

多层金属复合板激光冲击柔性微成形实验研究

张文昊, 刘会霞, 沈宗宝, 张国策, 马友娟, 王 霄

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

摘要 研究了一种多层金属复合板激光冲击柔性微成形(LSFF)的新工艺,验证了该工艺的可行性,发现在合适的工艺参数下,成形件没有层裂或裂纹等缺陷。研究结果显示,在LSFF下,镍/铜/镍金属复合板的成形深度介于铜箔和镍箔的之间,且成形深度随着激光能量和激光冲击次数的增加而增加。成形件表面发生了粗化现象,且其粗糙度随着激光能量的增加而增加。

关键词 激光技术; 激光冲击柔性微成形; 多层金属复合板; 成形深度; 表面质量

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0702001

Experimental Research on Laser-Shock Flexible Micro-Forming of Multilayer-Metal Composite Sheets

Zhang Wenhao, Liu Huixia, Shen Zongbao, Zhang Guoce, Ma Youjuan, Wang Xiao

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract A new technique on laser-shock flexible micro-forming (LSFF) of multilayer-metal composite sheets is investigated, and its feasibility is verified. It is found that there is no delamination or cracks in the formed parts under appropriate process parameters. The study results show that the forming depth of Ni/Cu/Ni metal composite sheets under LSFF is between the forming depth of copper foils and that of nickel foils, which increases with the increase of the laser energy and laser impact times. Surface roughening happens in the formed parts and the roughness increases with the increase of the laser energy.

Key words laser technique; laser-shock flexible micro-forming; multilayer-metal composite sheets; forming depth; surface quality

OCIS codes 140.3538; 000.2170; 160.3900

1 引言

随着现代工业的发展,单层材料越来越难以同时满足多种优越性能的需求,多层金属复合板应运而生。通过将多种不同的金属进行层状结合,可以获得优越的机械、物理、化学性能,如高的比强度、高的导电和导热性能、良好的抗磨损和抗腐蚀能力等^[1-3]。另外,当零件的内侧和外侧需要处于不同的物理化学环境时,必须使用多层金属复合板^[4]。再者,脆性材料可以通过与高延展性材料的结合来提高其塑性成形能力^[5]。由于种种优势,多层金属复合板在汽车、飞机、电子、医药等领域中得到越来越广泛的应用^[6]。

作为大规模生产的重要手段,压力成形工艺在多层金属复合板零件的生产中占据重要地位^[7]。一些学者对多层金属复合板的传统成形工艺进行了研究。Atrian等^[8]研究了压边力、工件放置方式、润滑和毛坯直径对铜/钢复合板拉深工艺的影响。Afshin等^[9]研究了铝/钢复合板的减薄、起皱以及晶粒尺寸、温度

收稿日期: 2016-12-26; **收到修改稿日期:** 2017-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(51675243)、江苏省自然科学基金(BK20151343)

作者简介: 张文昊(1993—),男,硕士研究生,主要从事激光加工和数字化设计与制造方面的研究。

E-mail: Z10091122@163.com

导师简介: 刘会霞(1964—),女,博士,教授,主要从事激光加工和数字化设计与制造方面的研究。

E-mail: lhx@ujs.edu.cn(通信联系人)

和放置方式对温拉深成形件的影响。Hashemi 等^[10]研究了铝/钢复合板在拉深成形中的失效以及成形极限。Hashemi 等^[11]通过有限元模拟研究了工艺参数对铝/钢和铜/钢复合板的液压成形工艺的影响,并且通过实验验证了模拟结果。Dehghani 等^[4]研究了铜/钢复合板的极限拉深率、厚度变化以及断裂位置。Al-Ghamdi 等^[7]采用单点渐进成形工艺成形了铜/钢复合板。

近几年,微小型化逐渐成为工业生产中的重要趋势。Sun 等^[12]研究了工件放置方式和热处理对 1 mm 厚铜/铝复合板的成形极限的影响。Karajibani 等^[13]通过实验和数值模拟研究了 1 mm 厚铝/钢复合板的成形能力。Li 等^[14]研究了 1 mm 厚铝/镁/铝复合板在不同成形温度、冲头速度和凹模圆角半径下的成形极限和界面微观结构。

