

TC4 钛合金板材双晶探头超声波检测

张永红 李永春 曹凯

(兰州空间技术物理研究所,空间环境材料行为与评价技术重点实验室,兰州 730000)

文 摘 研究了 TC4 钛合金板材高灵敏度双晶探头超声波检测中变型波、组织噪声的产生原因及影响。结果表明:变型波会给缺陷波定量评定带来影响,以缺陷波始脉冲波幅定量评定最为准确,对于缺陷波始脉冲之后的波幅超标应选用不同焦距的双晶探头进行对比检测。组织噪声的产生与板材中同取向粗大 α 相晶粒增多密切相关,通过减小脉冲宽度可有效降低组织噪声。

关键词 钛合金板材,双晶探头,变型波,组织噪声

Ultrasonic Testing of TC4 Titanium Alloy Plates With Double Crystal Probe

Zhang Yonghong Li Yongchun Cao Kai

(Lanzhou Institute of Space Physics, Science and Technology on Performance
Evaluating in Space Environment Laboratory, Lanzhou 730000)

Abstract The paper discusses the reasons and impact of variant wave and grain noise in ultrasonic testing of TC4 titanium alloy plates with double crystal probe. The results show that quantitative evaluation of the defect pulse wave amplitude is the most accurate by its beginning. The excessive pulse wave after the beginning of defects pulse wave should be used to test with different focal lengths double crystal probe, and that the same orientation coarse alpha grains is the main reason for clutter signal generated. It is possible to decrease grain noise level by decreasing the width of the pulse.

Key words Titanium alloy plates, Double crystal probe, Variant wave, Grain noise

0 引言

航天压力容器壳体制造用 TC4 中厚(6~20 mm)钛合金板材必须经过超声波检测合格才能够使用,依据 GB/T 5193—2007《钛合金加工产品超声波探伤方法》及中厚板超声波检测特点,应采用双晶探头进行检测^[1-3],尤其是在 AA 级钛合金板材或公称厚度 T 较小时,这是由于双晶探头具有灵敏度高、杂波少盲区小、板材中近场区长度小等优点^[4]。但是在实际检测中,由于变型波及组织噪声信号的出现,给缺陷波的评判和定量带来影响,因此非常有必要对变型波及噪声信号进行深入的研究,并且在实际检测中尽量

消除它们的影响,实现对航天压力容器制造用中厚钛合金板材的准确超声波检测。

本文主要根据对比试块检测试验结果,研究变型波的产生原因及其对缺陷波评定的影响。另外,分析了金相组织与噪声的关系,并提出降低组织噪声的有效措施。

1 变型波

1.1 试验

采用 Masterscan 335 型超声探伤仪、5P14FGF10 型双晶探头,在一定的检测灵敏度下,对 2 块 AA 级平底孔对比试块进行检测试验(表 1),使不同平底孔

反射回波达到最高且显示深度。

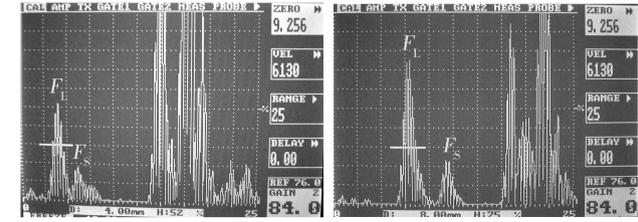
表 1 平底孔对比试块

Tab. 1 Reference bloke with flat-bottomed hole

试样	材质	孔径/mm	埋深/mm
1	TC4	0.8	4
2	TC4	0.8	8

1.2 结果与分析

对比试块反射回波如图 1 所示, F_L 为不同埋深平底孔纵波反射回波, 由图 1 可见, 在 F_L 之后总会出现一回波 F_S , 即为变型波。



(a) 埋深 4 mm (b) 埋深 8 mm

图 1 平底孔反射回波

Fig. 1 Wave echo of flat-bottomed hole

如图 2 所示, 双晶探头采用一发一收的形式, 为使声束在被检件中形成菱形汇聚区, 两个晶片都倾斜一定角度 θ , 以保证声束向探头中心线方向偏斜, 倾斜角 θ 一般在 $4^\circ \sim 10^\circ$ 之间, 倾斜角 θ 值愈大, 声束汇聚焦点愈小, 愈有利于薄件的检测。尽管倾斜角 θ 相对很小, 但纵波声束仍然是倾斜入射至板材内部, 接收晶片也是以同样倾斜角接收反射回来的声束。当纵波 L_1 倾斜入射到界面时, 必然会发生反射和折射, 由于反射波绝大多被隔声层所吸收, 不能被接收晶片接收, 对检测不产生影响, 这里主要讨论折射波及其变型波。

