

本文参考文献引用格式:火巧英,薛海峰,苟国庆.LCR波测量残余应力修正模型的建立[J].电焊机,2018,48(03):275-280.

# LCR波测量残余应力修正模型的建立

火巧英<sup>1</sup>,薛海峰<sup>1</sup>,苟国庆<sup>2</sup>

(1.中车南京浦镇车辆有限公司,江苏南京266111;2.西南交通大学材料科学与工程学院,四川成都610031)

**摘要** 对7N01铝合金母材进行热处理,制备具有不同晶粒度的试样,定性分析其晶粒度。通过单轴拉伸标定实验测试热处理试样的应力常数 $K$ ,发现材料的晶粒度越大,应力常数 $K$ 越大。自行搭建超声波测试平台,基于基准波形和采集波形进行互相关计算,得到各个晶粒度试样的相对 $t_0$ ,发现材料的 $t_0$ 与晶粒度也成正相关关系。使用电压幅值表征材料的声衰减后,建立超声衰减与应力常数 $K$ 、 $t_0$ 之间的关系,拟合得到超声衰减与 $K$ 、 $t_0$ 的本构方程。建立关于临界折射纵波衰减度和传播时间的修正模型,使用电压幅值表征 $K$ 、 $t_0$ 的变化。

**关键词** 残余应力;临界折射纵波;衰减度;晶粒度

中图分类号: TG404 文献标志码: A 文章编号: 1001-2303(2018)03-0275-06

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2018.03.54

## Establishment of the modified model for residual stress measurement by LCR wave

HUO Qiaoying<sup>1</sup>, XUE Haifeng<sup>1</sup>, GOU Guoqing<sup>2</sup>

(1.CRRC Nanjing Puzhen Co. Ltd., Nanjing 266111, China; 2.School of Material Science and Engineering, South-west Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract** Specimens of the 7N01 aluminum alloy with different grain sizes were prepared by means of heat treatment in this paper in order to analysis the grain size qualitatively. The stress constant  $K$  of the specimens after heat treatment was calibrated by uniaxial tensile calibration test. The results showed that the stress constant  $K$  increased with the material grain size increasing. The author built the ultrasonic testing platform in this paper. The nominal  $t_0$  of the specimens was get based on the cross correlation calculation between reference waveform and capture waveform. The material  $t_0$  was also positively associated with the grain size. The relationships between  $K$ ,  $t_0$  and voltage attenuation were established in this paper. Then, the constitutive equation of  $K$ ,  $t_0$  and voltage attenuation was fitted. Therefore, the modified model between the attenuation of LCR wave and the propagation time was established in this paper, and the change of  $K$  and  $t_0$  were represented by the voltage amplitude.

**Key words** residual stress; LCR wave; attenuation; grain size

## 0 前言

残余应力可能导致结构尺寸变化、结构疲劳寿命下降,也可能增加应力腐蚀敏感性,严重威胁焊接结构件的安全,稍有疏忽就会造成重大事故。由

于目前残余应力检测手段的局限性及其危害性,检测、消除残余应力成为学术界的研究热点。目前尚无一种满足各种测试条件的无损应力检测方法,如X射线衍射法测试对试件表面要求较高,产生辐射对人体危害较大;中子衍射法设备笨重、耗资巨大、测试效率低;超声波测量残余应力技术发展潜力巨大,但其测试精确性仍受到诸多因素的困扰。为此,在残余应力的产生<sup>[1-3]</sup>、检测<sup>[4-7]</sup>、消除<sup>[5]</sup>上,学术界及工业界进行了大量研究工作。

收稿日期:2017-12-26

基金项目:城轨车辆铝合金车体焊接残余应力检测标准技术研究(KJ16-67C048)

作者简介:火巧英(1981—),女,本科,高级工程师,主要从事轨道车辆车体焊接工艺工作。E-mail:huo1026@163.com。

试验材料为高速列车车体用材料7N01P-T4,在此从超声衰减与应力常数  $K$  的关系、超声衰减与  $t_0$  的关系、修正模型、焊缝部分应力测试 4 个方面系统研究 LCR 波测量残余应力修正模型的建立。

