

锻造TC4组织超声波调制特性研究

邵文彬, 吴伟, 张全红, 邬冠华

引用本文:

邵文彬, 吴伟, 张全红, 等. 锻造TC4组织超声波调制特性研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(2): 170-177.

您可能感兴趣的其他文章

1. 冷精锻工艺设计

引用本文: 张清林. 冷精锻工艺设计[J]. [兵器装备工程学报](#), 2017, 38(8): 188.

2. GH141镍基高温合金环形件生产工艺优化

引用本文: 谢永富, 李玉凤, 苏春民. GH141镍基高温合金环形件生产工艺优化[J]. [兵器装备工程学报](#), 2017, 38(7): 168-170.

3. 陶瓷/金属复合装甲的基体性能对超声检测的影响

引用本文: 陈正林, 张雪飞, 王高潮, 等. 陶瓷/金属复合装甲的基体性能对超声检测的影响[J]. [兵器装备工程学报](#), 2017, 38(11): 155-158,196.

4. 中国高速铁路几个重要零件的精锻成形

引用本文: 陶宇, 付传锋. 中国高速铁路几个重要零件的精锻成形[J]. [兵器装备工程学报](#), 2016, 37(6): 119-123.

5. 钛-不锈钢爆炸复合接头棒品质特性的相互关系

引用本文: 李莹, 王礼营, 庞国庆, 等. 钛-不锈钢爆炸复合接头棒品质特性的相互关系[J]. [兵器装备工程学报](#), 2015, 36(8): 26-28.

锻造 TC4 组织超声波调制特性研究

邵文彬, 吴伟, 张全红, 邬冠华

(南昌航空大学, 南昌 330063)

摘要:采用奥林巴斯 A112S10/0.25 单晶 10 MHz 直探头获取 TC4 合金锻件(锻造温度为 920 ~ 990 °C、锻造变形量 22% ~ 48%)组织超声信号,在金相组织分析基础上,用统计学相关性分析金相组织和超声信号特征关系。研究表明在 920 ~ 970 °C 温度锻造 TC4 合金时:超声纵波声速决定于初生 α 相面积百分比,随面积比提高而提高;超声波纵波衰减决定于初生 α 相晶粒平均直径,随平均直径增加而增加;超声纵波二次底波频偏决定于初生 α 相面积百分比,随面积比提高而降低。超声参数决定于($\alpha + \beta$)片层发育程度。

关键词:锻造温度;锻造变形量;纵波衰减;纵波底波频偏

本文引用格式:邵文彬,吴伟,张全红,等.锻造 TC4 组织超声波调制特性研究[J].兵器装备工程学报,2020,41(2):170-177.

Citation format:TAI Wenbin, WU Wei, ZHANG Quanhong, et al. Study on Ultrasonic Modulation Characteristics of Forged TC4 Tissue[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(2): 170-177.

中图分类号: TG115.285; TG115.21

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2020)02-0170-08

Study on Ultrasonic Modulation Characteristics of Forged TC4 Tissue

TAI Wenbin, WU Wei, ZHANG Quanhong, WU Guanhua

(Nanchang HangKong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: This program mainly focused on the ultrasonic signal analysis of the TC4 alloy forging, using A112S normal probe of single crystal(10/0.25, 10 MHz) that produced by Olympus. Forging temperature of TC4 is between 920 ~ 990 °C, and forging deformation is in the range of 22% ~ 48%. Based on the analysis of metallographic organization, using the statistical correlation analysis to analyze the relationship between metallographic structure and ultrasonic signal. Research shows that the velocity of ultrasonic longitudinal wave was determined by the percentage of primary α phase in TC4 when the forging temperature in the range of 920 ~ 970 °C. And with the area ratio of α phase increased, the velocity increased. The attenuation of ultrasonic longitudinal wave was determined by the grain average diameter of primary α phase in TC4 when the forging temperature in the range of 920 ~ 970 °C. And with the average diameter increased, attenuation increased. The frequency offset of secondary bottom wave was determined by the percentage of primary α phase in TC4 when the forging temperature in the range of 920 ~ 970 °C. And with the area ratio of α phase increased, the frequency offset decreased. When forging in 980 °C, the ultrasonic parameters were determined by the degree of development of ($\alpha + \beta$) lamellae.

Key words: TC4; forging temperature; forging deformation; longitudinal wave attenuation; longitudinal wave frequency offset

收稿日期:2019-05-20;修回日期:2019-06-25

基金项目:南昌航空大学研究生创新基金项目(YC2017053)

作者简介:邵文彬(1992—),男(蒙古族),硕士研究生,主要从事无损检测研究,E-mail:704905623@qq.com。

通讯作者:吴伟(1970—),男,硕士,教授,主要从事无损检测及仪器智能化研究,E-mail:18418990@qq.com。

为满足提高航空效率和降低成本的要求,减轻航空材料的密度和提高性能变得越来越重要。材料密度的降低可提高飞机的推重比,增加飞行距离和减少燃料费用。飞机结构件的一种主要减重方法是采用比强度高、综合性能好的钛合金替换原材料,可减轻质量 10% 或更多^[1]。其中 TC4 合金的总产量占全部钛合金产品的 50%,占全部钛合金加工件的 95%^[2]。自从该合金出现以后,对它的研究一直持续不断。由于其长时间的深入研究,所以其加工技术现在已经较为成熟。但这些年由于设计概念的变化,由过去单纯的静强度设计思想转变为破损-安全设计概念和损伤容限设计准则^[3],以及对新的应用领域的开发,从而对它的研究又掀起了高潮。目前已对该合金的显微组织、织构、热处理、截面大小、加载方向、应力比、表面状态及腐蚀环境对合金疲劳性能的影响规律及影响机理开展了大量研究工作,使 TC4 再度成为新的应用材料。

