

工艺参数对激光辅助预应力成形效率的影响

彭 青 陈光南 王明星 吴臣武

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 针对激光辅助预应力成形问题,建立了相应的有限元模型,并进行了实验验证。通过无量纲参数,研究了预应力水平和激光工艺参数对激光辅助预应力成形效率的影响规律。结果表明,在弹性范围内,预应力越大,成形效率越高;在扫描速度和功率密度给定的情况下,成形效率随光斑半径增加而增加;在扫描速度和光斑半径给定的情况下,成形效率随功率增加而增加;在光斑半径、输入能量给定的情况下,成形效率随扫描速度增加而增加。

关键词 激光技术;辅助成形;预应力;成形效率

中图分类号 O303;TN249;TG386.3⁺¹ **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1003006

Effects of Process Parameters on Efficiency of Laser-Assisted Pre-Stress Forming

Peng Qing Chen Guangnan Wang Mingxing Wu Chenwu

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract A finite element model (FEM) based on numerical model is established to study the process of laser-assisted pre-stress forming and further verified with experimental data. Based on the verified FEM model, the effects of pre-stress and laser parameters on forming efficiency are investigated via a set of dimensionless quantities. A higher pre-stress level results in a higher forming efficiency in the elastic range. A larger beam radius at constant scanning velocity and power density, or a higher power at constant scanning velocity and beam radius, or a faster scanning velocity at constant beam radius and injected energy, results in a higher forming efficiency.

Key words laser technique; assisted forming; pre-stress; forming efficiency

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850; 350.3390

1 引 言

工程中存在着这样一类零件,如整体壁板^[1,2],由于结构复杂,或者材料特殊,在弯曲成形时,容易导致开裂和失稳,因此其只能承受弹性载荷,采用常规塑性成形方法往往不能有效成形。针对整体壁板成形这一难题,国内外目前主要采用喷丸成形和时效成形。前者通过高速运动的细小金属弹丸撞击零件表面,其结果表现为被喷表面面积增大,大于未喷表面,从而逐步使钣金零件发生向受喷面凸起的弯曲变形^[3]。后者将零件置入加热炉或热压罐内并使其在人工时效温度下保持一段时间,利用材料的蠕变效应,从而最终达到成形目的^[4,5]。

激光辅助预应力成形方法是近年来由陈光南等^[6]提出的一种新方法,其可行性已初步得到证实^[7]。即在弯曲成形时,以一定强度的激光束扫描其弹性势能集中区域,通过提高该区域内材料的温度降低其屈服强度,促使工件内的弹性势能转化为塑性功。不同于喷丸成形,激光辅助预应力成形的源动力完全来源于预载荷所提供的弹性势能,其利用局部热载荷诱导预应力工件内部所储存的弹性势能耗散为塑性功。在成形源动力这一点上,该方法与时效成形一致,但不同的是,时效成形利用特殊材料高温下的蠕变效应成形,该蠕变过程往往耗时较长。激光辅助预应力成形中激光的热效应时间较

收稿日期: 2011-04-26; 收到修改稿日期: 2011-06-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(10872199,50901084)和中国博士后基金(20090460537)资助课题。

作者简介: 彭 青(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事材料工艺力学方面的研究。

E-mail: chase.pq@gmail.com

短,且只作用于弹性应变能集中的局部区域,一般不超过零件总面积的 10%;激光作用区内的材料,其性能还可以通过后续的喷丸处理进一步改善和提高^[8]。因此,激光辅助成形技术适用于传统材料制成的零件,无需采用专门的时效强化材料,其材料适用性相对较广。

激光辅助预应力成形过程包含两个方面的因素:1)全局作用的机械载荷,即预应力;2)局部作用的热载荷。机械载荷提供了成形所需弹性势能或所转化为塑性功的全部能量,而激光热载荷则决定了弹性势能向塑性功转换的效率。因此,研究预应力的水平和激光工艺参数对成形效率的影响是必要的。本文以有限元模型(FEM)为基础,通过实验验证和数值模拟,分析机械载荷、热载荷等关键参数对成形量和能量转换率的影响规律。

