

Ti/Al双金属薄壁件激光辅助旋压成形规律

谭祖龙¹ 龙锦川^{2*} 金俊松¹ 王新云¹ 邓磊¹ 唐学峰¹ 柴芳涛¹

1. 华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉, 430074

2. 中南大学机电工程学院, 长沙, 410083

摘要:针对Ti/Al双金属薄壁锥形件室温成形几何精度和力学性能较差的问题,提出使用激光辅助剪切旋压成形的方法来改善工件性能。对变形前沿的温度场进行分析,建立了激光功率需求随时间的变化模型。理论分析表明,通过控制激光功率增长曲线可以实现温度场的稳定控制。基于此建立了有限元模型,通过模拟结果研究了变形规律和物理场分布规律,并在旋压实验中对工艺进行了验证。研究表明,激光辅助剪切旋压时,Ti层和Al层在变形过程中的应力传递和应变分配提高了不同层间的协调变形能力,使成形件获得了良好的强度和塑性组合。与室温剪切旋压和不施加激光热源的热旋工艺相比,激光辅助剪切旋压可以显著提高Ti/Al双金属薄壁锥形件的贴模度和变形均匀性,改善整体的力学性能。

关键词: Ti/Al双金属;薄壁件;激光辅助;旋压成形

中图分类号: TG306

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.10.028

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Laser-assisted Spinning Forming Laws of Ti/Al Bimetallic Thin-walled Parts

TAN Zulong¹ LONG Jinchuan^{2*} JIN Junsong¹ WANG Xinyun¹ DENG Lei¹

TANG Xuefeng¹ CHAI Fangtao¹

1. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha, 410083

Abstract: To address the poor geometric accuracy and mechanics performance of Ti/Al bimetallic thin-walled conical parts formed at room temperature, a laser-assisted shear spinning process was proposed to enhance their performance. The temperature field at the deformation fronts was analyzed, and a time-varying model of laser power demand was established. Theoretical analysis demonstrated that stable control of the temperature field might be achieved by regulating the laser power growth curve. A finite element model was developed to investigate deformation behaviors and physical field distributions through simulation results. Experimental validation of the process was conducted. Findings indicate that during laser-assisted shear spinning, the stress transfer and strain distribution between the Ti and Al layers enhance interlayer coordinated deformation capability, resulting in favorable combinations of strength and plasticity in the formed parts. Compared with conventional room-temperature shear spinning and thermal spinning without laser heating, the laser-assisted approach significantly improves die-conforming accuracy and deformation uniformity of Ti/Al bimetallic parts, thereby optimizing their overall mechanics properties.

Key words: Ti/Al bimetallic; thin-walled part; laser assistance; spinning forming

0 引言

钛/铝层状复合材料作为一种新型结构材料,因其独特的性能优势而备受关注。该材料可将钛合金的高强度与铝合金的低密度、低成本特性有机结合,实现材料性能的优化组合^[1]。更为重要的是,通过调控组分材料种类和层厚等结构参数,可以精确设计复合材料的性能指标,从而满足不

同应用场景的特定需求^[2]。这些优异的性能特征使钛/铝层状复合材料在航空航天领域具有巨大的应用潜力^[3]。

在航空航天领域,薄壁锥形件作为关键基础零部件,其制造工艺一直备受关注。目前,剪切旋压工艺是成形此类零件的常用方法^[4]。然而,钛/铝双金属薄壁锥形件在室温成形过程中面临严峻挑战:由于钛、铝两种材料的变形能力存在显著差异,故极易出现变形不协调现象,导致开裂或层间脱层等缺陷。虽然采用热旋工艺可在一定程度上

收稿日期:2025-02-27

基金项目:国家自然科学基金(52305361,52175319)

提高钛/铝层状复合材料的变形能力,但两种材料性能的固有差异仍会导致变形不均匀和尺寸精度不足等问题。为解决这一技术难题,研究人员提出在旋压过程中引入实时加热以维持变形区域温度场稳定的工艺方案。目前常用的外加热源主要有火焰加热、感应加热和激光加热等^[5]。其中,激光加热凭借其热源集中、能量可控等特点,以及通过精确调节激光输出功率即可实现成形过程的温度控制,展现出独特的技术优势^[6]。

在激光辅助旋压成形研究方面,BRUMMER等^[7]通过对比多种材料在室温旋压和激光辅助热旋条件下的成形性能,证实了外加激光热源可显著提高难变形材料的可成形性和成形极限;冉津宇等^[8]针对铝合金椭球面薄壁件开展的激光辅助旋压实验研究表明,与室温旋压相比,该工艺可显著改善难变形材料的可旋性,同时大幅提高工件的厚度精度和贴模度;肖刚锋等^[9]采用数值模拟方法研究了钛合金锥形件激光辅助铲旋工艺,发现采用坯料整体预热结合激光辅助补热的工艺方案,可实现坯料基体表层高温、内层低温的温度梯度分布,这种温度场分布既有利于表面金属材料铲旋成形出法兰,又可有效抑制锥壁翘曲变形。然而,现有研究仍存在以下不足:首先,对激光加热温度场的精确控制研究较为匮乏;其次,研究对象多局限于单金属材料,缺乏针对钛/铝双金属剪切旋压的系统研究。