钛合金的常规锻造温度是在相变点以下 40~50℃,加热变形得到等轴晶组织,但高温性能、断裂韧性和抗裂纹扩展的能力较差^[4]。在相变点以上锻造得到网篮组织,它的高温性能(蠕变和持久性能)、断裂韧性和抗裂纹扩展的能力较好,但塑性和热稳定性严重下降^[5]。在相变点 45~75℃ 以近 β 锻造,可获得三态组织—等轴 α+条状 α+β+β 转变基体。这种组织在不降低塑性、热稳定性的条件下,提高了材料的屈服强度、高温蠕变性能、低周疲劳寿命、断裂韧性和抗裂纹扩展能力,并能提高使用温度^[6]。因此锻造钛合金组织决定其性能,如果能够通过无损检测方法判断锻造钛合金组织,预测其性能,将更有利于锻造产品的质量控制。

1 超声组织评价原理及研究基础

超声波与材料相互作用,若遇到非均质介质,如声阻抗不同两种介质分界面、缺陷等,超声波的传播方向或特征会发生改变;检测设备接收到改变后的超声波信号,根据波形等特征便可分析工件内部“非均质介质”的特性^[7]。

超声纵波声速:

$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (1)$$

超声横波速度:

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}} \quad (2)$$

式(1)和式(2)为超声波声速物理公式,式中: E 为杨氏弹性模量(N/m²), G 为剪切弹性模量, σ 为泊松比, ρ 为介质密度(kg/m³), λ μ 为介质弹性常数。弹性模量是描述材料在弹性阶段力学性能的参数,它决定了材料的一系列的机械性能。材料的组织结构对弹性模量的影响表现在原子间距和原子间作用力与弹性模量有关,而原子间距与材料的组织结构关系密切,材料的组织结构改变对弹性模量也会造成一定的影响。材料手册中^[8] 钛合金的弹性模量 105~120 GPa,取 TC4 泊松比 $\sigma = 0.32$,密度 $\rho = 4.51 \text{ g/cm}^2$,取 $E =$

120 GPa,声速为 6 170 m/s。

依照非线性声学理论,有应力的超声纵波声速表达式如式(3)所示:

$$C^2 = C_L^2 - \left[(\lambda' + 2\mu') \frac{(4\lambda' + 10\mu' + 4m)}{\mu'} + \lambda' + 2J \right] \cdot \frac{\sigma}{[\rho_0(3\lambda' + 2\mu')]} \quad (3)$$

式中: C 为有应力作用超声波纵波声速; C_L 为无应力作用无限大介质超声波纵波声速; σ 为应力(拉应力为正号,压应力为负号); ρ_0 为介质密度; λ' μ' 为材料的拉曼常数; J 、 m 为材料的三阶弹性常数。

超声检测在材料中的衰减通常是指散射衰减和吸收衰减。超声波的衰减是指超声波在介质中传播时,随着传播距离的增加能量逐渐减小的现象。材料晶粒度对超声检测的影响表现在散射和衰减两个方面^[9-10]。根据多晶体材料的超声散射理论,超声散射可分为 3 种类型,即瑞利散射,随机散射和漫散射。散射类型与晶粒平均直径之间的对应关系如图 1 所示。一般来说,当晶粒平均直径 d 与波长 λ 的比值小于 0.1 时,散射现象微弱,对超声检测不会造成大的影响;而当比值大于 0.1 时,散射现象将显著增强,超声检测的信噪比降低,灵敏度下降。

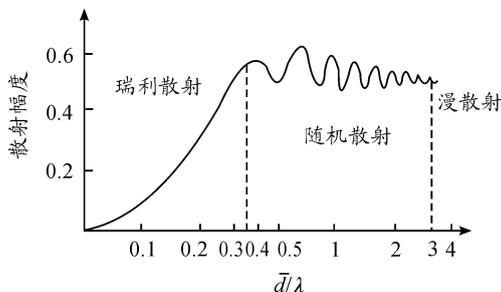


图 1 晶粒平均直径与三种散射类型的对应关系曲线

超声衰减的主要原因:

吸收衰减:介质质点的内摩擦、热传导、材料中的位错运动、磁畴运动等都是导致吸收衰减的原因。吸收衰减与频率的关系为 $\alpha_a = c_1 f$;

散射衰减:材料中的晶粒或其他微小颗粒对声波的散射。对于粗晶材料,超声波的散射尤为严重。超声波的散射与晶粒的尺寸、各向异性的程度和超声波的频率关系存在以下三种情况:

当 $d \ll \lambda$ 时, $\alpha_s = c_2 F d^3 f^4$, 称为晶粒的瑞利散射;

当 $d \approx \lambda$ 时, $\alpha_s = c_3 F d f^2$, 称为随机散射;

当 $d \gg \lambda$ 时, $\alpha_s = c_4 F/d$ 为扩散散射;其中 d 为晶粒平均直径, λ 为波长, α_s 为散射系数, c_2 、 c_3 、 c_4 为常数, F 为各向异性系数, f 为超声波频率。

