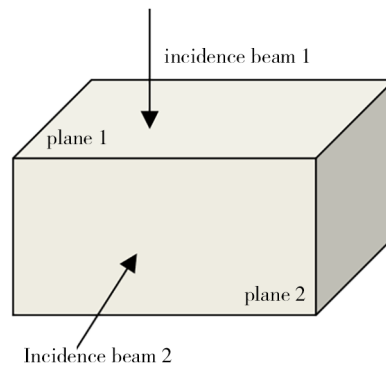


图3 底波衰减检测声束入射方向示意图

Fig. 3 Schematic diagram of beam incidence direction

2 实验结果与分析

2.1 超声底波检测结果与分析

在同一检测增益值下,声波沿图3中不同方向入射的底波衰减检测C扫描图见图4。C扫描图中不同颜色部位对应的A扫描信号波幅如图5所示。

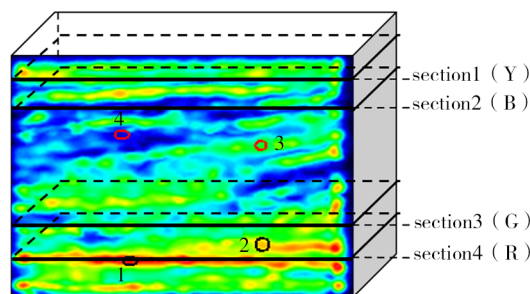


图4 试样内部截面截取方式

Fig. 4 Schematic diagram of internal section for metallographic

检测结果表明,垂直于板材轧制流线方向传播的入射声束1,底波衰减幅度变化小,主要在80%~60%之间波动,变化范围不超过2 dB,表示该方向材料内部组织分布一致性较好;沿板材轧制流线方向传播的入射声束2,底波衰减幅度波动较大,波幅在80%~10%之间波动,变化范围达到18 dB,底波幅度变化呈条带状分布,表示该方向材料内部组织分布一致性较差。

2.2 材料高低倍组织观察及分析

进一步分析沿板材轧制流线上引起底波衰减幅度差异的原因。垂直于试样入射面2截取具有不同底波衰减幅度的截面观察其高低倍组织,各截

面对应的底波衰减幅度如图6所示,截面1(Y)底波幅度在60%~40%之间,截面2(B)底波幅度在20%以下,截面3(G)底波幅度在40%~20%之间,截面4(R)底波幅度在80%~60%之间。

4个截面的低倍组织见图7,底波幅度衰减较小的截面1(Y)和截面4(R)的低倍组织为模糊晶,底波幅度衰减较大的截面2(B)和截面3(G)为清晰晶显示,且局部晶粒粗大,边缘晶粒细小。

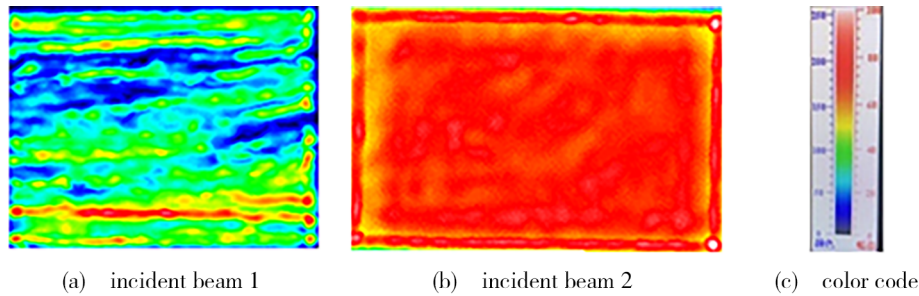


图5 声波沿不同方向入射的底波衰减检测C扫描图

Fig. 5 C-scan diagram of bottom wave attenuation detection of sound wave incident from different directions