2 有限元模型及其验证

激光辅助预应力成形过程是一个热力学耦合作用过程。成形过程为:

1) 三点弯曲样件,初始变形挠度为 ω_0 ,为了保证工件在加载过程中不发生破坏或者失稳,工件变形程度一般被控制在弹性范围以内。记 $\bar{\omega}_0 = \omega_0 / \omega_E$,这里 ω_E 为使工件仅发生弹性弯曲变形的最大挠度。

2) 保持工件变形,以激光扫描弹性应变能分布集中的区域,使得工件内已有的弹性应变能转化为塑性功,记转换效率为 ξ 。

3) 将工件冷却,卸载。最后残余挠度为 ω 。记相对成形量为 $\bar{\omega} = \omega / \omega_0$ 。

主要工艺参数包括:激光有效功率 βP (β 为吸收系数)、光斑大小 r_b 、扫描速度 V 以及预加载时的弯曲挠度 ω_0 ;记工件厚度为 H ,工件材料的热导率为 k ,密度为 ρ ,比热为 c ,弹性模量为 E ,由量纲分析^[9] 可得

$$\begin{cases} \bar{\omega} = h_1(\bar{\omega}_0, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) \\ \xi = h_2(\bar{\omega}_0, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\Pi_1 = \frac{r_b}{H}$, $\Pi_2 = \frac{\beta P}{EVr_b^2}$, $\Pi_3 = \frac{k}{\rho c HV}$ 。显然, $\bar{\omega}_0$ 与机械载荷(预应力水平)相关,而其他 3 个无量纲量则与热载荷(激光参数)相关。可将上述工艺参数相关无量纲量作为影响激光辅助预应力成形效率的主要参数。

采用顺次耦合方法^[10] 建立如图 1 所示的有限元模型。由于对称性,只需要建立半模型。由于成形过程中,压头的变形相对于试件的变形往往可以

忽略不计,因此可采用刚性面来模拟压头。加载则采用压头的向下位移量来控制。使用面热流形式来模拟激光热作用,光斑以一定速度沿 Y 轴正方向扫描。模型中还采用如下假设^[11~13]:假设材料是各向同性的,在热分析中仅考虑自然对流换热边界条件,结构分析中使用理想弹塑性模型作为本构关系,塑性流动时材料不可压缩,并忽略应变率效应。

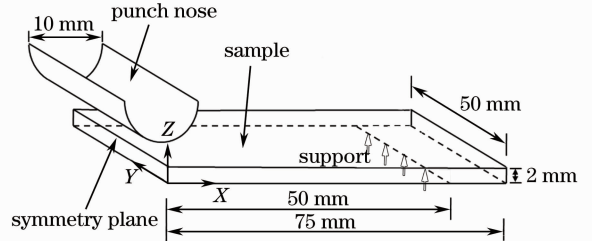


图 1 有限元模型

Fig. 1 Schematic for FEM

为了验证有限元模型的有效性,对激光辅助成形 7075 铝合金薄板有限元模拟的载荷-位移曲线结果进行了实验验证。实验装置如图 2 所示。实验采用 YAG 连续波激光器,通过 X-Y 精密位移平台控制光路以实现激光扫描,并在试件上激光扫描路径处涂上碳素墨汁以增加试件对激光的吸收率。实验过程的物理模型参数与有限元模拟所采用的参数一致;输出功率为 140 W,光斑半径为 3 mm,扫描速度为 1 mm/s。

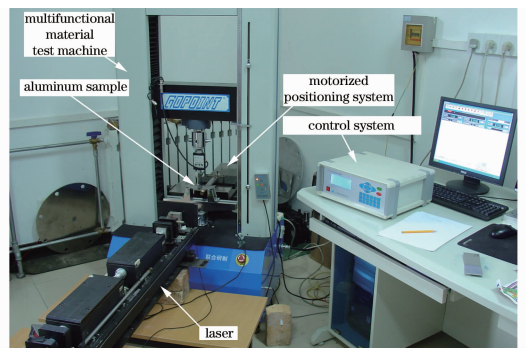


图 2 验证实验装置

Fig. 2 Experimental setup for the verification of FEM

有限元计算结果和实验测试数据如图 3 所示。考虑到实验中存在测量误差、设备所带来的系统误差等多方面因素,同时考虑到有限元计算所采用的温度相关材料性质与实际材料存在一定差异,以及有限元基本假设简化了实际物理过程,因此计算结果和实验测试数据存在着一定差异,但两者在误差范围内基本吻合。由此可以断定该有限元模型能够有效反映激光辅助成形 7075 铝合金薄板模型的有效性。

