

# 304 不锈钢固溶产物晶粒尺寸的 超声无损表征研究

Ultrasonic Nondestructive Characterization  
of Average Grain Size in 304 Stainless  
Steel Solution Treatment Products

李 萍,程向梅,李安娜,唐子乔

(大连理工大学 材料科学与工程学院,辽宁 大连 116024)

LI Ping, CHENG Xiang-mei, LI An-na, TANG Zi-qiao

(School of Materials Science and Engineering, Dalian

University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

**摘要:** 304 不锈钢在 1080℃ 下分别固溶 1, 2h, 水淬后进行超声检测, 以探讨无损评价 304 不锈钢固溶产物晶粒尺寸的可行性与表征参数。研究表明: 固溶处理后, 超声波速度逐渐降低, 衰减系数明显增大; 延长固溶时间, 声速缓慢降低, 衰减系数继续增大。频谱分析表明: 固溶处理后, 峰值频率明显降低, 峰值幅度不断增大。分析认为: 上述现象的产生与固溶处理对材料晶粒尺寸的作用以及晶粒尺寸对超声波传播的影响作用相关。基于最小二乘法拟合得到: 横波声速  $v_t$ 、纵波声速  $v_l$  与平均晶粒尺寸  $d$  线性相关:  $v_t = -0.49254d + 3188.40138$ ,  $v_l = -0.07632d + 5772.88964$ ; 衰减系数与晶粒尺寸符合如下规律:  $\alpha = 1.2605 \times 10^{-15} d^{6.5012} + 0.0995$ 。

**关键词:** 固溶处理; 晶粒尺寸; 超声检测; 频谱分析

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.06.016

**中图分类号:** TG115.28<sup>+</sup>5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)06-0077-05

**Abstract:** Specimens of 304 stainless steel exposed to solution treatment at 1080℃ for 1, 2h have been evaluated employing ultrasonic testing in order to discuss the feasibility and ultrasonic nondestructive characterization parameters for average grain size in 304 stainless steel solution treatment product. The results showed that the ultrasonic velocities decreased gradually and the attenuation coefficient increased apparently after solid solution treatment. The velocities continued decreasing slowly and the attenuation coefficient increased further with increasing solution treatment time at the same temperature. The spectral analysis exhibited an obvious decrease of the peak frequency and a gradual increase of the peak amplitude after solution treatments. The above studies are mainly attributed to the effects of the solution treatment to the grain size and the effects of the grain size to the propagation of ultrasonic wave through materials. Based on the least square method, the linear relationships between transverse wave velocity  $v_t$ , longitudinal wave velocity  $v_l$  and the average grain size were obtained  $v_t = -0.49254d + 3188.40138$ ,  $v_l = -0.07632d + 5772.88964$ ; meanwhile, the relevance of the attenuation coefficient to the average grain size was also described in the studied specimens as followed as  $\alpha = 1.2605 \times 10^{-15} d^{6.5012} + 0.0995$ .

**Key words:** solution treatment; grain size; ultrasonic testing; spectral analysis

304 不锈钢是 18-8 型不锈钢的基本钢种, 以其良好的耐蚀性、耐热性、低温强度和力学性能等被广泛应用于石油化工、冶金机械、航空航海和仪器仪表等领域<sup>[1,2]</sup>。常温下置于腐蚀介质中, 一般不会使其发生晶间腐蚀。当经历不适当的加热, 如在 400~850℃ 的温度范围内进行焊接时, 会有高铬碳化物沿晶界析出, 出现

晶界贫铬, 置于腐蚀介质中就会产生晶间腐蚀, 长此以往, 腐蚀会不断向里深入, 直至完全破坏了晶粒间的联系, 所以应对有晶间腐蚀倾向的 304 奥氏体不锈钢进行固溶处理。通常是将其在 1010~1150℃ 进行加热, 这可以使碳化物相充分溶解, 固溶体强化, 韧性及抗蚀性得到提高。研究发现: 固溶处理时加热温度与保温时间的

