SUS306 不锈钢热疲劳损伤的超声无损评价

马世伟, 袁 康
(上海大学机电工程与自动化学院, 上海市电站自动化技术重点实验室, 上海 200072)

摘要: 对经过高温热处理和断裂拉伸实验的 SUS306 不锈钢模拟试样进行了接触法高频超声测试,对获得的超声反射波信号进行分析,得到了相应的超声波衰减系数与试样平均晶粒尺寸、断裂伸长率之间的关系,对利用超声脉冲反射技术进行材料热疲劳损伤进展的无损评价具有实际意义。

关键词: 超声无损评价; 衰减系数; 晶粒尺寸; 断裂伸长率
中图法分类号: TG115 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-3630(2008)-02-0206-04

Ultrasonic nondestructive evaluation to the thermal fatigue damage of SUS306 stainless steel

MA Shi-wei, YUAN Kang
(School of Mechatronic Engineering & Automation, Shanghai University, Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, Shanghai 200072, China)

Abstract: The high frequency ultrasonic test of using direct contact method to SUS306 stainless steel samples, which were treated by high temperature heat treatment and stretch experiment, is described in this paper. The ultrasonic attenuation coefficient, average grain diameter and elongation at breaking of the sample being tested are obtained through echo analysis. The relationships between average grain diameter, elongation at breaking and ultrasonic attenuation coefficient of samples are also established. These results are expected to be useful for early assessment of material thermal fatigue damage advance.

Key words: ultrasonic nondestructive evaluation; attenuation coefficient; grain diameter; elongation at breaking

1 引 言

SUS306 铬镍奥氏体不锈钢是典型的高温耐腐蚀锅炉用钢,在工作过程中,由于长期受到高温高压及交互载荷作用,会引起材料内部微结构变化和力学性能退化,这些是限制此类设备使用寿命的重要因素,对其进行无损检测和评价是保证设备安全运行、延长其使用寿命的重要技术手段。

发射高频超声脉冲到已知厚度的被测材料中,对多次反射回波的到达时间和振幅等进行测量,确定超声波的衰减等声学参数,借以表征材料力学性能和微结构变化,可以用于无损评价材料的损伤及其进展[1-6]。但是,由于不同材质和任何材料微结构的变化都可能对超声波的传播特性产生影响,使得超声波在固体中的传播机理较为复杂,对这一领域的理论研究和实践探索还不透彻[1,2]。

通常晶粒尺寸和断裂伸长率是结构钢材的重要本征参数,影响着材料的力学性能(疲劳蠕变和屈服强度等)。研究这类钢材在不同热处理和拉伸状态下,超声波衰减系数的变化与材料晶粒尺寸和断裂伸长率等的变化规律,为利用超声波无损评价这类材料的损伤状况积累数据, 具有重要的实际意义。因此, 本文针对经过高温热处理和拉伸实验的 SUS306 不锈钢模拟试样,开展了超声检测实验,研究了超声波衰减系数的变化,以及与试样平均晶粒尺寸、断裂伸长率之间的关系。

收稿日期: 2007-06-25; 修回日期: 2007-09-11
基金项目: 国家自然科学基金(60472102)和上海市教育基金(07zz03)资助项目
作者简介: 马世伟(1965-), 男, 甘肃人, 博士, 副研究员, 研究方向为检测技术与信号处理。
通讯作者: 袁康, E-mail: 2yuankang@163.com

2　超声测试系统

测试系统如图 1 所示：超声检测实验装置由宽带超声脉冲发送/接收器 GE Panametrics 5073PR，数字示波器 Tektronix DPO4032，以及 PC 微机构成。采用脉冲反射法，使用标称频率为 30MHz 的接触型纵波探头 GE Panametrics V213-BA，并利用 MATLAB 仿真软件对信号进行分析处理。