激光温度场作为局部加热能场,在旋压过程中对维持变形区域温度场稳定具有关键作用。然而,锥形件在成形过程中,坯料上各质点的运动轨迹呈现动态变化特征,这就要求激光功率必须根据质点空间位置和时间变化进行实时调整,因此,建立激光功率与质点空间位置及时间的动态关系模型,成为激光辅助剪切旋压技术研究的核心问题之一。

本文首先推导了锥形件剪切旋压过程中激光热源功率随加热位置变化的数学模型。在此基础上,利用ABAQUS有限元仿真软件建立了Ti/Al双金属激光辅助剪切旋压有限元模型,系统研究了Ti/Al双金属锥形件成形过程中的变形行为,重点分析了等效应力和等效塑性应变的分布规律。最后,通过激光辅助剪切旋压实验,验证了该工艺的可行性,并与室温剪切旋压、不施加激光的热剪切旋压工艺进行了对比分析。

1 激光功率模型

本文使用的激光加热器为光纤激光器,发射激光束能量密度分布符合高斯分布,热流密度分布函数如下:

$$q(r) = \frac{\beta n}{\pi R_0^2} P e^{-\beta \frac{r^2}{R_0^2}} \quad (1)$$

式中: P 为激光功率; n 为激光吸收率; R_0 为光斑的半径; r 为点到光斑中心的距离; β 为热流集中程度系数。

为简化计算,假设光斑内各处能量密度相同,用单位面积平均热功率表示为

$$q_0 = \frac{n(1 - e^{-\beta})P}{\pi R_0^2} \quad (2)$$

假设坯料上变形区域第一个质点距离圆心半径为 R_1 ,认为该点只有在激光光斑内时才被加热,因此实际加热时间小于该点运动经过光斑的总时长。加热过程中坯料的圆周运动和光斑的进给运动同时进行,质点在光斑内的运动轨迹为一条螺旋线,示意图见图1,轨迹的极坐标方程为

$$r = \frac{v_0}{2\pi n_0} \theta \quad (3)$$

式中: v_0 为激光光斑的进给速率; n_0 为芯模转速。

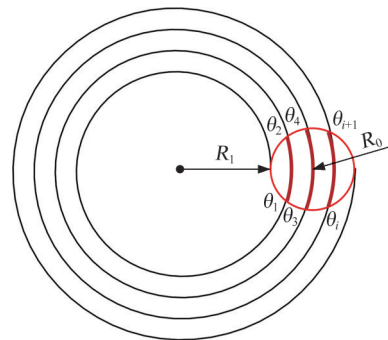


图1 质点相对运动轨迹与激光实际加热范围

Fig.1 The relative motion trajectory of particles and the actual heating range of laser

激光光斑边界的极坐标方程为

$$r = (R_1 + R_0) \cos \theta \pm \sqrt{R_0^2 - (R_1 + R_0)^2 \sin^2 \theta} \quad (4)$$

联立式(3)、式(4)得到一个方程,该方程没有简单的解析解,而坯料上任意一点的螺旋线轨迹方程和光斑的相交次数相同,因此假设交点分别为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 。对于每一对相邻的交点 θ_i 和 θ_{i+1} ,相交部分长度为

$$L_i = \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} \sqrt{\left(\frac{v_0 \theta}{2\pi n_0}\right)^2 + \left(\frac{v_0}{2\pi n_0}\right)^2} d\theta \quad (5)$$

所有相交部分总长度为

$$L_a = \sum_{i=1}^{n-1} L_i \quad (6)$$

从 θ_1 到 θ_n 这一段螺旋线的总长度为

$$L_s = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sqrt{\left(\frac{v_0 \theta}{2\pi n_0}\right)^2 + \left(\frac{v_0}{2\pi n_0}\right)^2} d\theta \quad (7)$$

因此实际加热时间 Δt 为

$$\Delta t = \frac{L_a 2R_0}{L_s v_0} \quad (8)$$

根据 Fourier 定律计算该质点单位时间热传导过程的散热量 Q_c , 可知该值只与温度梯度有关, 而激光辅助剪切旋压过程默认变形区域温度处于稳定状态, 因此认为 Q_c 为一个定值。根据 Stefan-Boltzmann 定律计算该质点单位时间热辐射过程的散热量 Q_r , 同理该值为一个定值。根据牛顿冷却定律计算该质点单位时间热对流的散热量 Q_{cv} , 公式如下:

$$Q_{cv} = h(T - T_{amb}) \quad (9)$$

其中, h 为坯料表面与环境之间的传热系数, T 为成形温度, T_{amb} 为环境温度。成形温度和环境温度为定值, 只需考虑 h 的变化情况, 在实际应用中常使用经验公式来计算:

$$h = CRe^m \quad (10)$$

$$Re = \frac{vd}{\mu} \quad (11)$$

式中: C 为与流体物性相关的参数; m 为与换热面几何形状相关的参数, 旋压过程的热对流行为近似于平板边界层流动, 故 m 取 1; Re 为雷诺数; d 为特征长度; μ 为流体的运动黏度; v 为流体的流速, 即质点的线速度。