改变会对 304 不锈钢的晶粒尺寸产生影响<sup>[3]</sup>。金属晶粒尺寸是影响材料疲劳、蠕变等力学性能的重要工程指标,对声速<sup>[4-7]</sup>、衰减系数<sup>[4,8,9]</sup>、频谱参数<sup>[3,4]</sup>等声学特征参数有较为显著的响应。与金相法相比,利用声学参数与晶粒尺寸相关性进行的晶粒尺寸和微结构评价是无损的,评价结果更加客观地反映了声波传播路径上材料晶粒尺寸以及组织结构的整体效应。

对 304 不锈钢而言,改变固溶处理条件,可以获得相同的结构、单一的奥氏体相与不同的晶粒尺寸,这更有利于超声法无损表征 304 不锈钢固溶产物晶粒尺寸的探讨,有助于分析并比较不同特征参数对晶粒尺寸的响应灵敏度。

## 1 实验技术与方法

### 1.1 实验材料及固溶处理条件

实验所用 304 奥氏体不锈钢的化学成分为(质量分数/%): 17.00~19.00 Cr, 8.00~11.00 Ni,  $\leq 0.07$  C,  $\leq 1.00$  Si,  $\leq 2.00$  Mn,  $\leq 0.03$  S,  $\leq 0.035$  P, 余量 Fe。制备 12 块规格为 15mm×15mm×45mm 奥氏体不锈钢试样,每 4 块为一组。第一组试样不做任何处理用于进行对比,第二、三组试样在 1080℃ 下分别固溶处理 1,2h,然后水淬。在对试样进行超声检测时,为了保证超声波探头与被测样品表面充分接触,被测表面应具有较好的光洁度,其粗糙度( $R_a$ )应不低于 3.2,且要求试样上下表面相互平行。

### 1.2 金相观察

为明确不同固溶处理条件下试样微观组织的变化,需要将每个实验样品依序进行金相观察。所有样品经磨制、10%(体积分数)草酸溶液电解腐蚀后,放在金相显微镜下观察各自的微观组织。

### 1.3 晶粒尺寸测量

金属的晶粒尺寸对其在室温及高温下的力学性能有决定性的影响,因此,在金属性能分析中,晶粒尺寸的估算显得十分重要。按照 GB/T6394—2002《金属平均晶粒度测定方法》标准对 304 不锈钢进行晶粒尺寸测量(晶粒的计算不包括孪晶)。本工作采用截点法计算不同固溶处理条件下 304 不锈钢的晶粒尺寸,并取平均值,测量误差小于 5%。

### 1.4 超声实验系统与测量方法

由于超声波与材料显微结构相互作用时会引起声速和声衰减变化,因此采用声速和衰减系数这两个指标参数来无损表征不同固溶处理条件下 304 不锈钢试样的晶粒尺寸。采用脉冲反射法对 12 块 304 不锈钢试样进行超声波速率与衰减系数测量。通过精确测量邻近

反射回波间的时间间隔  $\Delta t$ 、对应的回波幅度  $B_1, B_2$  以及试样厚度  $d$ ,由公式  $v=2d/\Delta t$  及  $\alpha=20\lg(B_1/B_2)/2d$  即可计算出超声波在样品中的传播速度与衰减系数(其中  $B_1$  和  $B_2$  分别表示一次回波和二次回波的幅值)。在每一试样上测量 5 次,且位置变化,以作空间平均。

本研究采用的超声检测实验装置见图 1。SIUI CTS-32 探伤仪发射窄脉冲,激励发射探头,实验采用标称频率 2.5MHz、晶片直径 14mm 的发射/接收纵波直探头(SIUI 2.5Z14N)和标称频率 2MHz、晶片直径 12mm 的发射/接收横波直探头(GE MB2Y),Tektronix 2012 示波器与计算机相连被用来采集时域波形信号。所有信号处理均在计算机中由 Origin 软件实现。鉴于直接接触法具有简便易操作的特点,而且采集到的信号清晰,强度高。本次实验采用直接接触法来进行超声检测,耦合剂选用黄油。