### 1 超声衰减与应力常数 $K$ 的关系

超声波在介质中传播时,随着距离的增加,声波的散射和吸收会导致能量衰减,这种现象称为超声波衰减。它是评价材料特性的重要参数。超声波在固体介质中传播时,根据衰减原因的不同分为扩散衰减、吸收衰减和散射衰减等。

介质中的衰减可以用衰减系数来度量。对于金属材料,超声波的衰减主要包括吸收衰减和散射衰减两类<sup>[8]</sup>。金属材料的超声波衰减系数为<sup>[9]</sup>

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_s \quad (1)$$

式中  $\alpha_a$  为吸收衰减系数  $\alpha_s$  为散射衰减系数。

吸收衰减系数为

$$\alpha_a = c_1 f \quad (2)$$

式中  $c_1$  为与材料微观结构无关的系数  $f$  为超声波频率。实际情况中,吸收衰减非常微小,且与材料的微观结构无关。因此,金属材料的超声波衰减形式主要为散射衰减<sup>[10]</sup>。

为达到修正超声波测量残余应力的目的,需定量描述超声波衰减。微观上,当超声波在金属材料中传播时,材料的晶粒度越大,晶界面对超声波的散射干扰就越大,从而增加了超声能量的衰减。宏观上,表现为接收波形电压幅值减小,即超声衰减的增大,超声衰减与电压幅值之间有确切的对应关系。由于超声波衰减系数的计算较为复杂,将使用声波信号电压值来描述超声波的衰减,其优点为:

(1)利用现有设备,节省成本。目前,使用 LCR 波测量应力时,超声探头的作用仅为测量 LCR 波从发射到接收的传播时间  $t$ 。若使用声信号的电压幅值代表超声波的衰减,在测量时可以直接通过探头采集 LCR 波的声信号,不需另外添加测量设备。

(2)无需经过复杂公式演算,直观形象地度量超声波衰减。试验度量超声波衰减大小的目的是建立衰减与计算参数的关系。相比通过复杂计算得到的衰减系数,使用探头直接采集信号,对比测试信号中的 LCR 波电压幅值与母材声信号中的 LCR 波电压幅值,能够直观看出衰减幅度的大小。并且在后续与应力常数  $K$ 、 $t_0$  的关系建立后,实质上是  $K$ 、 $t_0$  与声信号电压值之间的计算关系。在测试时采集到声

信号后即可得到  $K$ 、 $t_0$ ,简化了计算过程。

LCR 波电压幅值采集步骤为:使用自搭建的实验平台采集试样的超声波测试信号数据,信号采集频率 2.5 GS/s,同时采集 512 次,取平均值以消除干扰。将其导入 Origin 分析绘图,获得本次测试从发射到接收的波形图,如图 1 所示。