对于坯料上的质点, 从开始加热到离开光斑范围特征长度从 R_1 变化为 $R_1 + 2R_0$, 而 R_0 远小于 R_1 , 因此 d 的改变量忽视不计。所以, 认为质点单位时间对流换热量 Q_{cv} 与线速度成正比, 即与 R_1 成正比。

结合式(2)和式(8), 单位时间内半径 R_1 处质点实际吸收的总能量为

$$E_1 = q_0 \Delta t = \frac{L_a 2n(1 - e^{-\beta})P}{L_s \pi R_0 v_0} \quad (12)$$

经过时间 Δt , 质点所在半径 R 发生改变, 公式如下:

$$R = R_1 + v_0 \Delta t \quad (13)$$

根据式(5)、式(6), L_a 的变化可以忽略不计, 对 L_s 进行积分计算:

$$\int \sqrt{\left(\frac{v_0 \theta}{2\pi n_0}\right)^2 + \left(\frac{v_0}{2\pi n_0}\right)^2} d\theta = \frac{v_0}{4\pi n_0} (\theta \sqrt{\theta^2 + 1} + \ln|\theta + \sqrt{\theta^2 + 1}|) + C \quad (14)$$

其中, $\ln|\theta + \sqrt{\theta^2 + 1}|$ 项可忽略不计, $\theta \sqrt{\theta^2 + 1}$ 可近似为 θ^2 , 不同半径处的点受激光加热时间一样, 螺旋线轨迹对应的 θ 值范围线性增加, 结合式(3)与数列知识可得, 随着 R 的增大, L_s 的值近似

线性增大, 结合式(13), 将 L_s/L_a 视为 Δt 的一阶函数 $C + k\Delta t$, 因此 E_1 可表示为

$$E_1 = \frac{1}{C + k\Delta t} \frac{2n(1 - e^{-\beta})P}{\pi R_0 v_0} \quad (15)$$

结合式(9)~式(11), 经过时间 Δt , 单位时间内半径 R 处质点的散热量为

$$E_2 = Q_c + Q_r + \frac{Cd}{\mu} (T - T_{amb}) n_0 (R_1 + v_0 \Delta t) \quad (16)$$

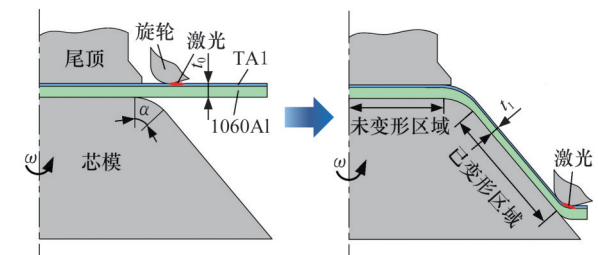
为保证旋压过程变形区域温度处于稳定状态, 使 $E_1 = E_2$, 对应的激光功率 P 随时间 t 变化公式为

$$P = \frac{\pi R_0 v_0 (C + kt) [Q_c + Q_r + \frac{Cd}{\mu} (T - T_{amb}) n_0 (R_1 + v_0 t)]}{2n(1 - e^{-\beta})} \quad (17)$$

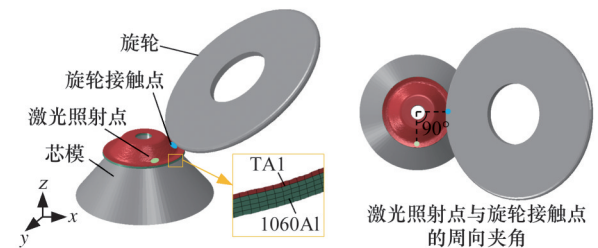
2 有限元建模与实验方案设计

2.1 有限元模型建立

基于剪切旋压原理在 ABAQUS/Explicit 有限元软件上建立了 TA1/1060Al 双金属薄壁件激光辅助剪切旋压有限元模型, 部件包括芯模、旋轮、坯料, 原理及装配图见图 2。旋压过程中芯模和旋轮基本上不产生塑性变形, 设置为刚体, 坯料设置为可变形体。激光照射点和旋轮与坯料的接触点位于同一个圆上, 圆周方向间隔 90° 的夹角。坯料在厚度方向分为 TA1 层和 1060Al 层, 厚度比为 1:4。



(a) 激光辅助剪切旋压原理



(b) 有限元模型装配图

图 2 原理和装配图

Fig.2 Principle and assembly diagram

旋压坯料为 TA1/1060Al 商用复合板, 两种金属组分的力学性能参数^[10-11]如表 1 所示。TA1

和1060Al各自的应力应变曲线见图3。因为复合板的界面粘接强度超出铝基体的抗撕裂强度^[10],因此有限元模型中TA1层和1060Al层的界面通过节点绑定连接。

表1 TA1和1060Al力学性能参数

Tab. 1 Mechanical properties parameters of TA1 and 1060Al

材料	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
TA1	4.499	110	0.37
1060Al	2.705	66.7	0.33