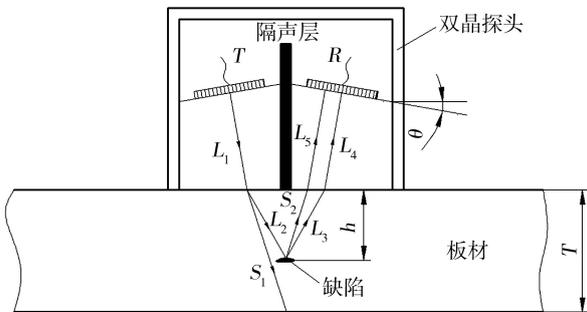


图 2 双晶探头

Fig. 2 Double crystal probe

由于 θ 较小, 折射纵波 L_2 是主声束, 双晶探头正宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第 5 期

是通过接收 L_2 在被检件内部的反射波来进行检测的。当 L_2 遇到缺陷时, 整个回波的路径为: $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow L_3 \rightarrow L_4$ (图 2), 全部为纵波。通常情况下, 双晶探头检测只考虑这条路径。

折射横波 S_1 的声压远小于 L_2 , 因此折射横波对缺陷的检出率远远低于折射纵波。另外, 在钛材中纵波声速约为横波声速的 1.9 倍, 在 θ 较小的情况下, 折射横波向探头中心线方向偏斜更小, 所产生的反射波不易被接收探头接收。因此 S_1 对检测的影响一般不考虑。

当主声束 L_2 在某深度遇到缺陷时, 在产生主反射纵波 L_3 的同时, 会产生变型反射横波 S_2 , S_2 经接收楔块折射又变型为纵波 L_5 , 同样被接收晶片接收, 其反射回波的路径为: $L_1 \rightarrow L_2 \rightarrow S_2 \rightarrow L_5$ (图 2), 这样反射回波会呈现双峰回波。由于 S_2 声压总小于反射纵波 L_3 的声压, 这样在灵敏度要求不高的检测中, S_2 所产生的回波不明显, 但在最高灵敏度的 AA 级钛合金板材或板厚较小检测中, 反射横波表现明显^[5]。

根据 S_2 所经过的路径, 其反射回波 F_S 在荧屏上出现的位置为:

$$d_s = \frac{1}{2}h \left(1 + \frac{C_L}{C_s} \right) \quad (1)$$

式中 d_s 为横波反射回波深度, h 为缺陷埋藏深度, C_L 为钛材中纵波声速, C_s 为钛材中横波声速。钛材中纵波声速大于横波声速, 这样 F_S 显示的深度 d_s 总是大于缺陷实际埋深 h 。由于钛材中纵波与横波声速之比固定, d_s 正比于 h 。由图 1 可见, 随着平底孔埋深的增加, F_S 与 F_L 间距随之增大, 测量 F_S 的深度表明, d_s 完全符合公式(1)。另外, F_S 波幅随着 F_L 的增加而增加, 这是由于主声束声压增强, 其变型波也随之增强。

1.3 变型波对缺陷波评定的影响

在高灵敏度 TC4 钛合金板材双晶探头检测中, F_S 的出现不仅会产生噪声降低检测信噪比, 而且对缺陷波的评定造成影响。由于 F_S 出现在 F_L 之后、一次底波 B_1 之前, 而且具有一定的幅值, 从而给 F_L 和 B_1 之间某个部位的反射波进行加强, 这样 F_L 之后的缺陷反射波极有可能失真, 因此对 F_L 和 B_1 之间的反射波定量可能不准确。

由公式(1), 当横波反射回波 F_L 深度 d_s 为被检板材公称厚度 T 时,

$$h = \frac{2TC_s}{C_s + C_L} \quad (2)$$

这意味着当 $F_L \geq 2TC_s / (C_s + C_L)$ 时, 可以不考虑

横波反射回波的影响,因为此时横波反射回波只会出现在 B_1 之后。而当 $F_L < 2TC_S / (C_S + C_L)$ 时,只能用缺陷波始脉冲波幅进行定量。

1.4 消除变型波的影响

在实际检测中,当缺陷波始脉冲的波幅最高时,即可按其波幅定量、按其波峰定位;当出现如图 3 所示的情况时,尽管缺陷波始脉冲 F 之后的脉冲波 F_{max} 波幅最高,但仍应当以缺陷波始脉冲 F 进行缺陷定量和定位,对于 F 之后的脉冲波 F_{max} 应按公式(1)计算,判断是否由横波反射回波与缺陷波叠加引起。

