

文章编号: 1000-7032(2018)09-1225-08

SrAl₂O₄:Eu,Ho/树脂应力发光薄膜 在焊缝缺陷检测中的应用

郑升辉¹, 刘亚楠¹, 李月婵¹, 付晓燕^{1*}, 张洪武^{2*}

(1. 厦门理工学院 材料科学与工程学院, 福建省功能材料及应用重点实验室, 福建 厦门 361024;

2. 中国科学院 城市环境研究所, 福建 厦门 361021)

摘要: 采用高温固相法合成 SrAl₂O₄:Eu,Ho 应力发光材料。XRD 结果表明,所合成的样品较纯,掺杂离子并未改变基质材料的基体结构。将 SrAl₂O₄:Eu,Ho(SAOEH) 应力发光粉末与树脂混合制备复合应力发光薄膜。光谱结果表明,薄膜的发光随着厚度的增加而增强;薄膜的 SEM 结果表明,SAOEH 粉体颗粒均匀分散在树脂中。将应力发光薄膜应用于钢板焊缝处背面,应力测试结果表明薄膜应力发光先增强后减弱。当薄膜厚度为 0.9 mm 时,应力发光最强,且在焊缝处可得到较高的响应值。此外,在循环测试的过程中,应力发光薄膜可对焊板断裂实现实时响应,结合 CCD 相机可实现钢板焊缝检测的可视化,并对缺陷定位。

关键词: SrAl₂O₄:Eu,Ho/树脂薄膜; 应力发光; 缺陷监测; 荧光传感

中图分类号: O482.31

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20183909.1225

Application of SrAl₂O₄:Eu,Ho/Resin Mechanoluminescence Thin Film in Visualization Detection of Weld Seam Defects

ZHENG Sheng-hui¹, LIU Ya-nan¹, LI Yue-chan¹, FU Xiao-yan^{1*}, ZHANG Hong-wu^{2*}

(1. School of Materials Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Key Laboratory of Functional Materials and Applications of Fujian Province, Xiamen 361024, China;

2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

* Corresponding Authors, E-mail: fuxiaoyan@xmut.edu.cn; hwzhang@iue.ac.cn

Abstract: Mechanoluminescence (ML) materials SrAl₂O₄:Eu,Ho(SAOEH) were prepared *via* solid state reaction. The XRD results show that the as-prepared sample is mostly monoclinic SrAl₂O₄ phase. The SAOEH powder was mixed with high elastic resin to prepare ML thin film. The photoluminescent intensity of the ML film increases following the increase of film thickness. The SEM results reveal that SAOEH ML particles disperse uniformly in the resin. In order to detect the weld seam defects, the SAOEH ML film was pasted in the backside of welding steel plate. It can be found that the ML intensity in the weld region is stronger than that in any other region. In addition, the ML intensity is enhanced following the increase of film thickness and reaches the strongest when the film thickness is 0.9 mm. Furthermore, the SAOEH film can be utilized to realize a real-time response to the fracture. Combining with CCD camera, the visual detection of steel weld and location of the defect region during the cyclic test can be realized.

Key words: SrAl₂O₄:Eu,Ho/resin films; mechanoluminescence; defect monitoring; fluorescence sensing

收稿日期: 2017-12-10; 修订日期: 2018-01-26

基金项目: 福建省科技厅国际合作重点项目(2018J0018); 2017年度福建省高校新世纪优秀人才项目; 国家自然科学基金(51102201)资助项目 Supported by Key Project of International Cooperation of Fujian Provincial Science and Technology Department (2018J0018); Outstanding Talents of The New Century in Fujian University in 2017; National Natural Science Foundation of China(51102201)

1 引 言

随着国内外机械故障诊断技术的迅速发展,先进的现代诊断技术成为研究的热点。无损检测已经不再局限于 X 射线,包括声、电、磁、光等各种物理现象几乎都被用于无损检测,如利用振动法检测、超声波检测、射线照相检测、激光全息检测、涡流检测、磁粉检测、微波测试法、脆性涂层法、渗透探伤法、光纤内窥技术、油液分析技术等^[1-3]。但这些诊断技术仍然存在一些缺点,大部分方法只能提供离线的监测,并需要专业的检验人员,不能对机械运行中的突发事故给以预警,这就需要一种实时的检测系统,能够针对特定的缺陷做出及时响应,达到预警的目的。目前机械部件的拼接过程仍涉及到焊接工艺,如激光焊、电弧焊、气焊等。这些机器在运行的过程中难免会经受冲击和振动。长时间的运行和冲击振动会使机器的整体性能降低,并且在焊接的部位容易产生各种缺陷,比如磨损、裂缝等故障,甚至出现零件断裂,这些都有可能严重导致事故^[4]。所以焊接部位的可靠性也是影响机械安全的一个重要因素,对于不可避免而产生的疲劳缺陷,只能靠定期和日常检修来保障安全。但在检测的过程中拆卸零件步骤比较繁琐,鉴于这种需求,可以采用无损检测的方法。针对以上分析结果,我们可结合应力发光材料对缺陷部位进行可视化,可直观、实时表征部件表面应力分布情况^[5-9]。大量研究表明,应力发光材料可对外力实现力-光转换,达到检测的目的^[10-14]。但作为一种新提出的检测技术,应力发光材料的应用研究还有许多技术问题有待解决,如应力发光灵敏度低、发光材料与基体结合差等^[15]。为解决以上问题,我们通过合成高亮度应力发光粉体并与树脂结合制备应力发光薄膜,提高材料的稳定性和与基体结合的能力。

