

基于超快电子衍射的飞秒激光加工汽车用铝材 超快超精细晶格动力学过程

刘栋¹,王瑄²,王伟¹,岳大光¹,赵娟¹,张路路¹,张芹¹,高尚¹

1. 山东交通学院 理学院, 山东 济南 250357;

2. 中国科学院 物理研究所, 北京 100190

摘要:为提高超短脉冲激光加工汽车铝制零部件的质量,通过超快电子衍射系统分析飞秒激光轰击下铝多晶薄膜的电子衍射时间分辨谱(小于40 ps):在亚毫米尺度及ps分辨率内,观测铝多晶声子系统热传导耦合过程,得到晶格温度、晶格结构参数的演化规律。研究原子运动和晶格结构沿各晶向的精细变化,并推断铝薄膜内部晶格结构改变为热致和非热致效应共同作用的结果。研究铝薄膜被飞秒激光加热后内部超快热传递和晶格改变过程,在原子尺度下精细描绘铝晶格动力学图像,可为飞秒激光加工汽车用铝材料技术提供理论依据和数据支持。

关键词:超快电子衍射;晶格动力学;热传导;热致效应;非热致效应

中图分类号:TP212.9

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)04-0008-10

引用格式:刘栋,王瑄,王伟,等.基于超快电子衍射的飞秒激光加工汽车用铝材超快超精细晶格动力学过程[J].山东交通学院学报,2022,30(4):8-17.

LIU Dong, WANG Xuan, WANG Wei, et al. Ultrafast and superfine lattice dynamics in metal Al for automobile processed by femtosecond laser based on ultrafast electron diffraction[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(4): 8-17.

0 引言

随着社会的发展,人们对汽车的外观、性能指标、安全性及经济性均提出更高要求。受环境污染和能源成本上升的影响,各大汽车厂商先后推出自己的新能源汽车计划。整车和零配件供应商都在尝试采用高强度的轻量化新材料、新工艺等满足新能源电动汽车项目、无人驾驶技术的需要。目前常采用铝板、激光拼焊板、连续变截面板(tailor rolling blanks, TRB)、热成型、液压成形及高强钢减少白车身质量,同时保障甚至提高安全性能^[1-3]。

在汽车制造方面,铝材比传统硬钢具有更多优势:1)人体工程性能优越,例如可塑性较好,制造的座椅等部件更舒适,具有特殊的金属光泽,更加美观;2)力学性能较好,金属铝添加镁、铜、硅、锰、锌等金属制成的铝合金的强度和硬度均明显提高;3)工艺性强,铝材比较轻质,加工性能较好,液态铝合金具备流动填充性,在塑性过程中不易出现裂纹,压力加工性较好^[4]。因此,含铝材料在汽车行业中应用日益广泛。2021年初,上汽通用的凯迪拉克CT6投放市场,成为中国第1款投放市场的全铝车身车型,其白车身及覆盖件用铝合金达62%。新捷豹XFL采用了全铝车身,白车身和覆盖件用铝合金达75%^[5]。蔚来的ES8汽车被定位为中国市场第1款真正意义上的纯电动全铝车身车型,蔚来正在建设全铝车身的生产

收稿日期:2022-04-29

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(11904394, No. 12004216);山东省科学青年基金项目(ZR2020QA064);山东交通学院博士科研启动基金项目(BS20190204)

第一作者简介:刘栋(1986—),男,济南人,副教授,理学博士,主要研究方向为原子与分子物理, E-mail: liudong@sdjtu.edu.cn。

线。中国也将成为铝制车身的最大生产国^[6]。

铝材加工时,经过固溶热处理、淬火及后续强化,快速冷却时的热传导过程引起温度梯度对材料的残余应力、力学性能有较大影响^[7]。在制作汽车的变速系统、传动系统、电池系统、悬挂系统及车身时,需考虑热量在铝材部件中的传导过程对其机械性能的影响。

激光加工技术已广泛应用于汽车零件的制造。相比于传统纳秒激光加工,近年来出现的飞秒激光加工技术(激光脉宽小于 100 fs)最突出的特点是热效应小:飞秒激光的短脉宽和高能量密度使材料通过多光子效应和隧道效应电离,材料内部电子系统被激发,通过电子-声子耦合将热量传递给晶格^[8-9]。此过程极短。晶格产生非热致损伤或非热致相变,热效应极小,因此切口附近较少产生熔化、溅射、烧蚀,边缘光滑平整,加工质量较高^[10]。飞秒激光瑞丽光斑小,适用靶材范围广,是微小部件精细加工的重要方法^[11]。飞秒激光加工技术已逐渐应用于汽车行业:喷油器是汽车上的精密零部件,在接受发动机指令后,精准控制、高速喷射雾状燃油,燃油充分燃烧产生动能,驱动汽车前行。喷油器对喷射孔尺寸精度、内壁的光滑要求较高。传统上采用电火花打孔制造喷油器,但随着汽车排放标准不断提高,传统打孔技术不能满足这一要求。王国富完成基于飞秒激光超精细孔加工技术的电控燃油喷油器制造工艺开发及装备集成项目,喷油孔加工厚度小于 2 mm,定位准确度为 $\pm 0.005/300$ mm,孔径加工范围为 0.05~2.00 mm,加工误差不大于 ± 0.002 mm^[12]。飞秒激光加工在汽车制造业中应用潜力巨大,并向其他材料和功能的汽车零部件发展。研究飞秒激光加热后汽车用铝材内部的热传导和晶格变化过程,即晶格动力学过程,对提高激光加工汽车部件的质量,保证汽车安全稳定运行具有重要意义。

