

文章编号: 0258-7025(2009)05-1261-06

激光辅助预应力成形的相似性问题

彭青^{1,2} 陈光南¹ 王秀凤³

(¹中国科学院力学研究所, 北京 100190; ²中国科学院研究生院, 北京 100039)
³北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘要 根据激光辅助预应力成形的物理模型,以激光辅助预应力成形过程中的温度场、成形效率、弹性能转化比等物理量为目标,通过方程分析法以及量纲分析,提出了一组无量纲参数,确定了相似准则。使用有限元方法分析了满足几何相似和物理相似的模型比为1:3两个模型。结果表明,满足相似准则的两个模型,在相应的输入参量下,其物理量相似。

关键词 激光技术; 相似准则; 量纲分析; 预应力; 有限元方法

中图分类号 O303; TN249; TG386.3¹ **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093605.1261

Similarity Criterion of Laser-Assisted Pre-Stress Forming

Peng Qing^{1,2} Chen Guangnan¹ Wang Xiufeng³

¹Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

²Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

³School of Mechanical and Automation, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083, China

Abstract According to the physical model of laser-assisted pre-stress forming, a set of dimensionless quantities was proposed and a similarity criterion was established with equation analysis and dimensional analysis, for the physical quantities such as temperature field, forming efficiency, and elastic energy conversion. Two models with a model ratio of 1:3 under geometry and physical similarities were analyzed with finite element methods. The results show that with the models satisfying similarity criterion, the output quantities are of physical similarity in correspondence with the input quantities.

Key words laser technique; similarity criterion; dimensional analysis; pre-stress; finite element methods

1 引言

因具有重量轻、强度高、抗疲劳、密封性和安全性好等一系列优势,筋条与蒙皮一体化复杂薄壁结构的工程应用日益广泛。整体壁板^[1]作为一种典型的一体化复杂薄壁结构,具有重量轻、气密性好、安全性高的特点,在现代飞机设计中被普遍采用。这种一体化壁板是保障新型(大)飞机气动性能和承载能力的基本组件。弯曲是这类零件的主要成形方式。但是由于其结构特性,弯曲成形时这类零件的

变形抗力高、回弹大、单次成形量小且成形精度低^[2,3]。尤其是对于结构完整性和服役安全性要求严格的高筋条整体壁板,在成形的过程中不允许出现屈曲和微裂纹等变形损伤。因此,整体壁板的成形一直成为大飞机制造等工程领域的关键难题^[1-7]。

针对这一难题,陈光南等^[8,9]近期提出了激光辅助预应力成形方法(Laser-assisted Pre-stress Forming)。该方法的原理是:在弯曲成形复杂薄壁

收稿日期: 2008-07-17; 收到修改稿日期: 2008-09-26

基金项目: 中国科学院力学研究所三期创新项目资助课题。

作者简介: 彭青(1983-),男,博士研究生,主要从事先进制造与材料工艺力学等方面的研究。

E-mail: chase.pq@gmail.com

导师简介: 陈光南(1948-),男,研究员,主要从事先进制造与材料工艺力学等方面的研究。E-mail: gnchen@imech.ac.cn

结构工件(如整体壁板)时,以一定强度的激光束扫描其弹性变形能集中的难变形区域,通过提升该区域内材料的温度降低其屈服强度并增强其塑性变形能力,促使工件内的弹性变形能转化为塑性功。在机械加载条件一定的情况下,工件的成形能力与成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。本文将围绕激光辅助预应力成形方法,简化其物理模型,重点探讨其相似性规律。

2 物理模型

激光辅助预应力成形的加工步骤如下:

1) 使用三点弯曲(或者四点弯曲、胎模弯曲)对试件进行加载,如图1中箭头1所示。一般来说,为了保证工件在加载过程中不发生破坏或者失稳,工件变形程度控制在弹性范围以内;

2) 保持工件变形,以激光扫描弹性能分布集中的区域,如图1中箭头2所示。在工件上产生非均匀的温度场,从而使材料屈服极限不同程度地降低,将已有的弹性能转化为塑性功;

3) 将工件冷却、卸载,如图1中箭头3所示。

步骤1中的机械加载量(压头向下位移)一般被控制在这样一个范围:工件的变形是弹性的。由于

激光的参与,该弹性应变能被转化为塑性功。这是一个激光诱导温度场与机械加载的既有应力场的耦合作用过程。温度场的主要作用是其改变了材料的物理力学属性,降低了材料屈服极限,导致了弹性能向塑性功的转化。但是,反过来,该过程的应力应变场对温度场的影响则一般被认为是可以忽略的^[10-15]。因此,可以先求解激光加热所产生的温度场,然后求解应力场。