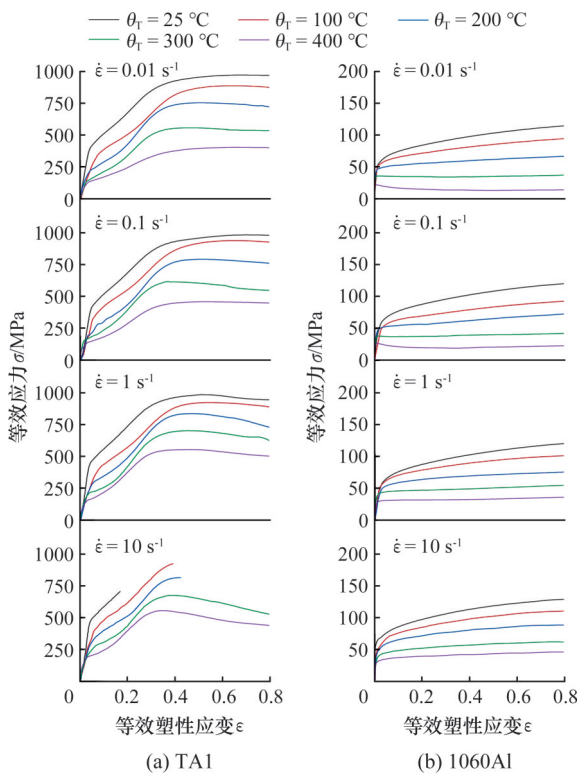


图3 等效应力-应变曲线

Fig. 3 Equivalent stress-strain curves

为了避免不参与变形的单元始终处于运动状态以及变形体的惯性引起较大网格扭曲,从而缩短计算时间,模拟中,基于相对运动原理,将芯模和坯料的运动自由度完全固定,并设置旋轮自内向外做螺旋线运动。坯料网格划分为六面体网格,网格类型为C3D8RT。坯料的厚度方向划分为5层,其中1层为TA1,4层为1060Al;与尾顶接触的部分不参与变形,因此径向上网格划分为3层;变形区域径向网格层数为43,网格数为57 730。坯料底部未变形区域通过固定约束与芯模上表面粘接,其余区域与芯模之间以及坯料上表面与旋轮之间定义为摩擦接触,并采用罚摩擦算法;坯料与旋轮之间摩擦因数为0.01^[12],与芯模之间摩擦因数为0.05^[13]。

旋压开始时,坯料初始温度设置为350 °C。

芯模和旋轮温度设置为25 °C,与空气的传热系数为20 W/(m²·K)。坯料与芯模的传热系数为400 W/(m²·K),与旋轮的传热系数为200 W/(m²·K),与空气的传热系数为100 W/(m²·K),热辐射系数为0.2。

2.2 激光热源实现方式

在ABAQUS/Explicit中,通过写入Vdflux子程序进行移动热源的施加。高斯热源公式如式(1)所示,具体参数设置如下:为提高激光吸收率,在双金属坯料的Ti层表面涂上一层石墨润滑脂,因此激光吸收率设置为0.8^[14];光斑半径为3 mm,因热影响区范围较小,热流集中程度系数 β 取1。

由式(17)可知所需的激光功率 P 为时间 t 的二次函数。为了方便实施,采用微分法对功率变化曲线进行简化,如图4a所示。假设旋加的总时间为 t_0 ,将功率从 $t=0$ 到 $t=t_0$ 的整个变化过程等分为4段连续线性增长的过程。在有限元模拟中,预热温度为350 °C、进给量为0.7 mm/r、芯模转速为300 r/min。激光功率随时间变化的设置如下:0~2.5 s,激光功率为1200~1275 W;2.5~5 s,激光功率为1275~1400 W;5~7.5 s,激光功率为1400~1575 W;7.5~10 s,激光功率为1575~1800 W。

激光照射点与旋轮运动轨迹如图4b所示,旋轮与激光照射点的起始位置在 xy 平面处于同一个圆上,相隔1/4个圆周,因此两者的螺旋线轨迹在 xy 平面上的投影基本上是重合的。

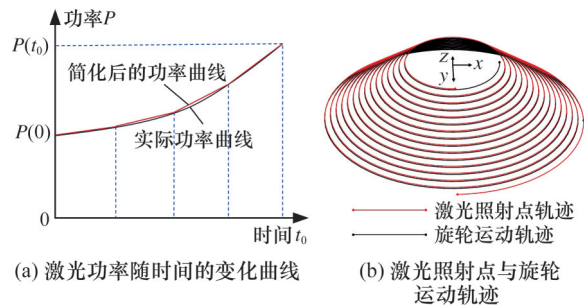


图4 激光功率变化以及激光与旋轮运动轨迹

Fig. 4 Laser power changing with time, laser and roller motion trajectory

2.3 旋压实验设计

激光辅助剪切旋压实验在PS-CNCVGP450立式旋压机上进行,设备及装置如图5所示。为使坯料达到预定变形温度,采用电磁感应加热装置提前加热。坯料到达预定的变形温度时,旋轮开始运动,同时激光开始加热。坯料上,激光照射点与旋轮作用点位于同一个圆上,间隔1/4个圆周,以加热预变形区域。激光功率参数设置与前

