

铝合金薄壁件的激光校形试验

王秀凤¹ 郭晓丽¹ 彭青² 陈光南²

(¹北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

²中国科学院力学研究所, 北京 100190

摘要 校形是保障板金属成形零件形状精度的重要手段。为改善校形效果、提高校形效率,提出了矫正其形状的新方法。该方法利用激光热源局部作用铝合金薄壁件待校形的区域,促使其弹性内能做塑性功并重新分布残余应力,达到提高校形效果和校形效率的目的。以航空用铝合金薄板进行三点弯曲试验得到待成形样件,激光热源沿其弯曲线进行扫描后,得到了一定的校形量,定量分析了校形效果,得出校形率的大小随试件的材质和厚度的不同而不同。试验结果表明了激光校形的可行性,为深入研究成形件的激光校形奠定了基础。

关键词 激光技术;激光校形;校形量;三点弯曲试验;成形件

中图分类号 TN249;TG386.3⁺1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.021403

Laser Correction of the Thin-Walled Aluminum Alloy Part

Wang Xiufeng¹ Guo Xiaoli¹ Peng Qing² Chen Guangnan²

(¹ School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

² Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Shape correction is an important tool in ensuring the forming precision of sheet metal parts. In order to improve the correction effect and efficiency, a new method of laser correction of thin-walled aluminum alloy part is proposed. When laser beam irradiates the residual stress gathering area of the formed part, the elastic energy in this area is transformed into plastic work due to laser thermal effect, thus the forming error is corrected and the forming precision is improved. The formed part is produced by standard three-point bending test, and then laser beam scans it along the bending line, so that the actual correction values are obtained. The correction effect is discussed through the quantitative analysis of the experimental data. The actual correction rate varies with the choice of material and thickness of specimen. The feasibility of the laser correction technique is verified. Research foundation is laid for further application of laser correction in engineering.

Key words laser technique; laser correction; actual correction value; three-point bending test; formed part

OCIS codes 140.3390; 350.3390

1 引言

铝合金件经冲压成形后不可避免地存在回弹现象,由此造成零件的成形精度差,使得零件成形后的校形工作不可缺少。对于简单的弯曲件,常用过弯法、模具补偿法、拉弯法和加压校正等方法,借助于解析和数值计算求解校正参数,对回弹进行预测,达到减少回弹、减少零件成形后校形量的目的。但是补偿值计算是在一定假设的基础上进行的,如材料特性一般按理想弹塑性或双线性强化来处理,忽略了校正中各纤维层之间的挤压作用等,致使计算结果的误差和离散性都很大,计算精度很难令人满意。加上板材材质本身的不均匀性,又存在各向异性,即使零件对称,成形后的成形精度也不能完全保证,还是需要最终的校形来实现。因此,实际生产中迫切需要行之有效的校形技术以提高校形精度和校形效率。针对目前的研究现状,依据课题组在薄板成形和激光热加工方面的研究积累,本文提出一种激光校形铝合金薄壁件的新方法,其原理是以一

收稿日期: 2012-11-13; **收到修改稿日期:** 2012-11-15; **网络出版日期:** 2013-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(10872199)资助课题。

作者简介: 王秀凤(1963—),女,博士,副教授,主要从事激光加工技术、塑性成形工艺等方面的研究。

E-mail: wangxiufeng@buaa.edu.cn

定强度的激光束按一定路径扫描待校形工件上对应成形误差的内应力集中区域,通过激光的热效应降低该区域材料的屈服强度并增强其塑性变形能力,促使弹性内能做功,校正成形误差,提高成形工件的形状精度^[1]。

2 激光校形方法

该技术与已有十余年研究历史的薄板激光热成形方法^[2~6]在成形原理上具有本质差异。激光热成形的动力主要源自激光热效应在薄板内建立的非均匀热应力场,而激光校形的动力主要依赖工件局部弹性内能的有效释放或重新分布,当内应力不足以实现预定校形任务时可适当施加外载。由此可见,激光校形方法能够通过释放局部关键点内部的弹性势能来改变关键点的应力状态,从而提高成形零件所需部位的形状精度,是替代目前广泛采用的人工校形的有效方法。

该方法的主要技术特点如下:

- 1) 快速能量注入,热影响区域小,可有效控制作用区的温升,保证材料组织结构无显著变化;
- 2) 有机结合虚拟校形与实际校形,实现自动化、可视化校形,可以重复多次,直至满足精度要求。

较之传统校形方法,该方法具有如下显著优势:

- 1) 激光的单色性和分析性好,能量密度高,无污染,控制精度高,可以很方便地实现校形加工的柔性化、自动化以及数字化和智能化。
- 2) 工件的校形能力与校形精度可通过调整激光的光束质量、作用时间以及扫描路径等参数加以控制,特别适用于常规方法难以实现的大型工件的校形。
- 3) 通过揭示并掌握激光/材料的相互作用规律,可以在激光校形时,通过改善材料的组织、结构和/或残余应力分布,优化校形件的硬度、裂纹敏感性和疲劳性能。

到目前为止,有关激光校形技术的研究仍不多见。最早德国埃尔兰根大学的 Geiger^[7]在提出激光成形技术的应用领域时就指出该技术可用于汽车零部件的矫形、造船业船板的矫形及焊接件的校形等,并进行了应用试验,但迄今为止没有进一步的深入研究。夏寒剑^[8]对矫形机理进行了简单的描述,针对不锈钢板的简单弯曲进行了激光加热矫形的试验研究,得到了矫形过程中的影响因素变化规律。由于铝合金等轻金属材料特性与不锈钢的差异很大,激光与材料相互作用后对材料的组织及性能的影响差异更大,因而不锈钢板得到的一些规律不适用铝合金件的校形。Ueda 等^[9]针对低碳钢板和不锈钢板进行校平的试验研究,先通过胀形试验得到凸包,然后使用激光扫描将凸包校平,分析了校平的机理,给出了校平过程中激光功率和扫描路径对校平效果的影响,由于没有考虑板料的各向异性,研究的校形精度受到影响,且待校平件的初始残余应力分布仅限于等双拉状态,研究结论具有一定的局限性。从上述研究工作来看,有关激光校形的研究基本上仍处于试验研究阶段,缺乏对校形机理的深入研究,已报道的研究工作仅针对钢材,没有涉及到航空用的铝合金材料。鉴于激光校形技术的独特优势,目前国内已有一些航空、航天企业对该项技术表现出了极大的兴趣,但苦于没有成熟的技术而无法实际应用。本文选取飞机上常用的铝合金薄板,先通过三点弯曲试验得到样件,然后对其进行激光校形试验,试验结果验证了该工艺的可行性,为激光校形的工程应用提供了可借鉴的依据。

3 试 验

试验在中国科学院力学研究所材料工艺研究中心表面改性实验室进行。试验装置如图 1 所示,由 GOPOINT 材料试验机、Nd:YAG 激光器、激光光束反射镜、十字精密位移平台、K 型热电偶(直径 0.2 mm)、HIOKI 8430 数据记录仪、平板试件、压头和支撑块组成。试件材料选用飞机上常用的铝合金 2024、7075 和 6056 薄板,试件尺寸 150 mm×50 mm,厚度分别为 2 mm、2 mm 和 2.5 mm。

将试件放在三点弯曲工作台上,支座间的距离为 100 mm,手动调整工作台压头到与板接触。在试件长度方向中部加载至屈服后卸载,通过数据采集系统得到工件在机械压弯过程中的载荷-位移曲线。然后激光束沿工件下表面弯曲线处残余应力集中区进行照射,激光的输出功率为 140 W,激光的移动速度为

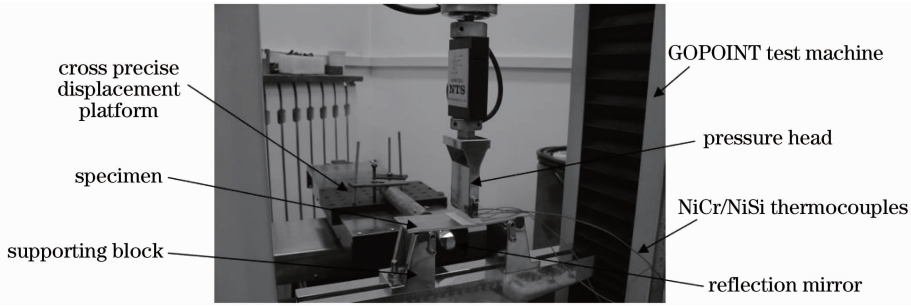


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental setup for laser correction

0.5 mm/s, 光斑直径为 6 mm, 薄板被照射表面涂碳黑以提高材料对激光的吸收率。扫描完成后在空气条件下自然冷却, 试件获取校形效果。采用 K 型热电偶测量激光照射过程中工件上表面粘贴点的温度, 通过 HIOKI 8430 数据记录仪记录并保存, 测温点的位置及编号如图 2 所示, 图中 CH1 为扫描路径起始端, 距边 5 mm; CH2 为扫描线中心; CH3 为扫描路径末端, 距边 5 mm。