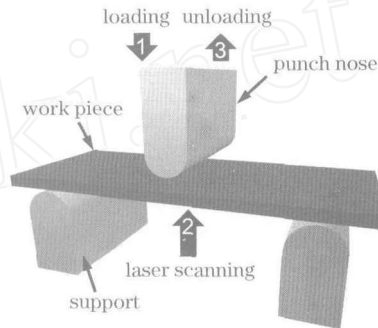


图1 激光辅助预应力成形示意图

Fig. 1 Schematic for laser-assisted pre-stress forming

热传导的控制方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T), \quad (1)$$

其中 ρ 为密度, c 为比热容, k 为热导率, t 为时间, T 为温度。应力应变场的控制方程为

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \dot{\sigma}_{ij} - \delta_{ij} \frac{\nu}{E} \dot{\sigma}_{kk} + (1-g)\lambda \left(\sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{\sigma_{kk}}{3} \right) + \delta_{ij} \alpha \dot{T}, \quad (2)$$

其中

$$\lambda = \begin{cases} 0 & \text{if } \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} < k^2, \text{ or if } \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} = k^2 \text{ and } s_{ij} s_{ij}^k \leq 0 \\ \frac{s_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}{2k^2} \text{ and } s_{ij} \dot{s}_{ij} = 0 & \text{if } \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} = k^2 \text{ and } s_{ij} s_{ij}^k \geq 0 \end{cases}. \quad (3)$$

e_{ij} , s_{ij} 分别为偏应变张量和偏应力张量。(2)式中弹性状态下, $g=1$; 塑性状态下 $g=0$, 即

$$g = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} < k^2, \text{ or if } \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} = k^2 \text{ and } s_{ij} s_{ij}^k \leq 0 \\ 0 & \text{if } \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} = k^2, s_{ij} \dot{s}_{ij} = 0 \text{ and } s_{ij} s_{ij}^k \geq 0 \end{cases}. \quad (4)$$

在整个加工过程中,弹性能被转化为塑性功,定义一个描述能量转化率的参量 ξ

$$\xi = \frac{E_p}{E_{el}} \times 100\%, \quad (5)$$

其中 E_{el} 为加载时的总弹性能, E_p 为成形后的总塑性功。 ξ 的物理含义是激光的参与是弹性能向塑性功转化的转化比例。 ξ 值越接近 1, 成形效果越好。

3 量纲分析

Π 定理是量纲分析的一般定理,可以概述如下:对于某物理现象,其涉及到 n 个变量,其中含有 m 个基本变量,则此 n 个变量之间的关系可以用 $(n-m)$ 个无量纲的 Π 项表示。

激光辅助预应力成形物理体系中的表征物理量包括如下几个方面。激光的相关参数:激光功率 P ,

光斑大小 r , 扫描速度 V , 材料的吸收系数 β ; 机械加载相关参数: 压头半径 r_p , 预加载时的弯曲挠度 ω_0 ; 试样的结构参数: 试样在支撑点之间的长度 L , 试样宽度 W , 试样厚度 δ ; 试样的材料相关参数: 密度 ρ , 比热容 c , 热导率 k , 热膨胀系数 α , 泊松比 ν , 弹性模量 E , 硬化模量 E_t , 屈服极限 σ_Y ; 环境相关量: 环境

温度 T_0 , 对流换热系数 h ; 相关输出量: 激光加热过程中的最高温度 T_{\max} , 成形量 ω , 能量转化率 ξ 。由控制方程可知, 上述参数中 ρc 是联合作用的。另外, βP 为加工时作用于工件上的有效功率。这使得最终得到的无量纲参数比 Π 定理所规定的少了两项。无量纲的参数有 β , 泊松比 ν , 能量转化率 ξ 。

$$\left. \begin{aligned} [r] &= L, [r_p] = L, [L] = L, [W] = L, [\delta] = L, [\omega_0] = L \\ [\beta P] &= L^2 MT^{-3}, [V] = LT^{-1}, [E] = L^{-1} MT^{-2}, [E_t] = L^{-1} MT^{-2} \\ [\sigma_Y] &= L^{-1} MT^{-2}, [\rho c] = ML^{-1} T^{-2} \Theta^{-1}, [\alpha] = \Theta^{-1}, [k] = LMT^{-3} \Theta^{-1} \\ [T_0] &= \Theta, [h] = MT^{-3} \Theta^{-1} \\ [T_{\max}] &= \Theta, [\omega] = L. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