目前对多层金属复合板的成形工艺大都为传统的准静态成形工艺。但是,传统成形工艺在微成形方面存在一些不足。例如,传统的微成形系统需要制作专门的微凸模,而微凸模的制造比较困难^[15]。另外,随着微凸模磨损的加剧,成形质量会严重下降^[16]。显然,传统的微成形工艺难以精确并经济地制造多层金属复合板微零件^[7]。激光冲击柔性微成形工艺,使用激光产生的冲击波作为虚拟冲头,并结合软模,不仅可以弥补传统微成形工艺的不足,还拥有自身独特的优势,可以明显提高材料的成形能力^[17],在常温或高温下都能较好地复制出不同材料模具的形状。Liu 等^[18]对铜箔激光微压印工艺的研究、Gao 等^[19]对铝箔激光微拉深工艺的研究、张青来等^[20]对镁合金激光温拉深成形工艺的研究,都证明了激光冲击柔性微成形是成形多层金属复合板的理想选择。

本文选用镍/铜/镍金属复合板为实验材料,分析了激光冲击柔性微成形工艺的可行性,比较了该工艺下多层金属复合板和单层金属板的成形深度,研究了激光能量和激光冲击次数对成形深度的影响规律,并对成形件的表面质量进行了研究。

2 实验准备与实验原理

2.1 实验材料

选用三层镍/铜/镍金属复合板作为实验材料。该金属复合板包含一层紫铜层和两层纯镍层,总厚度为 0.13 mm,三层的厚度比例约为 1:1:1。图 1 所示为显微镜下观察到的镍/铜/镍金属复合板的结构。该金属复合板的制造工艺流程如下:将一块紫铜板和两块纯镍板叠放在一起,两边封焊;然后先将其压力成形至一定厚度,再进行多道次冷轧,直至达到所需的厚度;之后将材料退火以消除制造过程中产生的残余应力。紫铜和纯镍的主要机械性能参数见表 1^[21]。

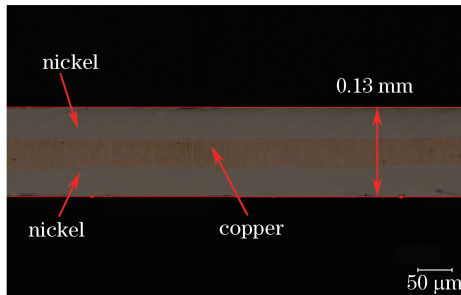


图 1 镍/铜/镍金属复合板的结构

Fig. 1 Structure of Ni/Cu/Ni metal composite sheet

表 1 紫铜和纯镍的机械性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of red copper and pure nickel

Material	Yield strength /MPa	Modulus of strain hardening /MPa	Young modulus /GPa	Poisson ratio	Strain hardening exponent	Coefficient of strain ratio
Red copper	90	292	124	0.34	0.31	0.025
Pure nickel	163	648	207	0.31	0.33	0.006

2.2 成形原理

图 2 所示为激光冲击柔性微成形的成形装置与成形原理。成形系统包括激光器、压边圈、约束层、吸收层、软模、工件、微模具。使用黑漆作为吸收层,将其喷涂在软模上;软模材料选用透明的聚氨酯。

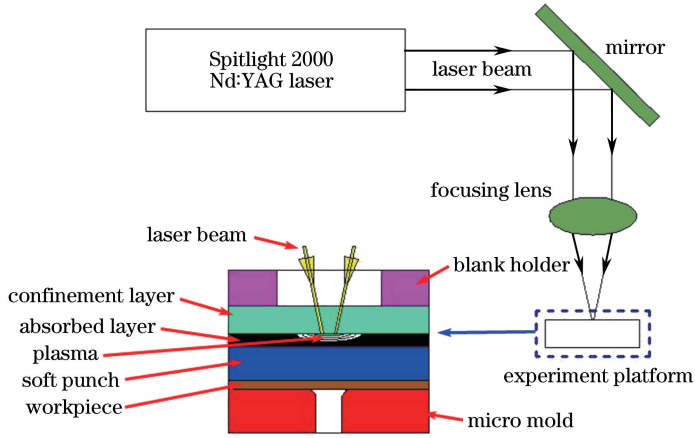


图 2 激光冲击柔性微成形的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of laser-shock flexible micro-forming

