

文章编号: 1004-0609(2003)04-0914-05

不锈钢/铝(合金)/不锈钢多层复合板的冲压成型性能^①

朱旭霞¹, 彭大暑², 黎祚坚³

(1. 宁波高等专科学校 机械系, 宁波 315016; 2. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;

3. 广东工业大学 材料科学与工程系, 广州 510090)

摘 要: 通过实验测量了不锈钢/铝合金/不锈钢三层复合板和不锈钢/铝/铝合金/铝/不锈钢五层复合板的各项成型性能指标, 并采用刚-塑性有限元方法对这 2 种复合板在有压边力条件下的冲压成型过程进行了计算模拟分析, 获得了各组元金属的变形规律以及等效应力、应变分布图。分析结果证明: 五层复合板的冲压成型性能要优于三层复合板。

关键词: 成型性; 数值模拟; 有限元法; 复合材料; 不锈钢; 铝合金

中图分类号: TG 339

文献标识码: A

不锈钢/铝(合金)/不锈钢多层复合板作为半成品, 需要经过深加工才能生产出最终成品。冲压成型由于其工艺上的复杂性, 可以作为金属板料深加工的典型代表。层压型复合板的冲压成型比单一金属更加复杂, 不仅要考虑通常冲压加工的相关工艺因素, 而且要考虑金属板料中各组元之间的塑性力学性能及变形协调性问题。

目前关于多层复合板冲压过程的研究还比较少, 因而研究多层复合板在冲压过程中的变形特点有益于今后此类产品的开发。对复合板成型过程研究的方法很多, 但采用有限元法对板材的冲压过程进行模拟, 其结果较理想^[1-12]。因此, 本文作者将通过实验测试和刚塑性有限元模拟计算相结合的方法, 分析不锈钢/铝(合金)/不锈钢多层复合板成型性能及复合板在冲压成型过程中的变形特点。

1 实验

实验所用不锈钢/铝/铝合金/铝/不锈钢五层和不锈钢/铝合金/不锈钢三层复合板的坯料尺寸分别为: 314 不锈钢板 0.3 mm × 200 mm × 500 mm、1050 纯铝板 0.5 mm × 200 mm × 500 mm、3003 铝合金板 3 mm × 200 mm × 400 mm。轧机为 d 360 mm × 400 mm 二辊轧机。轧制速度 2 m/min, 轧制温度 500 °C。一次轧制复合, 轧后总厚度均为 2.8 mm。扩散退火温度为 500 °C, 保温 1 h。

塑性应变比 γ 、应变硬化指数 n 以及综合力学性能均在 CCS-441000 电子万能实验机上测试, 实验方法分别按照国家标准 GB5027-85、GB5028-85、GB6397-86 进行, 其中 γ 值是相对延伸率为 20% 时的测量结果。试样尺寸为 12.5 mm × 2.8 mm × 210 mm, 拉伸速度为 2 mm/min。

2 结果与分析

采用实验方法对板材成型性能进行研究, 不仅有助于了解此种材料的成型性能, 而且有利于指导在实际生产中的应用。表征复合板材的几项成型性能的几项参数(平均塑性应变比、凸耳系数、平均应变硬化指数、延伸率、屈强比)研究测试结果如表 1 所列。

平均塑性应变比是衡量材料在冲压成型过程中宽厚方向变形趋势的参数, 此值的大小决定了材料的抗失稳变薄的能力。对于 2 种复合板的平均塑性

表 1 不锈钢/铝(合金)/不锈钢多层复合板
(退火态)成型性能对比

Table 1 Comparison of deep drawing properties
for three-layer and five-layer composites (annealing)

Composite	$\bar{\gamma}$	$\Delta \gamma$	$\bar{n}$	$\delta/\%$	$\sigma_{0.2}/\sigma_b$
SS/3003/SS	0.927	-0.700	0.196	28.3	0.77
SS/1050/3003/ 1050/SS	1.163	-0.622	0.203	36.4	0.75

