

## 热加工工艺对GH738金相组织及超声特性的影响

向 苹, 邬冠华, 陈 曦, 占连扬

(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 南昌, 330063)

**摘 要:** 针对不同热加工工艺下GH738锻件金相组织的无损评价问题, 对经过固溶、稳定化、时效和钎焊处理的合金分别进行金相、超声检测, 讨论热加工工艺变化对金相组织、超声检测特征值的影响, 分析金相组织参数与超声参数之间的相关性。结果表明: 晶粒直径变化对声速影响微弱, 在热加工过程中, 固溶处理后声速下降, 稳定化与时效处理后声速不断上升, 钎焊处理后声速开始下降且达到最小值。衰减系数、非线性系数与晶粒直径的变化规律趋于一致, 随着热加工过程的进行, 呈现出固溶阶段快速上升、稳定化后缓慢上升并趋于平缓的趋势, 超声衰减与非线性系数可用于表征GH738合金的晶粒直径及织构不连续性。

**关键词:** GH738; 超声参量; 热加工工艺; 组织形貌

**中图分类号:** TG115.28      **文献标志码:** A

## Effects of Hot Working Process on Microstructure and Ultrasonic Characterization of GH738

XIANG Ping, WU Guanhua, CHEN Xi, ZHAN Lianyang

(Key Laboratory of Non-destructive Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang, 330063, China)

**Abstract:** In order to non-destructively evaluate the microstructure and strengthening state of GH738 forging products during the heat treatment and brazing production cycle, the GH738 alloy is heat-treated under solution, stabilizing, ageing and braze welding treatment conditions. Metallographic and ultrasonic tests are carried out. The metallographic structure and ultrasonic characteristics are established. The mapping relationship between signal parameters is detected, and the influence mechanism of tissue changes on the changes of ultrasound signal parameters is analyzed. Results show that the effect of grain diameter on sound velocity is weak. During the hot working process, the sound velocity decreases after solution treatment, and the sound velocity continues to increase after stabilization and aging treatments. After the brazing process, the sound velocity starts to decrease and get minimum. The attenuation coefficient and non-linear coefficient change with the grain diameter. Both of them rise to the stabilization process and then slowly rise to flatten out. That means ultrasonic attenuation and non-linear coefficients can be used to characterize the grain diameter and texture discontinuity of GH738 alloy.

**Key words:** GH738; ultrasonic parameters; hot working process; tissue morphology

**基金项目:** 无损检测教育部重点实验室开放基金(EW201708505)资助项目; 南昌航空大学研究生创新专项资金(YC2018051)资助项目。

**收稿日期:** 2019-11-23; **修订日期:** 2020-01-22

## 引 言

镍基高温合金由于具有良好的高耐热强度、抗热腐蚀、抗高温氧化性能以及良好的疲劳性能和断裂韧性等综合性能,广泛应用于各种高性能发动机部件以及各种工业燃气轮机的高温热端部件,如涡轮轮盘、涡轮机匣、工作叶片和燃烧室<sup>[1-5]</sup>。

GH738是一种合金化程度较高的镍基高温合金,在加工过程中常出现组织偏析、晶粒粗大、混晶和表面裂纹等组织不均匀性问题<sup>[6-8]</sup>。检测微观组织的常规方法是金相法,但该方法属于破坏性抽查实验,会直接损坏部件导致失效,因而,材料组织结构的超声无损检测越发受到重视<sup>[9-10]</sup>。张颜艳<sup>[11]</sup>研究奥氏体不锈钢组织变化对超声参数的影响,结果表明不锈钢晶粒度与超声纵波声速、衰减系数和噪声频率皆有较好的相关性,同时确定了水淬与空冷条件下的不锈钢平均晶粒尺寸与超声声速关系的数学模型。文献<sup>[12]</sup>利用粒子群优化方法建立 AISI304 不锈钢基于多尺度超声衰减系数的评价模型。文献<sup>[13]</sup>利用超声衰减系数与 AISI 301 不锈钢的晶粒尺寸的对应关系进行研究,结果表明,衰减系数与晶粒尺寸有较好的相关性并可间接评价材料的硬度与屈服强度。时靖<sup>[14]</sup>研究了航空发动机导向叶片 GH738 在模锻工艺中因温度不均匀下降影响材料性能微观结构特征,进而构建 GH738 微观组织结构超声检测评价模型。姬忠超等<sup>[15]</sup>研究了不同固溶温度和保温时间对 GH690 合金组织和性能的影响规律,发现晶粒尺寸随固溶温度升高或保温时间延长而增大,合金硬度反之。文献<sup>[16]</sup>在 350~550 °C 对 GH690 合金进行时效处理和短效有序化,发现晶间碳化物 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 的沉淀随时效温度的升高而增加。

运用 GH738 合金进行航空发动机构件制造,需要对 GH738 锻件进行固溶+稳定化+时效处理后进行钎焊处理,不同热加工过程中 GH738 的金相组织无损检测与表征方法尚未明确。对 GH738 锻后组织按照标准热处理制度 B 进行热处理,并将标准组织再次加热至钎焊温度进行保温以模拟钎焊过程,获取在热加工工艺过程中的组织形貌与超声检测参数,对各参数进行拟合分析和相关性分析,从而分析组织变化对超声信号参量变化的影响机制,对进一步建立 GH738 金相组织的无损评价与表征方法有重要意义。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