激光束通过与其成 45° 的反射镜的反射以及透镜的聚焦,聚焦在吸收层上,吸收层吸收激光能量并产生高温高压的等离子体。在约束层的作用下,等离子体向下运动,形成强大的冲击波;冲击波作用在软模上,使软模发生变形压入模具型腔,从而带动工件变形。

激光冲击柔性微成形属于动态成形,其加载压力极大而作用时间超短,使材料产生超高应变率($10^7 \sim 10^9 \text{ s}^{-1}$)的塑性变形,可以明显提高材料的成形能力,大大拓宽可成形材料的范围,相比准静态加载工艺具有很大优势^[17]。软模的使用简化了成形装置,提高了成形工件的表面质量和精度。

2.3 实验条件

实验使用的激光器是德国 InnoLas 公司生产的 Nd:YAG Spilight 2000 激光器,其参数见 2。压边力约为 12 N。约束层选用亚克力板(PMMA),厚度为 3 mm,宽度和长度均为 6 cm。使用 4 种厚度的软模:100, 300, 400, 500 μm 。使用微细电火花技术制造微模具,其形状和尺寸如图 3 所示,其中 R 为半径。

表 2 激光器参数

Table 2 Parameters of laser

Parameter	Wavelength /nm	Pulse width /ns	Repetition frequency /Hz	Single pulse energy /mJ	Spot diameter at exit /mm	Energy stability
Value	1064	8	1-10	80-1800	9	$< \pm 1\%$

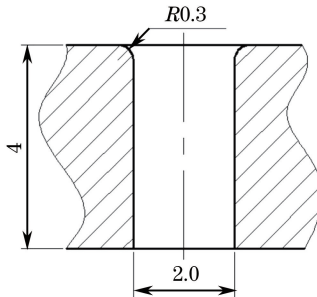


图 3 微模具的形状和几何尺寸

Fig. 3 Shape and geometric dimension of micro-mold

3 实验结果与讨论

3.1 可行性分析

实验参数的选择如下:光斑直径为 3 mm,激光能量为 1380 mJ,冲击次数为 1,软模厚度为 100 μm 。

激光冲击后,工件形成了一个呈高斯分布的圆顶状拉深杯。图 4 所示为日本基恩士公司生产的 VHX-1000 超景深三维显微镜下观测到的成形件的三维轮廓。使用成形件最底部所对应的最大成形深度作为成形件的成形深度,测得其成形深度为 743.5 μm ,如图 4 所示。成形件中未观测到裂纹。

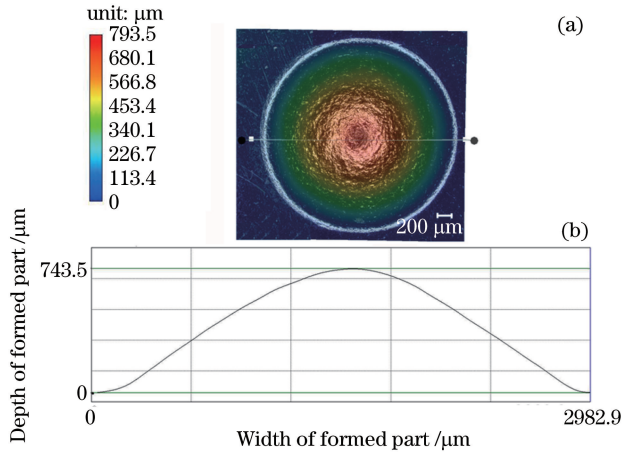


图 4 成形件的(a)三维轮廓和(b)成形深度

Fig. 4 (a) Three dimensional profile and (b) forming depth of formed part

研究表明,层裂是多层金属复合板成形过程中的主要缺陷。Mori 等^[22]对铝/钢复合板拉深成形工艺的研究表明,当钢层和铝层发生颈缩时,其结合界面上出现了层裂。Ohashi 等^[23]对铜/钢复合板的弯曲成形工艺进行的研究表明,结合界面处会在复合板破裂之前产生层裂现象。Engel 等^[24]对双层钢板弯曲成形工艺的研究表明,钢/钢复合板的结合界面也会产生层裂现象。Lee 等^[25]研究发现,铜/钢复合板在成形过程中出现颈缩现象的同时会产生层裂,且层裂区域的大小会随着成形温度的升高而增大。Syn 等^[5]研究发现,铝/镁复合板在颈缩之前就会发生层裂,且层裂会使得颈缩提前发生。因此,证实成形件中是否产生了层裂显得极为重要。使用环氧树脂和固化剂组成的混合溶液对成形件进行冷镶嵌,然后将镶嵌块打磨、抛光,直至可观察到成形件的中心横截面。

