

激光声表面波技术在材料加工表面损伤检测中的应用

李杰*, 胡沛静, 陈晨

(铜陵学院, 铜陵 244061)

摘要: 激光声表面波技术是一种新兴的无损检测方法, 在材料加工表面损伤评估中展现出独特优势。本文重点探讨了该技术在表面裂纹、粗糙度和热损伤定量表征方面的应用。通过激光激发表面波并分析其传播特性, 实现了高灵敏度、强量化能力的损伤检测。优化激励-接收方案和信号处理算法, 可进一步提升检测性能。实验研究表明, 表面波的时频域特征参数与损伤量纲间存在确定性关联, 为工程应用奠定了基础。

关键词: 激光声表面波; 无损检测; 表面损伤; 材料加工; 定量表征

Application of laser surface acoustic wave technology in surface damage detection of material processing

LI Jie*, HU Pei-Jing, CHEN Chen

(Tongling University, Tongling 244061, China)

ABSTRACT: Laser surface acoustic wave technology is an emerging non-destructive testing method that exhibits unique advantages in surface damage assessment during material processing. This article focuses on the application of this technology in the quantitative characterization of surface cracks, roughness, and thermal damage. High sensitivity and strong quantification ability for damage detection have been achieved through laser excitation of surface waves and analysis of their propagation characteristics. Optimizing the incentive reception scheme and signal processing algorithm can further improve detection performance. Experimental studies have shown that there is a deterministic correlation between the time-frequency domain characteristic parameters of surface waves and the damage dimension, laying the foundation for engineering applications.

KEY WORDS: laser surface acoustic wave; non destructive testing; surface damage; material processing; quantitative characterization

0 引言

随着现代工业的快速发展, 材料加工技术日新月异。然而, 在加工过程中难免会出现各种表面损伤, 如裂纹、变形、热影响等, 严重影响材料的性能和使用寿命。及时、准确地检测和评估这些损伤, 对保证产品质量和安全性能非常重要^[1]。传统的无损检测方法, 如渗透检测、磁粉检测等, 虽然可用于检测

表面缺陷, 但存在一些局限性, 如灵敏度有限、检测效率低下、对材料或环境条件要求较高等。而激光声表面波技术作为一种新兴的无损检测方法, 凭借其非接触、高灵敏、适用性强以及量化能力等独特优势, 在材料表面损伤检测领域展现出广阔的应用前景。本文将重点探讨激光声表面波技术在材料加工表面裂纹、粗糙度和热损伤评估中的应用研究, 阐述其检测原理、技术实施方案和优化策略, 并通过实验验证其检测性能。旨在

* 通信作者: 李杰, 博士, 讲师, 研究方向为金属材料表面涂层。E-mail: 350244889@qq.com

*Corresponding author: LI Jie, Ph.D, Lecturer, Tongling University, Tongling 244061, China. E-mail: 350244889@qq.com

为相关领域提供技术支持和应用参考。

1 材料加工表面损伤特征分析

材料加工过程中,由于复杂的应力-应变状态、热影响以及化学反应等因素,工件表面易产生多种类型的损伤。以高速切削加工为例,刀具与工件间的摩擦会导致局部温度急剧上升,当温度超过材料的相变点时,表面会发生烧蚀、氧化等热损伤,形成白层、黑斑等缺陷。同时,切削力的动态变化还会引发表面微裂纹的萌生与扩展^[2]。另外,磨削加工时砂轮的振动和磨粒脱落会造成表面微观形貌的改变,使粗糙度参数Ra增大。除几何损伤外,材料表面在加工应力作用下会产生残余应力,进而影响其疲劳性能。如在激光熔覆成形过程中,熔覆层会承受拉应力,基体承受压应力,两者间的应力差异可高达数百兆帕。总的来讲,加工损伤的微观特征表现为晶格畸变、位错增殖、孪晶形成等组织结构的变化,宏观特征则体现在裂纹形态、粗糙度值以及残余应力分布等方面的差异。深入分析这些特征,对损伤的定量表征和机理阐释具有重要意义。

2 激光声表面波技术在材料加工表面损伤检测中的具体应用

2.1 表面裂纹检测

激光声表面波技术检测材料表面裂纹的基本原理,是利用高能量密度脉冲激光照射材料表面,激发产生频率范围广、振幅较高的瑞利面波。当表面波在传播过程中遇到裂纹时,部分能量被裂纹尖端反射,形成独特的反射回波信号。同时,裂纹对入射表面波产生阻挡和绕射效应,使透射波信号幅值下降、频谱发生改变。通过采用宽带高灵敏度压电传感器接收不同传播距离处的表面波信号,并运用小波变换、匹配追踪等信号处理技术,可提取反射波到达时间、峰值振幅以及透射波频域特征参数。基于声波传播理论模型,建立这些参数与裂纹深度、长度的定量关系,即可实现裂纹缺陷的精确表征。在实际检测中,激光脉冲宽度通常选择纳秒量级,如5~10 ns,单脉冲能量密度控制在100~500 mJ/cm²。压电传感器频带应覆盖表面波主要频率分量,一般选用中心频率为5~20 MHz的宽带传感器^[2]。为抑制材料各向异性引起的声波畸变,可采用自适应光束整形技术,在样品表面形成强度分布与裂纹走向匹配的光斑。同时,优化检测角度、激光扫查步距等参数,可获得较高的信噪比和空间分辨力,实现微米级裂纹的无损定位和定量评价。