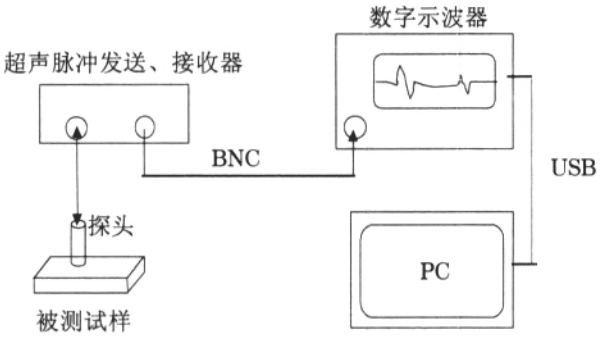


图 1　高频超声测试系统连接框图

Fig.1　Schematic diagram of high frequency ultrasonic testing device

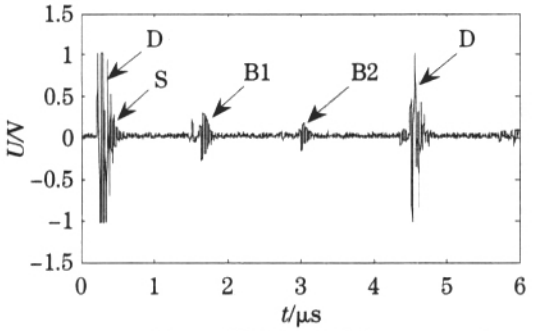


图 2　回波信号时间波形

Fig.2　Waveform of echoes

图 2 是实验所得超声回波信号的典型波形，图中符号分别表示：

S：表面反射波；

D：延迟线回波；

B1：第一次底面反射波；

B2：第二次底面反射波；

由于使用带延迟线超声探头，表面反射波和延迟线回波难以区分。因此，常比较 B1 和 B2 的到达时间差以及幅度变化来分析超声速度和衰减等的变化，因为它们反映了超声波在被测材料中往返一次的过渡时间和声能损失。

3　被测试样

被测试样选用 SUS306 铬镍奥氏体不锈钢，材料成分见下表 1 所示：

表 1　SUS306 成分

Table 1　Components of SUS306

成分	C	Si	Mn	P
含量/%	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035
成分	S	Ni	Cr	Mo
含量/%	≤0.030	10~14	16~18.5	2~3

试样分两类，第一类试样通过改变钢的奥氏体化温度和保温时间获得不同的晶粒尺寸，以模拟锅炉在高温长期工作时材料晶粒尺寸的变化；第二类为上述热处理后再作断裂拉伸实验，得到具有不同断裂伸长率的试样。

第一类试样编号分别为 S1、S2、S3、S4，模拟锅炉用钢的高温工作过程，进行了不同条件的热处理。晶粒尺寸通过配有标尺的目镜金相显微镜进行测量。表 2 给出了四个试样 S1、S2、S3、S4 的热处理规范（空冷）以及晶粒尺寸的测量结果，同时给出晶粒结构显微照片，如图 3 所示。由此可知，试样平均晶粒尺寸随热处理温度的提高和保温时间的延长均有显著增大，晶粒长大的趋势大约符合指数增长规律。第一类试样均被加工成规则长方体（20mm×20mm×5mm），同时对其表面进行磨削加工，确保对不同试样的超声测试是在相同表面状态和接触条件下进行，从而可以比较四组试样的测试结果。

