文章编号: 1004-0609(2014)09-2213-07

镁/铝合金双金属叠层板的拉深性能

杨 琳,樊 奇,曹晓卿,徐平平,王文先

(太原理工大学 材料科学与工程学院,太原 030024)

摘 要: 镁/铝合金双金属叠层板兼具镁合金与铝合金两种金属材料的优势,可用于生产同时具有良好耐腐蚀性、 轻量化及减震性的产品。而钣金件的生产通常都包括拉深成形,因此首先采用 DYNAFORM 软件模拟镁/铝双金 属叠层板的拉深过程,模拟结果表明,镁板与拉深凸模接触时,镁/铝双金属叠层板的拉深性能较好。利用自制的 温热拉深模具对不同厚度 AZ31 镁合金/1060 铝合金双金属叠层板在 100~270 ℃温度范围内进行拉深实验,研究 板坯厚度、成形温度等因素对镁/铝双金属叠层板拉深性能的影响,并分析拉深后得到的筒形件的壁厚分布。结果 表明,拉深过程中的最大拉深力随着叠层板板厚的增加、板坯成形温度的降低而增大;双金属叠层板拉裂的危险 区域与单金属板拉深一样出现在凸模圆角处。与镁合金、铝合金单层板拉深相比,镁/铝双金属叠层板拉深使筒形 件的凸耳减小。

关键词: 镁合金; 铝合金; 镁/铝双金属叠层板; 拉深性能; DYNAFORM 数值模拟 中图分类号: TG146.2 文献标志码: A

Deep drawability of Mg/Al bimetal laminated sheet

YANG Lin, FAN Qi, CAO Xiao-qing, XU Ping-ping, WANG Wen-xian

(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The Mg/Al bimetal laminated sheet combines advantages of both magnesium alloy and aluminum alloy materials, and can be used to produce lightweight products of good corrosion resistance and vibration damping property. Sheet metal production usually includes deep drawing process, so the deep drawing process of Mg/Al bimetal laminated sheet was simulated with DYNAFORM softwave. The simulation results show that the bimetal laminated sheet exhibits better deep drawability when the magnesium layer is in contact with the drawing punch. The experiments were conducted to investigate the effects of layer thickness and forming temperature on the deep drawing process of AZ31 magnesium/1060 aluminum alloy laminated sheets in the temperature range of 100–270 °C. The thickness of each layer for the drawn component was measured and the thickness distribution in each layer was analyzed. It is demonstrated that the maximum drawing force increases with the increase of the thickness of laminated sheets and the decrease of the forming temperature, and the risk fracture position for a drawn cup of laminated sheet is also at the punch profile radius similar to that of monolithic sheet. In addition, the deep drawing of Mg/Al alloy laminated sheets may reduce the earring height compared with the drawing of magnesium alloy or aluminum alloy sheet.

Key words: magnesium alloy; aluminum alloy; Mg/Al bimetal laminated sheet; deep drawability; DYNAFORM numerical simulation

金属复合板是将几种不同材料的金属板通过一定的复合技术结合为一体的复合材料^[1]。合理选择组元

金属,可使金属复合板的力学、物理和化学性能得到 优化,同时具有良好的装饰性、导电导热性、耐蚀耐

收稿日期: 2013-12-26; 修订日期: 2014-04-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51375328);山西省自然科学基金资助项目(2010011033-1)

通信作者: 曹晓卿, 教授, 博士; 电话: 0351-6010021; E-mail: caoxiaoqing@tyut.edu.cn

磨性及节约贵重金属等优点,因此,金属复合板在生 产和生活中得到了广泛应用。异种金属复合板的制备 工艺主要有轧制复合、爆炸复合、爆炸制坯--轧制复 合和扩散焊接等。但在实际工业生产中,这些工艺在 复合界面容易生成脆性的金属间化合物,破坏基体间 的冶金结合,影响金属复合板的成形性能^[2]。而且这 些工艺生产的金属复合板组元金属层的厚度难以控 制,产品的一致性较差^[1],并不同程度地存在耗能高、 污染严重、成本高等问题^[3]。

双金属叠层板由两层不同力学性能的金属板叠加 而成,与金属复合板相似,兼有两种金属的优良性能, 且不存在金属复合板的脆性中间界面层,可用于生产 具有良好耐腐蚀性、轻量化和减震性的产品。如今, 双层金属板在航空航天、汽车、化工和电力等工业领 域得到了越来越广泛的应用。拉深是一种重要的板料 成形方式,研究双金属叠层板的拉深性能,得到合理 的拉深工艺参数,对促进双金属叠层板的广泛应用具 有重要意义。但其组元金属的力学性能差异及组元金 属间的互相影响导致叠层板拉深成形比单金属板的复 杂^[4],其影响因素不仅与拉深工艺参数(如成形温度) 有关,而且与叠层顺序、组元金属的板坯厚度等密切 相关^[5]。