图 5 所示为显微镜下观察到的成形件横截面。可以看出,两个结合面均完好无损,成形件未发生层裂。为了保证准确性,在 1000 倍镜头下观察发现,两个结合面均完好无损。图 6 所示为成形件横截面的底部在 1000 倍镜头下的图像。



图 5 成形件的横截面

Fig. 5 Cross section of formed part

综上所述,在合适的工艺参数下,镍/铜/镍金属复合板可以在激光冲击柔性微成形工艺下成形出理想的微拉深件,而且没有破裂或层裂的存在。因此,多层金属复合板的激光冲击柔性微成形工艺是完全可行的。

3.2 多层金属复合板与单层金属板成形深度的比较

选用镍/铜/镍金属复合板和相同厚度的铜箔及镍箔,激光能量选用 515 mJ,其他参数与 3.1 节的相同。

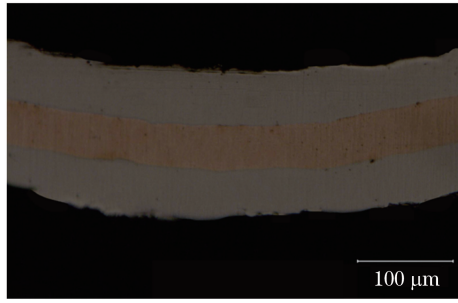


图 6 1000 倍镜头下观测到的成形件的底部

Fig. 6 Bottom of formed part under lens of 1000 times

每组实验均重复 3 次,取其平均值作为实验结果,取其标准差作为误差棒的一半。图 7 所示为镍/铜/镍金属复合板和铜箔及镍箔在相同条件下的成形深度。

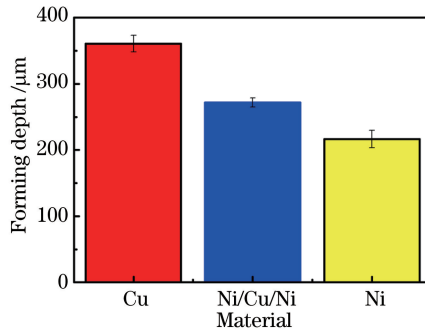


图 7 镍/铜/镍金属复合板和铜箔及镍箔在相同条件下的成形深度

Fig. 7 Forming depth of Ni/Cu/Ni composite sheets, Cu foil and Ni foil under same conditions

从图 7 可以看出,在激光冲击柔性微成形下,镍/铜/镍金属复合板的成形深度介于铜箔和镍箔的之间,并且其深度与镍箔的更为接近。根据复合材料的混合法则,复合材料的机械性能由各组成材料的机械性能及其所占体积分数决定^[26-27]:

$$\sigma_c = \sum_i \sigma_i V_i, \quad (1)$$

式中 σ_c 为复合材料的屈服极限, σ_i 为各组成材料的屈服极限, V_i 为各组成材料的体积分数。(1)式是简化的复合材料的混合法则^[26],在所使用的镍/铜/镍金属复合板中,镍的体积分数大约是铜的两倍。由表 1 可得到铜的屈服极限为 90 MPa、镍的屈服极限为 163 MPa。根据以上信息,由(1)式可以计算出镍/铜/镍金属复合板的屈服极限大约为 139 MPa,介于铜和镍的之间且与镍的更为接近。因此,镍/铜/镍金属复合板的成形深度介于铜箔和镍箔的之间,且与镍箔的更为接近。前人对多层金属复合板成形能力的实验研究也证实了此结论^[28]。

3.3 激光能量对成形深度的影响

激光能量是冲击波压力的来源,它的大小决定了软模和工件的变形程度。实验选取了 4 种激光能量: 515, 675, 1020, 1380 mJ。其余参数与 3.1 节的相同。