GH738 高温合金实验材料如为图 1 所示的模锻件,该模锻件是由坯料经过镦粗、冲孔、胀形、模锻和粗车加工而成的环件半成品,其形变温度为 1 030 °C。模锻件横截面及取样位置如图 2 所示,在环外的外缘上连续取样并标号,取样个数为 28。试样的尺寸约为 25 mm×30 mm×30 mm,试样经线切割后将各个表面使用磨床磨平,表面粗糙度 Ra<6.3。

### 1.2 试验方法

对 GH738 锻后组织按照标准热处理制度 B(1 030 °C/4 h/空冷+845 °C/4 h/空冷+760 °C/16 h/空冷)进行多阶段热处理,并进行不同保温时间的模拟钎焊过程,其钎焊保温时间分别为 10, 20, 30 和 40 min,热处理所使用的设备为最高加热温度为 1 150 °C 的箱式气氛炉。图 3 为 GH738 锻后组织试样热处理流程,在进行每阶段热加工工艺后,选取 3 块作为留样试块,表 1 为不同热加工工艺后的留样编号。



图 1 GH738 模锻件

Fig.1 GH738 forging components

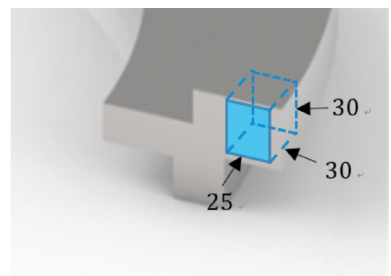


图 2 取样位置与样本尺寸

Fig.2 Sampling position and sample size

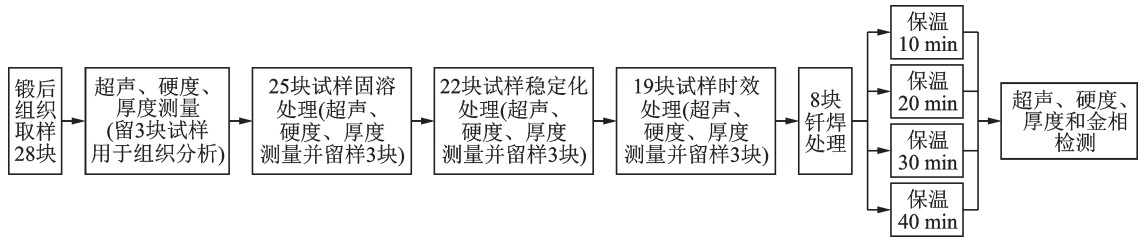


图3 GH738锻后组织试样热处理流程

Fig.3 Heat treatment process of GH738 forged microstructure sample

多阶段热加工处理后,将试样进行打磨、机械抛光以及溶液腐蚀。腐蚀液配比为:90 ml H<sub>2</sub>O+10 ml 浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+2.5 g K<sub>2</sub>MnO<sub>4</sub>粉末。采用MR5000型倒置式金相显微镜观察试样微观组织,借助ImageJ提取晶粒参数,根据《ASTM E112—2013平均晶粒度测定的试验方法标准》,通过式(1)计算合金的标准晶粒度。

$$N_{AE} = Z^{G-1} \quad (1)$$

式中: $N_{AE}$ 为每平方英寸面积内包含的晶粒个数,即1倍下0.064 516 mm<sup>2</sup>内的晶粒个数; $G$ 为晶粒度级别。

利用以奥林巴斯5077PR为核心的超声检测系统,如图4所示,采用探头频率为10 MHz、芯片尺寸为0.635 cm的纵波直探头在试样上分别取9个采样点,通过式(2),(3)计算每个采样点的声速和超声衰减系数,并取平均值。利用itec-RAM-5000-SNAP非线性超声测试系统,以2.5 MHz为激励频率、5 MHz为接收频率在试样上进行非线性检测,每个试样测试9个采样点,根据式(4)计算每个采样点的相对非线性系数,并取平均值。热加工前,所有试样原始状态下声速、衰减系数和非线性系数的平均值及标准偏差分别为6 054.9,0.137,0.32,3.0,0.004 6,0.035,由于非线性超声检测干扰因素较多,检测结果标准差较大,但仍呈正态分布,表明试样原始状态相近,超声检测有效。

表1 试样的热加工工艺参数

Table 1 Thermal processing parameters of sample

热加工参数	试样编号
原始状态	1 <sup>#</sup> , 4 <sup>#</sup> , 27 <sup>#</sup>
固溶处理	3 <sup>#</sup> , 16 <sup>#</sup> , 24 <sup>#</sup>
固溶+稳定化处理	11 <sup>#</sup> , 19 <sup>#</sup> , 25 <sup>#</sup>
固溶+稳定化+时效处理	12 <sup>#</sup> , 14 <sup>#</sup> , 15 <sup>#</sup> , 17 <sup>#</sup> , 18 <sup>#</sup> , 20 <sup>#</sup> , 21 <sup>#</sup> , 22 <sup>#</sup> , 23 <sup>#</sup> , 26 <sup>#</sup> , 28 <sup>#</sup>
固溶+稳定化+时效+钎焊处理	2 <sup>#</sup> , 5 <sup>#</sup> , 6 <sup>#</sup> , 7 <sup>#</sup> , 8 <sup>#</sup> , 9 <sup>#</sup> , 10 <sup>#</sup> , 13 <sup>#</sup>