本研究在基于应力发光材料合成、应力发光薄膜制备、不同应力发光薄膜发光强度的影响因素的基础上,为了进一步确定应力发光薄膜对钢板缺陷的响应情况,我们采用 CCD 相机对钢板上的薄膜进行拍照处理,通过采用相关软件对采集图片进行处理等相关实验,研究钢板上的缺陷与应力发光薄膜发光强度的对应关系,为应力发光薄膜的应用打下基础。

2 实 验

2.1 样品的制备

2.1.1 应力发光粉体 $\text{Sr}_{0.975}\text{Al}_{1.97}\text{O}_4:\text{Eu}_{0.025},\text{Ho}_{0.075}$ (SAOEH) 的制备

样品的制备采用典型的高温固相法,按化学计量比称取 SrCO_3 (AR)、 Al_2O_3 (AR)、 Eu_2O_3 (99.99%)、 Ho_2O_3 (99.99%),置入玛瑙研钵中,加入适量乙醇使其充分混合,充分研磨至粉末态。将研磨好的粉末盛放在坩埚中,放入高温炉中,空气中 800 °C 预烧 2 h,冷却至室温后继续研磨 1 h。之后将样品放入高温气氛管式炉中,在弱还原气氛(5% H_2 -95% Ar)中 1300 °C 煅烧 4 h,自然冷却至室温取出,研细即为所需发光材料 SAOEH。

2.1.2 SAOEH 应力发光薄膜的制备

将上述制得的粉末样品 SAOEH 和透明树脂按质量比为 1:1 比例混合均匀后,加入少量的固化剂稍加搅拌;然后放入真空干燥箱中抽真空,保持至 0.02 MPa,5 min 后取出,减少发光薄膜中的气泡;将抽完真空的混合样品倒进之前准备好的不同厚度的模具里,表面弄平滑之后静置 24 h,最后将薄膜从模具里取出,就得到我们需要的不同厚度的应力发光薄膜。

2.2 表征方法

采用 Panalytical X'pert PRO X 射线粉末衍射仪测定样品的晶体结构,参数为 $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0.154056\text{ nm}$),管电压为 40 kV,管电流为 40 mA,扫描步长为 0.026°;薄膜的激发和发射光谱采用爱丁堡瞬态荧光光谱仪 FLS920 测定。薄膜的形貌和结构采用 ZEISS IGMA 扫描电镜进行观察。为了测量钢板表面应力发光薄膜的应力发光强度,我们采用实验室自组装的系统。采用岛津力学试验机的卡钳装置固定钢板,在升降台处放置光子感应器或 CCD 相机,对钢板样品施加压缩、拉伸等不同形式的应力行为。在施加应力的同时,对样品发出的应力发光信号进行探测,获得应力发光样品的各种光学特性。具体实施步骤为:将制备好的发光薄膜粘附于钢板上,经 365 nm 紫外灯照射 30 s,然后固定在力学实验机上,间隔 2 min 后进行力学实验。采用 HAMAMATSU C9692 光子检测仪(光子检测仪以 50 ms 测定一个点)检测指定区域应力发光薄膜的发光强度,收集单位时间内应力发光薄膜指定区域的光子

数。可视化测试采用安道尔 Ixon Ultra 888 CCD 相机对负载过程中的钢板进行图像采集,曝光时间为 0.01 ~ 10 s,相机制冷温度为 -65 ℃,测试在不同条件下,钢板表面应力发光薄膜应力发光情况,在测试前样品在 365 nm 紫外灯下照射 30 s,间隔 2 min 后进行相关实验。之后采用 Andor Solid 和 orgin8.5 软件对采集到的图像进行处理,得到应力发光薄膜发光强度云图。