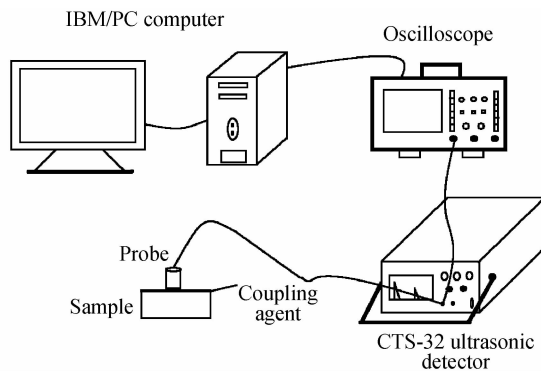


图 1 超声实验装置图

Fig. 1 Ultrasonic experiment device

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 金相分析

依照 1.1 对实验样品进行固溶处理,依照 1.2 对每个固溶后样品进行金相观察,微观组织如图 2 所示。Cr、Ni 的共同作用,使得材料在固溶处理后保持为单相奥氏体状态。

### 2.2 晶粒尺寸测量结果

依照 1.3 进行晶粒尺寸测量,晶粒尺寸(见表 1)随固溶时间的变化如图 3 所示。与原样相比经 1080℃ 固溶处理 1h,奥氏体晶粒急剧长大,平均晶粒尺寸达 110 $\mu$ m,增幅达 3 倍;进一步延长保温时间至 2h,晶粒长大缓慢,增幅为 16.4%。

### 2.3 固溶处理对超声波在 304 不锈钢中传播速率的影响

依照 1.4 依次测量超声波在每个实验样品中的传播速率(见表 1),测量结果如图 4(a)所示。与原样相比,经过固溶处理后,试样的横波声速、纵波声速均呈

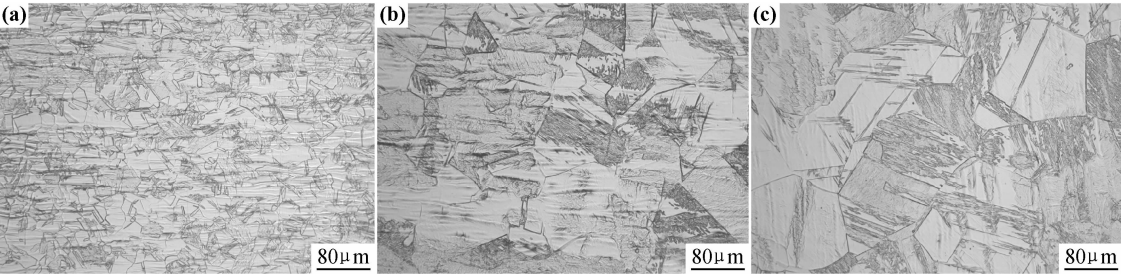


图 2 304 不锈钢不同固溶处理条件下显微组织 (a)未固溶;(b)1080℃固溶 1h;(c)1080℃固溶 2h  
Fig. 2 The microstructure of 304 stainless steel under different solid solution processing conditions  
(a)untreated;(b)solutionized at 1080℃ for 1h;(c)solutionized at 1080℃ for 2h

表 1 不同固溶处理条件下 304 不锈钢试样的平均晶粒尺寸及超声表征参数  
Table 1 Average grain size and ultrasonic characterization parameters of 304 stainless steel samples solutionized at different conditions

Sample	Solution treatment	Average grain size / $\mu\text{m}$	$v_l/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_t/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\alpha/(\text{dB}\cdot\text{mm}^{-1})$
1	Untreated	23	5770	3173	0.101
2	Untreated	24	5776	3174	0.105
3	Untreated	28	5768	3180	0.095
4	Untreated	27	5770	3176	0.097
5	1080℃/1h	109	5764	3137	0.114
6	1080℃/1h	107	5765	3136	0.120
7	1080℃/1h	109	5762	3136	0.130
8	1080℃/1h	113	5763	3136	0.126
9	1080℃/2h	127	5768	3120	0.167
10	1080℃/2h	127	5763	3126	0.153
11	1080℃/2h	131	5760	3127	0.172
12	1080℃/2h	125	5765	3124	0.161

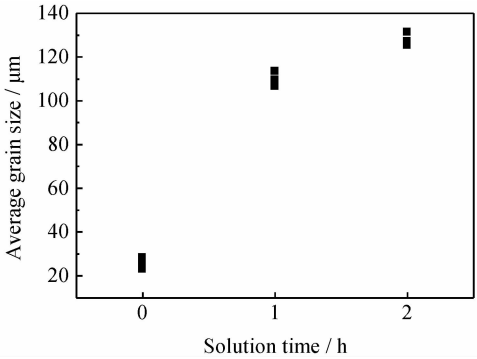


图 3 304 不锈钢平均晶粒尺寸随固溶时间变化关系  
Fig. 3 Variations of 304 stainless steel average grain size with solution time