(6)式和(7)式分别列出了上述输入量和输出量的量纲, 可以给出

$$\frac{T_{\max}}{T_0} = f_1(r, r_p, L, W, \delta, \omega_0, \beta P, V, E, E_t, \sigma_Y, \rho c, \nu, \alpha, k, T_0, h), \quad (8)$$

$$\frac{\omega}{\omega_0} = f_2(r, r_p, L, W, \delta, \omega_0, \beta P, V, E, E_t, \sigma_Y, \rho c, \nu, \alpha, k, T_0, h), \quad (9)$$

$$\xi = f_3(r, r_p, L, W, \delta, \omega_0, \beta P, V, E, E_t, \sigma_Y, \rho c, \nu, \alpha, k, T_0, h), \quad (10)$$

写出一般 Π 项的表达式

$$\Pi = r^{a_1} r_p^{a_2} L^{a_3} W^{a_4} \delta^{a_5} \omega_0^{a_6} (\beta P)^{a_7} V^{a_8} E^{a_9} E_t^{a_{10}} \sigma_Y^{a_{11}} (\rho c)^{a_{12}} \nu^{a_{13}} \alpha^{a_{14}} k^{a_{15}} T_0^{a_{16}} h^{a_{17}}, \quad (11)$$

可以得到方程组

$$\left. \begin{aligned} a_7 + a_9 + a_{10} + a_{11} + a_{12} + a_{15} + a_{17} &= 0 \\ a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + 2a_7 + a_8 - a_9 - a_{10} - a_{11} - a_{12} + a_{15} &= 0 \\ -3a_7 - a_8 - 2a_9 - 2a_{10} - 2a_{11} - 2a_{12} - 3a_{15} - 3a_{17} &= 0 \\ a_{12} - a_{14} - a_{15} + a_{16} - a_{17} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

或者

$$Da = 0, \quad (13)$$

其中 $\mathbf{a} = [a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}, a_{16}, a_{17}]^T$ 。

容易得到

$$\text{rank}(D) = 4, \quad (14)$$

即一共有 $17-4=13$ 个 Π 项。

求解方程(12)具有很大的随意性, 但通过一般分析, 可以得到无量纲的关系式

$$\frac{T_{\max}}{T_0} = g_1\left(\frac{r}{r_p}, \frac{r}{L}, \frac{r}{W}, \frac{r}{\delta}, \frac{r}{\omega_0}, \frac{VEr^2}{\beta P}, \frac{E_t}{E}, \frac{\sigma_Y}{E}, \frac{\alpha E}{\rho c}, \nu, \frac{k}{\rho c} \left(\frac{W}{L^2 V}\right), \alpha T_0, \frac{Lh}{k}\right). \quad (15)$$

如果模型试验材料与实际材料相同, 那么只需要考虑与材料本身不相关的量, (15)式可以简化为

$$\frac{T_{\max}}{T_0} = h_1\left(\frac{r}{r_p}, \frac{r}{L}, \frac{r}{W}, \frac{r}{\delta}, \frac{r}{\omega_0}, \frac{VEr^2}{\beta P}, \frac{k}{\rho c} \left(\frac{W}{L^2 V}\right), \alpha T_0, \frac{Lh}{k}\right), \quad (16)$$

同理, 可以得到

$$\frac{\omega}{\omega_0} = h_2\left(\frac{r}{r_p}, \frac{r}{L}, \frac{r}{W}, \frac{r}{\delta}, \frac{r}{\omega_0}, \frac{VEr^2}{\beta P}, \frac{k}{\rho c} \left(\frac{W}{L^2 V}\right), \alpha T_0, \frac{Lh}{k}\right), \quad (17)$$

$$\xi = h_3\left(\frac{r}{r_p}, \frac{r}{L}, \frac{r}{W}, \frac{r}{\delta}, \frac{r}{\omega_0}, \frac{VEr^2}{\beta P}, \frac{k}{\rho c} \left(\frac{W}{L^2 V}\right), \alpha T_0, \frac{Lh}{k}\right). \quad (18)$$