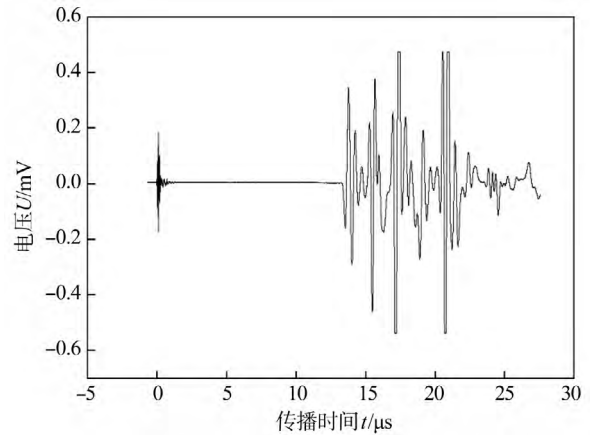


图 1 超声波传播波形

选取 LCR 波,如图 2 所示。

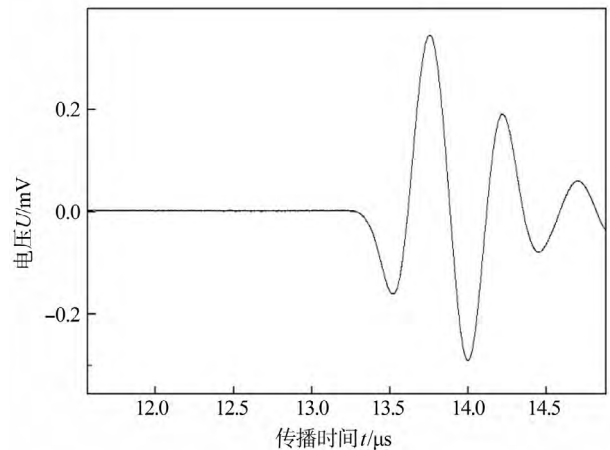


图 2 LCR 波

进一步放大声信号,使用标尺工具选定 LCR 波信号的最大值。读取电压幅值数据,获得 LCR 波的电压幅值,如图 3 所示。采集第三组热处理试样的波形,如图 4 所示。进一步放大,使用标尺读取数据。热处理试样 LCR 波的电压幅值如图 5 所示。获得超声衰减测试结果如表 1 所示。由图 5 可知,经过热处理后,7 系铝合金晶粒度有了较好区分度的同时,材料的超声衰减变化明显。热处理时间越短,材料的超声衰减越小。

通过拉伸标定方式测取材料的真实应力常数  $K_{真}$ ,具体实验方案如下。

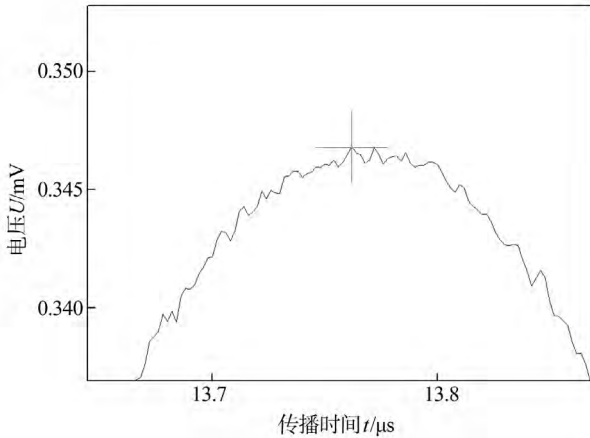


图 3 计算 LCR 波电压幅值

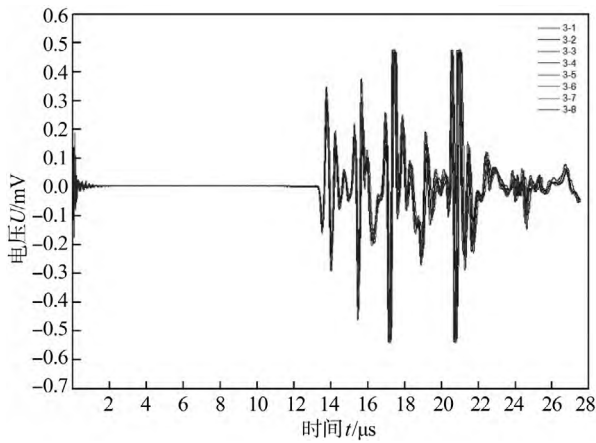


图 4 热处理试样的 LCR 波信号

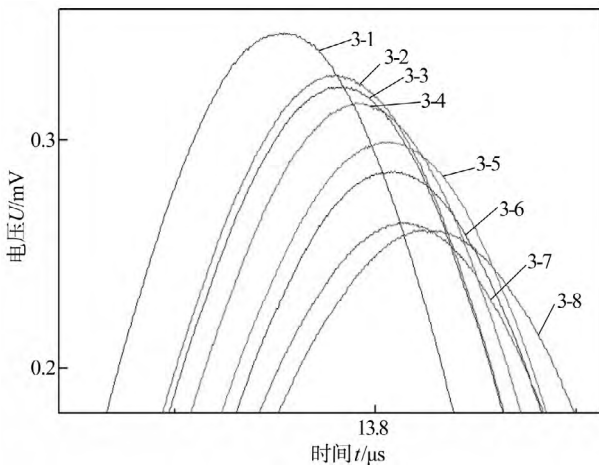


图 5 热处理试样 LCR 波电压幅值

表 1 超声衰减测试结果

试样编号	电压幅值/mV	试样编号	电压幅值/mV
3-1	0.346	3-5	0.285
3-2	0.327	3-6	0.316
3-3	0.321	3-7	0.263
3-4	0.299	3-8	0.259