声速 6 170 m/s,检测频率 10 MHz,波长 0.6 mm,晶粒尺寸 0.01~0.1 mm 之间,超声探伤中常用的频率为 20 MHz 以下,散射情况主要由瑞利散射与随机散射决定。可见散射引起的晶粒噪声具有强烈的频率依赖性,随着超声频率的降

低,散射系数急剧变小。

散射作用定量表达如式(4),对于表面粗糙度为 $2\ \mu\text{m}$ 的情况,每次反射损失约为 $0.5 \pm 0.5\ \text{dB}$ 。

$$\alpha = \frac{20\lg B_1/B_2 - \delta}{2d} \quad (4)$$

式中: α 为衰减系数 (dB/mm); B_1 、 B_2 为第一、二次底波高度; d 为试样厚度 (mm); δ 为底面反射损失。

声速和衰减关系进一步描述:

$$\alpha_{\text{SLT}} = \frac{4\pi^3 q V_f^4}{105\rho_0^2 c_L^2 c_T^6} \left[\left(1 - \frac{k_L^2 + k_T^2}{10} a^2\right) \cdot \left(70c_L^2 c_T^2 \overline{\Delta\rho^2} + 56 \overline{\Delta\mu^2}\right) + 28c_L^2 k_L^2 a^2 \overline{\Delta\rho\Delta\mu} \right] \quad (5)$$

式中: k_L 为纵波波数 ($k = 2\pi/\lambda$); k_T 为横波波数; C_L 为纵波声速; C_T 为横波声速; $\Delta\rho$ 为组织中不同相的密度差; $\Delta\mu$ 为组织中不同相的弹性模量差; ρ_0 为材料密度; a 为平均晶粒半径。

材料组织结构和性能的超声评价在国外早已被重视^[11], Kwun H 等^[12] 采用超声信号的反射衰减来测量粒度, 其研究表明: 在相同奥氏体晶粒尺度下, 超声波在贝氏体中的衰减大于马氏体中的衰减。Shyne^[13] 研究了显微组织对超声波在 4140 钢 (0.4% C) 中的传播速度与衰减的影响, 结果表明: 声速在珠光体/铁素体组织中最高, 贝氏体次之, 马氏体声速最低。Smith^[14] 研究发现超声波的衰减与晶粒度和晶粒尺寸密切相关, 但是从特定的衰减-频率曲线上找不到对应的晶粒尺寸分布规律。Ambardar 等^[15] 发现在铝铜铸造合金中, 纵波声速随着晶粒尺寸的增加而增大。Gronau 等^[16] 研究了 TiAl 粉末挤压成型合金的显微组织不均匀性与超声声速和声波衰减的关系。

国内夏复真等^[17] 通过超声衰减法测量了锻模材料的晶粒度, 并建议采用液浸法测量, 以减少接触法测量带来的误差。Wang 等^[18] 通过研究发现, 影响声速的主要因素是晶粒的取向, 而影响衰减的主要因素是晶粒尺寸。钱鑫源^[19] 经过大量实验研究表明, 钛合金冶金过程中产生的组织不均匀性会产生超声杂波信号。陈建忠^[20] 研究建立了超声纵波声速与低碳钢 Q235 平均晶粒直径的关系, 为超声声速法无损评价低碳钢的晶粒尺寸提供了依据。卢超等^[21] 通过改变热处理工艺, 测量了不同状态下的船用 TA2 合金的超声纵波声速和晶粒尺寸的关系, 结果表明 TA2 合金随着晶粒尺寸的增大, 纵波声速增大。毛江虹^[22] 发现当 TM50 合金中含有较大成分的铌 (Nb), 即富铌偏析时, 由于铌元素的弹性模量和密度很大, 导致材料的声阻抗增大, 超声衰减严重, 会加大超声检测的难度, 采用高频、小晶片探头可降低杂波水平, 提高检测灵敏度。郝静燕^[23] 采用超声声速法研究了超声波参与与材料弹性性能间的关系。毛江虹等^[24] 发现 TC4 钛合金棒材成分偏析类缺陷会影响一次底波与等边三角波之间的波形。

马小怀^[25] 用 V109 探头 (5 MHz) 对 55 mm 厚度板材研究得到: TC11 棒材中片状 α 组织, 杂波 $\varphi_{1.2} - (3 \sim 6)\ \text{dB}$ 网状组织 $\varphi_{1.2} - (5 \sim 8)\ \text{dB}$, 等轴 $\alpha + \beta$ 转 $\varphi_{1.2} - 12\ \text{dB}$, 局部 $\varphi_{1.2} - 9\ \text{dB}$ 。张永红^[26] 研究 $\alpha + \beta$ 型 (如 TC4) 钛合金比 α

型 (如 TA1) 钛合金易产生杂波信号, 杂波低晶粒组织均匀、细小, α 相与 β 相均匀分布 (等轴近圆形 α 和 $\alpha + \beta$ 均匀片层)。杂波高, 晶粒组织粗大, α 相组织长条状割裂了基体组织, 且分布极为不均匀。梁菁、史亦韦^[27], 等指出 TC11 小直径棒材中超声检测杂波水平与金相组织之间存在着一定的关系; 棒材中 α 片层集束尺寸较大、 β 晶粒破碎不足是高杂波水平产生的重要原因。