4 有限元分析

为了检验无量纲准则,使用商业有限元程序 ANSYS 进行了有限元分析。图 2 为有限元模型, X 方向为工件长度方向, Y 为宽度方向, Z 为厚度方向,激光扫描路径为原点出发沿 Y 轴正方向扫描。压头使用刚性面模拟,加载过程即刚性面向下移动。压头刚性面与工件上表面接触,采用接触对 TARGET170/CONTA174 来模拟该接触。考虑热边界条件在激光路径附近比较集中,因此对激光路径附近进行了一次网格细化处理^[11],如图 3 所示。

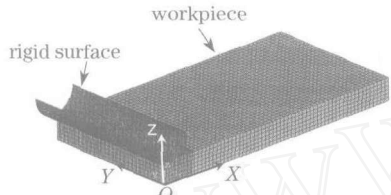


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

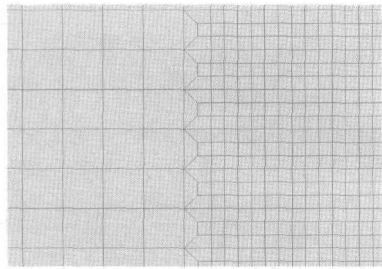


图 3 激光加热区网格细化

Fig. 3 Mesh refinement in heating area

模拟所用材料为铝合金 7075,该材料为航空制造业中常用材料之一。图 4 和图 5 给出了铝合金

表 1 相似模型的输入参数

Table 1 Input parameters of the models

Model No.	L / m	W / m	δ / m	r / m	r _p / m	ω ₀ / nr	βP / W	V _f / (m/s)	T ₀ / °C	h / (W/(m ² · K))
1	0.100	0.020	0.002	0.003	0.005	0.004	160	0.001	25	10
2	0.300	0.060	0.006	0.009	0.015	0.012	480	0.0003	25	3.33

5 结果和讨论

考察加工历程时间 t 时的最高温度 T_{max},可以通过无量纲量 T' 和 t' 来表示最高温度随时间的变化规律。其中 T' 和 t' 定义为

$$\left. \begin{aligned} T' &= \frac{T_{\max}(t')}{T_0} \\ t' &= \frac{t}{W/V} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中 T' 为最高温度与环境温度之比, t' 为加工时间与激光扫描时间之比。这里 t' = 1 时激光扫描结

束; t' > 1 时为冷却阶段。图 6 给出了 T' 与 t' 的变化关系。可以看出,在相同的网格拓扑结构下,模型 1 和模型 2 的 T' - t' 曲线吻合。该曲线从工件上最高温度在整个历程中的变化这一角度验证了本文所提出的无量纲数的正确性。

按照量纲分析所得到的规律,在不改变材料参数的情况下,设计了两个模型,模型比为 1 : 3。为了尽可能减小有限元网格划分所带来的误差,两个模型的有限元网格使用了相同的拓扑结构。为了使两个模型满足物理相似,激光参数、预载荷参数以及散热条件都必须按照文中的无量纲数做相应的调整。表 1 列出了两个模型的有关参数。

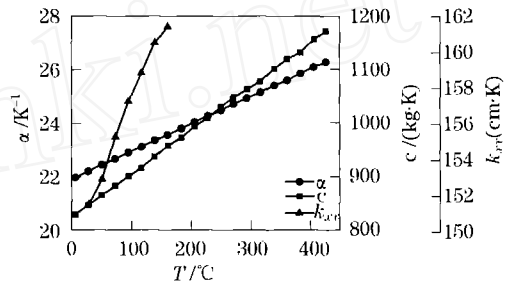


图 4 材料热物理参数

Fig. 4 Thermal physics parameters

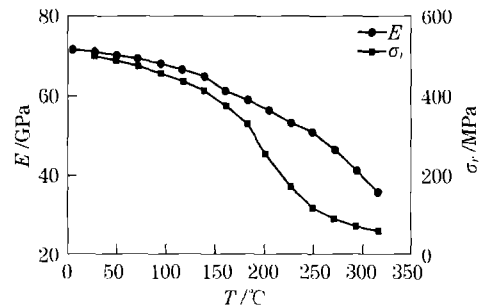


图 5 材料力学性能参数

Fig. 5 Mechanical property parameters

束; t' > 1 时为冷却阶段。图 6 给出了 T' 与 t' 的变化关系。可以看出,在相同的网格拓扑结构下,模型 1 和模型 2 的 T' - t' 曲线吻合。该曲线从工件上最高温度在整个历程中的变化这一角度验证了本文所提出的无量纲数的正确性。