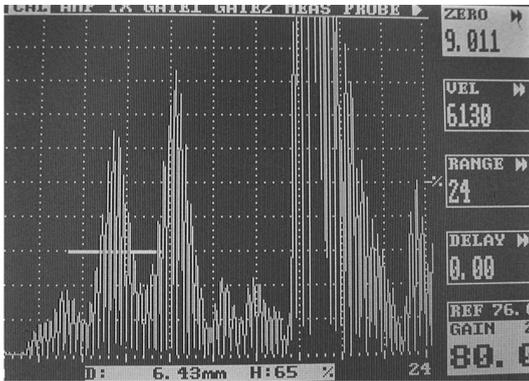
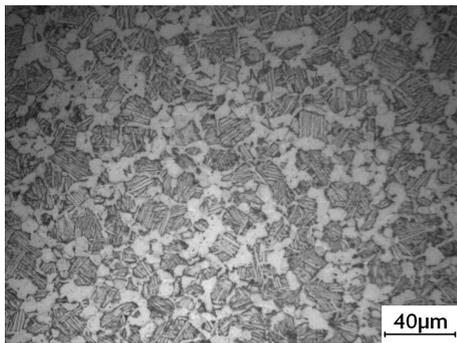


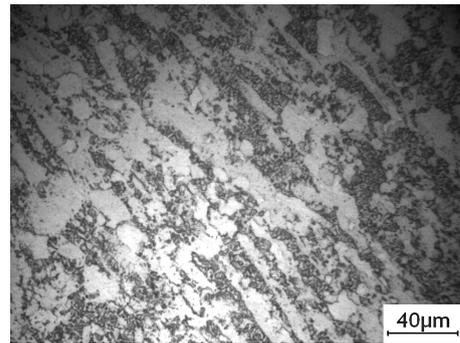
图 3 缺陷波信号

Fig. 3 Defect wave signal

另外,还应选用不同倾斜角(焦距不同)的双晶探头进行对比检测,只有缺陷波始脉冲之后的最高超标波幅位置不发生变化,才可判断不是由横波反射回



(a) 无噪声信号部位



(b) 噪声信号强烈部位

图 4 TC4 钛合金板材横截面显微组织

Fig. 4 Microstructure of TC4 titanium alloy plate cross-section

组织引起的噪声信号降低了钛合金板材超声波检测的信噪比,噪声信号的存在会掩饰幅度低的小缺陷信号,从而引起漏检或误判,甚至无法进行检测,因此 GB/T5193—2007《钛及钛合金加工产品超声波探伤方法》中规定:不允许有超过对比试块中参考平底孔反射高度 70% 的本底噪声。同时,对于 TC4 钛合金板材,极强的噪声信号极可能表明材料显微组织差,如图 4(b) 中粗大的白色的 α 相本身形成硬脆相,

波与缺陷波叠加所引起,否则极有可能与横波反射回波相关。总之,在任何情况下,对缺陷波的评定都应以其始脉冲最为准确。

2 组织噪声

2.1 金相实验

钛合金是一种组织噪声信号比较强的材料,通常认为粗大晶粒是造成噪声信号增强最主要的原因^[6-8],但文献[9-10]研究表明噪声信号增强并不一定代表晶粒组织差。笔者通过对不同厚度 TC4 钛合金板材进行金相组织分析发现,噪声信号水平与晶粒组织状态确实存在明显对应关系。对同一张公称厚度为 18 mm 的退火态 TC4 板选取不同 2 处进行刨切金相组织分析,其中一处为噪声信号强烈部位与板面平行截面金相,另一处为无噪声信号同埋深部位金相。

2.2 结果与分析

金相组织实验结果见图 4,结果表明:噪声信号不明显部位如图 4(a) 所示,等轴 α 相与 β 相晶粒组织细小、晶界清晰且均匀分布, α 相组织相对较少、无聚集;而噪声信号强烈部位如图 4(b) 所示,晶粒组织粗大且分布极不均匀,晶界模糊,大片白色的 α 相晶粒呈长条状、同取向割裂基体组织。因此可以推断 TC4 板材中组织噪声信号增强与相同取向 α 相粗大晶粒的增多密切相关。

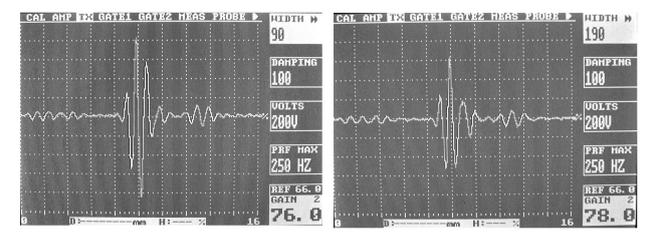
严重地影响材料的整体性能,使材料脆性急剧增加,韧性下降,强度也受到影响,在工作环境要求苛刻时,往往会因此发生突然断裂或因为韧性不足而不能保证其性能要求。