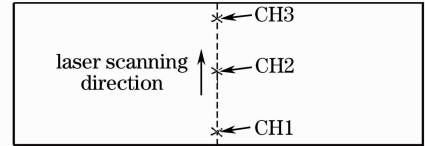


图 2 K 型热电偶粘贴位置

Fig. 2 Sticking positions of K type thermocouples

4 试验结果及分析

4.1 温度测量

由测温系统得到温度数据, 利用 Microsoft Excel 绘制出测量点温度随时间的变化曲线, 如图 3 所示。

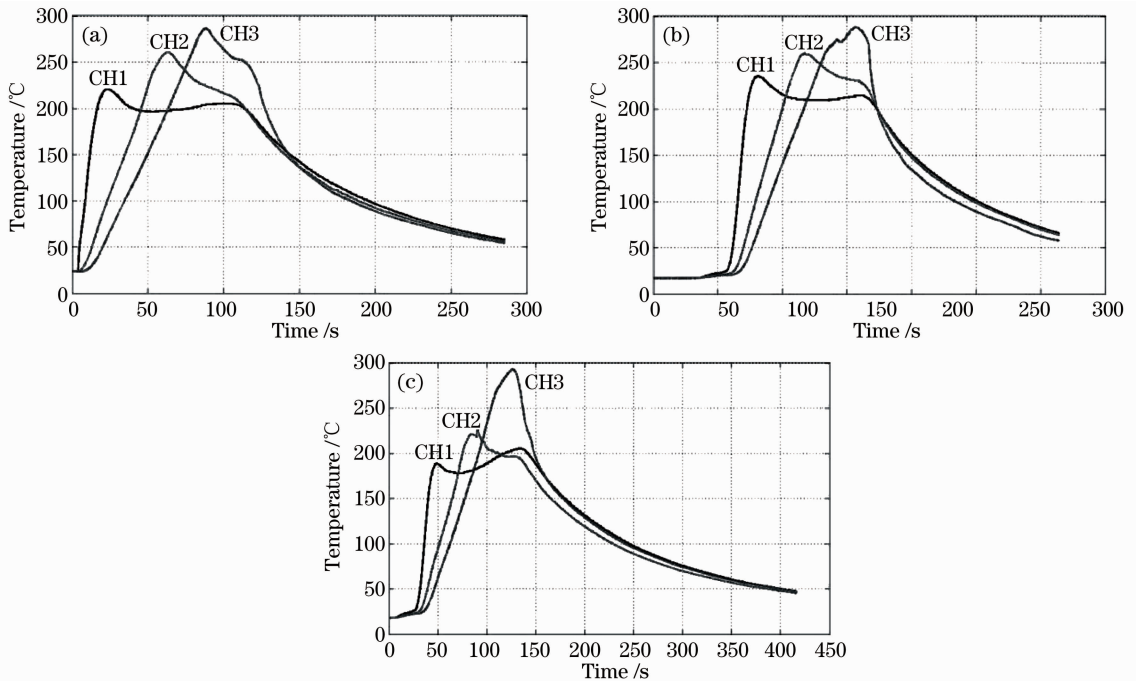


图 3 测量点温度随时间的变化曲线。(a) 2024-T4; (b) 7075-T6; (c) 6056-T751

Fig. 3 Variation of measured point temperature versus time during the process of laser scanning.

(a) 2024-T4; (b) 7075-T6; (c) 6056-T751

图 3 表明, 尽管试件的种类和厚度不同, 但校形过程中测量点的温度随时间的变化趋势相同。当激光束照射板料的下表面时, 由于热传导使得上表面温度迅速升高, 测量点 CH1、CH2、CH3 的升温速度随激光束照射位置的不同而变化, 很明显距离越近, 升温速度越快, 当激光扫描到测量点对应的下表面时, 测量点的温

度达到最高,当光斑沿着板宽方向扫到末端时,由于热量的逐渐积累,后者比前者达到的最高温度要高;停止扫描后,试件表面的温度呈阶梯式下降至室温,但明显程度不同,越靠近扫描的末端,越不明显,主要原因是激光扫描的速度较慢,使得散热减缓的程度受试件宽度的约束更显著。

4.2 载荷-位移试验曲线

为了得到最佳的校形效果,做了多组试验,最后选取材料刚产生明显屈服时的加载量为合适的初始加载量。由于不同材料的屈服极限有所不同,所以初始加载量是不同的。数据采集系统得到试件在3点弯曲过程中的载荷-位移试验曲线如图4所示。

图4表明试件在设定的初始加载量下,已出现了明显的屈服,说明试件进入了塑性阶段。卸载后的试件存在明显的塑性变形量,具体数据如表1中所示, α 即为卸载后试件中的塑性变形量。