超快电子衍射(ultrafast electron diffraction, UED)是精细探测物体内部原子与分子结构变化过程的试验测试手段^[13-14],其原理如图 1 所示。飞秒激光泵浦脉冲宽度极小,具有超高时间分辨率。采用飞秒激光加工靶材时,靶材内部发生较多超快化学和物理反应,如电子光致激发、化学键断裂、中间产物演化、晶体膨胀、晶格动力学相变等。采用具有高空间分辨率(可探测尺寸小于 0.1 Å 的)的电子衍射(electron diffraction, ED)技术观测晶格内部原子结构,如果再采用精细延时线控制拍摄图像的时间间隔(小于 0.1 ps)连续多次采集,拍摄靶材被激光加热后不同时刻的电子衍射图像,再通过快速的数据采集和分析软件,可动态观察晶格内部结构,对靶材内部晶格动力学过程进行时空分辨观测。这就是 UED 的基本原理。UED 兼顾飞秒激光和精确延时线的高时间分辨率(可探测小于 0.1 ps 的变化过程)和 ED 的高空间分辨率,目前时间分辨能力接近单原子不规则振动周期(100 fs),空间分辨可达亚毫埃米级(小于 10^{-4} nm),提供研究晶格系统结构超快动力学的超快超高精度的研究手段。UED 一般为透射式可观测样品内部,样品无需加工,无需复杂的理论模型,数据分析直接而准确,试验周期短。

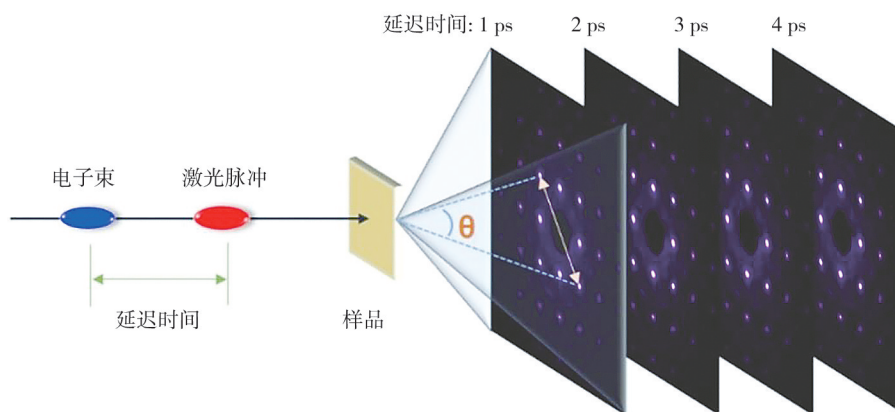


图 1 UED 原理示意图

本文采用 UED 技术揭示原子振动的时间尺度下,能量在电子和声子系统内的传播过程及晶格形变规律,研究飞秒激光加工汽车用铝材的超快超精细动力学过程,探讨 ps 时间尺度和 10^{-4} nm 空间尺度内的加工机理。

1 试验方法

1.1 理论方法

1.1.1 电子衍射理论

电子运动具有波粒二象性。高压电子衍射试验中的电子速度可比拟光速,根据相对论对电子质量进行修正,公式^[14]为

$$m_R = \frac{m_e}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (1)$$

式中: m_R 为修正电子质量; m_e 为电子质量, $m_e = 9.109\ 38 \times 10^{-31}$ kg; c 为光速, $c = 2.997\ 92 \times 10^8$ m/s; v 为电子速度。

根据能量守恒定律^[14]

$$eU + m_e c^2 = m_R c^2,$$

式中: e 为电子电荷量, $e = 1.602\ 19 \times 10^{19}$ C; U 为电子枪的电压。

可得到电子的德布罗意(Debroglie)波长

$$\lambda_e = \frac{h}{\sqrt{2m_e U \left(1 + \frac{eU}{2m_e c^2}\right)}}, \quad (2)$$

式中: h 为普朗克常数, $h = 6.626\ 07 \times 10^{-34}$ J·s。

晶体内部原子按照一定的规则和周期性排列,晶格结构本身长程有序。只要晶面间距与散射角、电子波长满足布拉格条件,且晶胞基元结构因子不为0,即不符合消光条件^[15],则出现衍射极大值(峰)。晶体衍射布拉格定律^[14]

$$\lambda_e = 2d_{hkl} \sin(\theta/2), \quad (3)$$

式中: θ 为反射电子波矢量的散射角, d_{hkl} 为晶面间距, λ_e 为入射电子波长。

由于消光定律的筛选^[16],只有部分晶面系能出现特征衍射峰。由衍射峰强度和尺度可推导样品内部实际空间分布。对于多晶样品图样,相当于相应单晶衍射斑绕零级中心旋转1周,衍射图样为一系列同心环(衍射峰),衍射峰半径对应相应晶向的 d_{hkl} ,环的宽度代表 Miller 系数不同的不同晶面距离变化是否均匀^[17]。

1.1.2 衍射峰强度

通常采用原子偏离平衡位置的垂直均方位移 $u^2(T)$ 代表晶格系统的振幅,振幅与晶格系统温度 T 相关。UED 可把晶格振动反映在衍射图像上,具有可观测晶格振幅小于0.1 ps 的时间分辨能力^[18]。采用德拜-沃勒模型(Debye-Waller model)描述 T 对衍射强度的影响^[13-14]:

$$I_s(T) = I_s(0) \exp\left[-\frac{s^2[u^2(T)]}{3}\right], \quad (4)$$

式中: $I_s(T)$ 、 $I_s(0)$ 分别为温度 T 、0 K 对应的衍射峰强度, s 为对应晶面的 Miller 系数。

由于与 T 相关,式(4)可改写为

$$I_s(T) = I_s(0) \exp\left[-\frac{1}{2}s^2 B(T)\right], \quad (5)$$

式中: $B(T)$ 为 Debye-Waller 因子, $B(T) = \frac{6h^2 T}{m_a \kappa_B \theta_D^2} \left(\frac{T}{\theta_D} \int_0^{\theta_D/T} \frac{x dx}{e - 1} + \frac{\theta_D}{4T}\right)$,其中, m_a 为原子质量, κ_B 为玻尔兹曼常数, θ_D 为德拜温度。