现递减的趋势(横波变化率为 1.26%,纵波变化率为 0.13%);相同的固溶处理温度下,随固溶处理时间的延长,试样的横、纵波声速缓慢降低(横波变化率为

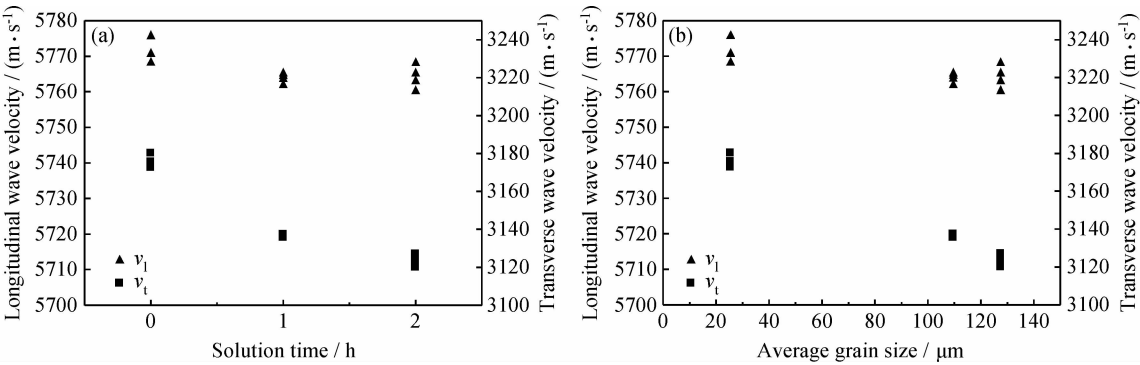


图 4 304 不锈钢横波声速与纵波声速随固溶时间(a),平均晶粒尺寸(b)变化关系  
Fig. 4 Variations of transverse wave velocities and longitudinal wave velocities in 304 stainless steel with solution time (a),average grain size (b)

0.383%,纵波变化率为 0.069%)。相对纵波声速而言,横波声速的变化更为显著。从图 4(b)可以看出,随固溶处理产物晶粒尺寸的增加,横波、纵波声速呈现降低趋势,这与图 4(a)有相同的变化特征。

超声波在固体介质中的传播主要由介质弹性模量

$E$ 、密度  $\rho$  和泊松比  $\nu$  决定。相对于弹性模量和密度,泊松比的影响小一些,可以只考虑弹性模量和密度对超声声速的影响。在不同固溶处理条件下,304 不锈钢的密度基本不变,所以本工作主要从弹性模量的角度分析声速变化的原因。

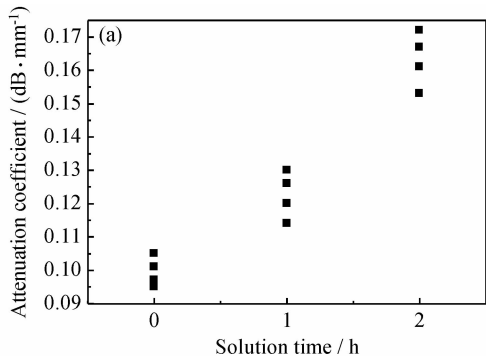
304 不锈钢是具有面心立方结构(fcc)的奥氏体型不锈钢,碳的溶解度是有限的,最多为 2.11%。固溶处理时,合金元素铬、镍取代铁原子的位置形成置换固溶体,造成点阵畸变,使原子之间的结合力下降,从而降低其弹性模量,所以相对于未固溶试样,经固溶处理后的试样,固溶度明显增加(含碳量小于 0.25%时,所有的碳化物在 1000~1100℃ 范围内全部溶解<sup>[10]</sup>),晶粒显著长大,声速出现明显降低,且横波的变化尤为明显;延长保温时间,因溶质原子在  $\gamma$ -Fe 中的溶解度已接近饱和,此时晶粒长大并不十分显著,畸变不足以引起弹性模量的进一步降低,这使得声速的变化变得缓慢。