述有限元模拟的设置相同。通过红外测温装置实时监测旋压过程中变形区域的温度变化情况。

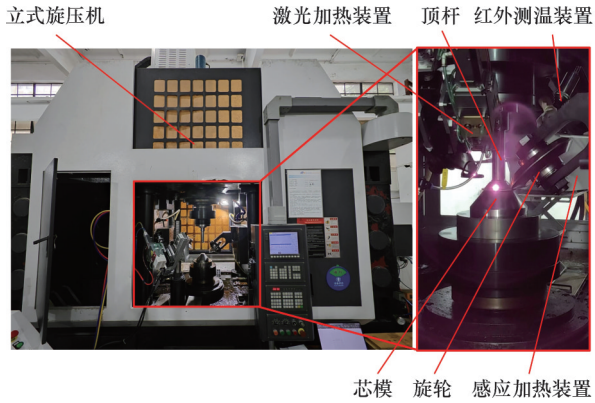


图5 旋压设备及装置

Fig.5 Spinning equipment and device

为了验证激光辅助剪切热旋成形工艺的合理性,进行了室温剪切旋压和激光辅助剪切热旋的对比实验;同时,对比了加热到预热温度后不施加激光热源和施加激光热源两种条件下旋压件的成形质量。

通过三维扫描仪扫描旋压件内表面轮廓,再使用Geomagic系列软件处理扫描获得的三维点云数据,与理论轮廓对比,通过计算得到旋压件的离模间隙和圆度。离模间隙通过对比每一点的空间坐标和理论轮廓曲线,计算出最小距离值来实现;圆度通过在所有点的z轴方向等距离选取6个面,以公式计算各个面内的点与z轴的距离来实现。计算方法如图6所示。采用超景深显微镜测量截面壁厚。在薄壁锥形件的侧壁上沿着径向切取拉伸试样,进行拉伸性能测试,如图7所示。

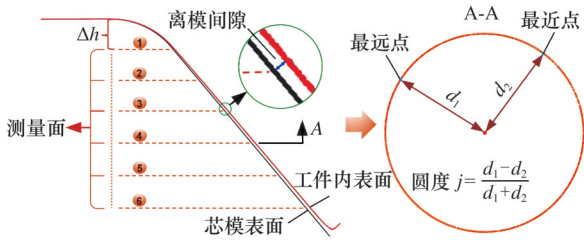


图6 离模间隙和圆度测量计算方法

Fig.6 Measurement and calculation method of die-off clearance and roundness

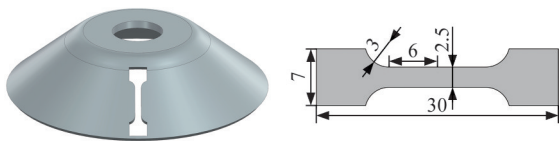


图7 薄壁锥形件拉伸试样取样位置及尺寸

Fig.7 Sampling position and size of tensile specimen for thin-walled conical parts

3 结果与讨论

3.1 成形规律研究

根据有限元仿真计算结果,对Ti/Al双金属薄壁锥形件的物理场分布规律进行研究。图8所示为Ti/Al双金属薄壁锥形件成形过程中不同变形程度时的温度分布和应力三轴度变化。从图8a和图8b中可以看到,表面Ti层的温度明显高于径向同一位置处的Al层,这是因为激光直接加热的是Ti层,且Ti的热导率只有Al热导率的十分之一,热量不能很快从Ti层传递到Al层,Ti层和Al层的温度差约为50℃。在旋压过程中,待变形区的法兰部分出现明显的向Ti侧翘起,且在变形末期,Ti层的伸长量小于Al层的伸长量,出现Al层外流现象。

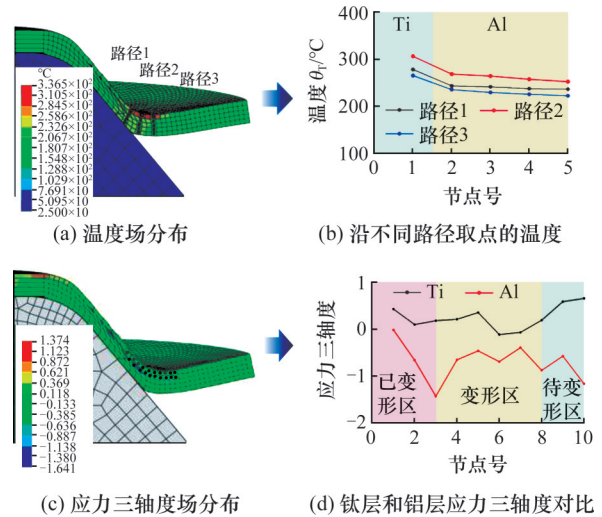


图8 温度场分布和应力三轴度变化

Fig.8 Temperature field distribution and distribution of stress triaxiality

根据变形程度,可以把坯料分为已变形区、变形区和待变形区三个区域。在Ti层和Al层中分别按照已变形区、变形区、待变形区的顺序选取10个单元,获取不同区域下不同层的应力三轴度变化,如图8c和图8d所示,可以看出,与单金属材料剪切旋压变形行为不同的是,Ti/Al双金属坯料上变形区的表面Ti层处于拉应力状态,而内部Al层处于压应力状态。对于Ti层,屈服强度远高于Al层,因此使单元压缩的正应力和旋轮向前运动施加的剪切应力大小差异不大,当剪切应力起主导作用时,单元处于拉应力状态。而Al层主要受到正应力影响,产生大的压缩变形。在界面的协调作用下,Ti层和Al层的不均匀变形使坯料整体向Ti侧翘曲。在图8d中,已变形区的Ti层和Al层单元都处于拉应力状态,这是因为该区域主