当 T 大于 θ_D 时, $B(T)$ 与 T 近似呈线性关系,即

$$B(T) = b_0 + b_1 T,$$

式中 b_0 、 b_1 为常数。

因此可得衍射峰强度与 T 的关系^[18]为

$$\frac{I_s(T + \Delta T)}{I_s(T)} = \exp\left(-\frac{1}{2}s^2b_1\Delta T\right), \quad (7)$$

式中 ΔT 为晶格温度变化。

由式(6)通过衍射峰强度的变化计算受激后 T 的变化。

1.1.3 衍射峰尺度

根据布拉格定律,衍射峰对应的位置(衍射角)和 d_{hkl} 相关。若晶格发生膨胀或收缩,晶格常数随之变化,对应的衍射峰位置平移,若晶格内不同晶面(对应不同 Miller 系数)的面间距变化不一致,则不同衍射峰的平移也不一致。因此,可通过检测各衍射峰的平移推断晶格在各方向上的膨胀和收缩过程。峰的半高宽(full width at half maximum, FWHM)是描述相同晶面中晶格变化是否均匀的重要参数。

UED 理论依据电子束轰击铝材后衍射峰的平移、增宽及强度变化解析晶格结构的变化。

1.2 试验装置

采用中国科学院物理所综合极端条件试验室的第3代 UED 试验装置(电子能量为 55 keV, Debroglie 波长为 0.050 9 Å, 单发电子数小于 1000)观测飞秒激光烧蚀铝的超快过程,其原理如图2所示。

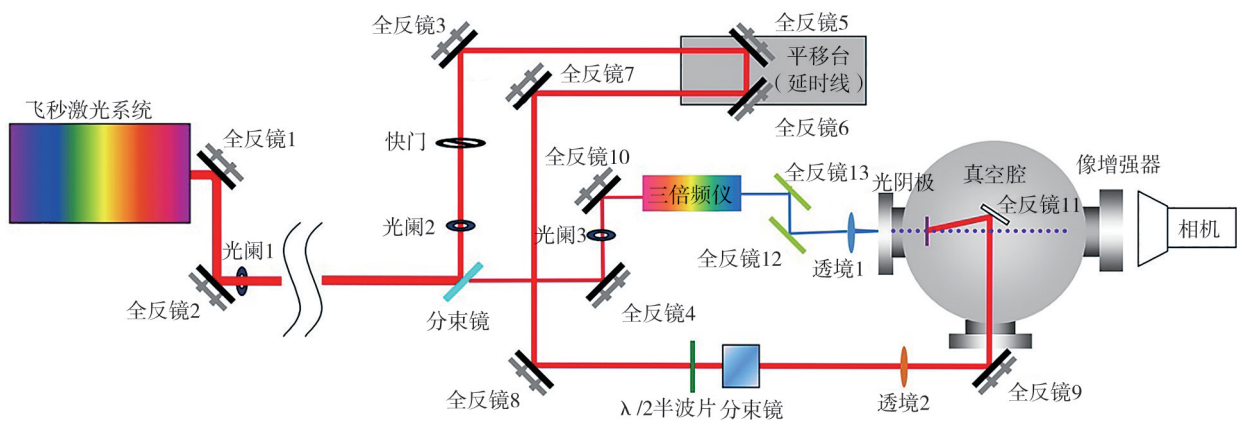


图2 中国科学院物理所综合极端条件试验室的第3代 UED 试验装置原理图^[19]

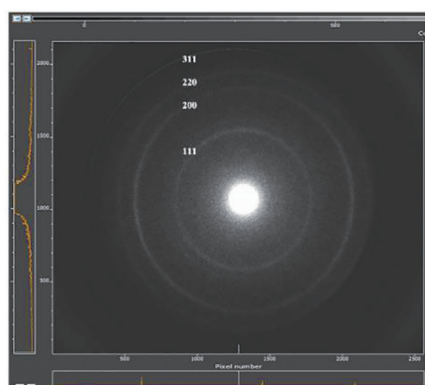
电子枪加速器、靶材置于超高真空系统内,机械泵、涡轮分子泵、钛离子泵联合抽气2周后,腔内气压小于 1.33×10^{-7} Pa。光源(热源)采用飞秒激光系统(spectra-physics spitfire-ace 967 laser 激光器,脉宽 40 fs, 波长 800 nm, 重频为 1 kHz),单脉冲能量调至 0.1 mJ,分束后一部分激光激发光阴极产生电子,经 55 kV 高压加速,穿过阳极小孔后用磁透镜垂直聚焦于样品表面。另一部分激光经延时线后聚焦于铝靶表面,铝靶表面薄膜采用电子束加热蒸镀和磁控溅射方法制作,厚 20~30 nm。通过延时线调整2束激光光程差,控制探测电子与泵浦激光的延迟时间,最小步长为 0.015 ps,这一部分泵浦光能流密度约为 $2 \text{ mJ}/\text{cm}^2$,光斑直径为 1 mm,模拟材料受热过程。可实现时间分辨能力为 500 fs 和结构变化为 0.1 nm 的解析能力,获得铝材在加热后约 40 ps 时间内的衍射图样。采用具有较高量子探测效率的荧光屏承接电子衍射图样,经过高增益的像增强器(microchannel plate, MCP)处理, MCP 增益不小于 10^5 倍,具有 20 线/mm 的空间分辨能力。最后电荷耦合器件捕获增强衍射图像,单张曝光时间为 5~20 s,传至计算机。