基于最小二乘法拟合得到横波声速  $v_t$ 、纵波声速  $v_l$  与平均晶粒尺寸  $d$  遵循线性变化规律,如式(1)、(2)(相关参数  $R_1=0.9922, R_2=0.7830$ )所示:

$$v_t = -0.49254d + 3188.40138 \quad (1)$$

$$v_l = -0.07632d + 5772.88964 \quad (2)$$

将金相法测得的 1080℃ 固溶 1h 试样的平均晶粒尺寸  $109.6\mu\text{m}$  分别代入线性方程(1)、(2)中,可计算出试样的横波声速为 3134.419m/s、纵波声速为 5764.525m/s,而采用脉冲回波法测得的试样的横波声速、纵波声速分别为 3136.177,5763.606m/s。可见,采用超声波声速估算 304 不锈钢平均晶粒尺寸是可行的。



## 2.4 固溶处理对超声波在 304 不锈钢中衰减的影响

超声波在 304 不锈钢试样中的衰减系数测量结果见表 1。图 5(a)表示的是 304 不锈钢试样衰减系数随固溶时间的变化关系,从图中可以看出,经固溶处理后,超声波在试样中的衰减呈上升的趋势;随固溶时间的延长,衰减系数进一步增大。

超声波在材料中的衰减与波束的扩散、声波的散射以及介质的吸收相关。扩散衰减主要由声源特性所致,这里可以不予考虑;而散射衰减、吸收衰减取决于介质的特性,在固体介质中,吸收衰减相对于散射衰减来说比例很小,几乎可以忽略,所以只需考虑介质界面引起的散射衰减。

依据平均晶粒尺寸  $d$  与声波波长  $\lambda$  的关系,典型的多晶体中产生的散射可分为三类:瑞利散射( $\lambda \gg \pi d$  时,  $\alpha_s = c_2 F d^3 f^4$ )、随机散射( $\lambda \approx \pi d$  时,  $\alpha_s = c_3 F d f^2$ )和晶粒扩散散射( $\lambda \ll \pi d$  时,  $\alpha_s = c_4 F/d$ ),衰减系数  $\alpha_s$  与材料各向异性系数、超声波频率等参数相关<sup>[3]</sup>。

即使经固溶处理后,304 奥氏体不锈钢的平均晶粒尺寸最大不超过 0.2mm,因此,超声波在其中的衰减仍属于瑞利散射。固溶处理后,试样晶粒明显长大,材料各向异性程度严重,使得散射衰减更为强烈,这与图 5(b)所示现象相吻合。延长保温时间,尽管晶粒尺寸的长大不显著,衰减系数仍然明显上升,这说明衰减系数在评价晶粒尺寸时有较好的响应灵敏度。

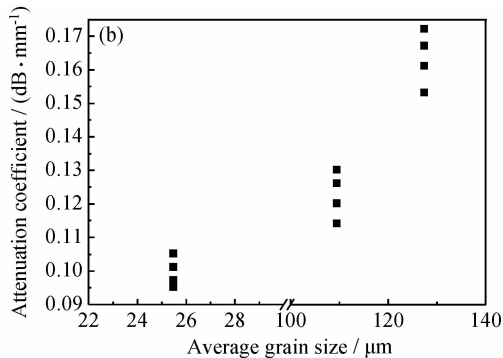


图 5 304 不锈钢纵波衰减系数随固溶时间(a),平均晶粒尺寸(b)变化关系

Fig. 5 Variations of longitudinal wave attenuation coefficients in 304 stainless steel with solution time (a), average grain size (b)

基于最小二乘法拟合得到衰减系数  $\alpha$  与试样平均晶粒尺寸  $d$  的相关性如式(3)(相关参数  $R=0.9616$ )所示:

$$\alpha = 1.2605 \times 10^{-15} d^{6.5012} + 0.0995 \quad (3)$$

将采用金相法测得的 1080℃ 固溶 2h 试样的平均晶粒尺寸  $127.5\mu\text{m}$  代入拟合方程(3)中,可计算出试样的纵波衰减系数为 0.161001dB/mm,而采用脉冲回波法测得的试样的纵波衰减系数为 0.164dB/mm。可见,采用超声波衰减系数估算 304 不锈钢平均晶粒