要受到旋轮向下移动的拉力作用。待变形区的Al层同样处于压应力状态,这是因为正在变形区的大量Al向外流动,挤压待变形区的Al基体,而Ti层压缩变形量远小于Al层,因此,旋压结束后Al层的伸长量大于Ti层,出现外流现象。

图9a和图9b所示为模拟等效应力场和等效塑性应变场分布。沿着旋压件已变形区域壁厚方向的网格由外向内选取6个路径点,提取路径上不同距离处的等效应力和等效塑性应变值,结果如图9c和图9d所示。较硬的Ti层等效应力达500 MPa,Al层等效应力为80 MPa,Ti层和Al层通过应力传递达到平衡状态,应力值在材料的各自屈服强度附近,表明两者都发生了大塑性变形。与旋轮接触的区域正在经历剧烈塑性变形,应力值最高,表面的Ti层受到旋轮的碾压作用,应力值达到868 MPa,随后旋轮继续碾压下一区域,已变形的部位表面Ti层应力值降低到500 MPa左右,这与上文提到的已变形区受到旋轮拉应力有关,集中的应力得到释放。由图9d可知,Ti/Al双金属锥形件的层状复合结构促使Ti层和Al层产生了应力分配和应变分配,较硬的Ti层应变只有0.7,从Ti层过渡到Al层应变产生陡升,达到4,随后逐渐降低到2.5左右,说明Ti和Al的界面处产生了强烈的剪切变形。

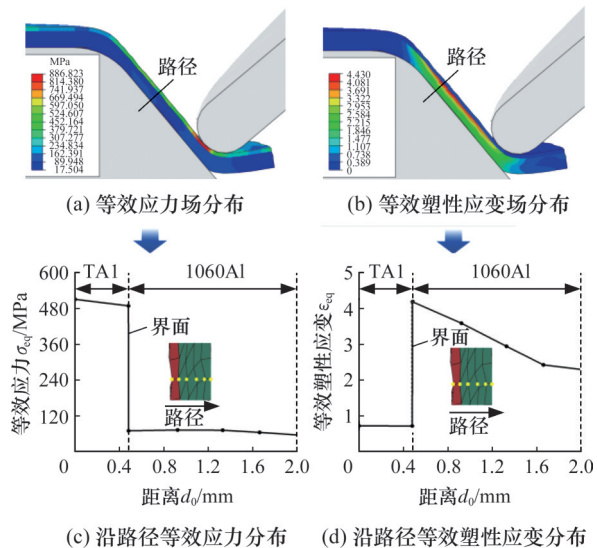


图9 等效应力和等效塑性应变

3.2 旋压结果分析

在350℃激光辅助剪切旋压实验过程中,采用红外测温仪测量变形前沿实时温度,通过摄像的方式记录温度变化历程,并与模拟结果进行对比,温度变化如图10所示。

室温剪切旋压和350℃下激光辅助剪切旋压

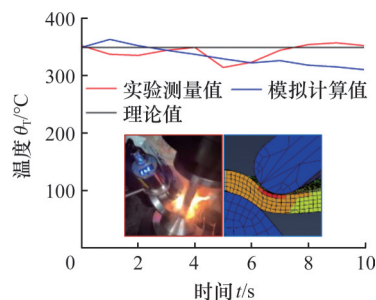


图10 实验与模拟变形区域温度变化

Fig.10 Temperature variation curve of deformation zone in laser assisted shear spinning experiment

的成形质量对比如图11所示。由图11a可知,随着与圆心距离的增大,离模间隙逐渐增大。室温剪切旋压的离模间隙最大值为0.448 mm,激光辅助剪切旋压的离模间隙最大值只有0.164 mm,因此激光辅助剪切旋压的贴模度是室温剪切旋压的近三倍。室温剪切旋压和350℃下激光辅助剪切旋压成形件的拉伸性能测试结果如图11b所示,激光辅助剪切旋压成形件在高温下抗拉强度下降了18%,而断裂延伸率提高了27%,这主要是因为350℃下激光辅助剪切旋压时Al层进行动态再结晶导致晶粒细化,整体的强度下降而塑性得到提高^[15]。激光能场给材料变形前沿施加了一个稳定的温度场,Ti层和Al层的塑性变形能力得到提高,这也是断裂延伸率提高的原因之一。根据图11c,激光辅助剪切旋压成形件的壁厚精度显著高于室温剪切旋压成形件,更加接近理论壁厚,说明激光能场提高了材料的塑性变形能力。图11d展示了两种工艺下成形件轴向上的圆度分布情况,激光辅助剪切旋压成形件的圆度明显低于室温剪切旋压成形件,表明激光能场可以改善旋压成形