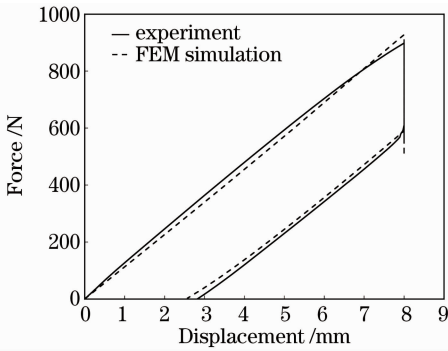


图3 实验和模拟的载荷位移曲线

Fig. 3 Force-displacement curves of experiment and simulation

3 机械载荷对成形量的影响

对于给定工件结构和加载方式的试件来说,初始加载量意味着预应力水平。显然,预应力水平直接影响到单次成形的能力。实际加工过程中,出于安全因素,往往要求预应力加载量在弹性范围内,即要求 $\bar{\omega}_0 \leq 1$ 。

有限元模拟得到无量纲预加载挠度 $\bar{\omega}_0$ 、激光作用下弹性应变能转化为塑性功的转化率 ξ 与无量纲成形量 $\bar{\omega}$ 的关系如图4所示。可以看到,在弹性范围内,随着预应力水平的提高,样件的成形能力和能量转换效率及其增长率都不断提高。由于塑性功绝大部分来源于预应力所提供的弹性势能,增大弹性势能意味着增大了能够转化、产生的塑性功。在同样的激光参数下,成形效率得以随之增加。为了提高样件的成形能力,预载荷水平应该尽量大;预载荷水平接近或达到其弹性极限时,即 $\bar{\omega}_0$ 接近或达到1时,其成形能力最佳。

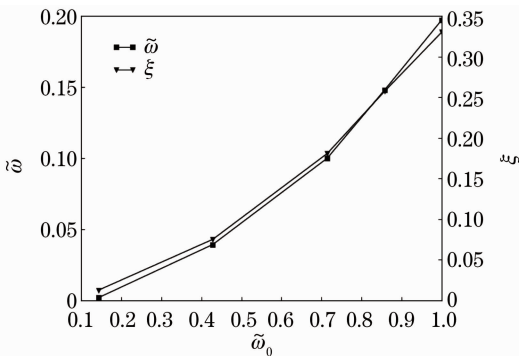


图4 机械载荷对成形效率的影响

Fig. 4 Effect of mechanical parameter on forming efficiency

因此,对于激光辅助三点弯曲成形,预应力水平过低,则不能成形。显然预应力水平应该尽可能在

安全范围内提高。

4 热载荷对成形量的影响

考察热载荷对成形量的影响需要将其限定在一个范围内。概括地说,该限定范围即满足工程实际的实施条件。本文中参数范围依据常用实验/工艺参数选取,要求工艺参数的选择既满足能够产生明显成形效果,又不致使材料性能下降;但为了更好地分析参数对成形效率的影响规律,适当地将此选择范围放大。因此,可选择有效功率范围 20~320 W,光斑半径 1~4 mm,扫描速度 0.5~4.0 mm/s。