3 结果与讨论

3.1 样品的 XRD 分析

图 1 为合成样品 SAOEH 的 X 射线衍射(XRD)图谱。发现各个衍射峰数据与标准卡片(PDF #01-034-0379)数据基本一致,合成的样品主要晶相是单斜晶系 P2₁ 结构^[16],SAOEH 样品中仅存在少量的 Al₂O₃ (* 标注),说明所得的样品较纯;样品的主要衍射峰未出现偏移改变等现象,说明加入少量的 Ho³⁺ 和 Eu²⁺ 离子并未改变样品的晶体结构。

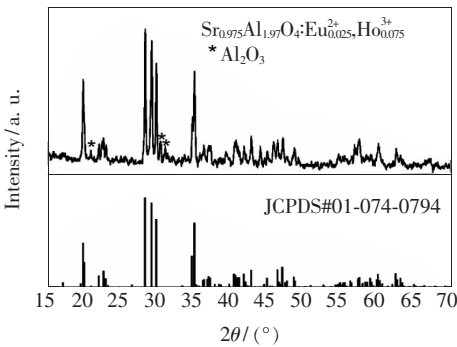


图 1 SAOEH 的 XRD 图

Fig. 1 XRD patterns of SAOEH samples

3.2 SAOEH/树脂复合应力发光薄膜的光致发光光谱

图 2(a) 所示为 SAOEH 薄膜的发射和激发光谱。在 365 nm 波长的激发下,SAOEH 的发射光谱为宽峰发射,且峰值位于波段 450 ~ 650 nm 之间。发射峰最大值在 521 nm 处,说明发光中心为 Eu²⁺^[17]。同样,以 521 nm 作为监测波长,得到该样品的激发光谱。在 512 nm 的监测下,SAOEH 的激发光谱呈现出一个宽峰的状态,且峰值位于波长 275 ~ 450 nm 之间的激发带,是典型的 Eu²⁺ 电子 4f⁶5d 至 4f⁷ 产生的跃迁发光。当 Eu²⁺ 受激发后,基态电子 4f⁷ 受激跃迁到 5d 能级(激发态)变成 4f⁶5d,之后激发态重新辐射跃迁回到基态 4f⁷ 从而产生绿色发光^[18]。从样品的发射与激发

光谱中未观察到 Ho³⁺ 的发射与激发峰,说明 Ho³⁺ 并未作为发光中心。图 2(b) ~ (c) 所示为不同厚度(0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 2 mm)应力发光薄膜的发射光谱和发光强度对比,可以看出,薄膜的发光强度随着其厚度的增加而增大,具有良好的线性关系,经 365 nm 紫外灯激发后,可明显地观察到绿色余辉发光。

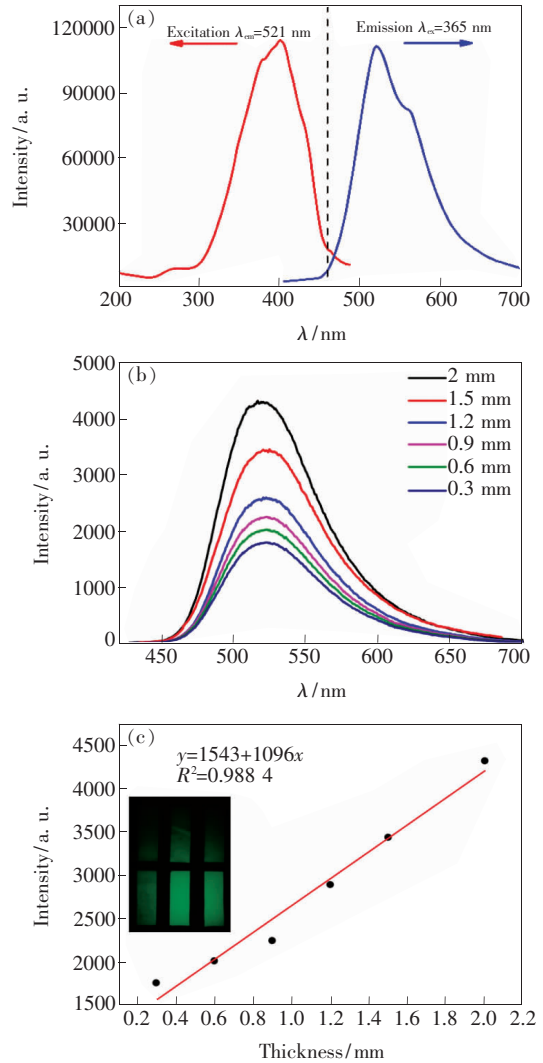


图 2 (a)SAOEH 发光薄膜的发射和激发光谱;(b)不同厚度 SAOEH 发光薄膜的发射光谱;(c)不同厚度 SAOEH 发光薄膜的发射强度,插图为薄膜的发光照片。

Fig. 2 (a) Emission and excitation spectra of SAOEH luminescent film. (b) Dependence of the emission spectra different thickness films. (c) Luminescence intensity of luminescent films with different thickness, the insert depicts the luminescence of films.