本系统具有单电子探测能力,可探测 1 个电子打到荧光屏上发出的微弱信号。采用自主研发的霍夫变换图像处理及数据分析软件实时处理图像,通过寻找衍射图案圆心确认铝的 4 个特征布拉格峰(衍射环),减掉背景后通过高斯函数拟合布拉格峰并获得拟合峰的精确半径。把不同延迟时间的布拉格峰强度(衍射环)和拟合峰半径均进行拟合操作,得到布拉格峰强度和半径的演化规律,推导晶格温度和晶格常数变化规律。

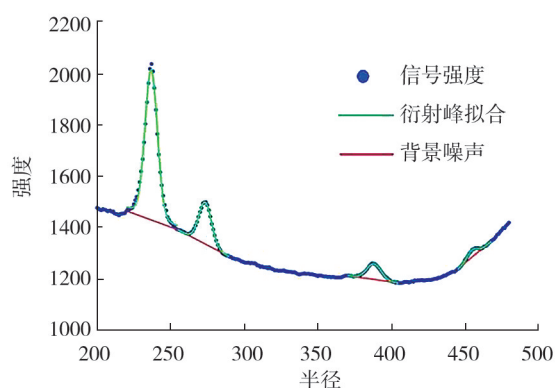
2 试验结果与分析

UED 系统采集铝衍射图样,采用霍夫变换图像处理及数据分析软件进行分析。飞秒激光系统加热的铝靶电子衍射图样如图 3a)所示,所包含的 111-200-220-311 环清晰可见。对某时刻的衍射图样的灰度图进行处理,提取强度-半径数据及拟合效果如图 3b)所示,蓝色圆点为原始数据。

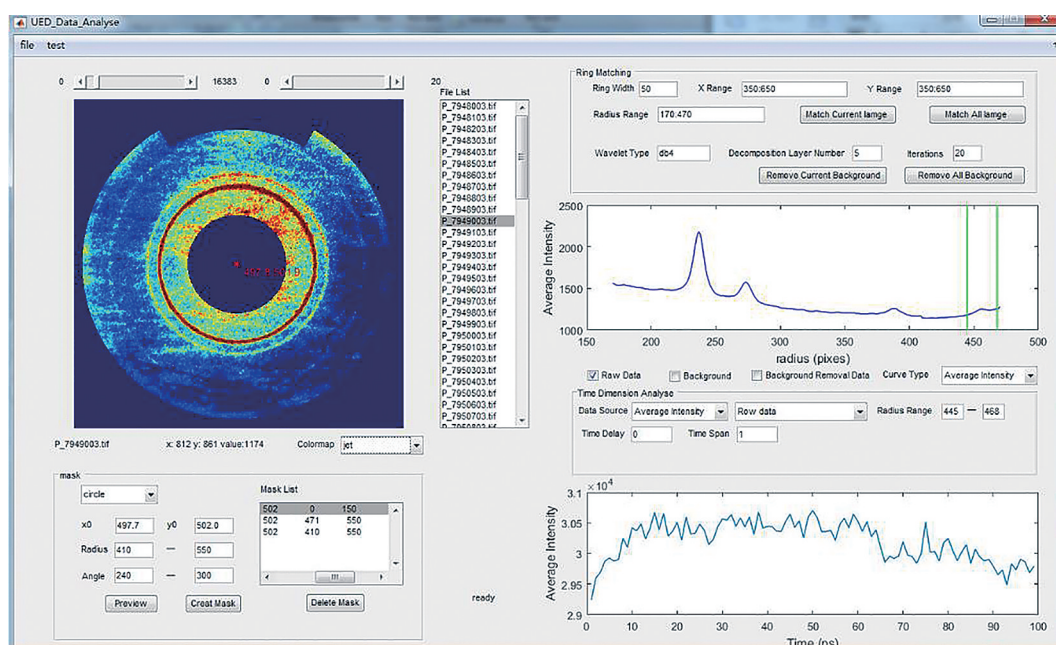
图 3b)为寻找衍射图案圆心,确认铝的 111、200、220、311 晶面的特征布拉格峰(衍射环),减掉无电子束背景,通过高斯强度拟合布拉格峰形状,获得对应时刻布拉格峰(衍射环)强度与拟合峰半径。在 UED 系统拍照的过程中,通过霍夫变换图像采集处理软件实时拟合每张输出衍射图样灰度图,如图 3c)所示,可得到布拉格峰(环)强度与半径。



a) 铝多晶标准样品靶(无加热)环电子束衍射



b) 提取强度-半径数据及拟合效果



c) 霍夫变换图像处理及数据分析过程

图3 UED 系统采集铝衍射图样及分析

飞秒激光(800 nm,0.1 mJ/脉冲)下铝多晶标准样品的电子衍射图样(小于 40 ps)如图 4 所示。通过软件采集分析不同延迟时间下的图像对应的布拉格峰(环)的强度与半径,得到布拉格峰(环)强度与半径随时间的演化规律。