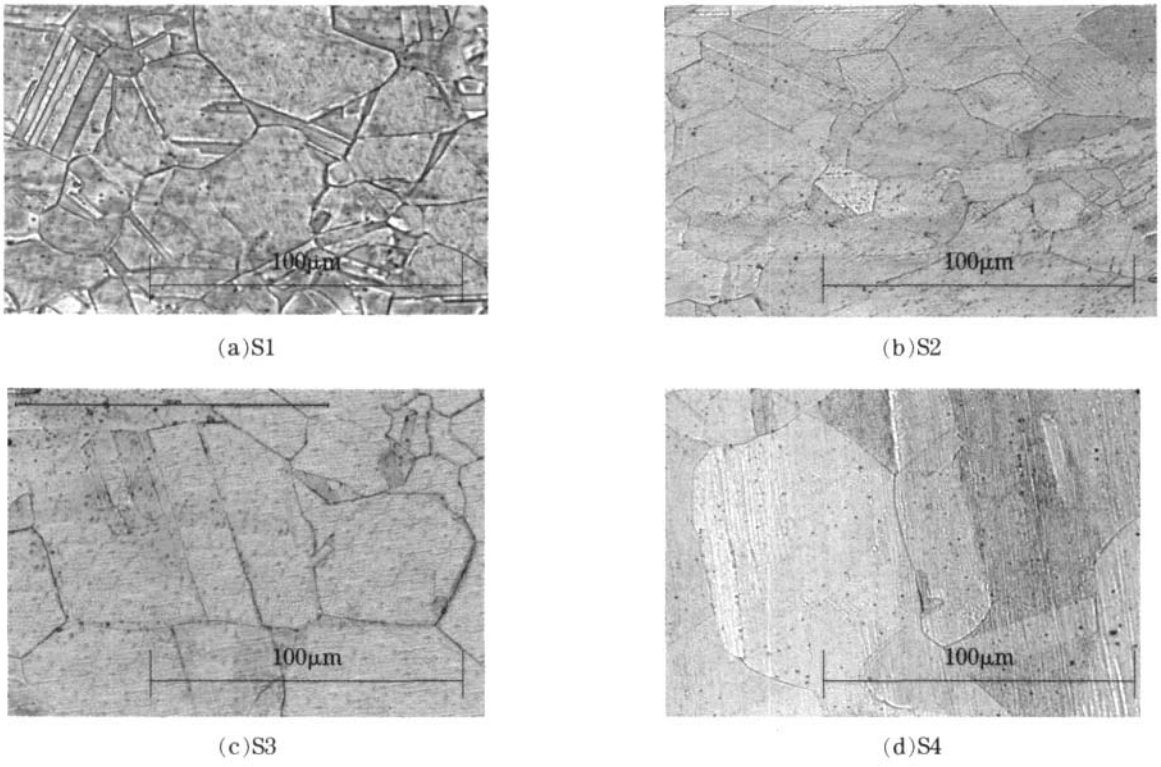
表 2　SUS306 钢试样的热处理规范及晶粒大小

Table 2　Heat treatment conditions and grain size of SUS306 steel samples

试样编号	加热温度/(℃)	保温时间	平均晶粒尺寸/μm
S1	950	20min	23
S2	1000	30min	37
S3	1050	2hr	63
S4	1100	3hr	112

第二类拉伸试样编号分别为 P1、P2、P3、P4（分别对应的热处理条件同第一类试样的 S1~S4），拉伸试样按照国际尺寸（如图 4）。拉伸试验采用 WDW-100A 型电子万能拉伸机。对样品的拉伸段进行尺寸测量，分别测量样品拉伸段的宽度和厚度。试样标距为 70mm，划分为 7 个格，每 10mm 划分为一格。采用定拉伸率拉伸，拉伸率为 0.001，拉伸速度约为 4.2mm/min。对拉断的样品进行再次测量，得到试样上 10mm 每格的断裂伸长率，如表 3 所示。