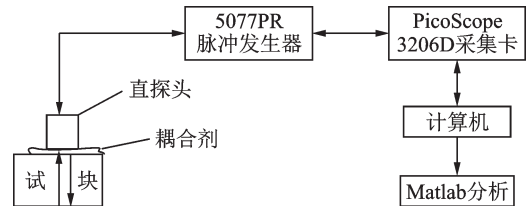


图4 超声信号采集系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of ultrasonic signal acquisition system

$$C = \frac{2d}{(S_2 - S_1) \times 0.02 \times 1000} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{2d} 20 \lg \frac{A_0}{A} \quad (3)$$

$$\beta' = \frac{A_2}{A_1} \quad (4)$$

式中: $d$ 为试样厚度,分别为1次底波和2次底波峰值处的位置,波形图中每个间距代表2 μm; $A$ 为2次底波幅值; $A_0$ 为1次底波幅值; $A_1$ 为基波幅值; $A_2$ 为2次谐波幅值。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 GH738热处理循环组织金相特征测量

金相法主要利用金属晶粒内部与晶界元素分布不同造成的光反射特性差异,对金属的微观组织进行评价。对GH738试块进行金相处理,通过金相显微镜观察晶界的腐蚀效果并获取试块多个位置的金相图,选用ImageJ软件对金相图片进行金相图像处理及微观组织测量。不同热处理过程后试样晶粒组织的变化情况,如图5所示。图5中试样热加工工艺参数详见表1。