综上所述, 常规超声检测利用超声波幅度检测已经很好解决工程材料缺陷检测检测问题, 利用超声波噪声检测剔除超标组织 (评价合格和不合格), 随航空发动机性能的提高, 航空锻件的材料组织控制要求进一步提高, 在锻件超声检测中, 如何利用超声参数评价材料细化要求的金相组织的技术, 成了提高航空发动机制造水平的关键技术。

2 材料试样及金相分析

根据 Ti-Al-V 三元合金平衡相图 6% Al 垂直截面 (参见图 2) 可知, TC4 典型组织随锻造温度和锻造变形量增加, 从 $\alpha - \beta$ 组织 (拉长 α 初生相和片层 $\alpha_2 - \beta$ 相), 转变到 β 组织 (α 初生相和片层 $\alpha_2 - \beta$ 相, 片层 α_2 相可能被 β 割断); 双态组织 (初生 α 相 + 片层 α_2 相) 向网篮组织甚至是魏氏体组织变化。TC4 锻造试块如图 3 所示, TC4 合金不同锻造温度和变形量的金相组织如图 4 所示。

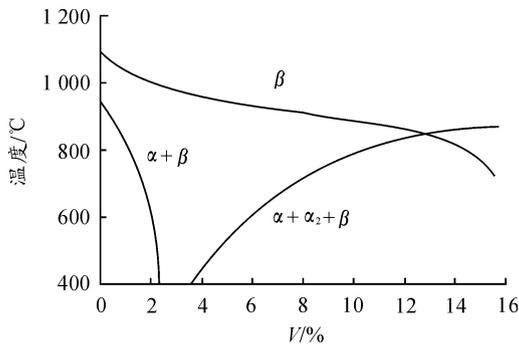


图 2 Ti-Al-V 三元合金相图 6% Al 垂直截面



图 3 锻造 TC4 试块

从金相组织观察中, 初生 α 相的大小和面积百分比随锻造温度的提高和变形量的提高而减小, 次生 α 相由短棒状向片层状演变, 在 TC4 相变点附近形成网篮组织。用自编的金

相分析软件,获得的 TC4 金相组织参数(初生 α 相面积百分比,初生 α 相平均直径、长短轴比)与锻造温度和变形量的关系曲线,如图 5,其中“■”为变形量在 23%~26%,”□”为变