4.1 Π_1 对成形量的影响

考虑 Π_1 对成形量的影响需要固定 Π_2 和 Π_3 的值不变。 Π_1 对成形量的影响即为在给定扫描速度和功率密度的情况下,加热区域(或光斑半径)对成形量的影响。选取适当激光工艺参数进行有限元计算,此时 $\Pi_2 = 0.139, \Pi_3 = 16.59$,可得如图5所示 Π_1 与成形量和能量转换率的关系。该曲线大致分为三个阶段:第一阶段,即 $\Pi_1 < 1.0$,因激光辐照面积过小或输入能量过低,样件的弹性势能难以转变为塑性功;第二阶段,即 $1.0 < \Pi_1 < 1.5$,样件的 $\bar{\omega}$ 和 ξ 随 Π_1 的增加迅速增加;第三阶段,即 $\Pi_1 > 1.5$,随 Π_1 增加, $\bar{\omega}$ 和 ξ 的增加率逐渐降低、趋于饱和,这是因为激光的辐照面积过大,已超出样件的弹性势能集中区域。图6给出了扫描路径中心处最高温度随 Π_1 的变化关系,对于铝合金样件,为了避免恶化其材料使用性能,需要限定激光作用区内材料的温度范围^[7],一般来说不高于 300 °C。因此, Π_1 的取值范围应限制在第二阶段之内。

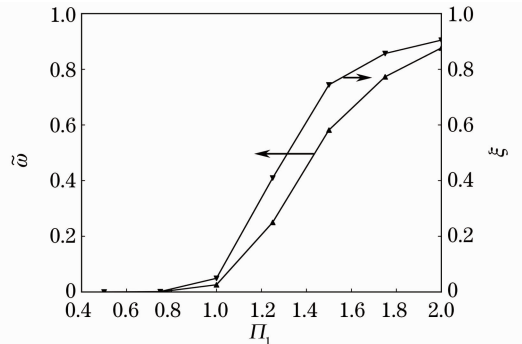


图5 Π_1 对成形效率的影响

Fig. 5 Effect of Π_1 on forming efficiency

4.2 Π_2 对成形量的影响

仅考虑 Π_2 对成形量的影响需要固定 Π_1 和 Π_3 的值不变。无量纲量 Π_2 对成形量的影响即为给定扫描速度和光斑半径的条件下,功率(或功率密度)对

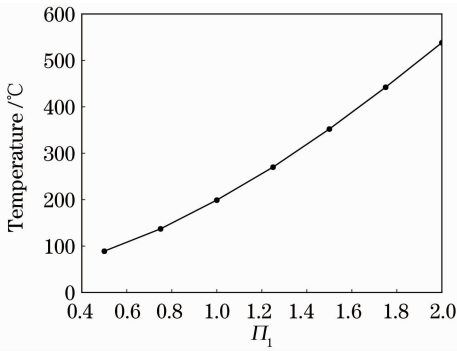


图 6 Π_1 对激光路径中心处温度峰值的影响
Fig. 6 Effect of Π_1 on maximal temperature in the center of scanning path

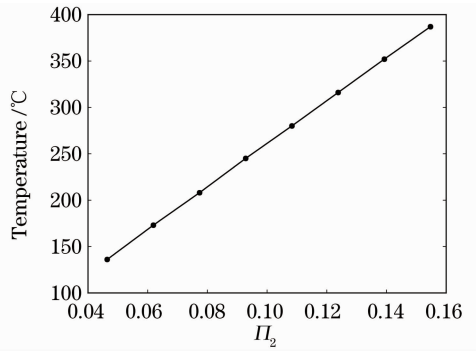


图 8 Π_2 对激光路径中心处温度峰值的影响
Fig. 8 Effect of Π_2 on maximal temperature in the center of scanning path

成形量的影响。在适当激光工艺参数下($\Pi_1 = 1.5$, $\Pi_3 = 16.59$),图7给出了 Π_2 对扫描过程中成形量以及能量转化效率的影响。该曲线也显示出三阶段特征。在第一阶段,即 $\Pi_2 < 0.06$ 时,随 Π_2 增加,样件的 $\bar{\omega}$ 和 ξ 的增加相对缓慢。在第二阶段,即在 $0.06 < \Pi_2 < 0.12$ 区间,样件的 $\bar{\omega}$ 和 ξ 随 Π_2 的增加迅速提高。由于功率的提高,在加热时间一定的情况下,输入能量增加,样件温升因此提高,从而导致了 $\bar{\omega}$ 和 ξ 的提高。在第三阶段,即 $\Pi_2 > 0.12$ 时,随着功率的继续提高,热影响区域大于弹性势能集中区域, $\bar{\omega}$ 和 ξ 的增加率下降。图8给出了扫描路径中心处最高温度随 Π_2 的变化关系,为了兼顾成形效果和材料性能,激光辅助预应力成形该铝合金样件时, Π_2 的取值范围应限定在 $0.06 \sim 0.12$ 之内。

