

文章编号: 1001-4888(2018)04-0621-06

S30408 钢应变强化效果的声发射测试实验研究^{*}

张颖¹, 张维¹, 高晗², 刘延雷³

(1. 东北石油大学 机械科学与工程学院, 黑龙江大庆 163318;

2. 中国石油石油化工研究院大庆化工研究中心, 黑龙江大庆 163318; 3. 杭州市特种设备检测院, 浙江杭州 310003)

摘要: 根据 Kaiser 效应和应变强化原理, 提出利用声发射特征参数确定 Kaiser 效应临界点应力, 通过计算 Felicity 比值来对应变强化效果进行评估的方法。以 S30408 钢为例, 对其应变强化过程及强化后二次加载过程进行声发射测试, 实验结果表明, 利用声发射累计能量和累计振铃计数等特征参数时间历程图, 可得到试件应变强化后 Kaiser 效应点应力值。通过对实验数据的计算与分析, 得到不同加载速率下各试件 Felicity 比值均大于 0.9, 且在 2.0mm/min 加载速率下, Felicity 比值最高, 说明在该加载速率下应变强化效果最为理想。

关键词: S30408 钢; 应变强化; 声发射; Kaiser 效应; Felicity 比值

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-234

0 引言

奥氏体不锈钢由于其良好性能而被广泛应用于各种重要领域, 但其屈强比较低, 按照现有 GB 150 标准进行设计制造时, 会造成极大的材料浪费, 因此需要采用应变强化技术提高其屈服强度^[1]。目前对应变强化效果的评估主要采用测周向变形量的方法, 但对于局部应力集中区应变强化效果是否合格缺乏有效的评估手段^[2,3]。声发射技术作为一种可以实时反映材料内部损伤状态的动态无损检测技术, 不同的状态会产生不同特征的声发射信号, 通过分析这些特征, 可以得出材料内部组织结构的活动情况, 进而可以推断材料在机械性能上的宏观表现^[4,5]。本文以 S30408 奥氏体不锈钢为研究对象, 分别对强化过程及强化过后试件二次加载过程进行声发射监测, 分析应变强化过程的声发射信号特征, 得到了利用 Kaiser 效应和 Felicity 比值评价应变强化效果的方法。

1 奥氏体不锈钢应变强化效果评价的声发射测试机理

奥氏体不锈钢的应变强化机理主要有以下两个方面: 一是塑性变形会引起材料内部晶粒碎化, 二是在强化过程中塑性变形的位错滑移出现了位错增殖使得位错密度大大增加。以上两个因素的综合作用使得材料发生塑性变形的阻力增大, 从而提高了材料的屈服强度^[6]。因此在应变强化过程中, 声发射源的主要来源是塑性变形产生的位错滑移。

Kaiser 效应是指重复载荷达到原先所加最大载荷之前不发生明显声发射现象^[7], 其实质是反映材料内部组织结构发生不可逆变化的程度, 因为这个变化是不可逆的, 所以卸载之后再次进行加载的过程不会产生明显的声发射现象。而应变强化也是通过对材料施加载荷, 使其内部结构发生不可逆的变化, 从而具备抵抗与强化过程使其内部发生不可逆变化的最大应力值相当的载荷的能力^[8]。因此当对强化

^{*} 收稿日期: 2017-11-07; 修回日期: 2018-01-12

基金项目: 国家质检总局科技计划(2016QK164)资助

通讯作者: 张颖(1972-), 男, 博士, 教授。从事过程设备安全检测及完整性评价的研究。Email: aezy163@163.com

过后的试件进行二次加载时,在达到强化过程最大应力 σ_k 之前,试件中不发生明显的声发射现象,说明强化过后的试件在承受 σ_k 以下应力时具有抵抗塑性变形的能力,即达到了应变强化效果。这就是根据 Kaiser 效应,利用声发射测试方法评价应变强化效果的原理。