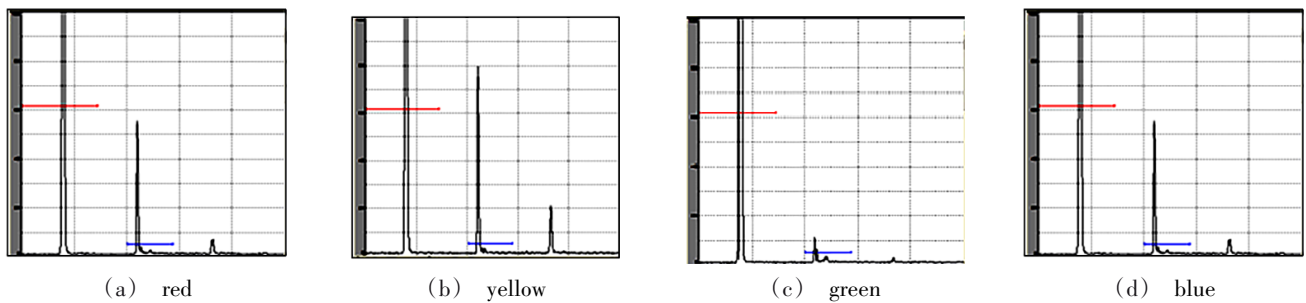


图6 C扫描图中不同颜色部位对应的A扫描信号

Fig. 6 A-scan waveform corresponding to different color parts in C-scan diagram

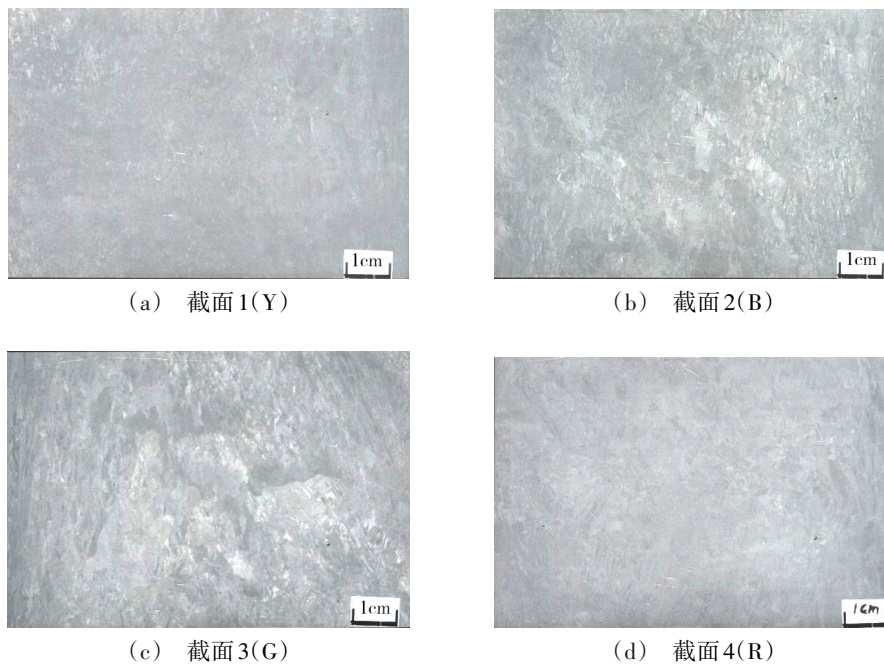


图7 4个截面的低倍金相照片

Fig. 7 Macro metallographic photographs of four sections

模糊晶晶界不清晰,对声波的散射作用小,引起的材料衰减小,对应的超声检测底波幅度高;清晰晶晶界清晰,再加上晶粒不均匀的影响,对声波散射作用大,引起的材料衰减大,对应的超声检测底波幅度低。

在上述4个截面上分别取多个15 mm×15 mm的小试样,观察其高倍组织,由各截面典型高倍组织图8可见,该板材试样内部基本为等轴组织,但 α 相存在被拉长的现象,且不同截面 α 相被拉长的程度不

同。其中,超声检测底波幅度衰减较小的截面1和截面4等轴 α 相较多、晶粒细小、分布均匀;超声检测底波幅度衰减较大的截面2和截面3部分区域 α 相被明显拉长、组织分布不均匀、存在长条组织,底波幅度衰减最大的截面2中 α 相被拉长的现象最为明显,长条组织与等轴组织交替分布,清晰可见。

当材料内部晶粒均匀分布时,不存在明显的阻碍声波传播的异质界面,声波传播产生的材料散射

衰减较小,表现为底波幅度高,检测杂波幅度低[图9(a)];当材料内部晶粒非均匀分布时,在不同尺寸、不同取向的晶粒间会产生阻碍声波传播的界面,从而增加材料散射衰减,表现为底波幅度降低,检测杂波幅度升高[图9(b)]。图8截面2和截面3中材料内部长条组织与等轴组织交替分布,产生多个晶间界面,导致超声检测时产生较大的材料散射衰减,从而引起底波幅度较大程度的降低。