镍/铜/镍金属复合板在不同激光能量下的成形深度如图 8 所示。可以看出,随着激光能量的增大,成形深度也增大。这是由于激光能量越大,产生的等离子体越多,进而产生的冲击波的压力越大,从而软模发生了更剧烈的变形,工件的成形深度增大。另外,随着激光能量的持续增大,工件成形深度的增幅会减缓,这是由于成形深度越大,工件材料越难流入模具型腔。

3.4 激光冲击次数对成形深度的影响

实验选取了 4 种冲击次数: 1, 3, 5, 7。激光能量使用 675 mJ,其他参数与 3.1 节的相同。图 9 所示为激光冲击次数对镍/铜/镍金属复合板成形深度的影响。

在激光初始冲击时,大量的黑漆残留在软模上,在之后的冲击中残留的黑漆继续吸收激光能量并产生冲

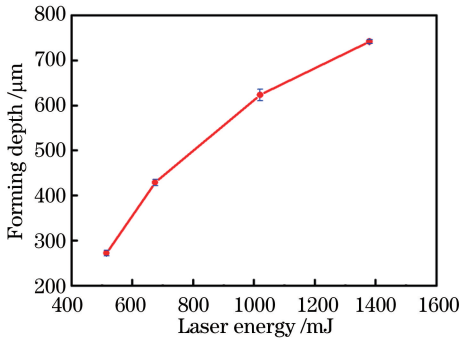


图 8 激光能量对镍/铜/镍金属复合板的成形深度的影响

Fig. 8 Effect of laser energy on forming depth of Ni/Cu/Ni metal composite sheet

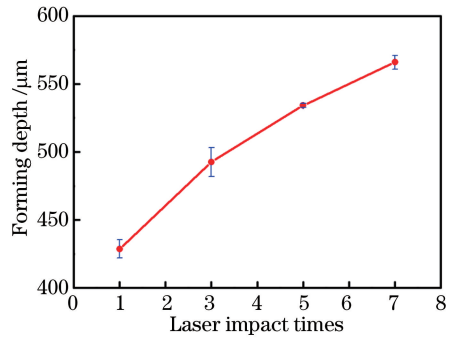


图 9 激光冲击次数对镍/铜/镍金属复合板的成形深度的影响

Fig. 9 Effect of laser impact times on forming depth of Ni/Cu/Ni metal composite sheet

击波。因此,随着激光冲击次数的增加,工件的成形深度增大。另外,随着激光冲击次数的持续增加,工件成形深度的增幅会减小。三个原因导致了这一现象:1) 随着激光冲击次数的持续增大,软模上残留的黑漆越来越少,因此冲击波的压力越来越小;2) 随着激光冲击次数的持续增多,软模的变形越来越剧烈,软模与约束层之间的距离越来越大,从而约束层的作用受到很大削弱;3) 在激光冲击过后,工件表面会产生加工硬化现象,因此工件越来越难以变形。

3.5 表面质量

成形件的表面质量是衡量微成形工艺的重要指标。使用德国卡尔蔡司公司的 Axio CSM 700 共聚焦显微镜获取 3.3 节中获得的成形件底部的表面形貌和粗糙度值,同时测量了未受激光冲击区域的表面形貌和粗糙度。图 10 所示为未受激光冲击区域的表面形貌,图 11 所示为不同激光能量下成形件底部的表面形貌。