(1)测试前的准备工作。将超声波测试探头固定在标准试样表面,放置方向为材料拉伸方向,以保证 LCR 波的传播方向与施加载荷方向平行。超声探头与试样二者之间涂有耦合剂,保证充分接触。由于检测探头垂直放置,试验中无法使用金属重块施加压力,改为使用橡皮筋完成探头的固定,每次固定时橡皮筋的缠绕方式、圈数一致,保证耦合压力为定值,所有试样测试时耦合程度一致。试样的实验状态如图 6 所示。

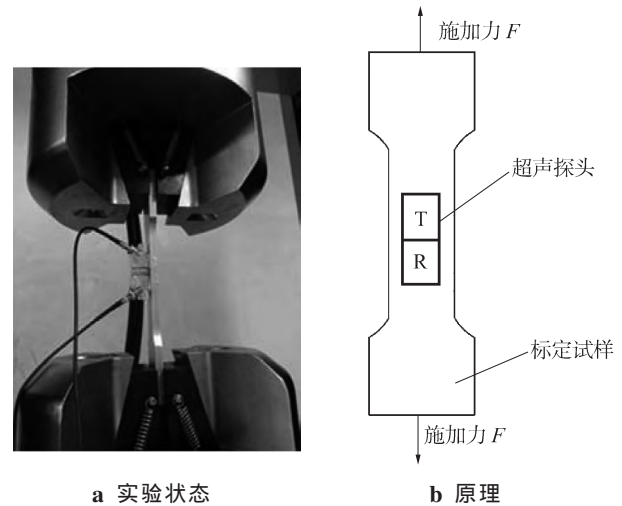


图 6 拉伸标定实验

(2)确认材料试验机上下夹头锁紧后,设定应力常数  $K=4$ ,操作超声波设备进行零应力标定,以此为基准进行下一阶段测量。

(3)操作材料试验机以  $2\text{ kN}+0.05\text{ kN}$  的步长逐步加力,每次加力后保持至拉力稳定不变后,使用超声设备测试此时试样的应力值。然后再次加力,维持、稳定后测试应力,循环直至  $20\text{ kN}$ 。由此得到 10 组数据,即可计算出该材料的真实应力常数  $K$ 。

1-1 试样经过拉伸标定试验获得施加力  $F$  和  $\sigma_{\text{测}}$  两列原始数据,如表 2 所示。

在现有施加力  $F$ 、 $\sigma_{\text{测}}$  共计 10 组数据的基础上,计算声时差  $\Delta t$  和真实应力  $\sigma_{\text{真}}$ 。以  $\Delta t$  为横轴,  $\sigma_{\text{真}}$  为纵轴绘图,拟合得到公式

$$y=5.6166x+3.2842 \quad (3)$$

拟合曲线如图 7 所示。该热处理状态试样的应力常数即为该拟合曲线斜率  $K=5.62$ 。

按照上述实验方法,对 8 组试样进行拉伸标定实验,得到拟合曲线如图 8~图 10 所示。拟合曲线的斜率即为该试样的应力常数  $K$ ,如表 3 所示。

超声衰减的测试结果如表 1 所示,将二者数据

表 2 试样 1-1 拉伸标定

施加力 $F/N$	$\sigma_{测}/MPa(K=4)$	$\sigma_{真}/MPa$	$\Delta t/ns$
2 000	6.00	13.3	0.187 5
4 000	16.37	26.6	0.687 5
6 000	26.37	40.0	2.75
8 000	36.37	53.3	5.25
10 000	46.00	66.6	7.25
12 000	55.63	80.0	9.75
14 000	64.00	93.3	11.75
16 000	73.25	106.6	14.25
18 000	83.25	120.0	16.25
20 000	91.63	133.3	18.75