拉伸实验显示，试样 P1、P2、P3、P4 的断口都位于标距区域 3 和 4 之间，这也与表 3 中的断裂伸长



(a)S1 (b)S2

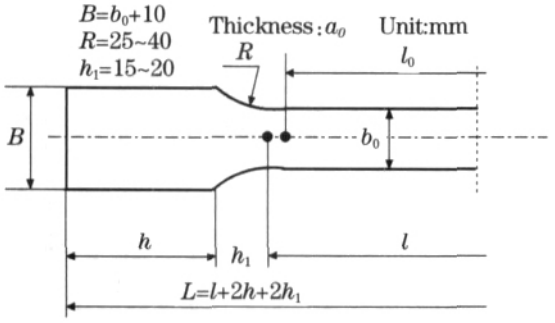
(c)S3 (d)S4

图 3 SUS306 钢试样晶粒显微照片

Fig.3 Photos of sample grain structure

率数据相吻合,即断口处两侧应具有最大的断裂伸长率。晶粒的长大使得材料受到外界载荷时,材料更容易发生屈服变形。

对上述两类试样分别进行了超声检测实验,检测是在各个试样表面不同部位多次进行,数据取统计结果。



a_0=5~10 b_0=30 B=40 h=50 h_1=15 l=85 l_0=70 R=30 L=210

图 4 拉伸试样尺寸图

Fig.4 Photos of stretched sample

表 3 断裂伸长率

Table 3 Elongation at break

区域	1	2	3	4	5	6	7
P1	0.484	0.555	0.699	0.598	0.509	0.466	0.394
P2	0.447	0.527	0.604	0.723	0.529	0.502	0.442
P3	0.512	0.576	0.686	0.734	0.408	0.581	0.509
P4	0.500	0.541	0.637	0.730	0.579	0.528	0.476

4 实验结果及讨论

当检测系统确定后,实际测得的衰减系数 A 应包括材质本身的衰减 M(散射衰减和吸收衰减),声束的扩散损失 L,反射损失 R 以及耦合损失 C 四部分,A=M+L+R+C。当不同材质之间的 L、R、C 的差值非常小时,可以忽略其影响,从而直接用测得的衰减系数 A 对不同材质的 M 进行相对比较。

扩散损失主要取决于探头直径、试样大小以及介质中声波的波长,在相同测试条件下,不同试样的扩散损失差值是由试样外形尺寸差异造成的。而反射损失和耦合损失包括试样表面凸凹不平、波型转换损失以及探头和耦合材料对声能的吸收等[6]。由于实验中钢材试样的几何尺寸一致性较好,加工精度较高,均经过表面处理,探头和被测试样充分接触,同时使用美国 SONOTECH 公司生厂的常温超声耦合剂,最大程度降低了反射损失和耦合损失。由于采用了较完备的测试机构,确保了测试系统的稳定性和测试条件的一致性,因此在本实验中对于不同热处理条件造成晶粒尺寸变化的 SUS306 钢试样,除材质以外的声能损失都不予考虑,直接采用实际测得的衰减系数 A 对材质的衰减情况 M 进行评价,计算公式如下:

$$A=\frac{20\lg(B1/B2)}{2H} \quad (1)$$

其中 B1、B2 分别为第一次底面反射波和第二次底面反射波的幅度，H 为试样厚度。

4.1　衰减系数与平均晶粒尺寸

如图 5 所示为所求得的衰减系数及其变化趋势，可以观察到晶粒大小对超声波衰减有明显的影响：对于 SUS306 钢样本 S1、S2、S3、S4，在其晶粒大小范围内，衰减系数随着平均晶粒尺寸的增大而逐渐增大，热处理后试样的衰减随着晶粒尺寸的增加近乎线性增加，表明晶粒大小变化影响声波的散射和吸收，造成能量随着传播距离的增加而逐渐减弱。霍尔-佩奇(Hall-Petch)公式指出了多晶体材料的强度与其晶粒尺寸之间的关系，晶粒尺寸越大则强度越低，如在受压状态下，会在组织内部形成缺陷，因此，可以用单位距离上超声反射波的幅度变化来对钢材强度进行无损评价。