2.2 表面粗糙度评估

激光声表面波技术评估材料表面粗糙度,主要利用声波在传播过程中受表面微观形貌调制的原理。具体来说,当表面粗糙度增大时,入射激光能量受到更强的散射和吸收,导致激发产生的表面波振幅降低,频谱特性发生改变^[3]。同时,粗糙表面的不规则起伏对声波传播造成阻碍,使其能量不断衰减。综

合分析声波传播过程中的幅值和频域特征,即可实现对材料表面粗糙度的定量表征。在技术实施中,通常采用线聚焦激光束激发表面波,利用高灵敏度窄带光电探测器接收不同传播距离处的声信号。通过提取信号幅值随距离的衰减特性,结合理论模型进行拟合,可得到粗糙度参数^[4]。此外,还可深入分析表面散射声场的频谱统计特征,如均方根值与粗糙度的关系等,这为评估结果的可靠性提供了有力支撑^[5]。需要注意的是,为尽量减小各类噪声和干扰的影响,在实际检测中应优化激光入射角度、重复测量次数等参数,以获得稳定、准确的评估数据。激光声表面波技术凭借其非接触、高灵敏等特点,为表面形貌无损表征提供了行之有效的解决方案。

2.3 表面热损伤评估

激光声表面波技术评估材料表面热损伤的基本原理,是利用声波传播特性对材料力学性质的高灵敏度。当材料表面受到热损伤时,其显微组织和力学参数会发生显著变化,如晶粒尺寸、残余应力、弹性模量等,这些变化会对声表面波的传播行为产生调制作用,使其表现出独特的时频域特征^[6]。

在技术实施过程中,首先利用高能量密度的脉冲激光照射材料表面,激发产生频率范围广、幅值较高的表面波。然后,采用宽带高灵敏度压电传感器阵列接收不同传播距离处的表面波信号。通过计算表面波在各传感器位置的到达时间差,可测量局部区域的表面波速度^[7]。由于声速与材料的弹性模量和密度密切相关,因此结合声弹性理论模型,即可定量评估材料的力学性能退化程度^[8]。此外,热损伤还会引起材料内部衰减系数的变化,使得表面波在传播过程中能量不断耗散^[9]。通过频域分析方法提取表面波幅值谱的衰减特性,可获得材料内禀品质因数等关键参数,进而表征其受损程度。为提高热损伤评估的精度和可靠性,需优化激光光源参数,如脉冲宽度、重复频率、光斑尺寸等,以激发出高信噪比的表面波信号。同时,应用相干检测、匹配滤波等信号处理技术,可有效抑制噪声干扰,提高检测灵敏度^[10]。激光声表面波技术评估热损伤的关键在于分析声波传播特性与材料力学性质间的映射关系,并采用优化的激励-接收方案和信号处理算法,实现损伤的定量表征,为材料热损伤的无损检测和健康监测提供了新思路。

3 技术实证分析

3.1 案例选取与实验方案

为验证激光声表面波技术在材料加工表面损伤检测中的有效性,选取Ti-6Al-4V钛合金作为研究对象。实验样品尺寸为100 mm×50 mm×3 mm,分别采用线切割和表面磨削加工制备不同缺陷特征。其中,线切割加工在样品表面预制深度为50~300 μm、长度为2~10 mm的单边开口裂纹;磨削加工制备表面粗糙度Ra分别为0.4、0.8、1.6和3.2 μm的试样。此外,利用CO₂连续激光器对部分样品进行表面热处理,获得不同程度热损伤。

实验采用 Nd: YAG 脉冲激光器作为声源, 激光波长 532 nm, 脉冲宽度 6 ns, 单脉冲能量 80 mJ, 重复频率 20 Hz。使用聚焦透镜将激光束聚焦到样品表面, 光斑直径约为 1 mm。采用线聚焦压电探头 (中心频率 10 MHz, 频带宽度 8 MHz) 作为检测器, 置于样品表面不同位置接收表面波信号。激光声实验过程中, 激光脉冲照射样品表面并线扫描, 扫描间距 0.2 mm, 重复测量 5 次取平均。采集系统采样频率为 500 MS/s, 数据长度 4000 个数据点。实验测量指标包括: 不同裂纹深度样品的透射波归一化峰值振幅、反射波归一化峰值振幅和反射波峰值延迟时间; 不同粗糙度样品表面波频谱的均方根值 RMS、频谱半高宽 BWp-p 和中心频率 fc; 热损伤样品的表面波速和品质因数。