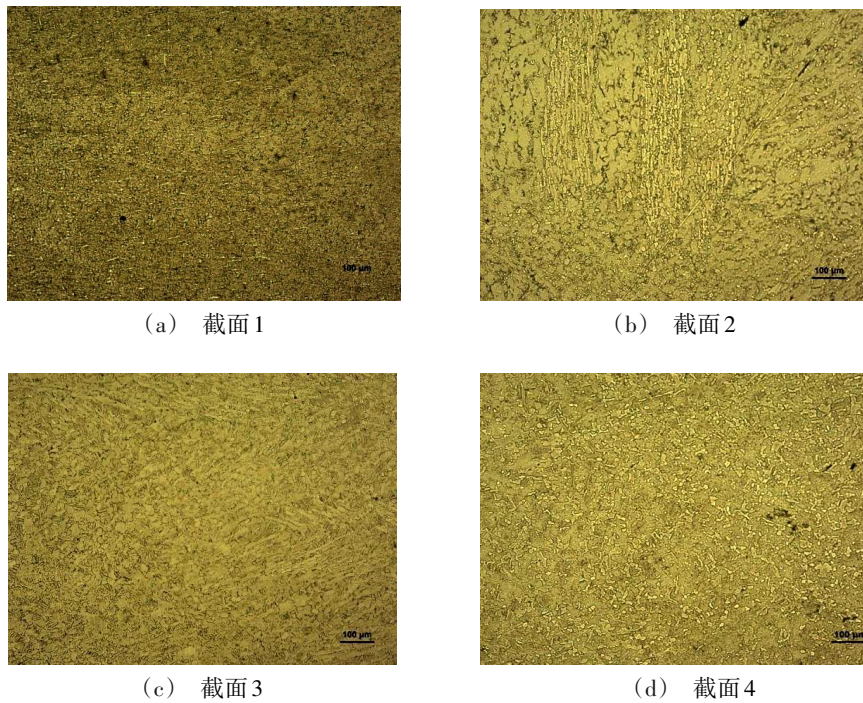


图8 试样高倍金相照片

Fig. 8 High power metallographic photos of samples

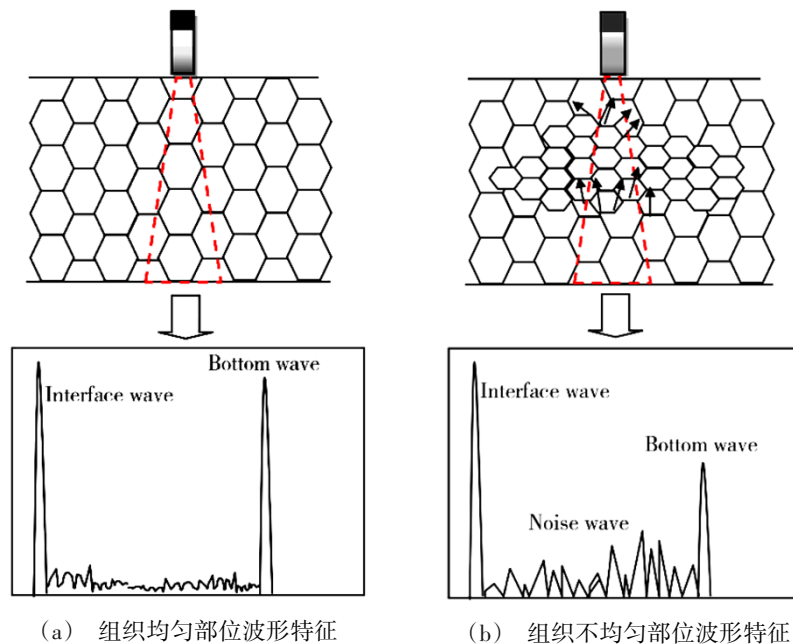


图9 材料组织与超声信号特征对应关系

Fig. 9 relationships between the material microstructures and their ultrasonic signals

3 结论

(1) 声波垂直于板材轧制流线方向入射时, 声衰减分布较均匀, 声波沿板材轧制流线方向入射时, 声衰减分布不均匀;

(2) 通过对平行于板材轧制流线方向的不同底波衰减幅度的截面高低倍组织观察, 发现该板材内部组织中的 α 相存在被拉长的现象, 且不同截面 α 相被拉长的程度不同, 超声底波衰减程度与材料内部 α 相的分布及形态有关; 声衰减小的区域, 材料内部等轴 α 相较多, 晶粒细小, 分布均匀; 声衰减大的区域, α 相被明显拉长, 存在长条组织。

参考文献

[1] 骆蕾, 沈以赴, 李博, 等. 搅拌摩擦焊搭接法制备 TC4 钛合金表面 Al 涂层及其高温氧化行为[J]. 金属学报, 2013, 49:996-1002.