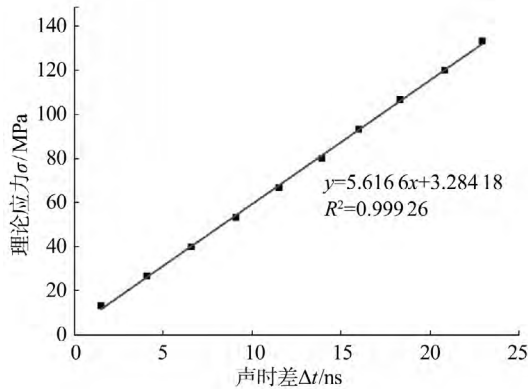


图 7 拟合曲线

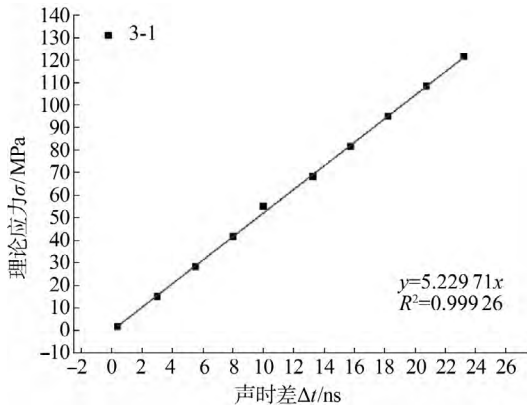
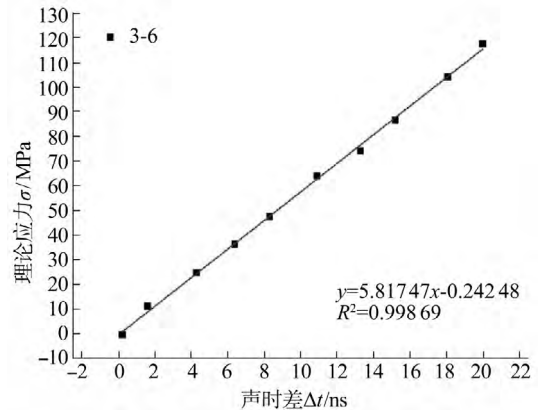


图 8 母材试样拉伸标定拟合曲线

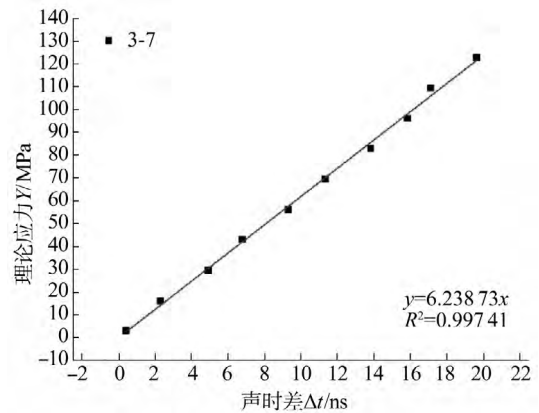
导入 Origin 中绘图,得到超声衰减与应力常数  $K$  的关系如图 11 所示。随着电压幅值的增大(即超声衰减的减小)材料的应力常数呈现减小趋势,二者之间有良好的线性关系。对比热处理后的晶粒度趋势,晶粒度与应力常数和电压幅值之间均有较好的相关性。随着晶粒度的增大,电压幅值减小(即超声衰减增大)、应力常数  $K$  增大。

通过线性拟合,得到的拟合方程为

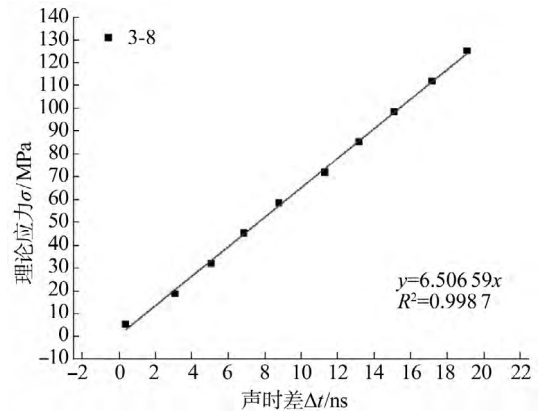
$$K=9.87-13.31U \quad (4)$$



a 3-6



b 3-7



c 3-8

图 9 470 °C 试样热处理试样拉伸标定拟合曲线

式(4)即为应力常数  $K$  与超声衰减的定量关系。确定系数  $R^2$  为 0.9407,说明曲线拟合较好。在应力测试中,若已知测试点的超声衰减,则可根据该定量关系得到该点的应力常数  $K$ ,从而达到修正目的。