由于 Kaiser 效应实际上是反映材料第一次加载过程的受损伤的程度,因此二次加载过程中的 Kaiser 效应临界点应力值与第一次加载过程的最大应力值有所差别,往往小于之前的最大载荷,这就是 Felicity 效应^[9]。根据上述内容,可使用 Felicity 比值对 Kaiser 效应有效性进行判断,如公式(1)所示。

$$F = \frac{\sigma'_k}{\sigma_k} \quad (1)$$

式中, F 为 Felicity 比值; σ_k 为强化应力,即强化过程最大应力,MPa; σ'_k 为二次加载过程中 Kaiser 效应临界应力,MPa。 σ'_k 是根据二次加载过程中的声发射特征参数对时间的变化情况确定的,即利用声发射累计参数对时间历程图,根据跳跃点法,得到声发射累计参数开始急剧变化的时间点^[10],它所对应的应力值即为 σ'_k 。

通过 F 值,可以判断材料内部组织变化程度,即应变强化的效果。根据 Kaiser 效应的原理,由式(1)可知, F 值越接近于 1,说明材料内部组织结构的变化使得材料能抵抗住而不发生塑性变形的应力值越接近于强化应力值,即应变强化的效果就越接近于期望效果。利用这一方法,可以对应变强化的效果进行评估。

2 S30408 钢应变强化过程声发射测试实验

选用 S30408 钢进行应变强化过程的声发射测试实验,实验系统如图 1 所示。试件为矩形截面,试件尺寸如图 2 所示。使用岛津 AG-X 电子万能试验机,采用位移加载方式,匀速轴向拉伸进行应变强化,采用 YYU-5/25 电子引伸计控制应变量。声发射信号采集使用 PCI-2 硬件采集系统和 AEwin for

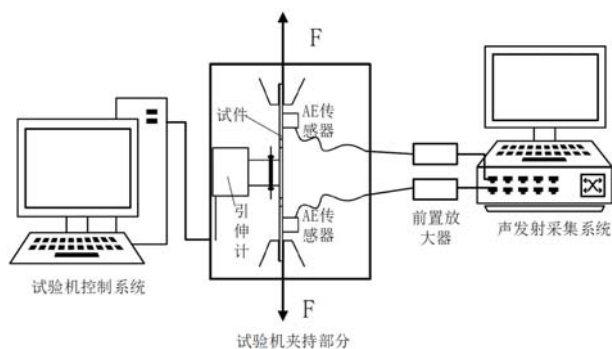


图 1 应变强化声发射测试系统

Fig. 1 Acoustic emission test system of strain hardening

SAMOS 软件采集分析系统,分别在试件两端布置 WD 型传感器采集信号,传感器频率范围为 100~1000kHz。根据断铅实验和小型部件声发射检测标准(GB/T 26646-2011)^[11],声发射检测系统参数设置如表 1 所示。实验采用 0.1mm/min、0.5mm/min、1.0mm/min、2.0mm/min、3.0mm/min、4.0mm/min 的加载速率进行,每种速率五个试件,由于在 10%应变量以下时,强化后材料中形变马氏体较少且力学性能不会有损失^[12],因此控制应变量

在 10% 以下,分别在 5%、10% 应变量处保持应变 5min,加载曲线见图 3。

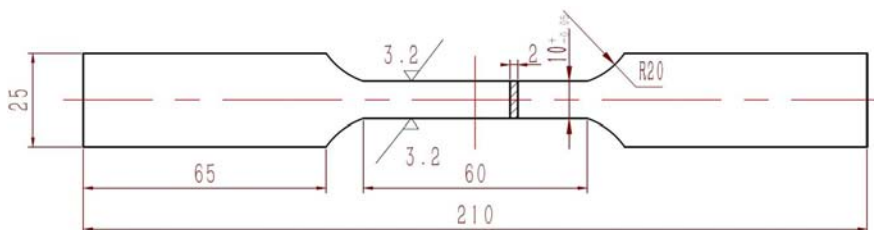


图 2 试件尺寸图

Fig. 2 Size diagram of specimen

3 实验结果分析

按图 3 的加载曲线,完成 6 种加载速率的试件应变强化,对声发射测试数据进行分析。通过对 6 种

加载速率下声发射数据图进行对比分析,发现不同加载速率下,无论是在强化过程还是二次加载过程中,声发射参数呈现相似的变化规律,因此下面以 2.0mm/min 的加载速率为例对实验结果进行详细说明分析。