3.3 SAOEH/树脂复合应力发光薄膜的微观形态观察

图 3 所示为 SAOEH/树脂复合应力发光薄

膜在不同倍数下的 SEM 图片,可以看到在微观条件下,SAOEH 发光粉体均匀地镶嵌在树脂中,形成融合良好的发光薄膜。但是,由于是采用高温法合成 SAOEH 应力发光粉体,所以薄膜上仍然有一部分大颗粒粉体存在。同时,在 SEM 图中未发现明显的气泡微孔,这是由于薄膜在

制备前经过抽真空处理,大量减少了薄膜内部的气泡,提高了薄膜的抗疲劳性能。当外部机械力(如拉伸、压缩、剪切)作用于应力发光薄膜时,在外力的作用下,树脂发生弹性形变,部分能量传递给薄膜内部的 SAOEH 粉体颗粒,产生应力发光。

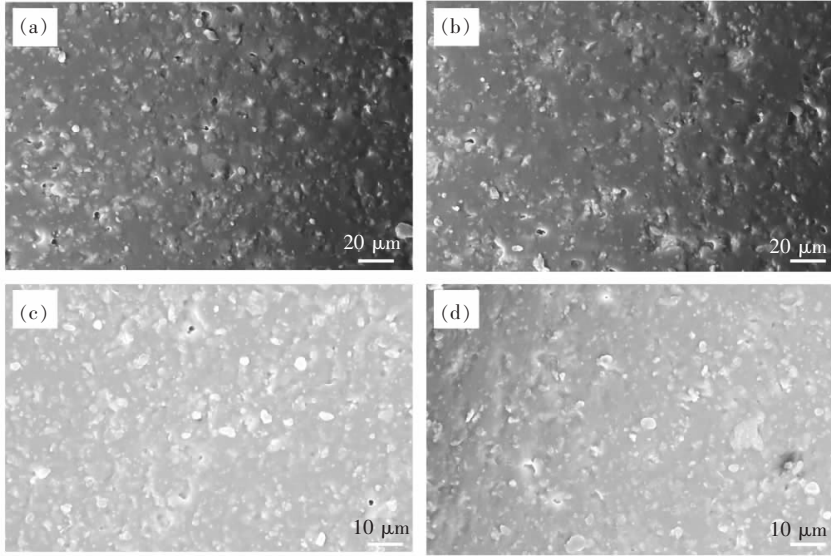


图 3 SAOEH/树脂发光薄膜的 SEM 图片
Fig. 3 SEM images of SAOEH luminescent film

3.4 不同厚度 SAOEH 应力发光薄膜在焊板上的应力发光曲线

图 4 所示为采用 SAOEH 应力发光薄膜实现力-光信号转换来检测焊接钢板应力响应。我们将不同厚度的应力发光薄膜裁为同等长宽(1.5 cm × 3 cm)均匀贴到厚度为 0.8 mm 的 304 钢板上,如图 4(a)所示。采用 C9692 光子检测器分别检测钢板上薄膜的应力发光强度值,光子检测器计数间隔为 50 ms 一个点,采用 365 nm 紫外灯激发 30 s,间隔 2 min,加载拉力为 1 500 N,拉伸速度为 10 mm/min,测得应力发光强度值。应力检测结果如图 4(b)所示,随着薄膜厚度的增加,薄膜的应力发光强度逐渐增大,当厚度为 0.9 mm 时应力发光强度达到最大,随后应力发光强度随厚度减弱,原因可能是当薄膜厚度较薄时,薄膜内部应力发光粉体较少,造成应力发光响应值较低;当薄膜厚度超过 0.9 mm 时,由于薄膜过厚,钢板受力所产生的形变不易传递到更厚的薄膜层,并且薄膜余辉可能影响接触面应力发光强度,使薄膜应力发光强度降低。因此,在后续的焊缝检测试验中我们选择 0.9 mm 厚的薄膜作为研究对象。