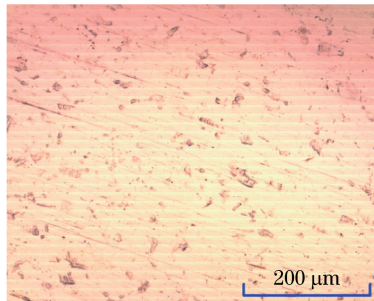


图 10 未冲击区域的表面形貌

Fig. 10 Surface morphology of unshocked area

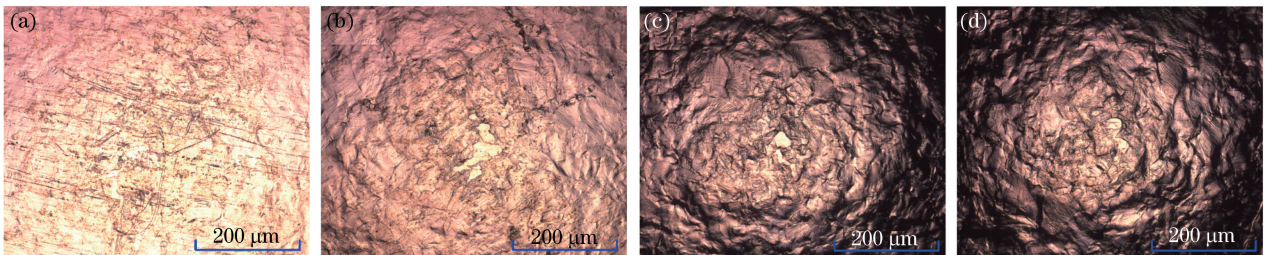


图 11 不同激光能量下成形件底部的表面形貌。(a) 515 mJ;(b) 675 mJ;(c) 1020 mJ;(d) 1380 mJ

Fig. 11 Surface morphology of bottom of formed part under different laser energies. (a) 515 mJ; (b) 675 mJ; (c) 1020 mJ; (d) 1380 mJ

可以明显看出,成形件发生了表面粗化现象,这与激光冲击柔性加载单层金属板的现象一致。两个原因导致了这一现象:1)在晶粒内部,位错滑移出材料表面后会在表面留下台阶;2)相邻晶粒间由于晶格取向差出现应变不协调,使得约束较小的自由表面晶粒发生了垂直于材料表面的移动或相对于相邻晶粒的转动^[29]。

图 12 所示为测得的成形件底部的表面粗糙度值。可以看出,成形件底部的表面粗糙度随着激光能量的增大而增大。这是由于激光能量越大,产生的冲击波压力越大,位错越易滑移出材料表面。另外,相邻晶粒的应变不协调现象也会变得更加突出。

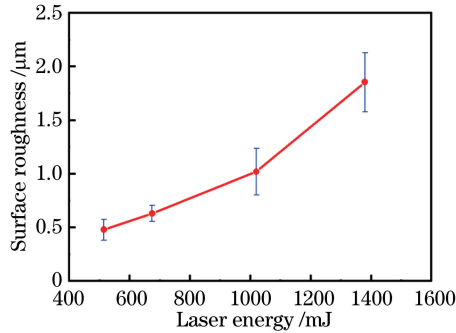


图 12 不同激光能量下成形件底部的表面粗糙度

Fig. 12 Surface roughness of bottom of formed part under different laser energies

4 结 论

研究了一种激光冲击柔性加载多层金属复合板微成形的新工艺。验证了该工艺的可行性,比较了多层金属复合板与单层金属板的成形能力,揭示了工艺参数对多层金属复合板成形深度的影响,研究了成形件的表面质量及其变化规律,得到以下结论:

- 1) 在合适的工艺参数下,通过激光冲击柔性微成形镍/铜/镍金属复合板可以成形出理想的微拉深件,界面状况均完好,没有产生裂纹或层裂缺陷;
- 2) 镍/铜/镍金属复合板的成形深度介于铜箔和镍箔的之间,且与镍箔的更为接近;
- 3) 在激光冲击柔性微成形下,镍/铜/镍金属复合板的成形深度随着激光能量和激光冲击次数的增大而增大,成形深度的增幅会逐渐减缓;
- 4) 与单层金属板类似,在激光冲击柔性微成形下,镍/铜/镍金属复合板的成形件中发生了表面粗化现象,且其粗糙度随着激光能量的增加而增加。

参 考 文 献

- [1] He P, Yue X, Zhang J H. Hot pressing diffusion bonding of a titanium alloy to a stainless steel with an aluminum alloy interlayer[J]. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2008, 486(1/2): 171-176.
- [2] Li T, Grignon F, Benson D J, *et al.* Modeling the elastic properties and damage evolution in Ti-Al3Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites[J]. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2004, 374(1/2): 10-26.
- [3] Lee J E, Bae D H, Chung W S, *et al.* Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 187-188: 546-549.
- [4] Dehghani F, Salimi M. Analytical and experimental analysis of the formability of copper-stainless-steel 304L clad metal sheets in deep drawing[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82(1): 163-177.
- [5] Syn C K, Lesuer D R, Sherby O D. Enhancing tensile ductility of a particulate-reinforced aluminum metal matrix composite by lamination with Mg-9%Li alloy[J]. *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 1996, 206(2): 201-207.
- [6] Manesh D H, Shahabi H S. Effective parameters on bonding strength of roll bonded Al/St/Al multilayer[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 476(1/2): 292-299.
- [7] Al-Ghamdi K A, Hussain G. On the comparison of formability of roll-bonded steel-Cu composite sheet metal in incremental forming and stamping processes[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 87(1): 267-278.
- [8] Atrian A, Fereshteh-Saniee F. Deep drawing process of steel/brass laminated sheets [J]. *Composites Part B-*