形量 38%~42%。采用 SPSS 统计分析软件作相关性分析的结果见表 1~表 3。

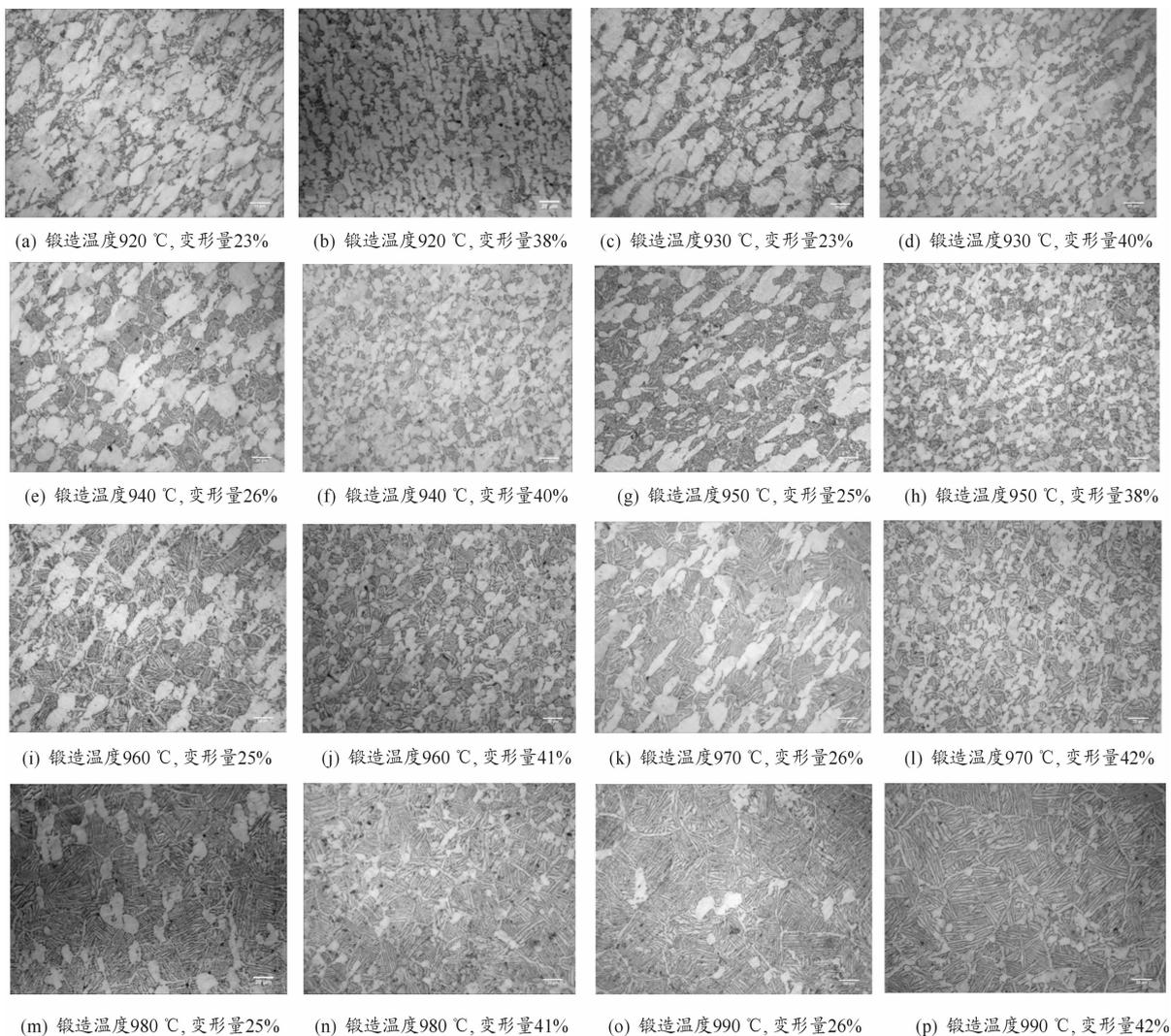


图 4 TC4 合金不同锻造温度和变形量的金相组织

图 5 初生 α 相组织分布与锻造温度和变形量的关系曲线

表1 锻造温度与初生 α 相面积比相关性分析

锻造温度与初生 α 相面积比	变形量 22%~26%	变形量 36%~42%
Pearson 相关性	-0.979**	-0.896**
锻造温度 显著性(双侧)	0.000	0.003
样组数	8	8

** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表2 锻造温度与初生 α 相平均直径相关性分析

锻造温度与初生 α 相平均直径	变形量 22%~26%	变形量 36%~42%
Pearson 相关性	0.116	-0.821*
锻造温度 显著性(双侧)	0.785	0.012
样组数	8	8

* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

表3 初生 α 相面积比与初生 α 相长短轴比相关性分析

初生 α 相面积比与初生 α 相长短轴比	初生 α 相长短轴比	初生 α 相面积比
Pearson 相关性	1	-0.738**
初生 α 相长短轴比 显著性(双侧)	/	0.006
样组数	12	12

** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

结果表明,TC4 合金在 920~990 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内锻造时,初生 α 相的面积百分比随锻造温度和锻造变形量提高而降低,变形量在 23%~26% 规律性好于变形量 38%~42% 变形量。38%~42% 变形量锻造中,初生 α 相平均晶粒直径、初生 α 相长短轴比随锻造温度提高而降低,晶粒更圆,排除相变点附近及相变点以上数据,初生 α 相的面积百分比和初生 α 相长短轴比密切相关,面积比增减,长短轴比减小。

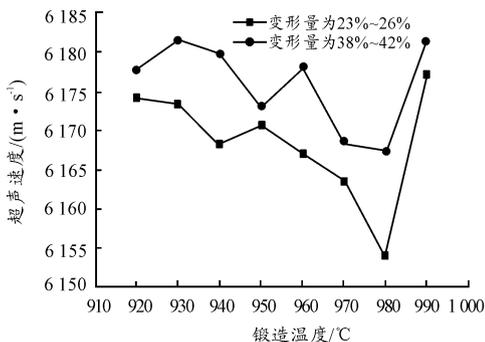
3 TC4 锻造组织的超声特征参数测量及分析

利用 Olympus 生产的信号发生/接收器 5077 来控制发出和接收信号,超声探头采用的是奥林巴斯生产的型号为 A112S 10/0.25 单晶 10 MHz 直探头信号的采集用 Pico-scope3027 采集卡,并使用采集卡自带的信号采集软件 Pico-scope6.0 显示和保存波形数据,自编软件作参数分析。

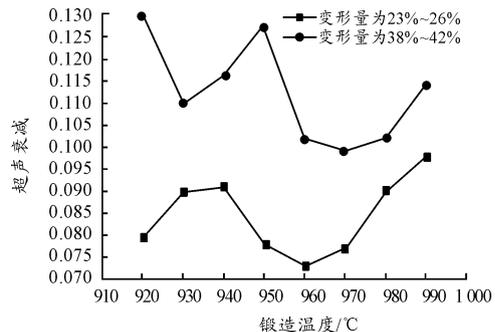
3.1 锻造参数与超声参数的关系

TC4 合金 β 转变点温度在 980~1100 $^{\circ}\text{C}$ 左右,不同锻造参数条件下获得的超声参数测量结果如图 6 所示。

TC4 超声声速和锻造温度及锻造变形量 SPSS 统计软件相关性分析结果见表 4,说明锻造参数和超声声速密切相关。



(a) TC4 锻造温度和变形量与超声声速



(b) TC4 锻造温度和变形量与超声衰减

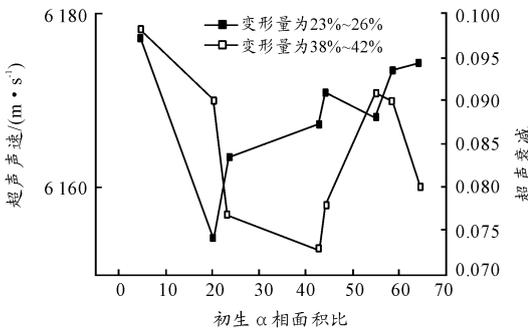
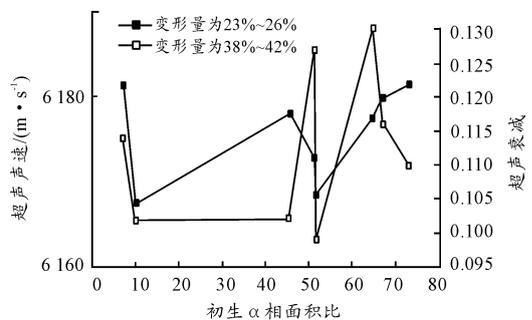
(c) TC4 初生 α 相面积比与声速和衰减 (变形量 23%~26%)(d) TC4 初生 α 相面积比与声速和衰减 (变形量 38%~42%)