SS—Stainless steel

① 收稿日期: 2002-09-26; 修订日期: 2003-02-08

作者简介: 朱旭霞(1972-), 女, 讲师, 博士。

通讯联系人: 朱旭霞, 博士; 电话: 0574-87081238; E-mail: zhuxuxia@sina.com.cn

应变比, 五层板的数值要高于三层板的, 且数值大于 1, 这说明五层复合板的宽度方向易于厚度方向变形, 板材抗失稳变形能力更强, 冲压性能更优。对于凸耳系数, 五层板的数值小于三层板的, 这表明五层板的各向性能差异更小, 生产中的毛边废料更少, 材料的利用率更高。同样对于平均应变硬化指数和延伸率两个参数, 五层复合板的数值也高于三层板的, 表明材料整体塑性变形能力更优。而屈强比则两者相差不大, 三层板略高。综合各项成型性能指标可以看出, 五层复合板的冲压成型性能总体优于三层复合板。

3 复合板冲压过程的有限元数值模拟结果及分析

本文作者对不锈钢/ 铝合金/ 不锈钢三层复合板和不锈钢/ 铝/ 铝合金/ 铝/ 不锈钢五层复合板的成型过程和材料的流动情况进行了分析。在分析过程中假设复合板的结合界面具有良好的结合强度, 组元层之间不会因为塑性变形而发生脱层和开裂。

在板料冲压成型时, 需要对板料进行压边以防

起皱。在有限元模拟时, 要对压边进行适当的简化处理。现假定压边圈为刚性物体, 并且将压边圈与凹模之间的距离设为板坯的原始厚度, 且在板料冲压成型过程中保持不变。板料就在压边圈与凹模组成的约束边界中运动变形, 由有限元程序自动识别板料边界与模具边界的接触状态, 并根据接触状态施加相应的几何约束与摩擦条件。对于薄板与模具之间的摩擦, 由于相对滑移的速度比较小, 对摩擦因数的影响可忽略不计, 因此本文作者采用经典摩擦定律来计算复合板冲压过程的摩擦力。