$$E_{\text{lsr}} \propto \frac{\beta P}{V}. \quad (3)$$

因此,无量纲量 Π_3 的物理意义是当光斑半径(辐照区域)、激光总输入能量不变的情况下,扫描速度 V 和成形量之间的关系。增加 Π_3 ,即增加加热时间或者降低扫描速度。选取适当激光工艺参数进行有限元计算,此时 $\Pi_1 = 2, \Pi_2 = 0.042, \Pi_3$ 与样件的 $\bar{\omega}$ 和 ξ 的关系曲线如图9所示。随着加热时间的增加,或扫描速度的减小, $\bar{\omega}$ 和 ξ 都减小。这是因为当扫描速度较高时,相同的总输入能量集中作用于弹性势能集中区,其热耗散相对较小,激光作用区温度较高,如图10所示。当扫描速度低于一定值时, $\bar{\omega}$ 和 ξ 几乎为零。温度场的整体水平下降导致了 $\bar{\omega}$ 和 ξ 的减小。考虑到成形效果和材料性能,需将 Π_3 取值限定于一定范围,即 $12 \sim 30$ 之间。

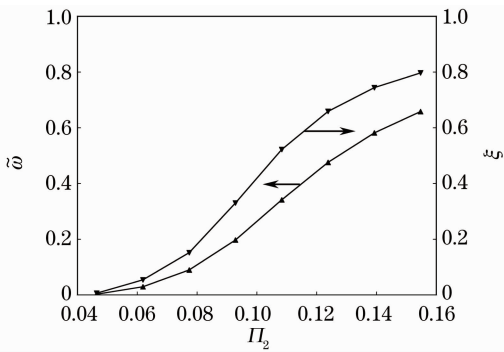


图 7 Π_2 对成形效率的影响
Fig. 7 Effect of Π_2 on forming efficiency

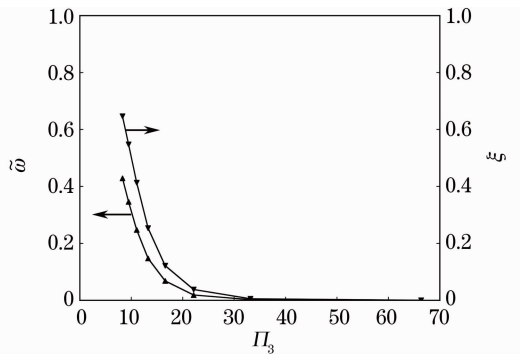


图 9 Π_3 对成形效率的影响
Fig. 9 Effect of Π_3 on forming efficiency

4.3 Π_3 对成形量的影响

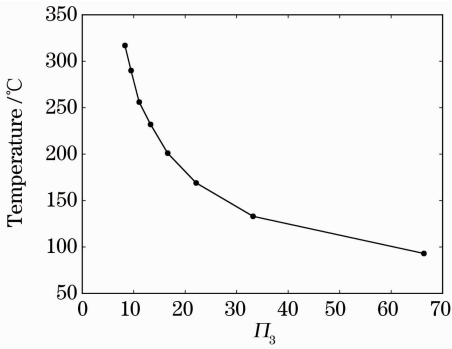
仅考虑 Π_3 对成形量的影响需要固定 Π_1 和 Π_2 的值不变。事实上,激光扫描过程中用于使工件温度升高的总有效能量为

$$E_{\text{lsr}} = \beta P \cdot \frac{W}{V}, \quad (2)$$

在工件宽度保持恒定的情况下,显然有

5 结 论

建立了适用于激光辅助预应力成形的有限元模型,并通过实验进行了验证。在此有限元模型的基础上,分析了给定零件结构、材料条件下,一组工艺参数相关的无量纲量对成形效率的影响,并提出了