尺寸也是可行的。

## 2.5 固溶处理对 304 不锈钢中超声波信号频谱特征的影响

通过 Origin 软件对经不同固溶处理试样的一次超声底波信号进行频谱分析。峰值频率是指幅度谱中振幅极大值对应的频率,反映信号简谐成分中振幅最大的简谐分量频率;峰值幅度是指幅度谱中峰值频率对应的幅值,表示峰值频率简谐分量的振幅大小。故这里选择幅度谱的峰值频率和峰值幅度描述固溶处理

表 2 304 不锈钢不同固溶处理条件下试样幅度谱的峰值频率和峰值幅度

Table 2 Peak frequency and peak amplitude of 304 stainless steel samples under different solution treatment conditions in the amplitude spectrum

Sample	Solution treatment	Peak frequency/MHz	Peak amplitude/V
1	Untreated	3.12	21.09
2	Untreated	3.12	20.06
3	Untreated	3.12	18.86
4	Untreated	3.12	19.42
5	1080℃/1h	3.08	20.97
6	1080℃/1h	3.08	20.43
7	1080℃/1h	3.08	21.35
8	1080℃/1h	3.08	22.33
9	1080℃/2h	3.08	23.61
10	1080℃/2h	3.08	25.50
11	1080℃/2h	3.08	24.95
12	1080℃/2h	3.08	24.37

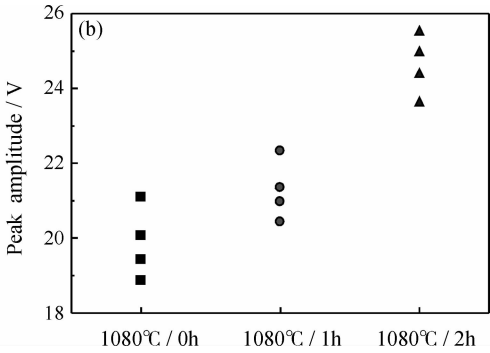
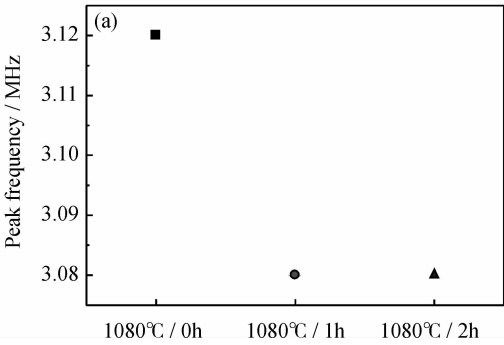


图 6 304 不锈钢不同固溶处理条件下试样幅度谱 (a)峰值频率;(b)峰值幅度

Fig. 6 Peak frequency and peak amplitude of 304 stainless steel samples under different solution treatment conditions in the amplitude spectrum (a) peak frequency;(b)peak amplitude

长,304 不锈钢的晶粒尺寸逐渐增大,对高频超声信号分量的衰减作用增强,从而使试样一次底波幅度谱的峰值频率向低频偏移。晶粒尺寸越大,传播过程中声能衰减越厉害,底波频谱的峰值频率向低频偏移也就越明显。而且,相对于高频分量,低频分量对应的幅值衰减也会较小,所以经固溶处理后当峰值频率向低频偏移时,对应的峰值幅度却逐渐增大,这与图 6 所示的变化趋势相吻合。

3 结论

(1)经固溶处理后,试样的横波声速、纵波声速均呈现递减的趋势;相同的固溶处理温度下,随固溶处理时间的延长,试样的横、纵波声速缓慢降低,相对纵波声速而言,横波声速的变化更为显著。

对超声信号频谱特征的影响,表 2 列出了不同固溶处理状态下 304 不锈钢试样幅度谱的峰值频率和峰值幅度值,将其作图得到图 6。

从图 6 可以看出,固溶处理后,试样幅度谱的峰值频率出现明显降低,固溶时间的延长对峰值频率的影响并不显著;而峰值幅度却逐渐增大。峰值幅度大即谱峰高说明超声波传播过程中该频率的声能衰减小,信噪比较高;反之信噪比较低。