由于标准热处理的固溶温度属于“低温”固溶,在固溶保温的状态下未融解的 $\gamma'$ 强化相与碳化物的

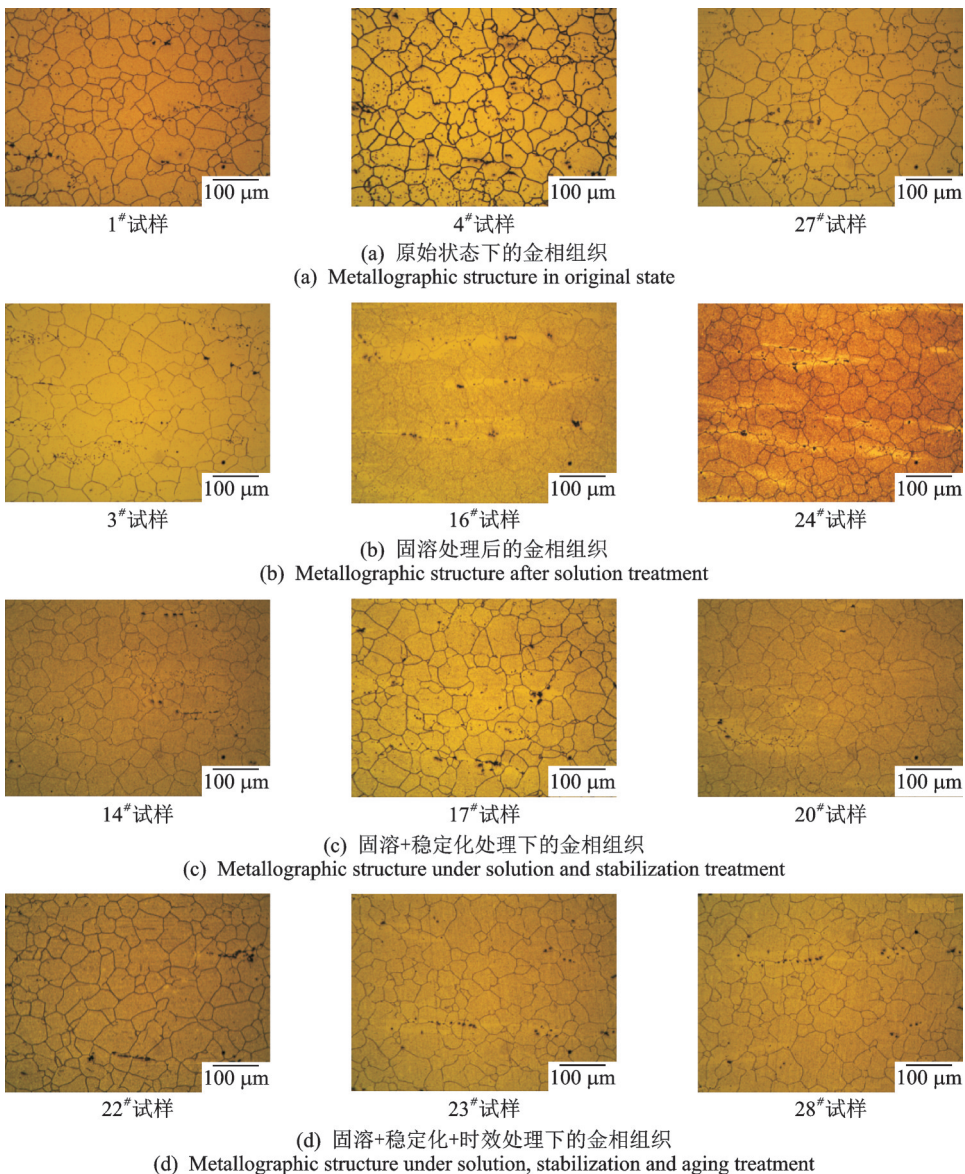


图5 不同热加工工艺下的金相组织

Fig.5 Metallographic structures under different thermal processes

存在将晶粒尺寸增长速度维持在较低水平,从图5中可以看出晶粒尺寸略有增大但是肉眼观察并不明显。

在不同热处理状态下,GH738合金晶界化合物析出量有较大差异。如图6所示锻后组织晶粒内部无析出相,合金元素富集于晶界,以连续分布的MC与 $M_{23}C_6$ 的形式存在。固溶处理过程中,大量的晶界化合物溶解于基体相中,在其后较快的冷却速率下仅于晶粒内部析出少量的 $\gamma'$ 强化相;稳定化处理过程中晶粒内部析出较大颗粒 $\gamma'$ 强化相。时效处理过程中,合金化元素多以细小 $\gamma'$ 强化相的形式析出,而晶界化合物变化并不明显, $\gamma'$ 强化相在晶内随机分布,使得合金达到其最大的强化效果。

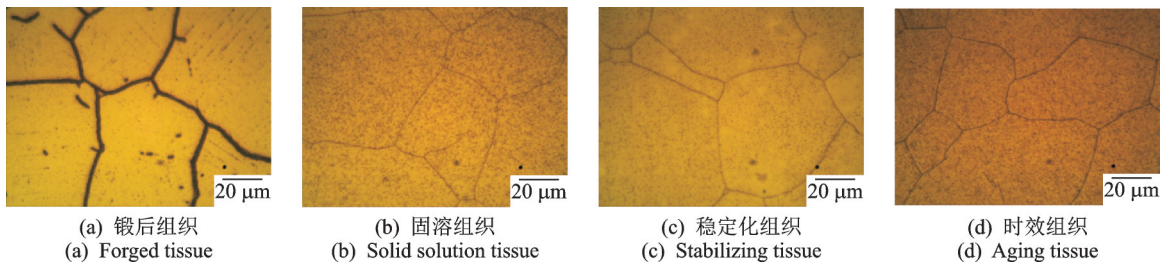


图6 不同热处理状态下GH738合金晶界形貌(1 000倍)

Fig.6 Grain boundary morphology of GH738 alloy under different heat treatment states (1 000 times)

为了研究经过完整热处理制度的GH738合金在钎焊温度下的组织变化,对模拟钎焊试块的组织进行分析,在1 040 °C的温度下分别保温10,20,30和40 min后空冷的试样组织形貌如图7所示。由于钎焊温度较高,在该过程中组织发生的变化类似于固溶处理阶段。由于保温时间较短,钎焊试样相比于时效处理后的试样,其晶粒尺寸并无显著增长,化合物也并未全部溶解,组织形貌的差异多由试样本身差异性导致。

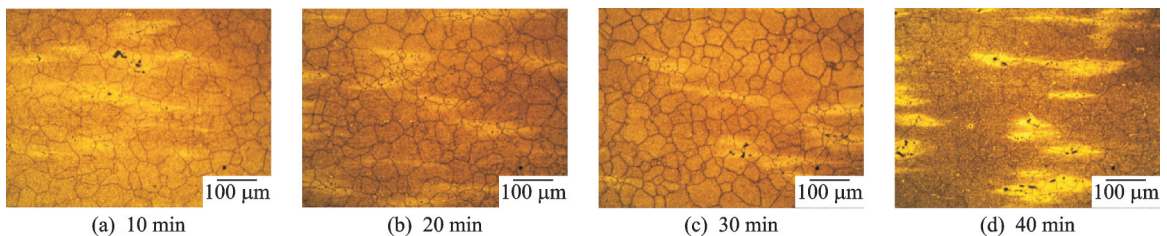


图7 1 040°C下不同保温时间的模拟钎焊试样组织

Fig.7 Microstructure of simulated brazing samples at different holding times at 1 040 °C

对同一种热处理状态的3块试样进行金相特征测量,数据如表2所示,并取平均值用于表征该种热处理状态下的GH738合金的平均等效晶粒直径及其ASTM晶粒度,结果如表3所示。将表3中的平均晶粒直径平均值绘制成曲线,得到图7所示的晶粒尺寸在标准热处理工艺及模拟钎焊温度下的变化曲线。

从图8可以直观看出,GH738合金在标准热处理制度B所规定的热处理工艺下,晶粒直径增量较小仅在固溶处理阶段稍有增长,体现在ASTM晶粒度级别上仅有0.1级的变化量,其后的稳定化+时效处理以及模拟钎焊温度试验,考虑到试样过程中存在误差,可以认为晶粒无显著变化。