图 10 Π_3 对激光路径中心处温度峰值的影响Fig. 10 Effect of Π_3 on maximal temperature in the center of scanning path

工艺参数的选取原则。在本文给定的参数范围内：

1) 对于给定结构样件，在弹性范围内，预应力水平越高，可转化为塑性功的弹性势能越大，成形效率越高。为获得更大的成形效率，预应力水平可选择为 $\bar{\omega}_0 = 1$ 。

2) 给定扫描速度、功率密度，光斑半径越大，扫描区域温升越大，能量转换率 ξ 越高，成形效率越高。同时考虑到成形效率与材料性能，需 $1.0 < \Pi_1 < 1.5$ 。

3) 给定扫描速度、光斑半径，功率(功率密度)增加，扫描区域温升增加，能量转换率 ξ 增加，成形效率增加，但增加率逐渐减小。同时考虑到成形效率与材料性能，需 $0.06 < \Pi_2 < 0.12$ 。4) 给定光斑半径、激光总输入能量，扫描速度越快，温度场分布越集中，能量转换率 ξ 越高，成形效率越高。同时考虑到成形效率与材料性能，需 $12 < \Pi_3 < 30$ 。

参 考 文 献

1 J. C. McQueen, S. W. McClaren, A. P. Martin. Integrally formed structures, a new stiffened panel concept[J]. *Journal of Aircraft*, 1970, **7**(6): 563~566

2 Zeng Yuansong, Huang Xia. Forming technologies of large integral panel[J]. *Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica*, 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

3 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

4 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

5 Wang Junbiao, Liu Zhongkai, Zhang Xianjie. Age forming of large scale integral aircraft wing panel [J]. *Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica*, 2008, **29**(3): 728~733

王俊彪, 刘中凯, 张贤杰. 大型机翼整体壁板时效成形技术 [J]. *航空学报*, 2008, **29**(3): 728~733

6 Chen Guangnan, Wang Xiufeng, Luo Gengxing *et al.*. Bend-laser compoud forming method [P]. China Patent, No. CN100552575C, 2008

陈光南, 王秀凤, 罗耕星等. 压弯激光复合成形方法 [P]. 中国专利, CN100552575C, 2008

7 Peng Qing, Chen Guangnan, Wu Chenwu *et al.*. Laser-assisted pre-stress forming for integral panels [J]. *Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica*, 2009, **30**(8): 1544~1547

彭青, 陈光南, 吴臣武等. 整体壁板激光辅助预应力成形 [J]. *航空学报*, 2009, **30**(8): 1544~1547

8 Chen Guangnan, Wu Chenwu, Peng Qing *et al.*. Laser-assisted pre-stress shot peen forming-peening hybrid method [P]. Chinan Patent, No. CN101289733A, 2008

陈光南, 吴臣武, 彭青等. 激光辅助预应力喷丸成形-强化复合方法 [P]. 中国专利, CN101289733A, 2008

9 Peng Qin, Chen Guangnan, Wang Xiufeng. Similarity criterion of laser-assisted pre-stress forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1261~1266

彭青, 陈光南, 王秀凤. 激光辅助预应力成形的相似性问题 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1261~1266

10 H. S. Hsieh, J. Lin. Study of the buckling mechanism in laser tube forming with axial preloads [J]. *International J. Machine Tools and Manufacture*, 2005, **45**(12-13): 1368~1374

11 K. C. Lee, J. Lin. Transient deformation of thin metal sheets during pulsed laser forming [J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, **34**(8): 639~648

12 H. S. Hsieh, J. Lin. Thermal-mechanical analysis on the transient deformation during pulsed laser forming [J]. *International J. Machine Tools and Manufacture*, 2004, **44**(2-3): 191~199

13 S. Safdar, L. Li, M. A. Sheikh *et al.*. Finite element simulation of laser tube bending: effect of scanning schemes on bending angle, distortions and stress distribution [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**(6): 1101~1110