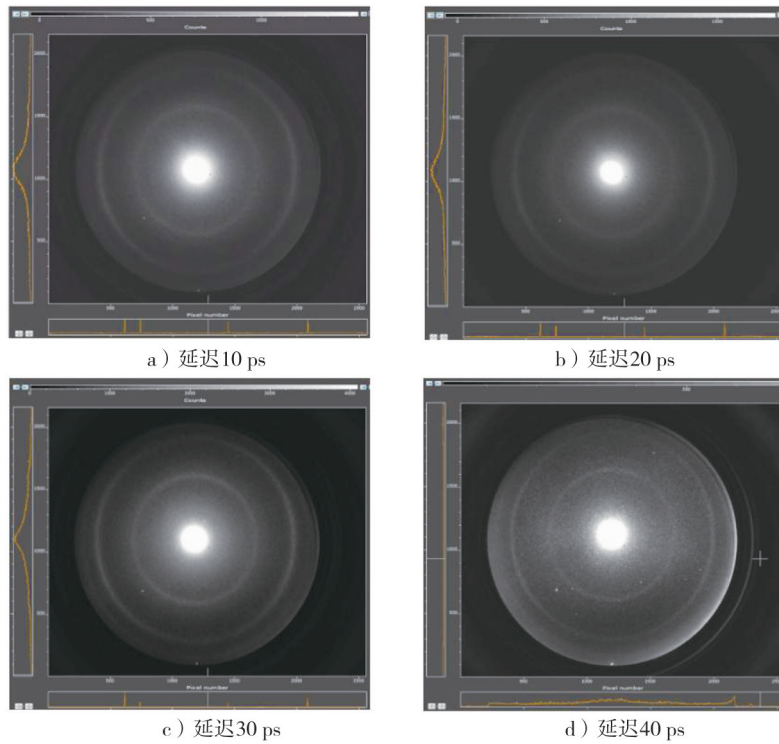


图4 UED系统采集铝衍射图样(55 kV)

2.1 晶格加热

探测电子脉冲到达靶材后 0~40 ps 内的铝 111、200、220、311 布拉格峰的强度变化。在延迟 7 ps 时静态平台区间结束,说明飞秒激光脉冲到达铝靶表面,对铝膜进行加热。激光脉冲的半高宽为 40 fs,加热过程迅速结束,之后热量在电子-声子系统中耦合并向外传递。铝多晶样品在飞秒激光加热下 0~40 ps 内衍射图样(55 kV)特征峰(环)强度的时间演化如图 5 所示。