表 1 声发射参数设置

Tab. 1 Acoustic emission parameter settings

AE 通道	阈值/dB	PDT/ μ s	HDT/ μ s	HLT/ μ s
1	30	300	600	600
2	30	300	600	600

表中,PDT 为峰值定义时间;HDT 为撞击定义时间;HLT 为撞击闭锁时间。

3.1 应变强化过程声发射信号特征参数的历程图分析

图 4 所示分别为 S30408 钢试件应变强化过程声发射幅值和振铃计数与拉伸载荷时间历程图。

第一个加载阶段(0~120s)分为弹性变形和塑性变形两个阶段,在拉伸过程中的弹性阶段(0~30s)形变量小且时间短,在此期间基本未监测到声发射信号;在 30~120s 时间段,根据应力值判断,此时材料已进入屈服阶段,发生塑性变形,材料内部组织产生了大量的可动位错并且内部组织运动活性增强,因此产生了大量的声发射信号,声发射振铃计数曲线出现峰值,同时伴随着较高的能量和幅值。在第一个保持应变阶段(120~420s),由于没有继续对试件进行加载,因此基本没有声发射信号的产生。在第二个加载阶段(420~540s),随着强化的加剧,由于位错密度升高,材料发生塑形变形需要的应力增大,导致声发射信号数量减少,但是由于塑性变形释放的能量较大,因此声发射振铃计数仍保持较高的水平。在第二个保持应变阶段(540~840s),由于加载阶段塑性变形的能量已充分释放,因此在第二个应变保持阶段试件内部也没有声发射活动。

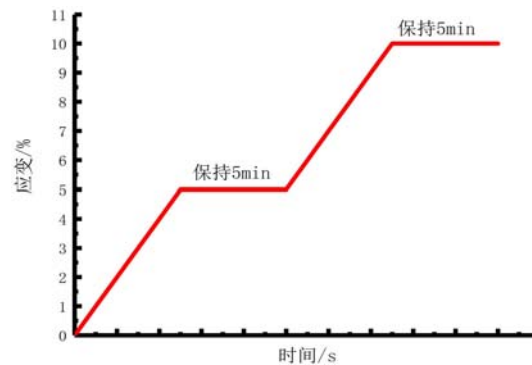


图 3 加载曲线图

Fig. 3 Load curve

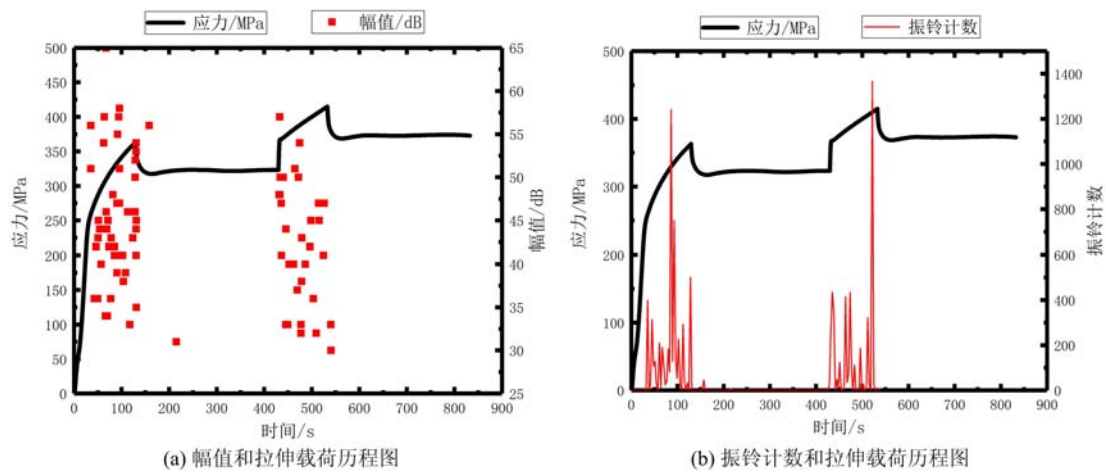


图 4 2.0mm/min 加载速率下声发射特征参数和拉伸载荷时间历程图

Fig. 4 Schematic diagram of acoustic emission characteristic parameters and tensile load vs time at a loading rate of 2.0mm/min