## 2 超声衰减与 $t_0$ 的关系

热处理后试样的电压幅值  $U$  与  $t_0$  的测试结果如表 4 所示。

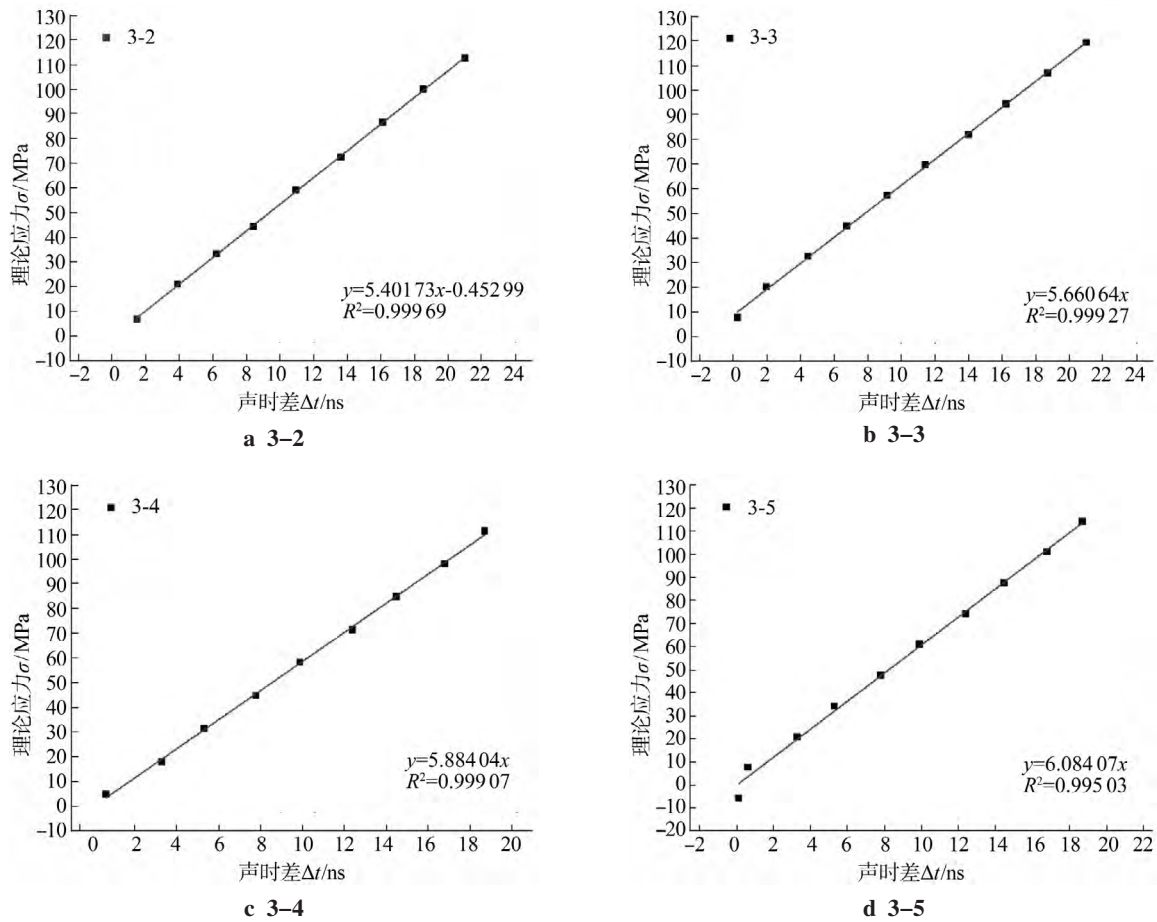


图 10 420 °C 热处理试样拉伸标定拟合曲线

表 3 第三组热处理试样拉伸标定结果

试样编号	应力常数 $K$	试样编号	应力常数 $K$
3-1	5.22	3-5	6.08
3-2	5.40	3-6	5.81
3-3	5.66	3-7	6.23
3-4	5.88	3-8	6.50