- Engineering, 2013, 47: 75-81.
- [9] Afshin E, Kadkhodayan M. An experimental investigation into the warm deep-drawing process on laminated sheets under various grain sizes[J]. Materials & Design, 2015, 87: 25-35.
- [10] Hashemi A, Gollo M H, Seyedkashi S M H. Study of Al/St laminated sheet and constituent layers in radial pressure assisted hydrodynamic deep drawing[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2015, 32(1): 54-61.
- [11] Hashemi A, Gollo M H, Seyedkashi S M H. Bimetal cup hydroforming of Al/St and Cu/St composites: Adaptive finite element analysis and experimental study[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(5): 2217-2224.
- [12] Sun T, Liang J, Guo X, *et al.* Optical measurement of forming limit and formability of Cu/Al clad metals[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(4): 1426-1433.
- [13] Karajibani E, Fazli A, Hashemi R. Numerical and experimental study of formability in deep drawing of two-layer metallic sheets[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 80(1): 113-121.
- [14] Li C, Chi C Z, Lin P, *et al.* Deformation behavior and interface microstructure evolution of Al/Mg/Al multilayer composite sheets during deep drawing[J]. Materials & Design, 2015, 77: 15-24.
- [15] Joo B Y, Rhim S H, Oh S I. Micro-hole fabrication by mechanical punching process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 170(3): 593-601.
- [16] Luo S Y. Studies on the wear conditions and the sheared edges in punching[J]. Wear, 1997, 208(1/2): 81-90.
- [17] Zhou M, Zhang Y K, Cai L. Laser shock forming on coated metal sheets characterized by ultrahigh-strain-rate plastic deformation[J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(8): 5501-5503.
- [18] Liu H X, Shen Z B, Wang X, *et al.* Micromould based laser shock embossing of thin metal sheets for MEMS applications[J]. Applied Surface Science, 2010, 256: 4687-4691.
- [19] Gao H, Ye C, Cheng G J. Deformation behaviors and critical parameters in microscale laser dynamic forming [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009, 131(5): 611-623.
- [20] Zhang Qinglai, Wu Tiedan, Zhang Bingxin, *et al.* Experimental research of warm laser shock forming of AZ31 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0903002.
张青来, 吴铁丹, 张冰昕, 等. AZ31 镁合金激光冲击温成形实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0903002.
- [21] Bae G, Xiong Y, Kumar S, *et al.* General aspects of interface bonding in kinetic sprayed coatings[J]. Acta Materialia, 2008, 56(17): 4858-4868.
- [22] Mori T, Kurimoto S. Press-formability of stainless steel and aluminum clad sheet[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 56(1/4): 242-253.
- [23] Ohashi Y, Wolfenstine J, Koch R, *et al.* Fracture behavior of a laminated steel-brass composite in bend tests [J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 1992, 151: 37-44.
- [24] Engel B, Buhl J. Metal forming of vibration-damping composite sheets[J]. Steel Research International, 2011, 82(6): 626-631.
- [25] Lee S, Oyama T, Wadsworth J, *et al.* Impact properties of a laminated composite based on ultrahigh carbon steel and brass[J]. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 1992, 154: 133-137.
- [26] Shinji M. Mixture rule for indentation derived Young's modulus in layered composites[J]. Thin Solid Films, 2009, 518(1): 233-24.
- [27] Meisam O, Hossein R D T, Abbas S M, *et al.* Prediction of the mechanical characteristics of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites using a new form of the rule of mixtures[J]. Carbon, 2010, 48(11): 3218-3228.
- [28] Tetsuo O, Nicolas T, Seiichiro K, *et al.* Experimental and numerical analysis of multilayered steel sheets upon bending [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(14): 1926-1933.
- [29] Wang X, Ma Y J, Shen Z B, *et al.* Size effects on formability in microscale laser dynamic forming of copper foil[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 220: 173-183.