表 2 列出了模型 1 和模型 2 的成形量、预载荷弹性性能、塑性功等量。计算结果表明,在成形效率 ω/ω₀ 以及能量转化率 ξ 上,两个模型所取得的结果相等。上述结果证实了提出的无量纲规律是正确的。

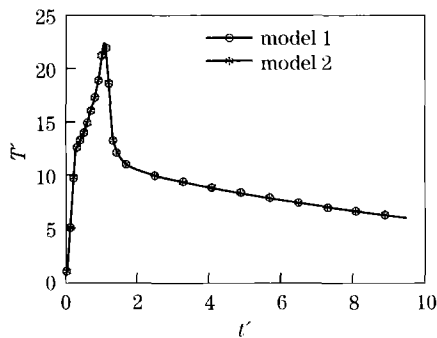
图 6 T' 随 t' 的变化关系Fig. 6 T' as a function of t'

表 2 相似模型的相关输出参数

Table 2 Output parameters of the models

Model No.	ω/m	ω/ω_0	E_{el}/J	E_p/J	$\xi/\%$
1	0.00144	0.36	0.188	0.088	46.8
2	0.00432	0.36	5.085	2.385	46.9

实际上,激光辅助预应力成形方法面向的是工程实际问题,实际的成形件尺寸往往较大。为了使缩比试验能够更好地反应实际情况,设计缩比试验时要充分考虑到按照模型比放大以后的激光输入参数以及加工消耗在实际生产中的可行性。例如,当模型比为 r 时,为了满足物理相似性,激光扫描速度比为 $1/r$,考虑到激光扫描时间 $t_{laser} = W/V$,那么激光扫描时间之比为 r^2 。本例中,试件尺寸扩大到 3 倍时,加工时间则扩大到 9 倍。那么在设计缩比试验中,激光工艺参数的选择必须考虑到实际情况下的加工耗时。又如,实际生产中,因激光器本身的限制,激光功率不可能无限制地增加,激光光斑半径也存在一定调控范围,在设计缩比试验时,模型比的确定则必须考虑到试验功率以及激光光斑半径经过放大后是否会超过工程实际的限制。上述规律是确定实际加工工艺和缩比试验时必须考虑的重要问题之一。为了解决加工耗时、实际生产工艺条件限制等矛盾,一方面,可以通过适当选择模型比,在工程实践可行的条件下满足物理相似;另一方面,可以改变加工工艺,例如优化激光扫描路径、多头激光并行加工等手段,以满足工程实际的可行性要求。