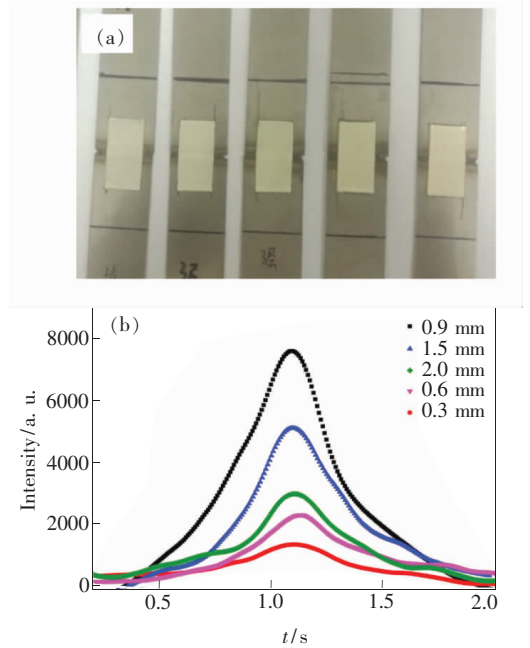


图 4 (a) 钢板上的不同厚度的 SAOEH 应力发光薄膜;
(b) 钢板上不同厚度 SAOEH 应力发光强度。
Fig. 4 (a) Different thickness SAOEH films on steel plates.
(b) Mechanoluminescence intensity of SAOEH with different thickness on steel plates.

3.5 应力发光薄膜对钢板缺陷响应

在前面薄膜厚度的研究基础上,为了进一步研究应力发光薄膜对钢板焊缝的响应情况,如图 5 所示,在激光焊接的 304 钢板背面制备厚度为 0.9 mm 的应力发光薄膜,用 365 nm 紫外灯照射 30 s,间隔 2 min,设定最大循环拉力 1 500 N,拉伸速度为 10 mm/min。分别在焊缝的上端 10 mm、焊缝处、焊缝下端 10 mm 取 3 个不同点(①、②、③、

③)测试薄膜的应力发光强度。图①、②、③分别为薄膜上不同的 3 个点所测得的应力发光强度与加载拉力的对应关系,从应力发光强度上明显可见,处于焊接处的薄膜应力发光强度明显大于钢板其他位置薄膜应力发光强度,②的强度值分别比①和③高 48.4% 和 47.8%,说明钢板焊接处为应力集中处,使用 SAOEH 应力发光薄膜能够有效地响应负载板材上的应力分布状况。