## 2.2 GH738热处理组织的超声测量

GH738在热处理过程中伴随着晶粒的长大、强化相及碳化物的溶解与析出等组织变化,因此改变

表2 金相组织特征测量数据

Table 2 Metallographic characteristics measurement data

试样	平均晶粒面积/ $\mu\text{m}^2$	等效晶粒 直径/ $\mu\text{m}$	晶粒度	试样	平均晶粒面积/ $\mu\text{m}^2$	等效晶粒 直径/ $\mu\text{m}$	晶粒度
4 <sup>#</sup> (原始)	1 176	38.7	6.407	25 <sup>#</sup> (稳定化)	1 477.4	43.37	6.583
27 <sup>#</sup> (原始)	1 305.4	40.77	6.647	1 <sup>#</sup> (时效)	1 152.8	38.31	6.826
28 <sup>#</sup> (原始)	1 491.4	43.58	6.455	12 <sup>#</sup> (时效)	1 400.2	42.22	6.208
3 <sup>#</sup> (固溶)	1 213.4	39.31	6.752	17 <sup>#</sup> (时效)	1 769.9	47.47	6.144
16 <sup>#</sup> (固溶)	1 529.9	44.14	6.418	5 <sup>#</sup> (钎焊)	1 422.6	42.57	6.503
24 <sup>#</sup> (固溶)	1 542	44.31	6.486	6 <sup>#</sup> (钎焊)	1 438.8	42.8	6.487
11 <sup>#</sup> (稳定化)	1 395	42.14	6.468	8 <sup>#</sup> (钎焊)	1 430.6	42.69	6.495
18 <sup>#</sup> (稳定化)	1 459.8	43.11	6.798	10 <sup>#</sup> (钎焊)	1 420.6	42.54	6.505

了超声传播状态。利用超声声速、衰减系数和非线性系数(量级为 $10^3$ )等参数对组织进行超声测量。图9—12为不同热处理状态下超声声速、衰减及非线性的变化曲线图。

可以看出,固溶处理过程使得超声声速值减小,而后的稳定化处理与时效处理使得声速回复至较高水平,模拟钎焊温度后,声速再次降低至较低水平。由于GH738合金晶粒尺寸在该过程中仅有长大的趋势。故可以推断,晶粒直径变化对声速的影响作用较弱。合金元素的分布方式导致晶格结构的改变对超声声速的影响较大,主导了声速在热处理过程中的变化方式。

由图10可以看出:固溶处理阶段衰减系数有较大的增幅,这是因为固溶阶段晶粒快速长大。而在模拟钎焊温度下,晶粒虽然有快速长大的趋势,但受限于试样的保温时间较短,晶粒尺寸增长量不显著。而在模拟钎焊后,晶界化合物析出量有所减小,将导致晶界对超声波的散射强度略有下降。

从图11可以看出,相比于超声声速在热处理过程中较为直观、规律性的整体变化,与超声衰减系数类似,超声非线性系数在后续热处理过程中波动幅度较大,因为影响非线性系数测量的不稳定因素较多,且非线性系数对于材料织构较为敏感。

随着标准热处理工艺的进行,试样的晶粒尺寸、超声衰减系数与非线性系数值有大致相同的变化趋势,与其变化机理相符合。晶粒直径在固溶处理阶段有显著的增大,在其后的热处理工艺中小幅度波动,无显著变化。晶粒尺寸的增长使得超声衰减系数与非线性系数在固溶处理阶段有较大幅度的升高。晶界化合物的析出量增加使得超声衰减系数与非线性系数在稳定化阶段仍有大幅度的升高,在时效阶段升高幅度较小。模拟钎焊温度下的短时间保温未对GH738金属宏观织构造成显著影响。

表3 不同热处理状态下试样的平均等效晶粒直径及晶粒度

Table 3 Average equivalent grain diameter and grain size of samples at different heat treatment states

参数	原始	固溶	稳定化	时效	钎焊
平均晶粒直径/ $\mu\text{m}$	41.02	42.59	42.87	42.67	42.9
晶粒度	6.609	6.501	6.482	6.496	6.48

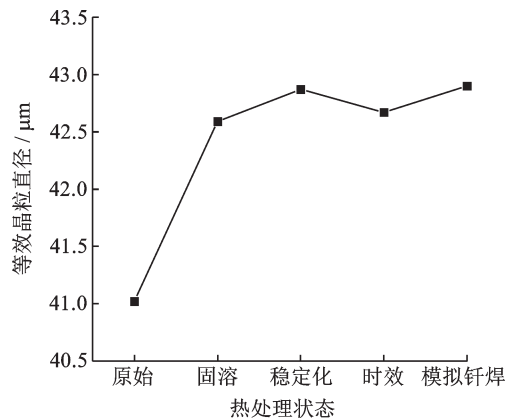
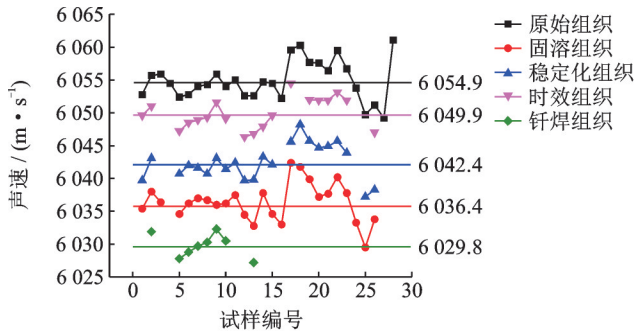
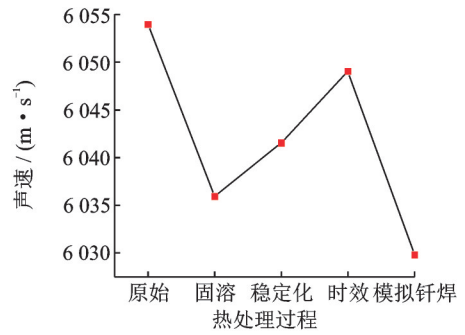