3.2 基于 Kaiser 效应的应变强化效果声发射评估

对应变强化后的试件进行二次加载,加载到强化过程的最大应力时停止加载,二次加载过程声发射幅值与拉伸载荷历程图如图 5 所示。对比图 4(a)和图 5 可知,应变强化后试件进行二次加载时,仅有少量声发射信号。根据 Kaiser 效应,这说明应变强化过后在达到上次的最大载荷前,试件中没有发生塑性变形,几乎没有声发射源。试件中的组织变化使材料具备抵抗变形的能力,说明应变强化过后材料能够准确地记忆卸载历史,当再次加载时材料内部细观组织较为稳定,所以应变强化能提高材料抵抗变

形的能力,即提高了材料的屈服强度。

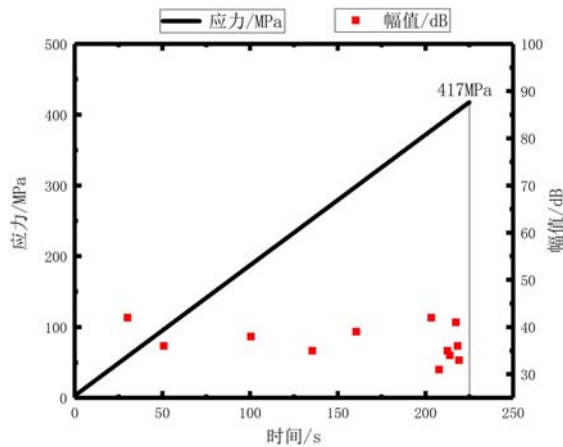


图5 强化后二次加载幅值和拉伸载荷时间历程图

Fig. 5 Schematic diagram of amplitude and tensile load vs time of the secondary loading after hardening

为了避免前期干扰点,本文通过设置门槛值来跨越干扰点。通过 MATLAB 软件计算,得出 Kaiser 效应点在图 6(a)中为时间轴上 203s 的点,在图 6(b)中为时间轴上 204s 的点,在图中读取该时间点对的应力值,即为 Kaiser 效应临界点应力值 σ'_k 。

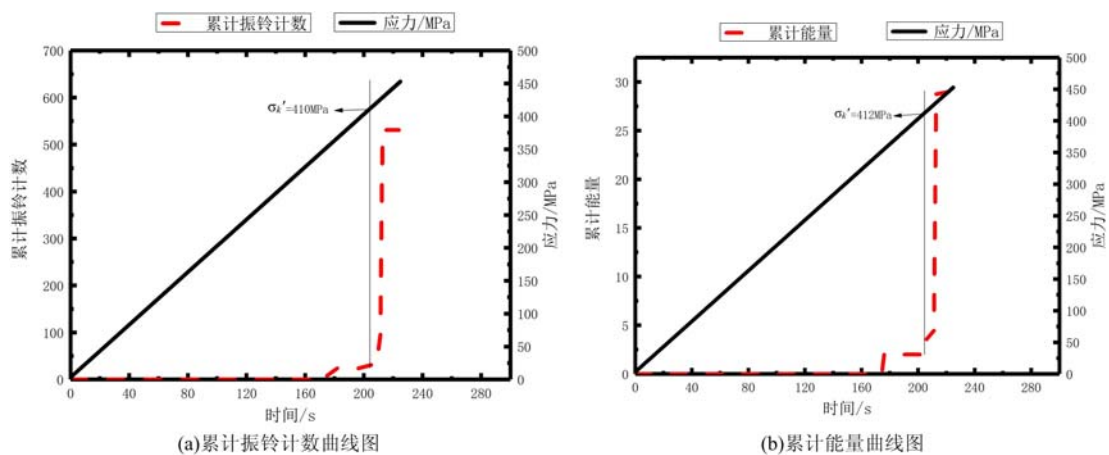


图6 加载速率为 2.0mm/min 下的累计振铃计数和累计能量曲线图

Fig. 6 Cumulative counts and cumulative energy curves at a loading rate of 2.0mm/min