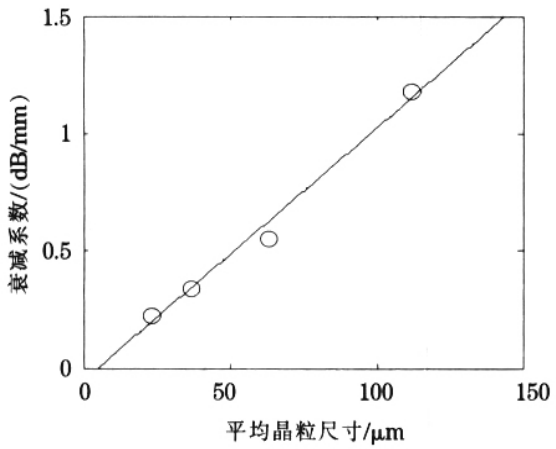


图 5　衰减系数与晶粒尺寸的关系

Fig.5　Relationship between attenuation coefficients and average grain diameter

4.2　衰减系数与伸长率

图 6 给出了超声衰减系数与断裂伸长率的关系。其中横坐标为表二中的断裂伸长率数据，超声衰减系数为多次测得试样在对应区域格上超声衰减系数的平均。由图 6 可知，对于 SUS306 钢样本 P1、P2、P3、P4，随着断裂伸长率增大，超声回波衰减系数增大，同时，在相同断裂伸长率下，随着热处理温度的提高和保温时间的增大，相应的超声回波衰减系数有增大的趋势。此关系可用于评价 SUS306 不锈钢在不同断裂伸长率下所对应的材料的缺陷程度。

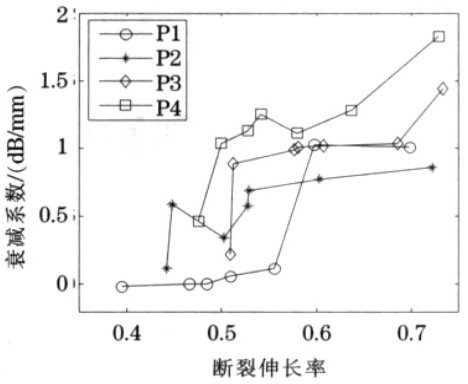


图 6　衰减系数与断裂伸长率的关系

Fig.6　Relationship between attenuation coefficients and elongation at breaking

5　结束语

研究 SUS306 钢在高温热处理和拉伸条件下，超声波衰减系数与平均晶粒尺寸、断裂伸长率之间的关系变化规律，对于利用超声衰减系数无损表征材料的微观组织变化和力学性能是有效的途径。本文的研究结果表明：随着 SUS306 不锈钢热处理温度的提高和保温时间的增大，材质的平均晶粒尺寸增大，使得超声回波衰减系数逐渐增大，同时，随着断裂伸长率增大，超声回波衰减系数增大。本次测试所获得的数据和关系将有助于研究和评估超声衰减系数等超声参数与材料力学性能的关系，这对利用超声技术无损评价材料热疲劳损伤状况的研究是有益的。

参 考 文 献

[1] Kawashima K, Ultrasonic nondestructive characterization of material[J]. Proceedings of JSME, 2001, 67(655): 370-377.

[2] Toshihiro O, Hirotsugu O, Masahiko H. Recent progress of experimental and measuring technology-changes of ultrasonic attenuation and microstructure evolution in crept stainless steels[J]. Trans. of the JSME, 2001, 67(655): 454-461.

[3] Kitasaka J. A trend of inspection techniques in boiler and pressure vessel[J]. Journal of the Japan Boiler Association, 2003, (320): 28-37.

[4] Mitoshi Y. Creep damage evaluation on heating furnace pipe using ultrasonic waves[J]. Idemitsu Technical Report, 2003, 46(2): 129-140.

[5] Kawashima K. Ultrasonic nondestructive evaluation of material properties and cracks[J]. Proc. of JSME, 2003, (9): 933-936.

[6] 林莉，李喜孟，张俊善. 40Cr 棒材不同显微组织的超声波衰减系数分析比较法[J]. 无损检测，2001，23(4)：159-161.
LIN Li, LI Ximeng, ZHANG Junshan. Analysis and comparison of ultrasonic attenuation coefficients of 40cr cylinders with different microstructures[J]. NDT, 2001, 23(4): 159-161.