图8 不同热处理状态下GH738平均晶粒直径变化曲线

Fig.8 Variation of average grain diameter of GH738 at different heat treatment states



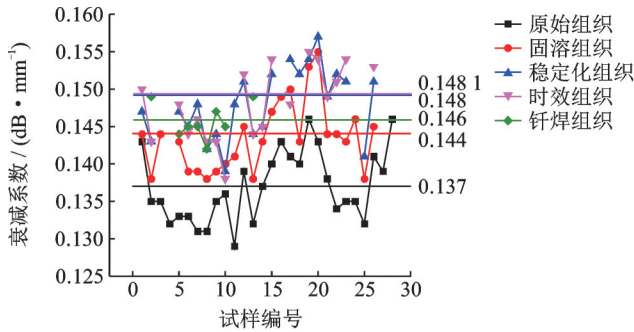
(a) 热处理过程中超声声速的变化情况  
(a) Changes of ultrasonic sound velocity during heat treatment



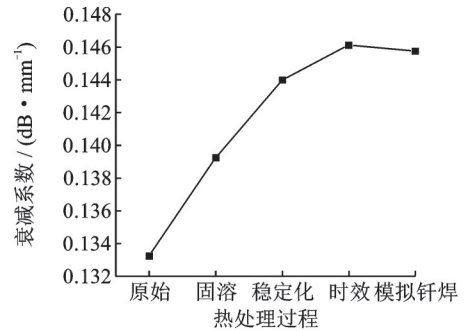
(b) 热处理过程中平均超声声速变化曲线  
(b) Change curve of average ultrasonic sound velocity during heat treatment

图9 热处理过程中GH738组织超声声速变化

Fig.9 Ultrasonic sound velocity changes of GH738 tissue during heat treatment



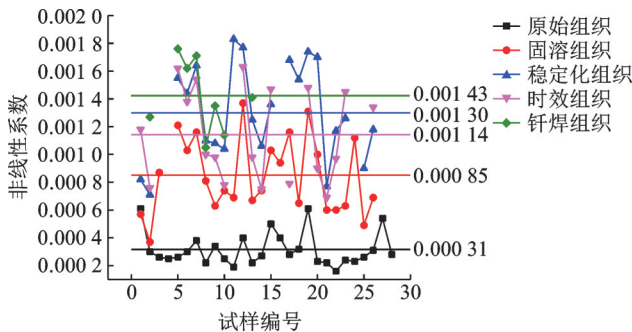
(a) 热处理过程中超声衰减系数的变化情况  
(a) Changes of ultrasonic attenuation coefficient during heat treatment



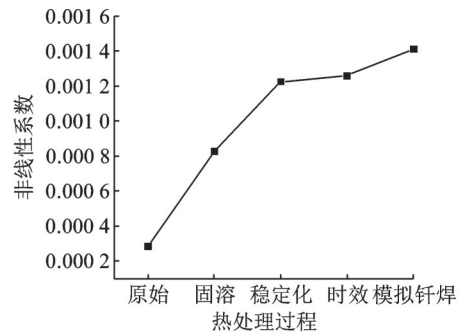
(b) 热处理过程中平均超声衰减系数的变化曲线  
(b) Change curve of average ultrasonic attenuation coefficient during heat treatment

图10 热处理过程中GH738组织超声衰减系数的变化情况

Fig.10 Changes of ultrasonic attenuation coefficient of GH738 tissue during heat treatment



(a) 不同热处理状态下试样超声非线性系数的变化  
(a) Variation of ultrasonic nonlinear coefficients of samples different heat treatment states



(b) 不同热处理状态下平均非线性系数的变化  
(b) Changes in the average nonlinear coefficient at different heat treatment states

图11 不同热处理状态下试样超声非线性系数的变化情况

Fig.11 Changes of ultrasonic nonlinear coefficients of samples at different heat treatment states

2.3 相关性分析

Pearson 相关系数<sup>[17]</sup>本质上是统计学方法中的一种线性相关系数,可以用来量度两个特征值之间的相互关系,通常用 $r$ 表示,取值范围为 $[-1,1]$ , $|r|$ 越接近1,相关性越高。

将超声特征参数与金相参数以热处理状态的不同进行分类汇总,见表4。根据各项参数在热处理循环中产生变化的机理,分为两类:晶粒直径、超声衰减系数与非线性系数与金属组织相关,而超声声速与试样硬度与金属晶格构造相关。对不同热处理状态下的各参数进行线性拟合(图12,13)以及相关分析(表4,5)。