LUO lei, SHEN Yifu, LI Bo, et al. Preparation and oxidation behavior of aluminized coating on TC4 titanium alloy via friction stir lap welding method[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49:996-1002.

[2] 姬书得, 温泉, 马琳, 等. TC4 钛合金搅拌摩擦焊厚度方向的显微组织[J]. 金属学报, 2015, 51:1391-1399.

JI Shude, WEN Quan, MA Lin, et al. Microstructure along thickness direction of friction stir welded TC4 titanium alloy joint [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51:1391-1399.

[3] LI J, JIA Y K, SHEN N Y, et al. Effect of grinding conditions of a TC4 titanium alloy on its residual surface stresses [J]. Strength of Materials, 2015, 47(1):2-11.

[4] WU Zhirong, HUA Xuten, SONG Yingdong. Multiaxial fatigue life prediction for titanium alloy TC4 under proportional and nonproportional loading[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 59:170-175.

[5] 齐立春, 黄利军, 赵新青, 等. 热处理对 TC4 钛合金厚板组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36:78-83.

QI Lichun, HUANG Lijun, ZHAO Xinqing, et al. Effects of heat treatments on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy thick plate[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36:78-83.

[6] 黄利军, 王庆如, 马济民, 等. TC4 钛合金厚板的组织与性能[J]. 金属学报, 2002, 38(S):188-190.

HUANG Lijun, WANG Qingru, MA Jimin, et al. Structure and mechanical properties of TC4 plate [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(S):188-190.

[7] LIU Jun, LU Jing, WANG Xing, et al. Corrosion fatigue performance of TC4 plates with holes in aviation kerosene

[J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 47:420-424.

[8] LIU Jun, WU Henggui, YANG Jinjie, et al. Effect of edge distance ratio on residual stresses induced by cold expansion and fatigue life of TC4 plates [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 109:130-137.

[9] 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, 42:1859-1863.

LI Hua, MA Yingjie, QIU Jianke, et al. Effect of microstructures on noise level in ultrasonic testing of TC4 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42:1859-1863.

[10] 马小怀. 钛合金超声波检测中杂波产生原因分析 [J]. 无损检测, 2008, 28:649-651.

MA Xiaohuai. Noise analysis during ultrasonic testing of titanium alloys [J]. Nondestructive Testing, 2008, 28:649-651.

[11] I Yang, J L, O L Lobkis, et al. Ultrasonic propagation and scattering in duplex microstructures with application to titanium alloys [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2012 31(3):270-283.

[12] HAN Y K, THOMPSON R B. Ultrasonic backscattering in duplex microstructures: Theory and application to titanium alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1997, 28 (1):91-104.

[13] LI Xiongbing, SONG Yongfeng, LIU Feng et al. Evaluation of mean grain size using the multi-scale ultrasonic attenuation coefficient [J]. NDT & E International. the Independent Journal of Non-Destructive Testing, 2015, 72:25-32.

[14] EMERY P, DEVOS A. Acoustic attenuation measurements in transparent materials in the hypersonic range by picosecond ultrasonics [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89 (19):191904-191904-3.

[15] BHATTACHARJEE A, PILCHAK A L, LOBKIS O L, et al. Correlating ultrasonic attenuation and microtexture in a near-alpha titanium alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42(8):2358-2372.

[16] 程明, 赵建国, 宋鸿武, 等. α 相尺寸对等轴 TC4 合金两相区热变形行为的影响 [J]. 航空材料学报, 2009, 29:22-26.

CHENG Ming, ZHAO Jianguo, SONG Hongwu, et al. Effect of α grain size on deformation behaviors of TC4 titanium alloy with equiaxed microstructure [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29:22-26.