3.1 不锈钢/ 铝(合金) / 不锈钢多层复合板的冲压模拟条件

在模拟计算中, 两种复合板的厚度同上, 冲头半径为 20 mm, 圆角半径为 3 mm; 凹模内径为 24 mm, 圆角半径为 3 mm; 摩擦因数为 0.1。

3.2 不锈钢/ 铝合金/ 不锈钢三层复合板冲压过程模拟

不锈钢/ 铝合金/ 不锈钢三层复合板冲压变形过程如图 1(a) ~ (c) 所示, 图 1(d) 所示是三层复合板

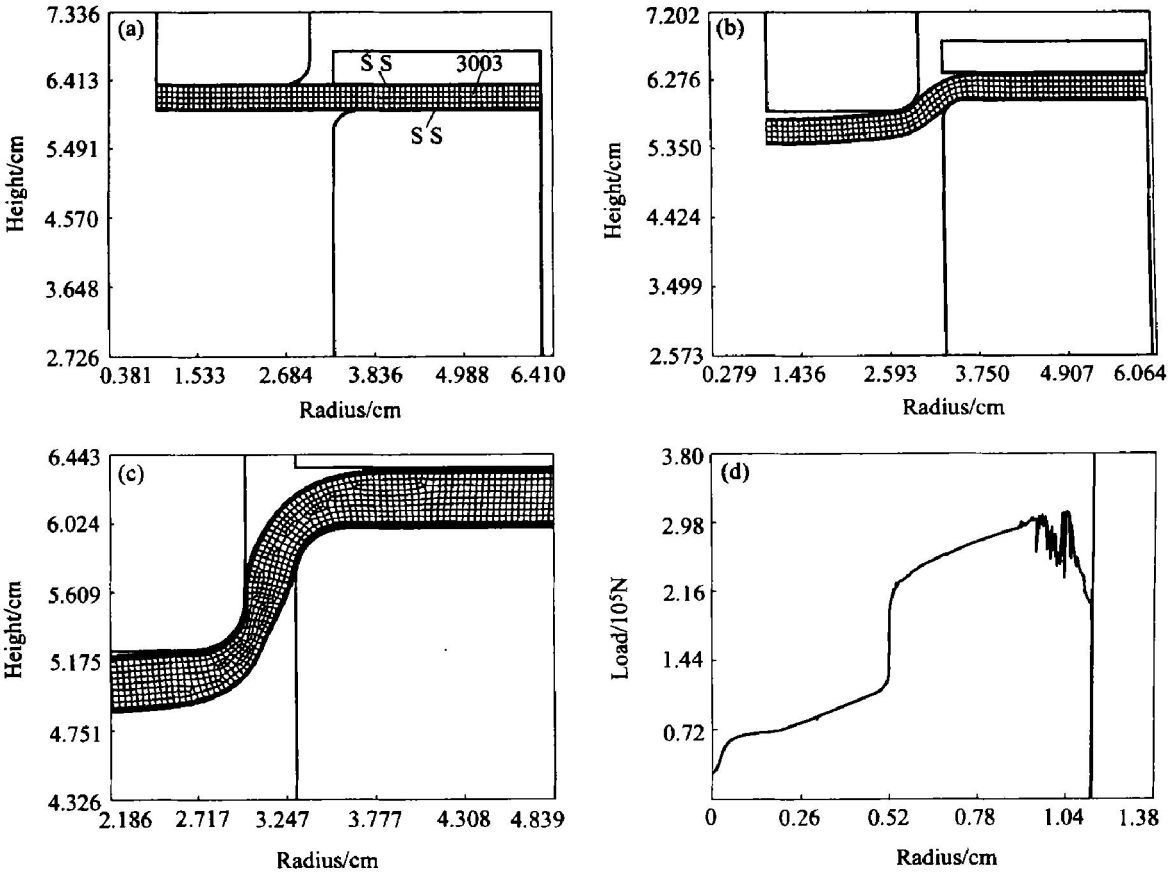


图 1 不锈钢/ 铝合金/ 不锈钢三层复合板冲压过程

Fig. 1 Deep drawing process for SS/ 3003/ SS three-layer composite

(a) —Preliminary mesh; (b) — $s=5\text{ mm}$; (c) — $s=11.2\text{ mm}$; (d) —Diagram of force change in deep drawing process

的冲压成型力—凸模行程曲线。

在不锈钢/铝合金/不锈钢三层复合板的冲压成型过程中(拉伸系数为0.46),为了成型模拟过程的进行,曾在行程为10.2 mm时进行了网格重划分。由图1(d)可以看出三层复合板的冲压性能比较差,在载荷达到 3×10^5 N时,三层复合板还没有完全冲压成型就在内层发生断裂。由此时三层复合板的等效应力、应变场分析可知,在断裂处不锈钢层因承受了较大的应力而发生了局部减薄现象,最后由于此处的应力集中而造成了断裂破损。在冲压成型过程中此处处于凸模圆角区域,在这一区域材料受到凸模圆角的顶压和成型力的拉伸作用,板厚减薄严重,该区域的承载能力决定着此种材料的冲压成型极限。

在冲压成型过程中,板材的塑性成型主要集中在突缘部分。随着凸模行程的增加,突缘的变形也随之增加,突缘面积不断减小,冲压成型力逐渐降低;另一方面,随着材料变形程度的增加,材料的

应变硬化效应显著提高,材料的变形抗力逐步加大。冲压成型力的大小是由这两个因素共同作用的结果。在冲压成型中期以前,材料的应变硬化效应占主要部分,材料的冲压成型力随凸模行程的增加而增加;而在成型后期,突缘面积的减少占主导地位,冲压成型力则不断下降。

3.3 不锈钢/铝/铝合金/铝/不锈钢五层复合板冲压过程模拟

图2(a)~(c)所示为五层复合板的冲压过程。可以看出,五层复合板的冲压过程(拉伸系数为0.48)十分顺利,相对无法完全深冲成型的三层复合板来说,五层复合板的冲压成型性能较优一些。