根据上述方法,绘制出不同加载速率下的累计振铃计数及累计能量曲线图,采用跳跃点法求得各加载速率下的强化应力及 F 值,取平均值后的数据列于表 2。

表2 不同加载速率下采用不同参数测得的强化应力及 F 值

Tab. 2 Stresses and F ratio measured with different parameters at different loading rates

加载速率 (mm/min)	强化应力 σ_k /MPa	Kaiser 效应临界点应力值 σ'_k /MPa		F 值	
		累计振铃计数	累计能量	累计振铃计数	累计能量
0.1	442	414	419	0.94	0.95
0.5	440	419	421	0.95	0.96
1.0	437	398	407	0.91	0.93
2.0	410	401	404	0.98	0.99
3.0	439	404	406	0.92	0.92
4.0	438	406	407	0.93	0.93

从表2可以看出,使用累计能量和累计振铃计数曲线图得出的 Kaiser 效应临界点的 F 值均为 0.9 以上,因此根据这两种特征参数的累计值绘出的曲线均能够清晰地得出 Kaiser 效应临界点,即能清晰反映强化过程材料内部组织结构变化程度,也就是材料能够抵抗变形的能力的大小。两种参数虽然得出的总体规律相差不大,但是根据图6,就最大拐点而言,累计振铃计数曲线较累计能量曲线拐点相对明显,表明累计振铃计数曲线对 S30408 钢应变强化过程 Kaiser 效应临界点应力值有较好的识别能力。并且从图7中可以看出,在加载速率为 2.0mm/min 时, F 值最高,说明在此加载速率下,S30408 钢内部组织发生变化所获得的抵抗变形的最大应力值最接近于强化应力值,即在这个加载速率下,应变强化的效果最为理想。

4 结论

(1) 根据应变强化原理和声发射 Kaiser 效应原理,提出采用二次加载方式,利用声发射特征参数曲线获得 Kaiser 效应临界点应力值,通过计算 Felicity 比值对应变强化效果进行评价的方法;

(2) 对 S30408 钢应变强化过程及二次加载过程进行声发射测试实验,采用跳跃点法,通过累计振铃计数和累计能量与载荷历程图,获得 Kaiser 效应临界点应力值,得到不同加载速率下的 Felicity 比值,根据 F 值可对应变强化效果进行评估;

(3) 通过对不同加载速率下的 F 值进行比较可知,在本次实验条件下,当加载速率为 2.0mm/min 时,S30408 钢应变强化效果最为理想,其 F 值为 0.98,强化后试件能抵抗住而不发生塑性变形的应力值最接近于强化过程施加的应力值。

参考文献:

- [1] 郑津洋,李雅娴,徐平,等.应变强化用奥氏体不锈钢力学性能影响因素[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2011,12(5):512-519 (ZHENG Jinyang, LI Yaxian, XU Ping, et al. Influencing factors of mechanical properties of austenitic stainless steel for strain hardening [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 12 (5):512-519 (in Chinese))
- [2] 苏文娟.奥氏体不锈钢深冷容器应变强化不同保载方式的探讨[J].压力容器,2016,33(7):1-5 (SU Wenjuan. Discussion on different load-keeping methods of strain hardening of austenitic stainless steel cryogenic vessels [J]. Pressure Vessel Technology, 2016, 33(7):1-5 (in Chinese))
- [3] ASME BPVC-Ⅷ-Ⅰ-2013, Mandatory Appendix 44, Cold Stretching of Austenitic Stainless Steel Pressure Vessels [S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [4] 岳亚霖,韦朋余,张炜,等.船用金属材料声发射信号特性研究[J].实验力学,2008,23(6):496-501 (YUE Yalin, WEI Pengyu, ZHANG Wei, et al. Investigation on characteristics of acoustic emission for marine metal materials [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23 (6):496-501 (in Chinese))
- [5] Rabiei Masoud, Modarres Mohammad. Quantitative methods for structural health management using in situ acoustic emission monitoring[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 49:81-89.
- [6] 白衫.深冷奥氏体不锈钢应变强化技术研究[D].上海:华东理工大学,2011 (BAI Shan. Study on strain hardening technology of cryogenic austenitic stainless steel [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011 (in Chinese))
- [7] 沈功田.声发射检测技术及应用[M].北京:科学出版社,2015 (SHEN Gongtian. Acoustic emission detection technology and application [M]. Beijing: Science Press, 2015 (in Chinese))