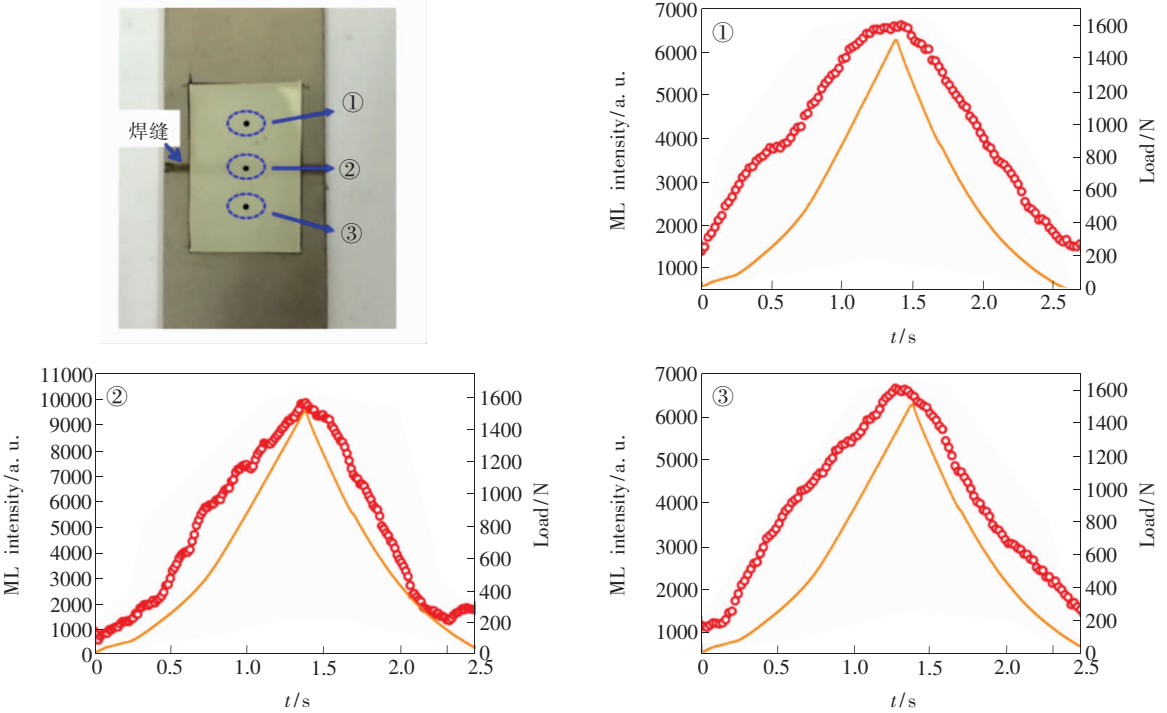


图 5 薄膜不同点的应力发光强度值

Fig.5 Mechanoluminescence intensities of the films at different points

3.6 应力发光薄膜对焊板断裂的响应

为了研究钢板断裂时 SAOEH 薄膜的应力发光特性,我们同样在焊接钢板上制备 0.9 mm 厚的应力发光薄膜并进行循环拉伸实验,如图 6 所示,钢板上的 SAOEH 应力发光薄膜在 365 nm 紫外灯下照射 30 s,间隔 2 min,设定最大循环拉力为 4 500 N,拉升速度为 15 mm/min,在焊缝区域测得薄膜应力发光强度与拉力的对应关系。从图中可以看出,在前 5 次施加拉力的过程中,应力发光薄膜的发光强度与拉力成线性关系,直到第 6 次循环时,钢板产生疲劳断裂,在断裂过程中薄膜发光强度急剧上升,出现非常可观的信号强度,随后迅速减弱。这一实验结果表明,SAOEH 应力发光薄膜具有检测焊接缺陷的可行性和实用性。当焊缝区域承受正常范围的应力时,SAOEH 应力发

光薄膜的应力发光强度会稳定在一定范围,随应力变化在一定的范围内波动。而当焊缝区域承受的力突然超出这一范围出现断裂,SAOEH 薄膜的

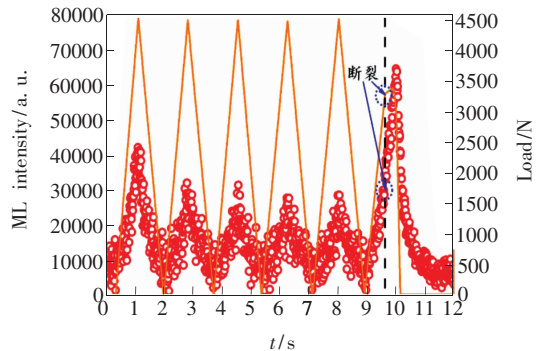


图 6 钢板焊缝疲劳断裂时薄膜的应力发光曲线

Fig.6 Mechanoluminescence curve of steel plate during fatigue fracture

应力发光强度就会随之大幅度增大,超出阈值,出现可监控的信号强度,这样就可以对将要发生的危险进行预警,防患于未然。因此,SAOEH 应力发光薄膜可以做到对焊缝缺陷的实时检测。

3.7 应力发光薄膜对钢板焊缝检测的可视化

图 7 展示了应力发光薄膜对钢板焊缝可视图片。如图 7(a)所示,将 0.8 mm 厚的激光焊接钢板背面用砂纸打磨平整,贴上应力发光薄膜,并结

合 CCD 相机对薄膜进行图像采集,先对薄膜采集背景发光强度,如图 7(b)所示,应力发光薄膜背景发光强度均匀,无明显亮点;之后对焊接的钢板施加 4 000 N 的拉力,拉伸速度为 10 mm/min,相机曝光时间为 3 s,得到薄膜应力发光图片,如图 7(c)所示。可见,薄膜的整体发光强度提高,特别是在钢板的中间焊缝连接区域,薄膜的应力发光强度值明显大于其他区域。