表 4 热处理试样电压幅值  $U$ 、 $t_0$  测试结果

试样编号	电压幅值 $U/mV$	$t_0/ns$	试样编号	电压幅值 $U/mV$	$t_0/ns$
3-1	0.346	0	3-5	0.285	17.2
3-2	0.327	5.6	3-6	0.316	10.8
3-3	0.321	8.0	3-7	0.263	22.4
3-4	0.299	14.8	3-8	0.259	25.6

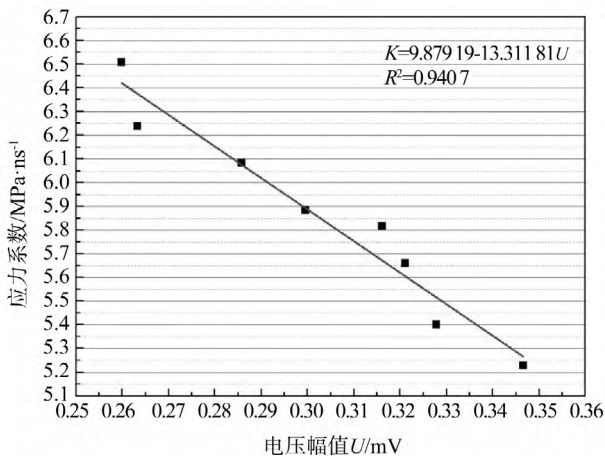


图 11 超声衰减与应力常数  $K$  的关系

将数据导入 Origin 中绘图 结果如图 12 所示。电压幅值与  $t_0$  之间有较好的线性关系 拟合方程为

$$t_0=96.54-276.04U \quad (5)$$

确定系数  $R^2$  为 0.984 28 ,可信度较高。式(5)即为 7N01P-T4 材料超声衰减与  $t_0$  之间的计算关系。通过数据可以看出 :7N01P-T4 材料的超声衰减与  $t_0$  成正相关 即材料的超声衰减越大  $t_0$  越大 超声波传播速度越慢。结合试样的晶粒度数据可知 材料晶粒度与  $t_0$  成正相关 晶粒度越大  $t_0$  越大。