6 结 论

1) 以激光辅助预应力成形的物理模型为研究对象,通过量纲分析得出了一组描述该物理过程的无量纲参数。

2) 对该物理模型进行了方程分析以及量纲分析,建立了相似准则。

3) 按照相似准则设计了两组模型比为 1:3 的有限元模型,通过有限元分析,证实了相似准则。

4) 在工程可行性的基础上,讨论了在设计缩比实验时应注意的问题。

参 考 文 献

- J. C. McQueen, S. W. McClaren, A. P. Martin. Integrally formed structures; A new stiffened panel concept [J]. *J. Aircraft*, 1970, 7:563~566
- Zhang Xiaojing, Zhou Xianbin. Simulation of springback in sheet metal forming[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 1999, 6(3): 56~62
张晓静,周贤宾. 板料成形回弹模拟[J]. *塑性工程学报*, 1999, 6(3): 56~62
- Zhu Dongbo, Sun Kun, Li Dichen *et al.*. The new research progress of sheet metal stamping springback [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2000, 7(1):11~17
朱东波,孙 琨,李涤尘等. 板料成形回弹问题研究进展[J]. *塑性工程学报*, 2000, 7(1):11~17
- Zeng Yuansong, Huang Xia. Forming technologies for integral panels[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, 29(3):721~727
曾元松,黄 遐. 大型整体壁板成形技术[J]. *航空学报*, 2008, 29(3):721~727
- Wang Xiufeng, Guo Xiaoli, Chen Guangnan *et al.*. Remark of integral panel forming[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2008, 3: 1~4
王秀凤,郭晓丽,陈光南等. 整体壁板成形评述[J]. *现代制造技术与装备*, 2008, 3: 1~4
- Zeng Yuansong, Huang Xia, Li Zhiqiang. The application and development of advanced shot peen forming technologies [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2006, 13(3): 23~29
曾元松,黄 遐,李志强. 先进喷丸成形技术及其应用与发展[J]. *塑性工程学报*, 2006, 13(3):23~29
- Zeng Yuansong, Huang Xia, Huang Shuo. The research situation and the developing tendency of creep age forming technology[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2008, 15(3):1~8
曾元松,黄 遐,黄 硕. 蠕变时效成形技术研究现状与发展趋势[J]. *塑性工程学报*, 2008, 15(3):1~8
- Chen Guangnan, Wang Xiufeng, Luo Gengxing *et al.*. A hybrid forming technique with bending and laser radiation[P]. China, 200710062910.2, 2008-03-12
陈光南,王秀凤,罗耕星等. 压弯激光复合成形方法[P]. 中国, 200710062910.2, 2008-03-12
- Chen Guangnan, Wang Xiufeng, Luo Gengxing *et al.*. A hybrid forming technique with bending and point heat source[P]. China, 200710118095.7, 2008-01-09
陈光南,王秀凤,罗耕星等. 压弯、点热源复合成形方法[P]. 中国, 200710118095.7, 2008-01-09
- Hom-Shen Hsieh, Jehnming Lin. Study of the buckling mechanism in laser tube forming with axial preloads[J]. *Int. J. Mach. Tool. Manu.*, 2005, 45:1368~1374
- Wang Yeping, Zhu Chengming. Finite element simulation of temperature field and stress field in laser forming[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2007, 1(2):22~24
王野平,朱成明. 激光弯曲成形温度场与应力场的有限元模拟[J]. *机械工程与自动化*, 2007, 1(2):22~24
- Pei Jibin, Zhang Liwen, Zhang Quanzhong *et al.*. Simulation on influence of scanning passes during laser bending of steel plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, 34(12): 1721~1725
裴继斌,张立文,张全忠等. 扫描次数对钢板激光弯曲成形影响

- 的模拟[J]. 中国激光, 2007, 34(12): 1721~1725
- 13 Jia Wenpeng, Lin Xin, Chen Jing *et al.*. Temperature stress field numerical simulation of hollow blade produced by laser rapid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, 34(9): 1308~1312
贾文鹏, 林 鑫, 陈 静 等. 空心叶片激光快速成形过程的温度/应力场数值模拟[J]. 中国激光, 2007, 34(9): 1308~1312
- 14 Jie Liu, Sheng Sun, Yanjin Guan. Numerical investigation on the laser bending of stainless steel foil with pre-stresses[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 209: 1580~1587
- 15 http://knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=754&VerticalID=0

《激光与光电子学进展》“光学制造”栏目征稿启事

《激光与光电子学进展》是中国科学院上海光学精密机械研究所主办的激光、光电子领域行业性期刊, 中国科技核心期刊。该刊 1964 年创刊, 至今已出刊 500 余期, 旨在促进国内外学术交流, 沟通科研单位、生产部门与用户的联系。2009 年, 《激光与光电子学进展》将加大光学制造方向的报道力度, 深入研讨光学制造的技术发展及其在工业、科研各方面的应用。主要涉及方向有光学元器件、光学仪器、光学加工、光学设计、光学材料、光学薄膜、光学检测等领域。

欢迎相关的科研、技术、市场人员根据我们栏目内容定位, 撰写或向我们推荐涉及上述领域的优秀技术论文。来稿不收取审稿费和版面费, 一经录用将优先发表并支付丰厚稿酬。

• 本栏目基本要求:

- 1) 稿件内容应为光学制造领域的最新进展、研究动态、科研和新品开发成果等方面;
- 2) 文章要求内容新颖、论点正确、论据充分、数据可靠、文理通顺;
- 3) 技术文章字数一般为 5000 字左右; 综述文章字数最多不超过 10000 字, 且第一作者需为副教授及以上职称。

• 投稿方式: 通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/lop.htm>)直接上传稿件(主题标明“光学制造”投稿), 也可以直接将稿件 word 版发至邮箱: dingjie@siom.ac.cn(主题标明“光学制造”投稿), 如有问题欢迎垂询 021-69918198 与栏目编辑丁洁联系。

《激光与光电子学进展》编辑部