对比三层复合板和五层复合板的冲压成型力—凸模行程曲线(图1(d)和图2(d))可见:五层复合板的承载能力最大可达到 10^6 N,是三层复合板的3倍。

五层复合板的外层的等效应变和等效应力最

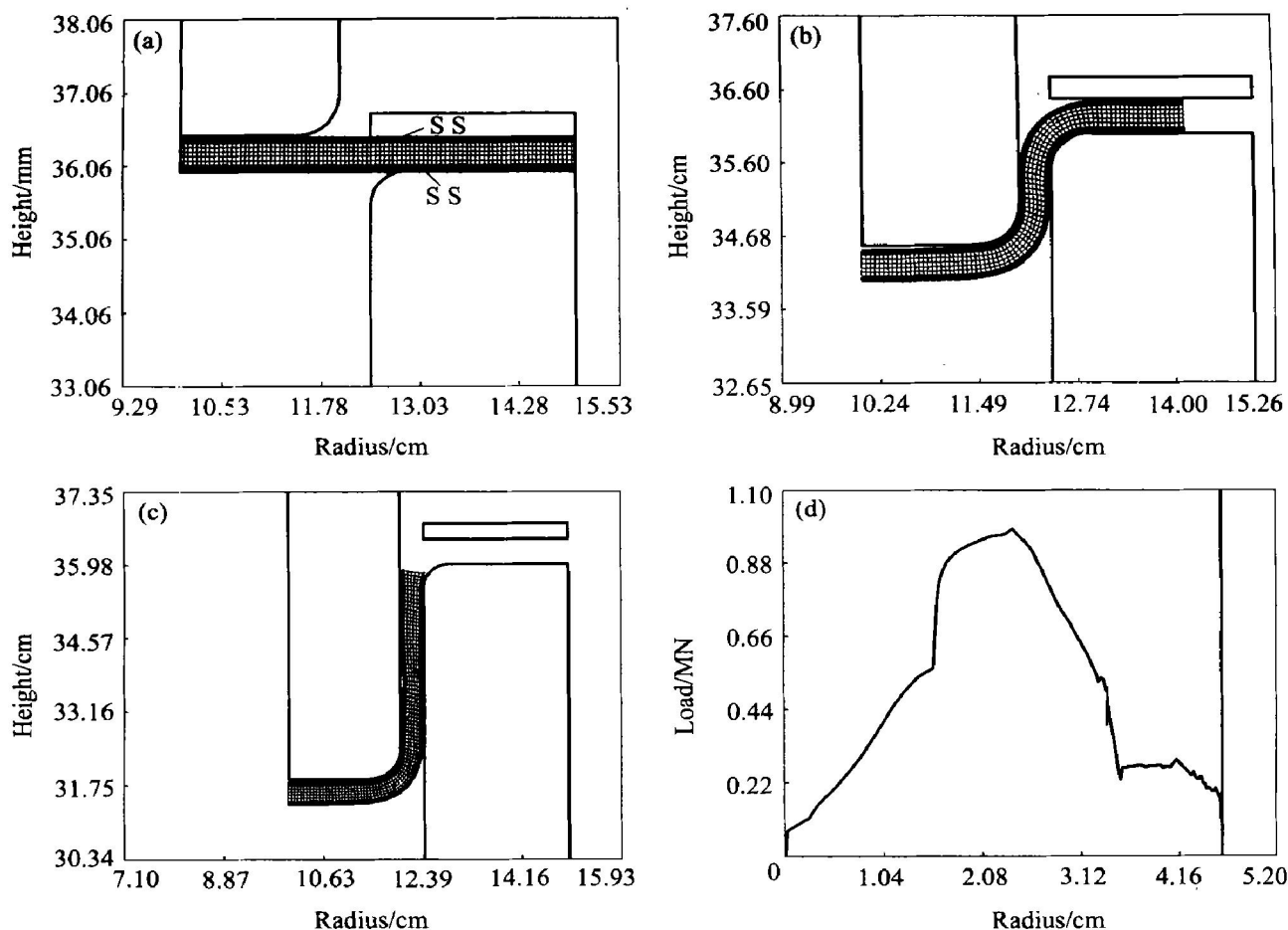


图2 不锈钢/铝/铝合金/铝/不锈钢五层复合板冲压过程

Fig. 2 Deep-drawing process for SS/1050/3003/1050/SS five-layer composite

(a) —Preliminary mesh; (b) — $s=20$ mm; (c) — $s=46.1$ mm;

(d) —Diagram of force change in deep drawing process

大,因为五层复合板的外层不仅受到双轴拉应力的作用,而且还受到弯曲拉应力作用。在受力较大的情况下,外层变形明显大于内层的金属。在五层复合板中纯铝的屈服强度最小,因此在五层复合板的冲压变形过程中次外层的纯铝层变形最大,其次是最外层的不锈钢层。五层复合板的外层不锈钢在轧制复合过程中变形不大,不易在冲压成型过程中被拉裂,而纯铝层的塑性相当好,且在扩散退火过程能够得到一定的塑性恢复,所以也不会再在冲压变形过程中被破坏。