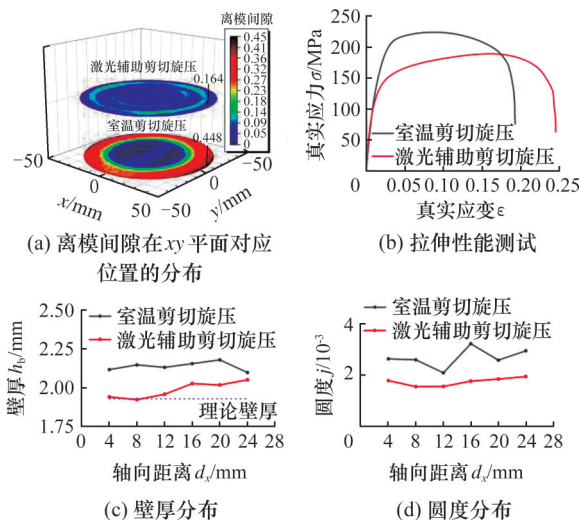


图11 室温剪切旋压与350℃下激光辅助剪切旋压对比

Fig.11 Comparison of shear spinning at room temperature and laser-assisted shear spinning at 350 °C

过程中材料在周向上流动的均匀性。

图12所示为350℃下激光辅助剪切旋压与350℃下不施加激光剪切旋压的结果。由图12a可知,外加激光热源后,离模间隙最大值从0.352 mm减小到0.164 mm,且350℃下激光辅助剪切旋压成形件的离模间隙分布不再是越靠近边缘处越大,而是出现波纹状分布。这是因为变形区域保持在350℃左右时,内层的Al处于软化状态,降低了回弹现象。根据图12b,相较于不施加激光热源的成形件,激光辅助剪切旋压成形件的抗拉强度基本不变,而断后伸长率提高了33%,这是因为不施加激光热源时,随着旋压的进行,成形区域温度持续下降,变形量较大的铝层位错不断累积,导致旋压后的区域塑性不断下降^[16]。如图12c所示,两种工艺的成形件壁厚整体分布相差不大,激光辅助剪切旋压下前期减薄量较大,但后期由于变形前沿材料的堆积导致减薄量减小。图12d则展示了两种工艺下轴向圆度分布差异,激光辅助剪切旋压成形件的圆度明显低于不施加激光剪切旋压,这是因为在不施加激光热源的情况下,坯料变形前沿温度不断降低,位错堆积导致材料的塑性变形能力下降,提高了起皱和扩径等缺陷出现的概率,导致周向上与理论轮廓的偏离程度较大。

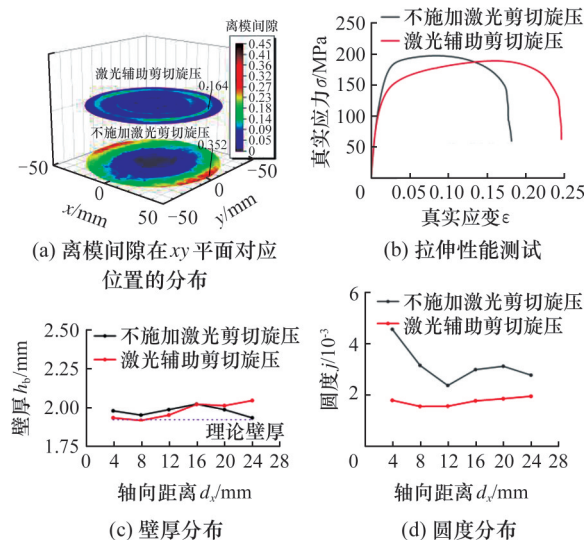


图12 350℃下不施加激光剪切旋压与350℃下激光辅助剪切旋压对比

Fig.12 Comparison of laser assisted shear spinning at 350℃ and laser assisted shear spinning at 350℃

4 结论

基于激光辅助剪切旋压原理推导了激光功率变化模型,通过有限元模拟嵌入激光热源模型,验

证了模型的可行性,并研究了TA1/1060Al双金属锥形件的变形规律,得出以下结论:

1)激光功率变化模型指出,在激光辅助剪切旋压过程中,随着旋轮向外进给运动,实际激光加热区域不断缩小,需要的激光功率增加。变形区域的对流换热占据主导地位,散热量随着坯料半径的增加而增加,为维持变形区域温度场的稳定,需要的激光功率呈增长趋势,激光功率随时间变化曲线呈现二次函数形式。

2)TA1/1060Al双金属薄壁锥形件在变形过程中由于界面的协调作用,实现了应力传递和应变分配。钛层和铝层存在明显的应力和应变梯度,较软的铝层变形量大,处于压应力状态;较硬的钛层变形量小,处于拉应力状态。材料的协调变形能力缓解了变形时的应力集中现象,提高了整体的塑性。

3)与室温剪切旋压相比,激光辅助剪切旋压成形件的几何精度得到显著提高,贴模度和壁厚改善明显,周向变形均匀性得到提高,同时成形件的断后伸长率提高了27%。与不施加激光热源的热旋相比,激光辅助剪切旋压成形件的几何精度和力学性能改善非常明显,贴模度和变形均匀性得到显著提高,断后伸长率提高了33%。

参考文献:

- [1] 韩建超,刘畅,贾磊,等. 钛/铝复合板研究进展[J]. 中国有色金属学报,2020,30(6):1270-1280.
HAN Jianchao, LIU Chang, JIA Yi, et al. Research Progress on Titanium/Aluminum Composite Plate [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals. 2020, 30(6):1270-1280.
- [2] CHEN Wenhua, HE Weijun, LUO Nianchun, et al. Effect of Layer Thickness on the Enhanced Strength and Ductility of Laminated Ti/Al Composite [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 859: 144230.
- [3] 石文静,高峰,柴洪友. 复合材料在航天器结构中的应用与展望[J]. 宇航材料工艺,2019,49(4):1-6.
SHI Wenjing, GAO Feng, CHAI Hongyou. Application and Expectation of Composite in Spacecraft Structure [J]. Aerospace Materials & Technology, 2019,49(4):1-6.
- [4] 张洋,韩冬,杨延涛,等. 锥形件剪切旋压的研究现状及发展方向[J]. 热加工工艺,2023,52(9):7-12.
ZHANG Yang, HAN Dong, YANG Yantao, et al. Research Status and Development Direction of Shear Spinning of Conical Parts [J]. Hot Working Technology, 2023,52(9):7-12.

- [5] ZHAN Mei, YANG He, GUO Jing, et al. Review on Hot Spinning for Difficult-to-deform Lightweight Metals[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(6):1732-1743.
- [6] KRATKY A. Laser Assisted Forming Techniques [C]// XVI International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-power Lasers. Gmunden, 2006:634615.
- [7] BRUMMER C, ECK S, MARSONER S, et al. Laser-assisted Metal Spinning for an Efficient and Flexible Processing of Challenging Materials [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 119:012022.
- [8] 冉津宇,王凤琪,于忠奇,等. 铝合金球面薄壁件激光辅助剪切旋压成形实验[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(10):1337-1345.
- RAN Jinyu, WANG Fengqi, YU Zhongqi, et al. Experiment of Laser Assisted Shear Spinning for Aluminum Alloy Spherical Thin-walled Parts [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University[J]. 2023, 57(10):1337-1345.
- [9] 肖刚锋,杨博文,常世荣,等. 基于数值模拟的钛合金锥形件激光辅助铲旋成形研究[J]. 塑性工程学报, 2024, 31(4):200-207.
- XIAO Gangfeng, YANG Bowen, CHANG Shirong, et al. Research on Laser-assisted Shovel Spinning Forming of Titanium Alloy Conical Parts Based on Numerical Simulation [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31(4):200-207.
- [10] 李励. 钛/铝复合板振动铸轧机理与界面性能控制研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2024.
- LI Li. Study on Mechanism and Interface Control of Twin-roll Casting With Roll Vibration for Ti/Al Clad Sheet [D]. Qihuangdao: Yanshan University, 2024.
- [11] 王飞龙,张勇,龙刚,等. TA1工业纯钛热物性参数测量及应用研究[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(2):48-52.
- WANG Feilong, ZHANG Yong, LONG Gang, et al. Thermal Parameters Measurement and Application of TA1 Industrial Pure Titanium [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42(2):48-52.
- [12] 邵玉林,刘博,潘贵平,等. TA1钛合金药型罩剪切旋压成形塑性变形规律的数值模拟研究[J]. 精密成形工程, 2024, 16(8):1-10.
- SHAO Yulin, LIU Bo, PAN Guiping, et al. Numerical Simulation of the Plastic Deformation of Conical Shaped Charges with TA1 Titanium Alloy Liner in Shear Spinning Forming [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(8):1-10.
- [13] GAO Pengfei, YAN Xinggang, LI Fuguo, et al. Deformation Mode and Wall Thickness Variation in Conventional Spinning of Metal Sheets [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2022, 173:103846.
- [14] 解玉坤. 2A12铝合金激光切割表面处理与吸收率测定研究[D]. 汉中:陕西理工学院, 2016.
- XIE Yukun. 2A12 Aluminum Alloy Laser Cutting Surface Treatment and Study on the Determination of Absorptivity [D]. Hanzhong: Shaanxi University of Technology, 2016.
- [15] ZHANG Jiayang, LI Feng, KANG Fuwei, et al. Double Effects of Recrystallization Behavior on Grain Morphology Evolution and Mechanical Properties of Al/Mg/Al Composite Plate by Hard Plate Rolling [J]. Progress in Natural Science, 2024, 34(5):1029-1038.
- [16] 焦子腾. 7A85铝合金热加工过程位错密度及组织演变规律研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2019.
- JIAO Ziteng. Study on Dislocation Density and Microstructure Evolution of Hot Working Process of 7A85 Aluminum Alloy [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:谭祖龙,男,2001年生,硕士研究生。研究方向为旋压成形技术。E-mail:M202371010@hust.edu.cn。龙锦川(通信作者),男,1995年生,讲师。研究方向为先进成形工艺、模具与装备。E-mail:longjc1226@csu.edu.cn。

本文引用格式:

谭祖龙,龙锦川,金俊松,等. Ti/Al双金属薄壁件激光辅助旋压成形规律[J]. 中国机械工程, 2025, 36(10):2389-2396.

TAN Zulong, LONG Jinchuan, JIN Junsong, et al. Laser-assisted Spinning Forming Laws of Ti/Al Bimetallic Thin-walled Parts [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(10):2389-2396.