304 不锈钢中包含无数多个取向不同的晶粒,每个晶粒的尺寸也不尽相同,并且晶粒取向和晶粒尺寸具有随机分布的特性,这会导致相邻晶粒间存在声阻抗差。而实验用超声信号可看作是由不同频率的简谐波复合而成,当这种脉冲信号在材料中声阻抗发生变化的区域传播时,必然会发生吸收或散射,造成相应信号频率响应特性的改变。一般低频信号的衰减较小,高频分量的降低较为明显。故随固溶处理时间的延

(2)经固溶处理后,试样的衰减系数明显增大;随固溶处理时间的延长,试样的衰减系数进一步增大。

(3)频谱分析表明:经固溶处理后,试样幅度谱的峰值频率明显降低,延长保温时间对峰值频率的影响较小,而峰值幅度不断增大。

(4)结合金相分析可知,声速、声衰减系数以及频谱参数的改变归因于固溶处理对材料的晶粒尺寸作用以及晶粒尺寸对超声波传播的影响作用。

(5)基于最小二乘法拟合得到:超声波横波声速  $v_t$ 、纵波声速  $v_l$  与平均晶粒尺寸  $d$  线性相关: $v_t = -0.49254d + 3188.40138$ ,  $v_l = -0.07632d + 5772.88964$ ;纵波衰减系数  $\alpha$  与平均晶粒尺寸  $d$  符合如下规律: $\alpha = 1.2605 \times 10^{-15} d^{6.5012} + 0.0995$ 。

- [J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2002, 38(4): 478—483.
- [3] DE ALMEIDA P, VAN DEELEN J, CATRY C, et al. Micro-structure characterization of titanium dioxide nanodispersions and thin films for dye-sensitized solar cell devices[J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2004, 79(7): 1819—1828.
- [4] SIEGEL R W. Nanostructured materials—mind over matter[J]. Nanostructured Materials, 1993, 3(1): 1—18.
- [5] AUGUGLIARO V, SCHIAVELLO M, SCLAFANI A, et al. Photocatalytic degradation of nitrophenols in aqueous titanium dioxide dispersion[J]. Applied Catalysis, 1991, 69(1): 323—340.
- [6] 杨柯, 刘阳, 尹红. 纳米二氧化钛的制备技术研究[J]. 中国陶瓷, 2004, 40(4): 8—12.
- YANG Ke, LIU Yang, YIN Hong. Study on the preparation technology of  $\text{TiO}_2$ [J]. China Ceramics, 2004, 40(4): 8—12.
- [7] 刘秀红, 赵尹, 姜海波, 等. 扩散火焰法控制  $\text{TiO}_2$  纳米晶粒径和晶型的研究[J]. 非金属矿, 2006, 7(4): 19—21.
- LIU Xiu-hong, ZHAO Yin, JIANG Hai-bo, et al. Control of size and crystal from of  $\text{TiO}_2$  nanocrystalline synthesized by Co-flow diffusion flames[J]. Non-Metallic Mines, 2006, 7(4): 19—21.
- [8] 欧阳欣, 闫鸿浩, 刘津开, 等. 纳米二氧化钛粉体的气相爆轰制备[J]. 高压物理学报, 2007, 21(4): 379—382.
- OUYANG Xin, YAN Hong-hao, LIU Jin-kai, et al. Nano-titanium dioxide synthesis using gaseous detonation[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007, 21(4): 379—382.
- [9] 李晓杰, 陈涛, 李瑞勇, 等. 爆轰法制备二氧化钛微粉及表征[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(11): 1788—1791.
- LI Xiao-jie, CHEN Tao, LI Rui-yong, et al. Explosive synthesis and characterization of titanium oxide[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(11): 1788—1791.
- [10] 施利毅, 李春忠, 朱以华, 等.  $\text{TiCl}_4$  高温气相氧化合成纳米二氧化钛颗粒的研究[J]. 功能材料, 2000, 31(6): 622—624.
- SHI Li-yi, LI Chun-zhong, ZHU Yi-hua, et al. Study on the nanosized  $\text{TiO}_2$  particles synthesized by  $\text{TiCl}_4$  high temperature gas phase oxidation[J]. Journal of Functional Materials, 2000, 31(6): 622—624.
- [11] 闫鸿浩, 黄先超, 李晓杰, 等. 不同前驱体浓度下气相爆轰方法制备纳米  $\text{TiO}_2$  粉体研究[J]. 中国科技成果, 2010, (21): 13—15.
- YAN Hong-hao, HUANG Xian-chao, LI Xiao-jie, et al. Study on  $\text{TiO}_2$  nanoparticles produced by gaseous detonation with different concentration of precursor[J]. China Science and Technology Achievements, 2010, (21): 13—15.
- [12] SPUUR R A, MYERS H. Quantitative analysis of anatase-rutile mixtures with an X-ray diffractometer[J]. Analytical Chemistry, 1957, 29(5): 760—762.
- [13] 徐士明. 理想气体方程在计算炸药爆炸产物上的应用[J]. 沈阳工业学院学报, 1994, 13(3): 54—61.
- XU Shi-ming. The applications of state equation of perfect gas to the calculations of explosion parameters of explosives[J]. Journal of Shenyang Institute of Technology, 1994, 13(3): 54—61.
- [14] 高谦, 郑珊, 张青红. 纳米氧化钛光催化材料及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [15] 李颖, 段玉然, 李维华. 采用拉曼光谱技术研究纳米锐钛矿到金红石的相转变[J]. 光谱学与光谱分析, 2002, 22(5): 783—786.
- LI Ying, DUAN Yu-ran, LI Wei-hua. Study of the transition between nano anatase to rutile phase with Raman spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2002, 22(5): 783—786.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(10872044, 10972051, 10902023, 11272081); 辽宁省自然科学基金项目(20082161)