图 6 TC4 锻造组织的超声特征参数测量结果

表4 TC4 超声声速下锻造温度及锻造变形量的

相关性分析

锻造温度与 超声声速	变形量 22% ~ 26%	变形量 36% ~ 42%
Pearson 相关性	-0.906**	-0.813*
显著性(双侧)	0.005	0.026
样组数	7	7

** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

表5 超声纵波声速(V)和衰减(A)TC4 金相组织参数相关性分析

	A	V	Areo	D	L	L_{max}/L_{min}
Pearson 相关性	1	0.651*	0.531	-0.320	-0.285	-0.621*
A 显著性(双侧)	/	0.022	0.075	0.311	0.369	0.031
样组数	12	12	12	12	12	12
Pearson 相关性	0.651*	1	0.788**	-0.057	-0.024	-0.707*
V 显著性(双侧)	.022	/	0.002	.860	0.940	.010
样组数	12	12	12	12	12	12

* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3.3 超声纵波声速与锻造 TC4 组织金相参数的关系

超声纵波参数和 TC4 金相参数相关性分析见表 6,表明纵波声速决定于初生 α 相面积百分数。

表6 不同锻造变形量 TC4 初生 α 相面积百分数与超声声速及衰减的相关性分析

α 相面积比与 超声声速	变形量 22% ~ 26%	变形量 36% ~ 42%
Pearson 相关性	0.893**	0.781*
显著性(双侧)	0.007	0.038
样组数	7	7

** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

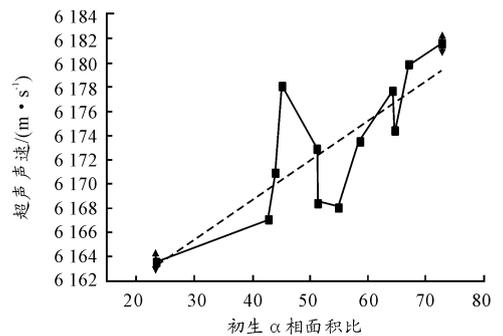
进一步分析, ≥ 980 °C 的 TC4 锻造接近或超过 β 相变点温度,将 920 ~ 970 °C 温度锻造和 980 ~ 990 °C 的初生 α 相面积百分数和超声声速的关系进行分析,结果见图 7,说明相变点以下,声速随初生 α 相面积百分数增加而增加,相变点以上,声速随初生 α 相面积百分数增加而减小。

在 920 ~ 970 °C 锻造组织为初生 α 相和(α 次生相 + β) 组成,初生 α 相晶体为密排六方结构,比 β 相的面心立方结构更难塑性变形,力学性能上具有显著各向异性,弹性模量高于 β 相。初生 α 相面积比降低,已知 α 相的弹性模量和 β 相的弹性模量,简单使用机械混合物的弹性模量计算公式(6),没有考虑次生 α 相片层结构对弹性模量的提高,得到 α

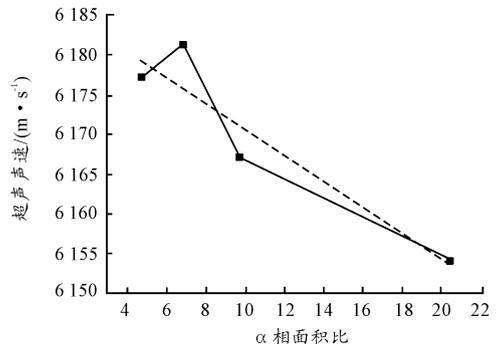
3.2 锻造 TC4 组织金相参数与超声参数的关系

超声纵波声速(V)和超声纵波衰减系数(A)TC4 金相组织参数[初生 α 相面积百分比(Aero),初生 α 相平均直径(D)、长轴平均长度(L)、长短轴比(L_{max}/L_{min})]的相关性分析见表 5(排除相变点左右和以上数据),结果表明,超声纵波声速和初生 α 相面积百分比、初生 α 相长短轴比以及衰减相关,超声衰减与初生 α 相长短轴比和纵波声速相关,其中声速和声衰减相关表明没有残余应力或者残余应力均匀一致。

相总含量 80% 时,声速 6 100 m/s, α 相总含量 100% ,声速 6 170 m/s,与实际声速非常接近。



(a) 锻造温度 920~970 °C



(b) 锻造温度 980~990 °C

图7 TC4 不同锻造温度下的初生 α 相面积百分数和超声声速的关系曲线

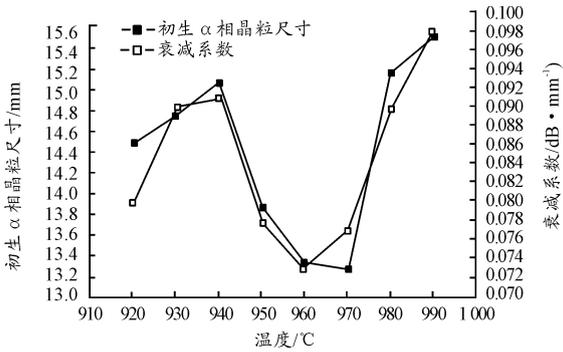
$$C_L = \sqrt{\frac{E_\alpha \times S_\alpha \% + E_\beta \times S_\beta \%}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}} \quad (6)$$