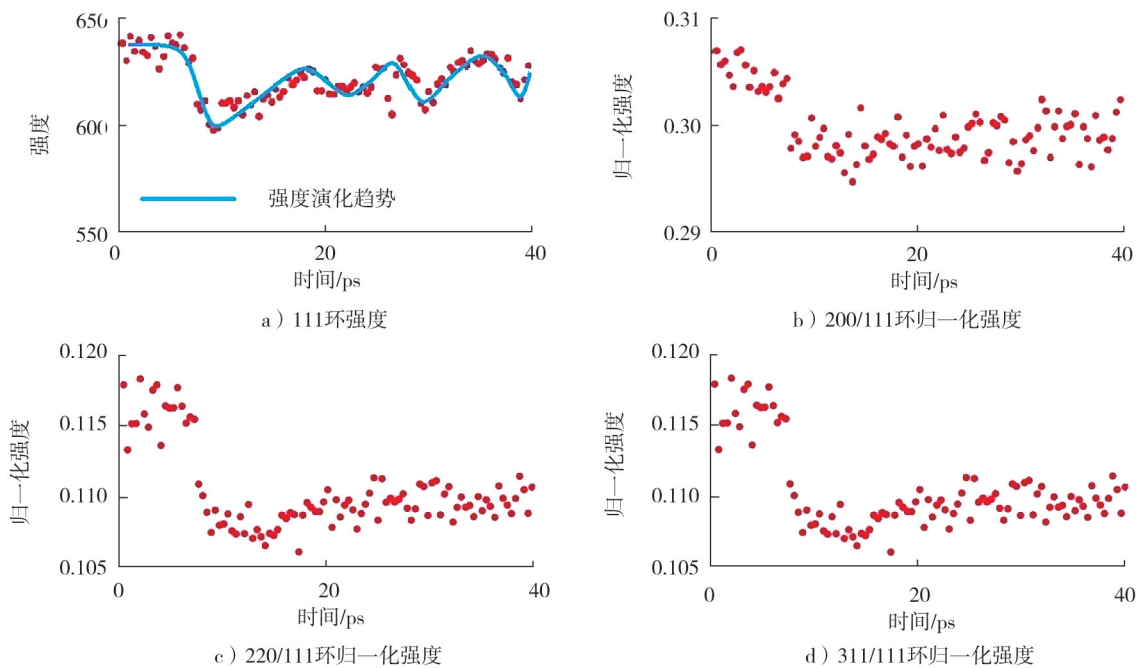


图5 铝多晶样品在飞秒激光加热下衍射花样特征峰(环)强度的时间演化

由图 5 可知:在激光加热后,衍射强度开始振荡,说明此时铝膜处于非热平衡状态。由式(4),可得铝

原子偏移量相对于 s_{\perp} (Miller 常数) 晶面垂直均方位移

$$\Delta[u^2(T)] = \frac{3}{s_{\perp}^2} \ln \frac{I_s(0)}{I_s(T)} \quad (7)$$

因此,某时刻各布拉格峰衍射强度的变化表征各晶面垂直均方位移的变化规律。

图 5b)~d) 中其他峰对 111 峰强度进行归一化处理,可看出 4 个晶面方向衍射强度的总体规律基本一致,说明在激光加热后很短时间内,晶格系统内热扩散过程在一定程度上属于各向同性。一般情况下,晶格结构的改变分为热致与非热致 2 种机制^[20-21]。热致改变中原子振动的偏移量只依赖于温度梯度,与晶面无关,表现为各向同性,说明激光加热后铝膜内部存在热致改变。由归一化强度小于 1 得到铝的 111 峰强度及振幅最大,200 峰其次,220 与 311 峰强度及其振幅均最弱。归一化系数的差异说明热量在晶格内部的传递也具有各向异性。铝多晶是各种晶胞的混合排列,没有明显的方向性,多晶铝膜热传递并不会表现为严重的各向异性。因此,多晶体的热致结构变化,晶面垂直均方位移的变化只依赖温度,与晶面无关。非热传递机制一般造成各向异性。在激光加热后极短时间内,铝膜内部也应该发生非热致改变。非热致结构变化可能是由于 800 nm 激光脉冲激发了电子跃迁,电子能级和电子态改变,成键不稳定,某些晶格键软化。800 nm 激光只能激发某些能级间的电子跃迁,受影响的能级只存在于某些晶面中的成键原子内部。电子跃迁弱化原子间的相互作用,削弱了原子键,使材料电子带结构和声子散射性质发生巨大改变,阻碍了这些晶面上载热声子运动(声子软化),导致晶格某些方向的热导率降低,晶格间热传递具有方向性。通过布拉格峰强度演化可说明铝膜内的晶格改变同时存在热致和非热致 2 种机制。

采用脉宽大于 1 ns 的传统长脉冲激光对汽车零部件进行切割、焊接、打标等加工时,能量首先被电子吸收,通过电子-声子耦合作用将能量传递至晶格(时间为几十 ps),随后晶格间进行热传递,周围晶格升温,引起材料熔化、沸腾等相变。脉冲宽度远大于电声耦合的时间,在脉冲持续过程中,有足够的时间将能量由电子传递给晶格,并在晶格间扩散,于是晶格温度逐渐升高并不断被激光加热,零件表面发生几 ns 甚至几十 ns 的熔化及沸腾,对材料表面产生影响,即热致烧蚀机制。持续整个脉宽的熔化及沸腾引起范围较大且后果严重的重凝和溅射现象,在汽车零件表面留下不平整的、由液体填充形貌和周期结构等的重凝区及飞溅液滴,严重影响零件加工质量^[9]。

飞秒激光脉宽小于 1 ps 甚至更短,脉冲作用时间远小于电子-声子耦合的特征时间,激光脉冲作用完成时能量来不及传递给晶格,此时晶格仍是冷的。飞秒激光引起的材料解离发生在几个 ps 内,热致效应引起的熔化、沸腾等极少,可提高加工平整度。但飞秒激光引起材料解离的过程较复杂,比如库伦爆炸和相爆炸^[10],及其他非热致机制。因飞秒激光加工汽车用铝材时广泛存在非热机制,可以有效利用以期提高加工质量。

2.2 晶格膨胀

通过 d_{hkl} 的变化研究晶格膨胀和收缩。根据式(3),布拉格峰半径的变化反映 d_{hkl} 的变化,即衍射角缩小对应 d_{hkl} 增大。系统衍射角小于 0.02 rad, d_{hkl} 相对变化 $(\Delta d_{hkl}/d_{hkl})$ 与衍射峰半径 r 相对变化 $(\Delta r/r)$ 大致相等,即

$$\Delta r/r = \Delta d_{hkl}/d_{hkl},$$

则衍射半径缩小对应 d_{hkl} 增加。同时,试验可解析的峰位相对变化小于 5×10^{-5} (与 MCP 单个像素对应),铝的晶格常数约为 4 Å,则 UED 系统的空间分辨率为 2×10^{-4} Å。

铝多晶样品在飞秒激光加热 0~100 ps 下衍射图样特征峰(环)半径随时间的演化如图 6 所示。

由图 6 可知:探测电子到达铝膜 30 ps 内各晶面布拉格峰半径变化趋势基本一致,证明了铝多晶样品内晶格膨胀或收缩各向同性。图 6a) 中 111 晶面的布拉格峰半径(衍射角)变化曲线说明:激光泵浦后 30 ps 内,晶格内部非单纯升温或膨胀过程,而是类似阻尼振荡的过程,是脉冲激光触及铝膜时引发相干声子振荡,产生机制是位移相干声子激发^[22-23];铝膜在获得能量后,电子和晶格内部的热压作用使晶格产生形变,这种形变在垂直于膜表面的法向方向引发相干声波,即纵波,表现为各晶面的同步呼吸运动,声波在膜的 2 个表面相互反射并发生干涉,形成一维驻波,周期