收稿日期: 2012-04-10; 修订日期: 2013-03-04

作者简介: 闫鸿浩(1975—), 男, 副教授, 博士, 主要从事爆炸加工工作, 联系地址: 辽宁省大连市甘井子区凌工路2号大连理工大学工程力学系(116024), E-mail: honghaoyan@vip.sina.com

\*\*\*\*\*  
(上接第 81 页)

(6) 采用超声法无损表征 304 不锈钢固溶产物晶粒尺寸是可行的, 并且以下声学特征参数: 横波声速、衰减系数、峰值频率、峰值幅度对于固溶产物晶粒尺寸的响应尤为灵敏, 可以考虑将它们作为无损表征固溶产物晶粒尺寸的特征参数。

## 参考文献

- [1] 严彪. 不锈钢手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009. 18—19.
- [2] 王荣滨. 18—8 型奥氏体不锈钢的晶间腐蚀[J]. 上海钢研, 2003(2): 19—21.
- [3] 张路根, 吴伟, 欧阳小琴. 304 不锈钢晶粒散射特性的超声检测分析[J]. 无损检测, 2010, 32(2): 99—102.
- [4] 马世伟, 袁康. SUS306 不锈钢平均晶粒尺寸的超声无损检测及其评价[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2010, 16(2): 125—129.
- [5] 吴伟, 张颜艳, 张士晶, 等. 超声声速无损评定 304 不锈钢晶粒尺寸[J]. 金属热处理, 2010, 35(7): 94—97.
- [6] 徐彦霖, 王增勇, 黄振翅. 奥氏体不锈钢平均晶粒尺寸的超声评价

- 技术[J]. 无损检测, 2001, 23(6): 246—248.
- [7] 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.
- [8] BOUDAA B, BENCHALA A, LEBAILI S. Grain size influence on ultrasonic velocities and attenuation[J]. NDT & E International, 2003, 36(1): 1—5.
- [9] NICOLETTI D, ANDERSON A. Determination of grain-size distribution from ultrasonic attenuation: transformation and inversion[J]. Journal of the Acoustics Society of America, 1997, 101(2): 686—689.
- [10] 居春艳. 两种不锈钢的高温相变及热物理性能的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51134013)

收稿日期: 2012-02-21; 修订日期: 2012-06-05

作者简介: 李萍(1969—), 女, 副教授, 博士, 主要从事材料无损检测与评价, 联系地址: 大连理工大学材料科学与工程学院(116024), E-mail: liping69@dlut.edu.cn