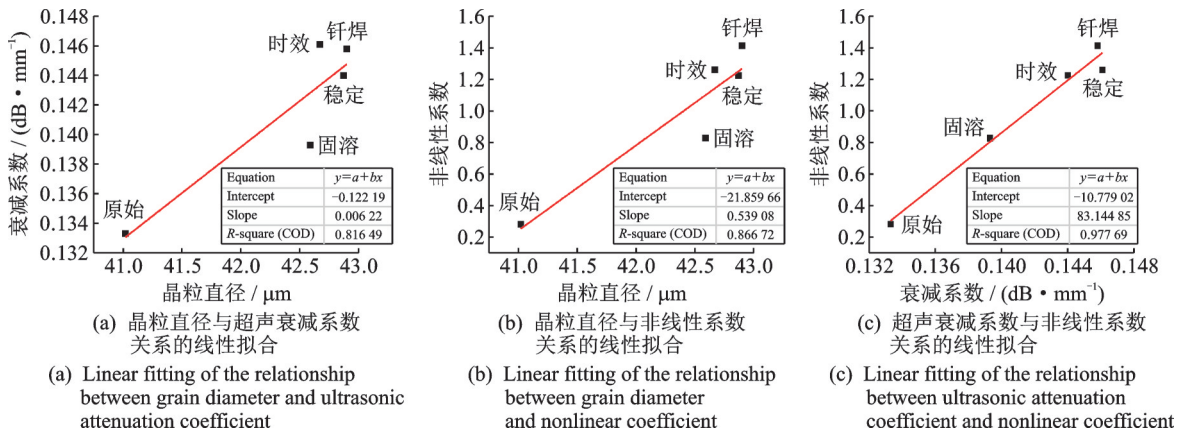


图12 GH738组织超声参数间的线性拟合

Fig.12 Linear fitting between GH738 tissue ultrasound parameters

从图12中可以发现晶粒直径分别衰减系数、非线性系数的拟合优度为0.816与0.866,其中非线性系数与晶粒直径间有相对更好的线性关系;衰减系数与非线性系数之间的拟合优度为0.978,说明这两个超声参数在GH738合金在热处理过程中有着相同的影响机制,因而,同时考虑衰减系数和非线性系数可以提高组织评价的准确性。

从表5数据可以看出:

(1)晶粒直径与超声衰减系数及非线性系数之间的皮尔逊相关性系数分别为0.904与0.931,接收原假设为真的置信水平分别为96.5%与97.8%,在0.05级别显著相关。

(2)超声衰减系数与非线性系数之间的皮尔逊相关性

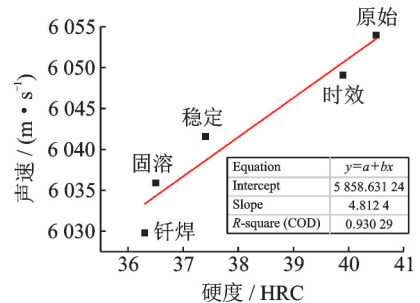


图13 硬度与声速的线性拟合分析

Fig.13 Linear fitting analysis of hardness and sound velocity

表4 热处理组织参数

Table 4 Microstructure parameters of heat treatment

热处理状态	原始	固溶	稳定	时效	钎焊
晶粒直径/ $\mu\text{m}$	41.0	42.6	42.9	42.7	42.9
声速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	6 054	6 036	6 042	6 049	6 029
衰减系数/ $(\text{dB}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.133 3	0.139 3	0.144	0.146 1	0.145 8
非线性系数	0.28	0.83	1.23	1.26	1.41
硬度(HRC)	40.5	36.5	37.4	39.9	36.3



表5 GH738热处理循环组织相关性分析

Table 5 Correlation analysis of GH738 heat treatment cycle structure

参数	相关性	晶粒直径	衰减系数	非线性系数
晶粒直径	皮尔逊相关性	1	0.904*	0.931*
	显著性(双尾)		0.035	0.022
衰减系数	皮尔逊相关性		1	0.989**
	显著性(双尾)			0.001
非线性系数	皮尔逊相关性			1
	显著性(双尾)			

注：“\*\*”在0.01级别(双侧),相关性显著,“\*”在0.05级别(双侧),相关性显著。

系数为0.989,接收原假设为真的置信水平为99.9%,在0.01级别显著相关。

对表4中的硬度、声速数据进行相关性分析,结果表明:超声声速合金硬度的拟合优度为0.930,其线性拟合结果为 $C_L=4.814\text{HRC}+5\ 858.63$ 。

从表6中数据可以得出,试样硬度与声速及试样厚度之间的皮尔逊相关性系数分别为0.965,接收原假设为真的置信水平分别为99.2%,在0.01级别相关性显著。

表6 超声声速与试样硬度相关性分析

Table 6 Correlation analysis of ultrasonic sound velocity and sample hardness

参数	相关性	声速	硬度
声速	皮尔逊相关性	1	0.965**
	显著性(双尾)		0.008
硬度	皮尔逊相关性		1
	显著性(双尾)		

### 3 结束语

(1) 超声声速在GH738合金热处理及钎焊模拟过程中发生变化的主导因素是合金化元素状态及分布改变引起的晶格畸变使材料的弹性模量发生变化,因而,超声声速可以表征GH738合金在热处理过程中的组织强化状态。

(2) 超声衰减系数与非线性系数在GH738热处理及钎焊模拟过程中发生变化的原因为晶粒尺寸与晶界化合物析出量变化导致晶粒对的超声散射及谐振强度提高,超声衰减与非线性系数可用于表征GH738合金的组织不连续性。

(3) 钎焊处理后GH738组织强化状态回复至与固溶处理试样接近的较低水平但晶粒组织及晶界状态未发生显著变化,且不同保温时间的钎焊试样其强化元素的状态及分布与晶界碳化物析出量无显著差异。