$$t = 2D/v_0,$$

式中: D 为薄膜厚度; v_0 为铝膜声速, $v_0 \approx 6420$ m/s。

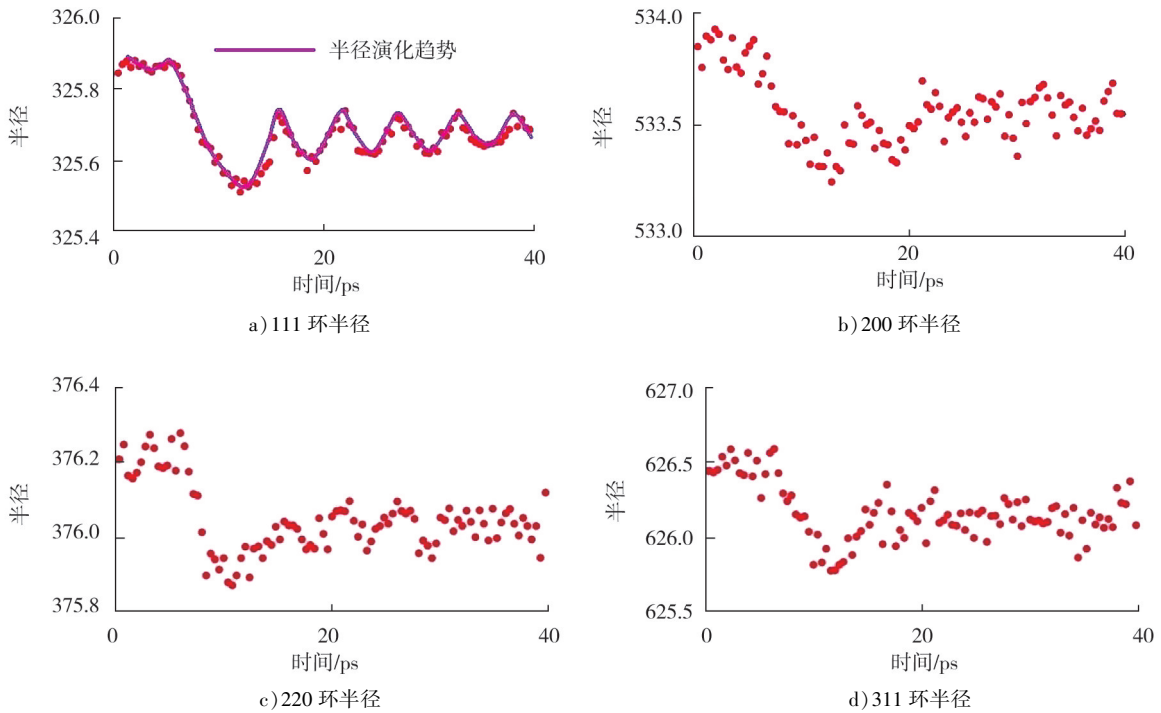


图6 铝多晶样品在飞秒激光加热0~100 ps下衍射图样(55 kV)特征峰(环)半径随时间的演化

由图6测得晶格系统发生相干振动的周期约为6 ps,可得到 $D=20$ nm,符合样品制备时的理论值。

热致过程中,晶格膨胀取决于温度变化,各 d_{hkl} 变化应相同。图6c)中,220晶面对应声子相干振幅最大,说明其 d_{hkl} 变化最大,而200晶面的 d_{hkl} 变化最小。这个现象不符合热致过程的特点。因为多晶体是各种晶胞的混合排列,表现为各向同性,飞秒激光加热后铝膜内部温度梯度也表现为各向同性^[10],如果晶格没有发生熔化,其结构变化应是均匀的热膨胀过程,各 d_{hkl} 的相对变化也应相等,因此各衍射峰半径的相对变化也应相等,这与试验结果不符。从图6中估算声子振荡的时间尺度约为几十ps,而一般铝晶格热传递过程的尺度为500 ps~1 ns,与图中结果不符^[15],因此说明非热效应产生作用。激光激发改变了某些晶向的原子键,该晶面上的声子振动被抑制。因此,振荡只能发生在加热后10~100 ps内。从图6可知:随时间的推移,声子相干的振幅逐渐减小。最后晶格趋于热平衡状态,非热效应逐渐消失。

试验结果表明:飞秒激光加热后,铝膜晶格的改变不能简单归因于热致或非热致效应,应是热致和非热致动力学混合作用的结果。哪一种机制更明显取决于激光能量、波长及脉宽等参数。如果挑选合适的飞秒激光参数对铝制汽车零部件进行切割、焊接、打标等加工,可尽量减少热效应的影响,达到比长脉冲激光更为平整、缺陷更小的加工结果,提高加工质量。

3 结语

通过超快电子衍射系统采集飞秒激光轰击下汽车用铝材的电子衍射时间分辨谱(小于40 ps),采集铝薄膜加热后的晶格超快动力学图像,在加热后小于40 ps的极短时间内,观测铝多晶声子系统热传导耦合过程,发现晶格温度、晶格结构参数的演化符合阻尼振动规律,证明铝膜的原子运动(垂直均方位移)和晶格结构参数的改变为热致和非热致效应共同作用的结果,从晶格超快动力角度说明飞秒激光加工汽车用铝材可提高加工质量,为加工技术的改善提供理论及数据参考。

参考文献:

- [1] 杜孔明. 精铸工艺在汽车零部件制造中的应用与发展[J]. 铸造技术, 2020, 25(6):445-447.
DU Kongming. Development & application of precision casting technique on manufacturing automobile's accessory[J]. Foundry Technology, 2020, 25(6):445-447.
- [2] 武仲河, 战中学, 孙全喜, 等. 铝合金在汽车工业中的应用与发展前景[J]. 内蒙古科技与经济, 2018(9):59-60.
- [3] 冯丽敏. 铝合金在汽车上的应用及发展趋势[J]. 农机使用与维修, 2013(2):48-49.
- [4] 李霞辉, 龙浩南. 全铝车身维修探讨: 胶粘铆接技术[J]. 时代汽车, 2019(19):139-140.
- [5] 王天胜, 徐国强, 严晓琳. 浅析车身钢铝冲压车间工艺规划的特点[J]. 锻造与冲压, 2019(22):27-29.
WANG Tiansheng, XU Guoqiang, YAN Xiaolin. Planning of the steel and Al-Alloy car body stamping process in workshop [J]. Forging & Metalforming, 2019(22):27-29.
- [6] 李艳萍, 张治民, 李保成. 铝合金材料在汽车工业中的应用与展望[J]. 铝加工, 2007(1):23-24.
LI Yanping, ZHANG Zhimin, LI Baocheng. Application and prospect of aluminum alloys in automobile industry[J]. Aluminum Fabrication, 2007(1):23-24.
- [7] 张园园, 吴运新, 廖凯. 铝合金厚板淬火过程换热系数的求解与验证[J]. 热加工工艺, 2008(12):87-90.
ZHANG Yuanyuan, WU Yunxin, LIAO Kai. Solution and validation of heat conduct equation for aluminum alloy ultra-thickness plate during quenching[J]. Hot Working Technology, 2008(12):87-90.
- [8] THORSTENSEN J, FOSS S E. Temperature dependent ablation threshold in silicon using ultrashort laser pulses[J]. Journal Applied Physics, 2012, 112:103514.
- [9] LIU D, CHEN C S, MAN B Y, et al. Evolution and mechanism of the periodical structures formed on Ti plate under femtosecond laser irradiation[J]. Applied Surface Science, 2016, 378:120-129.
- [10] LIU D, CHEN C S, MAN B Y, et al. Experimental investigation and 3D-simulation of the ablated morphology of titanium surface using femtosecond laser pulses[J]. The European Physical Journal Applied Physics, 2015, 72:31301.
- [11] LIU D, CHEN C S, MAN B Y, et al. Investigation of two kinds of periodical surface structures induced by femtosecond laser on the surface of titanium plate[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2016, 16:1287-1295.
- [12] 梅雪松, 段吉安, 李明, 等. “激光微纳制造”专题前言[J]. 中国激光, 2022, 49(10):9-10.
- [13] ROUSSE A, RISCHÉL C, GAUTHIER J C. Femtosecond x-ray crystallography[J]. Reviews of Modern Physics, 2001(73):17.
- [14] DEBYE P. X-ray interference and thermal motion[J]. Annalen der Physik, 1913, 348:49-92.
- [15] 梁文锡, 朱鹏飞, 王瑄, 等. 超快电子衍射系统的时间空间分辨能力研究及其优化[J]. 物理学报, 2009, 58(8):5539-5545.
LIANG Wenxi, ZHU Pengfei, WANG Xuan, et al. Development and optimization on spatiotemporal resolution of ultrafast electron diffraction[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(8):5539-5545.
- [16] KITTEL C. 固体物理导论[M]. 8th Ed. 项金钟, 吴兴惠, 译. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [17] SCHALLER R D, PIETRYGA J M, GOUPALOV S V, et al. Breaking the phonon bottleneck in semiconductor nanocrystals via multiphonon emission induced by intrinsic nonadiabatic interaction[J]. Physical Review Letters, 2005, 95(19):196401.
- [18] NIE S H, WANG X, PARK H, et al. Measurement of the electronic grüneisen constant using femtosecond electron diffraction [J]. Physical Review Letters, 2006, 96:025901.
- [19] ZHU P F, ZHANG Z C, CHEN L, et al. Ultrashort electron pulses as a four-dimensional diagnosis of plasma dynamics[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10):103505.
- [20] RETHFELD B, SOKOLOWSKI-TINTEN K, VON DER LINDE D, et al. Timescales in the response of materials to femtosecond laser excitation[J]. Applied Physics a-Materials Science & Processing, 2004, 79:767-769.
- [21] LIN Z B, ZHIGILEI L V. Time-resolved diffraction profiles and atomic dynamics in short-pulse laser-induced structural transformations: molecular dynamics study[J]. Physical Review B, 2006, 73(18):184113.
- [22] ZEIGER H J, VIDAL J, CHENG T K, et al. Theory for displacive excitation of coherent phonons[J]. Physical Review B, 1992(45):768.
- [23] DOWNER M C, SHANK C V. Ultrafast heating of silicon on sapphire by femtosecond optical pulses[J]. Physical Review Letters, 1986(56):761.

Ultrafast and superfine lattice dynamics in metal Al for automobile processed by femtosecond laser based on ultrafast electron diffraction

LIU Dong¹, WANG Xuan², WANG Wei¹, YUE Daguang¹,
ZHAO Juan¹, ZHANG Lulu¹, ZHANG Qin¹, GAO Shang¹

1. School of Science, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: In order to improve the processed quality of aluminum automotive components by the ultrashort pulse laser, the electron diffraction time resolution spectrum (less than 40 ps) of aluminum film lattice after femtosecond laser bombardment is studied by ultrafast electron diffraction; the thermal coupling process of phonon system of aluminum polycrystalline is observed in the sub-Ångstrom scale and ps time resolution. The evolutions of lattice temperature and lattice structure parameters are obtained. The subtle variations of atomic motions and lattice structure along the various crystal directions are investigated and attributed to both thermal effect and non-thermal effect. Understanding of energy conduction and lattice changing, as well as an exact description of the ultrafast lattice dynamics of aluminum at the atomic scale provide a more refined theoretical basis and data support for the laser machining of aluminum materials in automotive systems.

Keywords: ultrafast electron diffraction; lattice dynamics; heat conduction; thermal effect; non-thermal effect

(责任编辑:王惠)

.....
(上接第7页)

of intelligent connected vehicles towards environment based on multi-task network is studied by inserting the bi-linear interpolation layer into the bottom layer of convolutional neural network and modifying the pool layer of convolutional neural network. The collected image features of vehicles' environment are extracted by the encoder of multi-task neural network, which is used as the input of semantic segmentation and target detection decoder. The trained neural network is used to output the automatic sensing results of intelligent connected vehicles towards environment. The experimental results show that this method can realize the automatic perception of the intelligent connected vehicles towards environment. The target detection effect is good under different lighting conditions, and the network practicability and semantic segmentation accuracy are high. It can meet the requirements of the automatic perception of the actual intelligent connected vehicle towards environment.

Keywords: multi-task network; intelligent connected vehicle; automatic environmental perception; convolutional neural network; bi-linear interpolation

(责任编辑:郭守真)