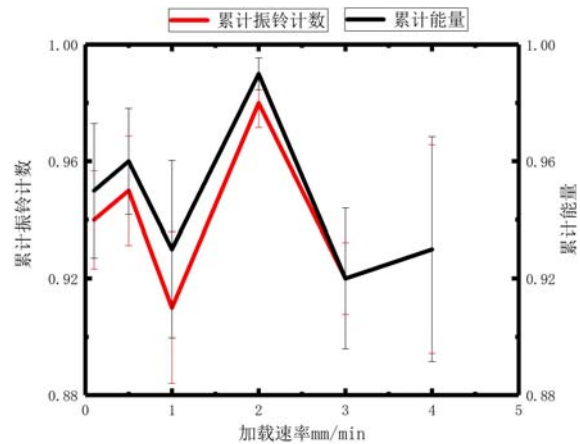


图7 不同参数曲线求得的 F 值曲线图

Fig. 7 F -curve from different parameter curves

- [8] Direction of the Engineering Sector Policy and Strategy Committee. Cryogenic vessels-static vacuum insulated vessels (Part 2): fabrication and testing (EN13458-2-2002) [S]. Brussels: Standards Policy and strategy Committee, 2002.
- [9] Lavrov A. The Kaiser effect in rocks: Principles and stress estimation techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts, 2003, 40:151-171.
- [10] 李浩然, 杨春和, 刘玉刚, 等. 花岗岩破裂过程中声波与声发射变化特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10):1915-1923 (LI Haoran, YANG Chunhe, LIU Yugang, et al. Experimental study on the characteristics of acoustic wave and acoustic emission during granite rupture [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10):1915-1923 (in Chinese))
- [11] GB/T 26646-2011, 无损检测 声发射检测 小型部件声发射检测方法[S]. 北京:中国质检出版社, 2012 (GB/T 26646-2011, Non-destructive testing-Acoustic emission detection of small components - Acoustic emission detection method [S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2012 (in Chinese))
- [12] 韩豫, 陈学东, 刘全坤, 等. 奥氏体不锈钢应变强化工艺及性能研究[J]. 机械工程学报, 2012(2):87-92 (HAN Yu, CHEN Xuedong, LIU Quankun, et al. Study on strain hardening process and properties of austenitic stainless steel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012(2):87-92 (in Chinese))

Experimental study of S30408 steel strain strengthening effect by acoustic emission measurement

ZHANG Ying¹, ZHANG Wei¹, GAO Han², LIU Yan-lei³

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China; 2. Daqing Chemical Research Center of China Petroleum and Petrochemical Research Institute, Daqing 163318, Heilongjiang, China; 3. Hangzhou Special Equipment Inspection Institute, Hangzhou 310003, Zhejiang, China)

Abstract: According to kaiser effect and the principle of strain strengthening, a method of determining critical point stress of kaiser effect is put forward in this paper by using acoustic emission characteristic parameters, and then strain strengthening effect is evaluated by calculating Felicity ratio. Taking s30408 steel as an example, the strain strengthening process and the secondary loading process after strengthening were tested by acoustic emission. Experimental results show that the Kaiser effect point stress values of the after-hardening specimens can be obtained by using the time charts of characteristic parameters such as acoustic emission cumulative energy and cumulative count. Through the calculation and analysis of the experimental data, the Felicity ratios of all specimens under different loading rates are all greater than 0.9, and the Felicity ratio is the highest under 2.0 mm/min loading rate, which shows that the strain hardening effect is the most ideal under this loading rate.

Keywords: S30408 steel; strain hardening; acoustic emission; Kaiser effect; Felicity ratio