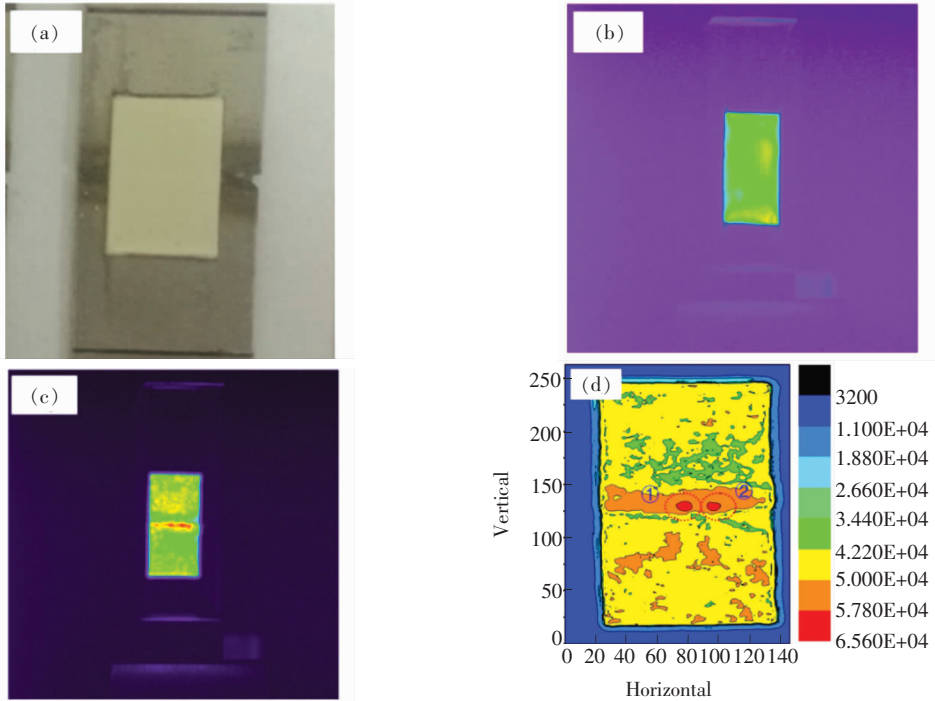


图 7 应力发光薄膜对钢板焊缝的可视化

Fig. 7 Visualization of steel weld defects

在图 7(d)中,可明显地观察到钢板上焊缝对应的薄膜应力发光,通过对数据进行处理并结合二维坐标数据,我们可以确定焊缝处的应力集中点(X, Y),如图 6(d)中①(77, 132)和②(97, 131)两点,说明利用应力发光薄膜与图像采集技术结合可实现对缺陷的可视化监测,这就为我们对隐患处进行修补提供了准确的位置以及破损程度等信息。

4 结 论

本文采用高温固相法制备高亮度应力发光材料 SAOEH,并结合树脂高分子制备应力发光薄膜,探究其在焊接缺陷、裂纹等无损检测中的潜在应用。实验结果表明:SAOEH 应力发光薄膜最大发射峰在 521 nm,是典型的 Eu^{2+} 的 $5d \rightarrow$

$4f(4f^65d$ 组态到基态 $4f^7$) 跃迁发光,绿色余辉肉眼可见;薄膜的电镜结果表明应力发光粉体均匀镶嵌在树脂中,并且真空处理后消除了薄膜上大量气泡微孔。当薄膜厚度为 0.9 mm 时,其在钢板上应力发光强度最大。同样,薄膜对钢板焊缝缺陷具有良好的响应值,薄膜在焊接处表现出较高的响应值,当焊接钢板疲劳断裂时,应力发光薄膜可产生实时响应。其次,我们针对焊缝缺陷进行可视化分布研究,发现应力发光薄膜在板材背面也可对钢板的缺陷达到高灵敏检测的效果,特别是在焊缝处,不仅能够显示应力的分布状态,而且可根据薄膜的应力发光强度确定基板应力相对大小,定位缺陷的位置,说明利用应力发光薄膜可实时监测基板的应力状态,并达到缺陷预警的目的。

参 考 文 献:

- [1] 李建忠, 刘国奇, 陈振华, 等. 基于小波包分解的不锈钢焊缝超声 TOFD 检测信号及缺陷信号提取 [J]. 无损检测, 2015, 37(1):38-41.
LI J Z, LIU G Q, CHEN Z H, *et al.*. Defect signal extraction on ultrasonic TOFD testing signal of stainless steel weld based on wavelet packet decomposition [J]. *Nondestruct. Testing*, 2015, 37(1):38-41. (in Chinese)
- [2] 李晓丽, 金万平, 张存林, 等. 红外热波无损检测技术应用与进展 [J]. 无损检测, 2015, 37(6):19-23.
LI X L, JIN W P, ZHANG C L, *et al.*. The application and progress of infrared thermal wave nondestructive detection technology [J]. *Nondestruct. Testing*, 2015, 37(6):19-23. (in Chinese)
- [3] 刘彦斌, 薄玉发, 刁明, 等. 浅谈无损探伤在铸件检测中的应用 [J]. 铸造工程, 2015(5):38-41.
LIU Y B, BO Y F, DIAO M, *et al.*. Discussion on the application of nondestructive testing in casting inspection [J]. *Found. Eng.*, 2015(5):38-41. (in Chinese)
- [4] 张文妍. 机车车辆关键部位焊缝的涡流探伤技术研究 [D]. 大连:大连交通大学, 2013.
ZHANG W Y. *Research on The Technology of Eddy-Current Detection for Railway Vehicle Welding Defects* [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [5] TU D, PENG D F, XU C N, *et al.*. Mechanoluminescence properties of red-emitting piezoelectric semiconductor MZnOS: Mn²⁺ (M = Ca, Ba) with layered structure [J]. *J. Ceram. Soc. Jpn.*, 2016, 124(6):702705.
- [6] 付晓燕, 房立均, 付海霞, 等. 紫外应力发光材料 SrMgSi₂O₆:Ce 的制备与光谱性质研究 [J]. 发光学报, 2013, 34(8):1006-1010.
FU X Y, FANG L J, FU H X, *et al.*. Ultraviolet mechanoluminescence from SrMgSi₂O₆:Ce [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(8):1006-1010. (in Chinese)
- [7] FUJIO Y, XU C N, TERASAWA Y, *et al.*. Sheet sensor using SrAl₂O₄:Eu mechanoluminescent material for visualizing inner crack of high-pressure hydrogen vessel [J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2016, 41(2):1333-1340.
- [8] ZHANG J C, ZHAO L Z, LONG Y Z, *et al.*. Color manipulation of intense multiluminescence from CaZnOS: Mn²⁺ by Mn²⁺ concentration effect [J]. *Chem. Mater.*, 2015, 27(21):7481-7489.
- [9] LEELACHAO S, MURAIISHI S, SANNOMIYA T, *et al.*. Correlation of triboluminescence and contact stresses in ZnS: Mn/polymeric matrix composite [J]. *J. Lumin.*, 2016, 170:24-29.
- [10] 付晓燕, 房立钧, 郑升辉, 等. 超声引起的 SrAl₂O₄:Eu, Dy 薄膜的应力发光 [J]. 发光学报, 2016, 37(9):1066-1070.
FU X Y, FANG L J, ZHENG S H, *et al.*. Mechanoluminescence of SrAl₂O₄:Eu, Dy film induced by ultrasound [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(9):1066-1070. (in Chinese)
- [11] ZHANG H W, XU C N, TERASAKI N, *et al.*. Detection of stress distribution using Ca₂MgSi₂O₇:Eu, Dy microparticles [J]. *Phys. E: Low-Dimens. Syst. Nanostruct.*, 2010, 42(10):2872-2875.
- [12] FU X Y, ZHANG H W, FANG L J, *et al.*. Preparation and mechanoluminescent properties of SrAl₂O₄:Eu film grown on silicon substrate using double buffer layers [J]. *Thin Solid Films*, 2013, 540:41-45.
- [13] 傅胤荣, 胡义华, 金亚洪. 应力发光材料 BaZrSi₃O₉ 的制备与发光特性研究 [J]. 广东工业大学学报, 2015, 32(4):17-20.
FUY R, HU Y H, JIN Y H. Preparation and mechanoluminescent properties of BaZrSi₃O₉ [J]. *J. Guangdong Univ. Technol.*, 2015, 32(4):17-20. (in Chinese)
- [14] WANG X, XU C N, YAMADA H, *et al.*. Electro-mechano-optical conversions in Pr³⁺ doped BaTiO₃-CaTiO₃ ceramics [J]. *Adv. Mater.*, 2005, 17(10):1254-1258.
- [15] ZHAO H, WANG X, LI J, *et al.*. Strong mechanoluminescence of Zn₂(Ge_{0.9}Si_{0.1})O₄:Mn with weak persistent luminescence [J]. *Appl. Phys. Express*, 2016, 9(1):012104.
- [16] ZHANG H, YAMADA H, TERASAKI N, *et al.*. Ultraviolet mechanoluminescence from SrAl₂O₄:Ce and SrAl₂O₄:Ce, Ho [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(8):081905-1-3.
- [17] CHEN Y, WANG J, LIU C, *et al.*. UV-Vis-NIR luminescence properties and energy transfer mechanism of LiSrPO₄:Eu²⁺, Pr³⁺ suitable for solar spectral convertor [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(3):3161-3169.

- [18] TIGGA S, BRAHME N, BISEND P. Effect of gamma irradiation on thermoluminescence and fractomechanoluminescence properties of $\text{SrMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ phosphor [J]. *Opt. Mater.*, 2016, 53:109-115.



郑升辉(1992 -)男,福建莆田人,硕士研究生,2015年于厦门理工大学获得学士学位,主要从事稀土发光材料的研究。

E-mail: shzheng100@gmail.com



张洪武(1975 -),男,山东青岛人,博士,研究员,博士生导师,2005年于中国科学院大连化学物理研究所获得博士学位,主要从事各种颜色新型荧光传感器的研究。

E-mail: hwzhang@iue.ac.cn



付晓燕(1977 -),女,山东烟台人,博士,教授,2006年于辽宁师范大学获得博士学位,主要从事新型发光材料开发、新型功能薄膜材料以及传感器等方面的研究。

E-mail: fuxiaoyan@xmut.edu.cn