### 3 修正模型

将  $K$ 、 $t_0$  与超声衰减的关系代入超声波测量残

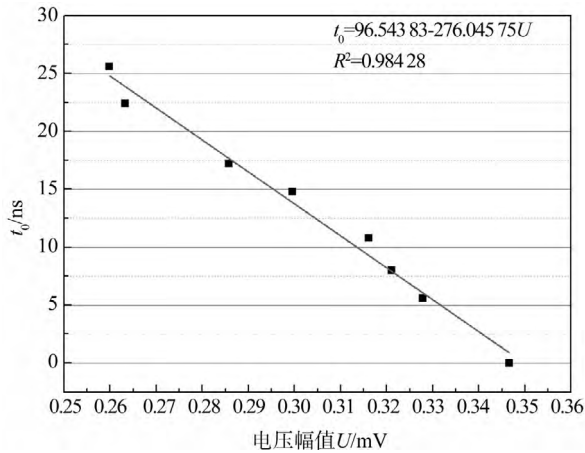


图 12 超声衰减与  $t_0$  的关系

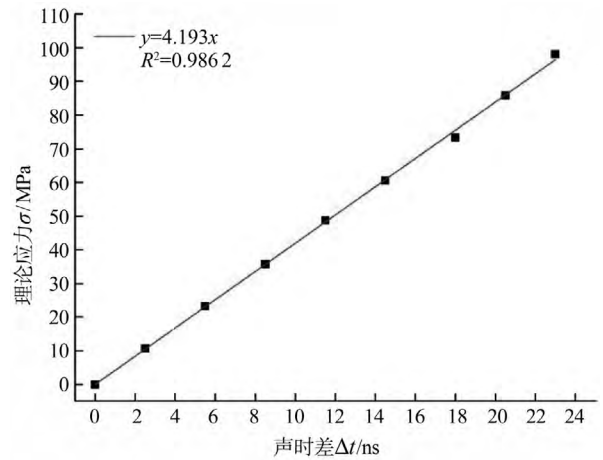


图 13 焊缝区域拉伸标定

余应力公式 得到：

$$\Delta\sigma = (9.87 - 13.31U) \cdot [t - (96.54 - 276.04U)] \quad (6)$$

整理得到

$$\Delta\sigma = (9.87 - 13.31U) \cdot (t - 96.54 + 276.04U) \quad (7)$$

式中  $U$  为 LCR 波电压幅值(单位  $mV$ )。若能在实际测量时实现超声波的自动采集和分析,则实现了在线修正功能。

#### 4 焊缝部分应力测试

试验中发现焊缝区域的微观组织与其他区域的差异巨大,使用修正模型效果不理想。这是因为焊缝组织主要是铸态组织、等轴晶。化学成分上,本研究 MIG 焊所用的 ER5356 焊条为 5 系铝合金,与母材差异性较大。而焊缝内部的主要成分均为填充金属,且经历的热循环相似,其微观组织均匀性较好。基于此,采用单独标定应力常数  $K$ 、 $t_0$  的方式对焊缝区域进行应力测试。

对 7N01 铝合金 MIG 焊焊接接头焊缝切割取样,使用超声测试平台测试该焊缝组织的名义  $t_0$  测试结果为 20.4 ns。使用拉伸标定方式测试其应力常数  $K$ 、 $t_0$ 。MIG 焊焊缝区域试样的拉伸标定结果如图 13 所示。结果表明,焊缝区域应力常数  $K=4.193 MPa/ns$ ,焊缝部分的应力测试将使用该参数进行计算。

#### 5 结论

(1)建立超声衰减与计算参数  $K$ 、 $t_0$  的计算公式,实现了材料微观结构与计算参数关系的建立。根据超声波应力测试基本公式,推导得到修正后的应力测试公式。在焊缝的应力测试修正部分,通过制取焊缝组织试样,经过拉伸试验、超声数据采集得到对应的应力常数  $K$  和  $t_0$ ,以修正其应力测试结果。

(2)使用波形电压幅值定量描述材料的超声衰减,超声衰减与材料的晶粒度的关系为  $t_0=96.54-276.04U$ 。

(3)通过对超声衰减与应力常数  $K$ 、超声衰减与  $t_0$  关系的探索,验证了试验猜想,量化了超声波检测残余应力的两个核心计算参数—— $K$ 、 $t_0$  与材料微观结构的关系。并根据以上关系,完成了超声波应力测试修正模型的建立。

#### 参考文献：

- [1] 田广志, 杨会静, 宋维才. 焊接残余应力的产生及其危害预防[J]. 唐山师范学院学报, 2010, 32(5): 45-56.
- [2] 米茂谷. 残余应力的产生与对策[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [3] 宋天民. 焊接残余应力的产生与消除[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004.
- [4] 朱旭霞, 彭大暑, 黎祚坚. 不锈钢/铝(铝合金)/不锈钢多层复合板残余应力研究[J]. 中国有色金属学报, 2003, 21(1): 37-40.
- [5] 邵卓平, 张伟林. 振动时效工艺中残余应力测试方法的探讨[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 1998, 6(3): 58-61.
- [6] Bendek E, Lira I, Francois M, et al. Uncertainty of residual stresses measurement by layer removal[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006(48): 1429-1438.
- [7] Maxwell A S, Turbull A. Measurement of residual stress in engineering plastics using the hole-drilling technique[J]. Polymer Testing, 2003(22): 231-233.
- [8] 李建萍. 金属材料晶粒大小测量方法的探索[J]. 南方冶金学院学报, 2000, 21(2): 113-114.
- [9] 贺西平, 田彦平, 张宏普. 超声无损评价金属材料尺寸的研究[J]. 声学技术, 2013, 32(6): 445-450.
- [10] 张颜艳. 奥氏体不锈钢组织超声无损评价研究[D]. 江西: 南昌航空大学, 2010.