3.2 实验结果分析

表 1 给出了不同深度裂纹的激光声表面波检测结果, 包括透射波归一化峰值振幅、反射波归一化峰值振幅和反射波峰值延迟时间。可以看出, 随着裂纹深度的增加, 透射波归一化峰值振幅逐渐降低, 反射波归一化峰值振幅和峰值延迟时间呈上升趋势。当裂纹深度为 300 μm 时, 反射波峰值振幅达到了无损表面的 2.1 倍, 表明该方法对深度裂纹具有明显的灵敏度。

表 1 不同裂纹深度的激光声表面波检测结果

Table 1 Laser surface acoustic wave detection results for different crack depths

裂纹深度 (μm)	透射波归一化峰值振幅 (无量纲)	反射波归一化峰值振幅 (无量纲)	反射波峰值延迟时间 (ns)
0	1.00	0.08	-
50	0.92	0.37	52
100	0.81	0.63	89
200	0.67	1.16	144
300	0.55	1.73	206

表 2 列出了不同粗糙度样品的表面波频域特征参数, 包括频谱均方根值 RMS、频谱半高宽 BWp-p 和中心频率 fc。随着粗糙度 Ra 的增大, RMS 和 BWp-p 呈指数关系上升, fc 线性下降。当 Ra 为 3.2 μm 时, RMS 和 BWp-p 分别为光滑表面的 4.3 倍和 2.2 倍, fc 降低了 42%。拟合得到 Ra 与 RMS 间的函数关系为: $Ra=0.64 \times 10^{1.08} RMS$, 相关系数达 0.997。

表 2 不同表面粗糙度的表面波频域特征参数

Table 2 Frequency domain characteristic parameters of surface waves for different surface roughnesses

粗糙度 Ra(μm)	频谱均方根值 (RMS)	频谱半高宽 BWp-p (MHz)	中心频率 fc (MHz)
0.4	0.32	4.6	12.5
0.8	0.58	6.1	10.8
1.6	1.02	8.5	8.3
3.2	1.79	12.2	6.1

对于热损伤试样, 实验测量了损伤区域表面波速的变化以及相应的品质因数 Q。结果表明, 热影响区表面波速明显低于基体, 且随激光作用时间的增加而减小。当激光作用时间为 2.5 s

时, 热影响区表面波速降低了 9.6%, 对应的信号品质因数 Q 仅为 0.27, 远低于未损伤表面的 0.85。可以看出, 激光声表面波技术通过测量裂纹样品的透射波和反射波特征、粗糙表面的频域参数以及热损伤区域的波速和品质因数, 可实现材料表面多种损伤的高灵敏、定量检测。

4 结束语

本文研究表明, 激光声表面波技术通过表征材料表面声波传播特性, 可实现加工表面裂纹、粗糙度、热损伤等关键损伤信息的高灵敏、定量检测。合理设计实验方案, 优化激励-接收系统和信号分析方法, 可获得高分辨力、强量化能力的无损检测结果。但该技术在实际应用中仍面临一些挑战, 如复杂曲面构件检测、材料各向异性效应补偿等。未来研究应着眼于多学科交叉融合, 发展自适应光路补偿、智能化检测系统, 并将其与相控阵聚焦、大数据分析等先进方法相结合, 在在线无损检测、制造过程质量监控等领域取得创新性突破, 助力智能制造时代的高质量发展。

参考文献

- [1] 李新月. 基于激光声表面波的加工表面损伤层检测的技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [2] 吴燕, 柳怡, 王岚, 等. 声表面波器件引线楔形键合根部微损伤控制研究 [J]. 压电与声光, 2023, 45(05): 682-685.
- [3] 张福浩, 裴丽, 郑晶晶, 等. O 波段掺铋光纤激光器输出特性实验研究 [J]. 中国激光, 2024, 51(23): 2.
- [4] 付兰凌, 杨金水, 刘志达, 等. 复合材料激光超声波传播特性及缺陷损伤检测 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(10): 1454-1461.
- [5] 王昆. 离子注入法制备熔石英表面同质应力膜的数值模拟研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- [6] 弓鹏飞. 基于激光超声的棒材缺陷检测方法研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- [7] 刘辉. 激光超声表面缺陷检测机理研究 [D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [8] 路子沫. 基于激光激发声表面波光谱技术检测人体皮肤病变的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [9] 袁玲, 任旭东, 严刚, 等. 激光冲击硬化层中激光声表面波的实验研究 [J]. 中国激光, 2008, (01): 120-124.
- [10] 赵伟. 海表面波条纹管激光图像特征信息提取技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

作者简介

李杰, 博士, 讲师, 研究方向为金属材料表面涂层。