2.3 减小组织噪声

由于组织噪声主要由粗大晶粒对超声束的散射及晶界间反射回波叠加产生,减小作用于晶粒的脉冲量可以有效降低组织噪声,从而提高检测信噪比。运

用超声束的几何特性和频谱知识,可以实现减小脉冲宽量的控制^[11-13]。在水浸超声 C 扫描检测中,可以通过减小点聚焦声束焦柱直径、提高检测脉冲频率来减小瞬态作用于晶粒组织的脉冲量,使组织噪声明显降低。而在双晶探头超声检测中,由于主声束仅仅是在棱形区域中心交汇,并未产生真正聚焦,因此无法通过调节减小声束直径的方法来减小脉冲量,但可以通过减小脉冲窄度的频谱方法来适当降低组织噪声,这是由于脉冲宽度窄可以减小晶界的影响。

对于型号相同但制做厂家或批次不同的双晶探头,脉冲宽度往往存在很大不同,应通过测试对比选用脉冲宽度尽可能窄的双晶探头^[5]。对于同一只双晶探头,当其激励方波宽度不同时,脉冲宽度也不同,当方波宽度为探头频率周期一半时,灵敏度最高但脉冲宽度也最大;当方波宽度为探头频率一个周期时,灵敏度较低但脉冲宽度最窄,此时组织噪声下降明显。图 5 为 5 MHz 双晶探头在不同方波宽度时的射频信号波形,当方波宽度约为探头频率一个周期时[图 5(b)],脉冲宽度明显小于方波宽度为探头频率一个周期时[图 5(a)]。另外,通过提高探头阻尼、降低触发电压也可适当减小脉冲窄度。



(a) 方波宽度 90 ns (b) 方波宽度 190 ns

图 5 不同方波宽度射频信号

Fig. 5 RF signal of different width of square wave pulse

尽管窄脉冲可以减小噪声信号,但灵敏度较低,高灵敏度 AA 级钛合金板材检测更适合宽脉冲。因此在组织噪声信号不影响评判时,应选用宽脉冲进行检测,否则可采用窄脉冲以降低组织噪声信号水平,同时必须满足灵敏度的要求。另外,对于在窄脉冲条件下局部噪声信号仍然超标者,可以认为显微组织过差,为不合格品。

3 结论

- (1) 在高灵敏度 AA 级 TC4 钛合金板材的双晶探头超声波检测中,应充分考虑变型横波对缺陷波评定的影响。
- (2) 在双晶探头检测时,对于缺陷波信号的定

位、定量以其始脉冲最为准确。

(3) 相同取向的 α 相粗晶组织增多、拉长是造成 TC4 钛合金板材组织噪声增强的最主要原因,采用窄脉冲可有适当减小组织噪声信号水平但必须满足检测灵敏度要求。

参考文献

- [1] 王海良. 用双晶探头距离-波幅特性缺陷评定中厚钛板缺陷反射信号[J]. 无损探伤, 2003, 27(3): 41-43
- [2] 郝红卫, 李麦海, 徐惠娟, 等. 8mm 厚钛板的超声波探伤方法研究[J]. 稀有金属快报, 2007, 26(3): 35-38
- [3] 司春杰. 双晶探头在中厚板探伤中应注意的问题[J]. 无损检测, 2011, 33(8): 75-78
- [4] 中国特种设备检验协会组织编写. 超声波检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2007
- [5] 李永春, 张永红. 钛合金板材超声波检测中杂波信号影响因素探讨[J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(增刊 1): 144-148
- [6] Bhattacharjee A, Pilchak A L, Lobkis O I, et al. Correlating ultrasonic attenuation and microtexture in a near-alpha titanium alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42A (8): 2358-2372
- [7] Zhu Y, Weight J P. Ultrasonic nondestructive evaluation of highly scattering materials using adaptive filtering and detection [J]. IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1994, 41(1): 26-33
- [8] 马小怀, 刘金州. 钛合金超声波检测中杂波产生原因分析[J]. 无损检测, 2007, 27(10): 1-5
- [9] 胡宗式. 钛合金超声波检测中噪声与组织关系[J]. 钛工业进展, 2002(6): 31-34
- [10] 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噪声水平的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(9): 667-669
- [11] Howard P J, Gilmore R S. Ultrasonic noise and the volume of the ultrasonic pulse[M]. Review of Progress in QNDE, vol. 15, Thompson D O, Chimenti D E, eds. New York: Plenum, 1996: 1495-1502
- [12] kim J, Udpa L, Udpa S. Multi adaptive noise cancellation for ultrasonic NDE [J]. NDT & E International, 2011, 34: 319-328
- [13] Bae S, Kim J, Udpa S S. A new adaptive grain noise cancellation filtering technique [J]. Review of Quantitative Non-destructive Evaluation of Materials, 1997, 17: 759-766

(编辑 李洪泉)