其中 E_α, E_β 为 α 和 β 弹性模量, S_α, S_β 为 α 和 β 所占面积百分比。

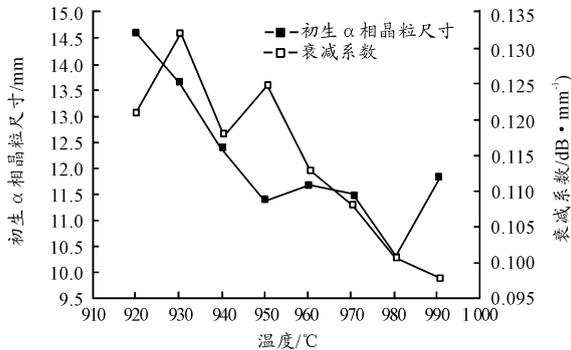
李萍等^[28]研究表明,规则片层组织弹性模量大,声速高,因此 TC4 金相组织中 α 次生相 + β 相组成的片层组织,声速高相对 α 初生相高,解释了图 6b 结果,相变点附近及以上锻造,纵波声速决定于 α 次生相 + β 相片层组织。

3.4 超声纵波衰减与锻造 TC4 组织金相参数的关系

超声纵波衰减系数和锻造温度和锻造变形量关系密切,如图 8 所示,纵波衰减与金相参数相关分析结果见表 7,衰减系数主要决定于初生 α 相的平均晶粒大小。声速 6 100 m/s,检测频率 10 MHz,波长 610 μm ,晶粒尺寸在 $15 \pm 6 \mu\text{m}$ 左右, $d \ll \lambda, a_s = c_2 F d^3 f^4$,衰减主要是晶粒的瑞利散射,衰减随初生 α 相的平均晶粒大小增减而增大。



(a) 锻造变形量 22%~26%



(b) 锻造变形量 38%~42%

图 8 纵波衰减与金相参数相关曲线

表 7 超声纵波衰减系数和 TC4 金相参数相关性分析

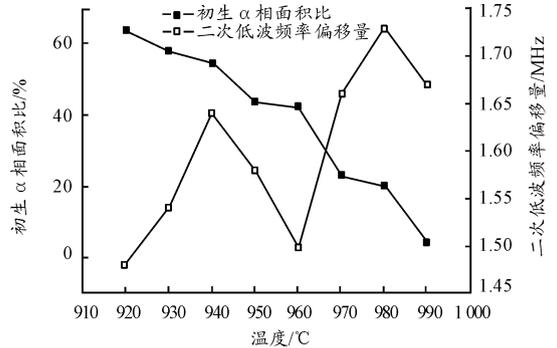
初生 α 相晶粒尺寸	变形量	
	22% ~ 26%	38% ~ 42%
Pearson 相关性	0.945 **	0.560
衰减系数	显著性(双侧)	0.000
	0.149	
样组数	8	8

** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

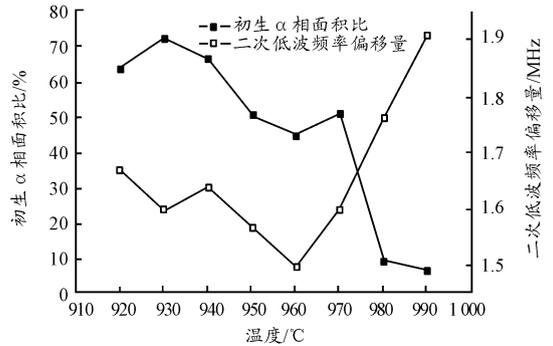
进一步分析,锻造变形量大的 TC4 金相组织,在相同温度下,初生 α 相的面积百分数变化不大(图 4(a)),变化大的在 $(\alpha_2 + \beta)$ 片层组织,随锻造温度的提高($\geq 960 \text{ }^\circ\text{C}$),小变形量的 $(\alpha_2 + \beta)$ 片层组织发育完善,随片层厚度增加,衰减系数增大。大变形量 $(\alpha_2 + \beta)$ 片层组织发育完善,随片层厚度增加衰减系数减小。

3.5 超声纵波二次底波频偏与锻造 TC4 组织金相参数的关系

用超声纵波二次底波频率偏移表达与锻造 TC4 组织金相参数关系,如图 9 所示,相关性分析结果见表 8。



(a) 锻造变形量 22%~26%



(b) 锻造变形量 38%~42%

图 9 二次底波频率偏移与金相参数相关曲线

表 8 超声纵波二次底波频率偏移表达与锻造 TC4 组织金相参数

二次底波频率 偏移量	变形量	
	22% ~ 26%	38% ~ 42%
Pearson 相关性	-0.752 *	-0.712 *
α 相面积比	显著性(双侧)	0.031
衰减系数	0.048	
样组数	8	8

* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

分析得出锻造温度大于等于 $960 \text{ }^\circ\text{C}$,超声纵波二次底波频率偏移决定 $(\alpha_2 + \beta)$ 片层组织发育程度,发育程度高,底波频率偏移大。

4 结论

1) 超声纵波声速在 $920 \sim 970 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度锻造时决定于 TC4