4.3 激光扫描后位移变化量

初始变形及各阶段的残余变形示意图如图5所示,图中A是卸载线,B表示激光扫描后使试件产生校形的量值。

表1列出了激光扫描后试件中的残余变形量 β 、校形量 $\delta(\delta = \beta - \alpha)$ 及试件的校形率 $\psi(\psi = \delta/\alpha)$ 。为计算和测量方便,变形量用角度表示,示意图如图6所示。

表1 试验结果及分析数据

Table 1 Experimental results and analysis data

Material	Specimen size /mm	Forced displacement /mm	α / [mm/(°)]	β / (°)	δ / (°)	ψ / %
2024-T4	150×50×2	12	5.24(13.4)	12.8	-0.6	4.5
7075-T6	150×50×2	10	1.37(3.5)	3.2	-0.3	8.6
6056-T751	150×50×2.5	6	2.03(5.5)	5.4	-0.1	1.8



图6 变形量以角度计算的示意图

Fig. 6 Diagram of deformation value calculated in angle

分析表1所列的数据不难发现:激光的热作用使得加工后试件得到了不同程度的校形量。这说明激光热效应促使更多的弹性内能转化为塑性功,并使得残余变形量得到了部分释放。尽管校形率的大小随试件的材质和厚度的不同而不同,但所有试件的试验结果都清晰地表明了激光校形的效果,因此,该试验说明了铝合金薄壁件激光校形方法是可行的,但内在的本质和规律有待借助于过程的仿真模拟进一步探讨。

5 结论

试验结果及分析表明针对已弯曲成形的试件,对待校形的部位加以激光的热作用,通过材料发生的软化效应,促使该部位产生塑性变形,校形效果随试件的材质和厚度的不同而不同。试验数据的定量分析表明了激光校形技术的可行性。

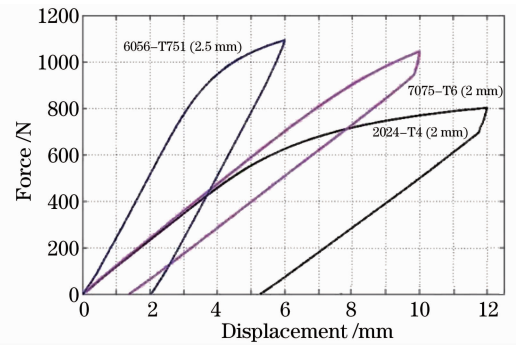


图4 载荷-位移试验曲线

Fig. 4 Force-displacement experimental curve

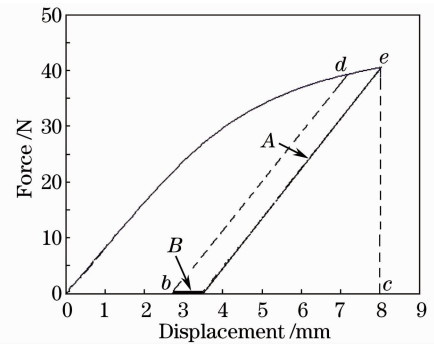


图5 初始变形及各阶段的残余变形示意图

Fig. 5 Diagram of initial deformation and residual deformation in different stages

参 考 文 献

- 1 Chen Guangnan, Wang Xiufeng, Luo Gengxing *et al.*. A Hybrid Forming Technique with Bending and Point Heat Source [P]. China Patent; CN100468244C, 2008
陈光南, 王秀凤, 罗耕星 等. 压弯、点热源复合成形方法[P]. 中国专利: CN100468244C, 2008
- 2 M. Geiger, F. Vollertsen. The mechanism of laser forming[J]. *Ann. CIRP*, 1993, **42**(1): 301~304
- 3 F. Vollertsen. An analytical model for laser bending[J]. *Lasers in Engineering*, 1994, **2**: 261~276
- 4 F. Vollertsen, M. Geiger, W. M. Li. FDM- and FEM-simulation of laser forming: a comparative study[C]. Proceeding of the Fourth International Conference on Technology of Plasticity, 1993. 1793~1798
- 5 X. F. Wang, G. N. Chen, Sh. G. Hu *et al.*. Research on dynamic micro-deformation under laser point source[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, **45**(12-13): 1515~1522
- 6 Peng Zhang, Bin Guo, De-Bin Shan *et al.*. FE simulation of laser curve bending of sheet metals[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2007, **184**(1-3): 157~162
- 7 M. Geiger. Synergy of laser material processing and metal forming[J]. *Ann. CIRP*, 1994, **43**(2): 563~570
- 8 Xia Hanjian. Laser Adjustment Research for Stainless Steel Sheet Metal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007
夏寒剑. 不锈钢薄板激光加热矫形技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007
- 9 Takashi Ueda, Eisuke Sentoku, Yoshihiro Wakimura *et al.*. Flattening of sheet metal by laser forming[J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2009, **47**(11): 1097~1102