3.4 两种复合板成型性能的比较

综合比较两种复合板的冲压成型过程数值模拟结果,可以看出五层复合板的成型性能要优于三层复合板,这一结论进一步验证了实验结果(见表1)。在复合板冲压性能实验中,五层复合板的各项表征材料成型性能的参数值均优于同类型三层复合板的性能,不锈钢/铝/铝合金/铝/不锈钢五层结构的复合板的冲压成型性能更优,这与数值模拟计算结果是一致的。

4 结论

1) 不锈钢/铝/铝合金/铝/不锈钢五层复合板的平均塑性应变比、凸耳系数、平均应变硬化指数、延伸率、屈强比均优于不锈钢/铝合金/不锈钢三层复合板。

2) 采用经典摩擦定律和刚性压边假设条件对两种复合板材的冲压过程进行的数值模拟证实:在相同变形条件下,不锈钢/铝合金/不锈钢三层复合板的冲压成型性较差,承载能力仅为五层复合板的三分之一,其外层的不锈钢在冲压成型力和模具压力作用下较易减薄破损,影响了三层复合板整体成型性能。

3) 数值模拟结论进一步证实了实验结果,不锈钢/铝/铝合金/铝/不锈钢五层复合板的成型性能更为优异。

REFERENCES

- [1] 钟志华,李光耀.薄板冲压成型过程的计算机仿真与应用[M].北京:北京理工大学出版社,1998.
ZHONG Zh-hua, LI Guang-yao. Numerical Simulation and Application of Deep Forming of Thin Sheet [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1998.
- [2] Mori T, Kurimoto S. Press-forming of stainless steel and aluminum clad sheet[J]. J Mater Proc Tech, 1996, 56: 242 - 254.
- [3] Jeswiet J, Cao Xiaokong. The effect of aspect ratio upon friction and normal forces in strip rulling[J]. J Mater Proc Tech, 1994, 45: 99 - 104.
- [4] Takuda H, Mori K, Fujimoto H, et al. Prediction of forming limit in deep forming of Fe/Al laminated composite sheets using ductile fracture criterion[J]. J Mater Proc Tech, 1996, 60: 291 - 296.
- [5] Ramaekers J, Kals J. Mathematical representation of friction in metal forming analysis[J]. Annals of CIRP, 1986, 35: 137 - 140.
- [6] Kapinski S. Analytical and experimental analysis of deep drawing process for bimetal elements[J]. J Mater Proc Tech, 1996, 60: 197 - 200.
- [7] Segawa A, Kawanami T. Rolling-deforming characteristic of clad materials determined by model experiments and numerical simulation of numerical simulation of clad rolling by the rigid-plastic FEM[J]. J Mater Proc Tech, 1995, 53: 544 - 551.
- [8] Rees D W A, Power R K. Forming limits in a clad metal [J]. J Mater Proc Tech, 1994, 45: 571 - 575.
- [9] Szulc W, Pietrzyk M, Kyja H, et al. Theoretical and experimental analysis of drawing of sheet rods covered with copper [J]. J Mater Proc Tech, 1994, 45: 401 - 406.
- [10] Richelsen A B. Numerical analysis of asymmetric rolling accounting for differences in friction[J]. J Mater Proc Tech, 1994, 45: 149 - 154.
- [11] Petty D M. Friction models for finite element modeling[J]. J Mater Proc Tech, 1994, 45: 7 - 12.
- [12] Kobayashi S. Deformation Analysis of Axisymmetric Sheet Metal Forming Process by Rigid-Plasticity Finite Element Method, Mechanics of Sheet Metal Forming [M]. New York: Plenum Press, 1978.

Numerical simulation of deep drawing procedure of stainless steel/ aluminum alloy/ stainless steel composite

ZHU Xu-xia¹, PENG Da-shu², LI Zuo-jian³

- (1. Department of Mechanical Engineering, Ningbo College, Ningbo 315016, China;
2. School of Materials Science & Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Department of Materials Science & Engineering, Guangdong University of Technology,
Guangzhou 510090, China)

Abstract: The forming properties of the stainless steel/ aluminum/ stainless sandwich sheets and the stainless steel/ aluminum/ aluminum alloy/ aluminum / stainless steel five-layer sheets were measured, and the deep drawing procedures of them were also analyzed by FEM. The distributions of effective strain and stress of the component metals were achieved. The simulation results show that the formability of five-layer composite is higher than that of three-layer composite. This conclusion is coincident with the experimental data.

Key words: formability; numerical simulation; FEM; composite; stainless steel; aluminum alloy

(编辑 何学锋)