合金中初生 α 相面积百分比,随面积比提高而提高,在 980 ~ 990 °C 锻造时,决定于 $(\alpha_2 + \beta)$ 片层发育程度,发育程度好,声速高;

2) 超声波纵波衰减在 920 ~ 970 °C 温度锻造时决定于 TC4 合金中初生 α 相晶粒平均直径,随平均直径增加而增加,在 980 ~ 990 °C 锻造时,决定于 $(\alpha_2 + \beta)$ 片层发育程度,发育程度好,衰减小;

3) 超声纵波二次底波频偏在 920 ~ 970 °C 温度锻造时决定于 TC4 合金中初生 α 相面积百分比,随面积比提高而降低,在 980 ~ 990 °C 锻造时,决定于 $(\alpha_2 + \beta)$ 片层发育程度,发育程度好,频偏高。

参考文献:

- [1] DING R, GUO Z X. Microstructural evolution of a Ti6Al4V alloy during phase processing: Experimental and simulation investigate [J]. *Material Science and Engineering A*, 2003, 365(2): 172 - 179.
- [2] 刘莹, 曲周德, 王本贤. 钛合金 TC4 的研究开发与应用 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2005, 28(1): 47 - 50.
- [3] 曹春晓. 选材判据的变化与高损伤容限钛合金的发展 [J]. *金属学报*, 2002(9): 4 - 11.
- [4] OKADA M. Titanium 92: Science and Technology [C]. San Diego, California: MS, 1992: 1551 - 1559.
- [5] LEE W B, LIU C F. High temperature deformation of Ti6Al4V alloy evolution by high strain rate compression tests. [J]. *Material Processing Technology*. 1998, 25(1/3): 127 - 136.
- [6] 周义刚, 张宝昌. 钛合金近 β 锻造研究 [J]. *航空学报*, 1989, 10(1): A60 - A66.
- [7] 沈肇亚, 郑中兴. 超声波探伤原理及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [8] 中国航空材料手册委员会. 中国航空材料手册. 3, 铝合金、镁合金、钛合金 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [9] 古尔巴托夫, 鲁坚科, 塞切夫. 非线性非分散介质中的波与结构: 非线性声学的一般理论及应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [10] 马大猷. 现代声学理论基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [11] KOEN E A, VAN DEN ABEELE K, SUTIN A, et al. Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) [J]. *NDT&E International*, 2001, 34(4): 239 - 248.
- [12] KWUN H. Measurement of stress in steels using magnetically induced velocity changes for ultrasonic waves [J]. *NDT&E International*, 1995, 28: 119.
- [13] GRAYALI N, SHYNE J C. Effect of microstructure and prior austenite grain size on acoustic velocity and attenuation in steel [J]. *Review of Progress in NDE*. Vol 4B. New York: Plenum Press 1985: 927 - 936.
- [14] SMITH R L. The effect of grain size distribution on the frequency dependence of the ultrasonic attenuation in polycrystalline materials [J]. *Ultrasonics*, 1982, 20(5): 211 - 214.
- [15] AMBARDAR R, MUTHU M T, PATHAK S D, et al. Effect of porosity, pore diameter and grain size on ultrasonic attenuation in aluminum alloy castings [J]. *INSIGHT*, 1995, 37(7): 536 - 543.
- [16] GRONAU O, REGENER D. Ultrasonic testing of extruded and rolled green compacts from TiAl [J]. *NDT&E International*, 1997, 30(6): 351 - 357.
- [17] 夏纪真, 陈文霖. 用超声衰减法检查锻模材料的晶粒度 [J]. *无损检测*, 1980, 2(4): 26 - 28.
- [18] WANG W, ROKHLIN S I, LIPPOLD J C, et al. Relationship between ultrasonic measurements and micro-structural characteristics of type 308 stainless steel welds [J]. *Materials Evaluation*, 1989, 47(12): 1388 - 1395.
- [19] 钱鑫源. 钛合金的超声波检验 [J]. *材料工程*, 1992(6): 29 - 32.
- [20] 陈建忠, 史耀武. 低碳钢晶粒尺寸的超声无损评价技术 [J]. *无损检测*, 2002, 24(9): 391 - 394.
- [21] 卢超, 郭冠华, 王伏喜, 等. 船用 TA2 钛合金晶粒尺寸的超声声速评定 [J]. *舰船科学技术*, 2005, 27(4): 78 - 80.
- [22] 毛江虹. TM50 钛合金中成份偏析的超声波检测 [J]. *无损检测*, 2008, 30(9): 663 - 664.
- [23] 郝静燕. 生物医用低弹钛合金弹性性能超声无损评价 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [24] 毛江虹, 张谊, 王建淦, 等. 钛合金棒材超声波探伤时底波后回波的缺陷定性分析 [J]. *无损检测*, 2011, 33(1): 43 - 46, 68.
- [25] 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*, 2006, 28(12): 649 - 651.
- [26] 张永红, 李永春, 曹凯. TC4 钛合金板材双晶探头超声波检测 [J]. *宇航材料工艺*, 2012, 42(5): 72 - 75.
- [27] 梁菁, 史亦韦, 蔡建明. TC11 小直径棒材超声检测杂波水平与组织的关系 [J]. *金属学报*, 2002, 38(z1): 683 - 687.
- [28] 李萍, 付千发, 李喜孟, 等. 20 钢高温时效组织弹性性能的超声无损评价 [J]. *材料热处理学报*, 2010, 31(5): 102 - 106.