#### 参考文献:

- [1] 张健, 王莉, 王栋, 等. 镍基单晶高温合金的研发进展[J]. 金属学报, 2019, 55(9): 1077-1094.  
ZHANG Jian, WANG Li, WANG Dong, et al. Progress in research and development of nickel-based single crystal superalloys [J]. Acta Metall Sin, 2019, 55 (9): 1077-1094.
- [2] 颜晓峰, 董建新, 石照夏, 等. 镍基高温合金GH4282的凝固和偏析行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(10): 3183-3189.  
YAN Xiaofeng, DONG Jianxin, SHI Zhaoxia, et al. Solidification and segregation behavior of nickel-based superalloy GH4282 [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(10): 3183-3189.
- [3] 董建新. 高温合金GH738及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014: 8-127.

- DONG Jianxin. Superalloy GH738 and its application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014: 8-127.
- [4] 李浩宇, 董建新, 李林翰. GH4738合金均匀化过程组织演变及热变形行为[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(3): 61-69.  
LI Haoyu, DONG Jianxin, LI Linhan. Microstructure evolution and thermal deformation behavior of GH4738 alloy during homogenization[J]. Journal of Materials and Heat Treatment, 2017, 38(3): 61-69.
- [5] CHEN X, YAO Z, DONG J, et al. The effect of stress on primary MC carbides degeneration of Waspaloy during long term thermal exposure[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 735(2): 928-937.
- [6] POURANVARI M, EKRAMI A, KOKABI A H. Diffusion brazing of cast INCONEL 718 superalloy utilising standard heat treatment cycle[J]. Materials Science and Technology, 2014, 30(1): 109-115.
- [7] AMIRI A, BRUSCHI S, SADEGHI M H. Investigation on hot deformation behavior of waspaloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 562(2): 77-82.
- [8] 姚志浩, 董建新, 陈旭, 等. GH738高温合金长期时效过程中 $\gamma'$ 相演变规律[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(1): 31-37.  
YAO Zhihao, DONG Jianxin, CHEN Xu, et al. Evolution law of  $\gamma'$  phase during long-term aging of GH738 superalloy[J]. Journal of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(1): 31-37.
- [9] 周正干, 刘斯明. 非线性无损检测技术的研究、应用和发展[J]. 机械工程学报, 2011, 47(8): 2-11.  
ZHOU Zhenggan, LIU Siming. Research, application and development of non-linear non-destructive testing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(8): 2-11.
- [10] 王珏, 尚晓娟. 多阶段热处理对GH738合金组织和室温硬度的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(12): 97-102.  
WANG Jue, SHANG Xiaojuan. Effect of multi-stage heat treatment on microstructure and room temperature hardness of GH738 alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(12): 97-102.
- [11] 张颜艳. 奥氏体不锈钢组织超声无损评价研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2010.  
ZHANG Yanyan. Ultrasonic nondestructive evaluation of austenitic stainless steel[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2010.
- [12] LI X, SONG Y, LIU F, et al. Evaluation of mean grain size using the multi-scale ultrasonic attenuation coefficient[J]. NDT & E International, 2015, 72(6): 25-32.
- [13] AGHAIE-KHAFRI M, HONARVAR F, ZANGANEH S. Characterization of grain size and yield strength in AISI 301 stainless steel using ultrasonic attenuation measurements[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2012, 31(3): 191-196.
- [14] 时靖. 基于定量金相学的GH738组织与超声信号间关系研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.  
SHI Jing. Study on the relationship between GH738 tissue and ultrasound signals based on quantitative metallography[D]. Nanchang: Nanchang University of Aeronautics, 2019.
- [15] 姬忠超, 张莹, 陈志英, 等. 固溶工艺对GH690合金组织和硬度的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(2): 132-136.  
JI Zhongchao, ZHANG Ying, CHEN Zhiying, et al. Effect of solid solution process on microstructure and hardness of GH690 alloy[J]. Hot Working Process, 2020, 49(2): 132-136.
- [16] MOUGINOT R, SARIKKA T, HEIKKILA M, et al. Thermal aging and short-range ordering of alloy 690 between 350 and 550 °C[J]. Journal of Nuclear Materials, 2017, 485: 56-66.
- [17] 张宇镭, 党琰, 贺平安. 利用Pearson相关系数定量分析生物亲缘关系[J]. 计算机工程与应用, 2005(33): 83-86, 103.  
ZHANG Yulei, DANG Yi, HE Ping'an. Quantitative analysis of biological kinship using Pearson correlation coefficient[J]. Computer Engineering and Applications, 2005(33): 83-86, 103.

## 作者简介:



向苹(1994-),女,硕士研究生,研究方向:智能化超声检测,E-mail:892906066@qq.com。



邬冠华(1963-),男,教授,硕士,研究方向:事材料无损检测与评价、失效分析,E-mail:wuguanhua@nchu.edu.cn。

陈曦(1882-),女,讲师,博士,研究方向:微观组织结构 and 机械性能的超声无损评价,E-mail:chenxi@nchu.edu.cn。

占连扬(1994-),男,硕士,研究方向:无损检测技术及仪器,E-mail:1105373548@qq.com。