近年来,研究者们已经开始关注双金属叠层板的 成形工艺。日本的 TAKUDA 等^[6]依据延性断裂准则对 低碳钢和几种铝合金金属叠层板的拉深成形进行了有 限元模拟,得出金属叠层板拉深成形性能与拉深工艺 参数及叠层顺序密切相关,指出两层成形性能较好的 低碳钢可改善中间 A2024 铝板的成形性能。ATRIAN 等^[7]研究了钢、黄铜双金属叠层板的拉深成形过程, 得到板坯直径与最大拉深力的关系以及最大拉深力出 现的位置。LANG 等^[8]研究了中间层很薄的多层板料 的液压成形,使中间薄板的成形性能显著提高,且发 现摩擦力较大时更有利于中间薄板的成形。

目前,已有钢/黄铜、钢/铝、钛/钢两层复合板^[6-10] 以及钢/铝/钢^[6]、不锈钢/铝合金/不锈钢^[11]三层复合板 的研究。镁合金密度低、比强度和比刚度高、减震、 导热性好,但耐腐蚀性差,而铝合金表面易形成比较 致密的氧化膜,耐腐蚀性优良。因此,镁/铝合金层状 复合材料可以兼具镁合金与铝合金的性能优势。目前 关于镁合金与铝合金的研究多限于采用挤压、爆炸复 合等方法制备的金属复合板^[12-14],而关于镁/铝叠层板 及其成形性能的研究还鲜见报道。

为此,本文作者首先通过数值模拟研究板坯的叠 层顺序对镁/铝双金属叠层板拉深性能的影响。然后通 过实验研究镁/铝双金属叠层板的拉深成形过程,分析 板坯厚度、成形温度对其拉深成形性能的影响。并通 过分析拉深后所得筒形件的壁厚分布,研究镁/铝双金 属叠层板拉深时的危险区域位置,为镁/铝双金属叠层 板的应用打下良好的基础,并有利于促进镁合金板材 制品的广泛应用。

1 数值模拟

采用 DYNAFORM 软件对镁/铝双金属叠层板筒 形件的拉深过程进行模拟。图1所示为镁/铝双金属叠 层板筒形件拉深过程模拟建立的模型,为与实验一致, 模型中凸模直径为38mm,凹模直径为42mm,凸模 圆角半径为7mm,凹模圆角半径为9mm。采用 DYNAFORM软件的Tool Mesh对工具进行网格划分, 采用 Blank Generator 对板料进行网格划分。将拉深凸、 凹模及压边圈均视为刚体。由于模具与板坯的轴对称 性,为缩短计算时间,取整个模型的1/4进行计算。



图1 数值模拟用网格模型



模拟中的材料为 AZ31 镁合金/1060 铝合金叠层 板,镁、铝合金板的厚度均为 0.8 mm。模拟中定义接 触类型为单向面面接触,并打开板坯与板坯之间的接 触选项(Between parts)。定义摩擦条件为库仑摩擦,板 料与凸模之间的摩擦因数为 0.2,与凹模之间的摩擦因 数为 0.14,与压边圈之间的摩擦因数为 0.14,两板之 间的摩擦因数为 0.125。凹模和压边圈采用固定压边间 隙 1.76 mm,模拟冲压速度为默认值 5 m/s,模拟成形 温度分别为室温、160 和 200 ℃。另外,设 AM 为铝 板与凸模接触,镁板与凹模接触;MA 为镁板与凸模 接触,铝板与凹模接触。

图 2 和 3 所示分别为成形温度为 160 和 200 ℃时 的模拟结果。成形温度为室温,板坯直径为 60 mm, 拉深筒形件均拉裂,但板坯叠层顺序为 AM 时,筒形

第24卷第9期

件拉入凹模 3 mm 破裂; 板坯叠层顺序为 MA 时, 筒 形件拉入凹模 5 mm 破裂。成形温度为 160 ℃时, 板 坯直径为 90 mm, 板坯叠层顺序为 AM 时, 筒形件凸 模圆角处出现拉裂(见图 2(a)); 板坯叠层顺序为 MA 时, 筒形件没有出现拉裂(见图 2(b))。成形温度为 200 ℃时, 板坯直径为 90 mm, 拉深筒形件均未出现拉裂, 但板坯叠层顺序为 AM 时, 筒形件起皱较明显(见图 3(a)); 板坯叠层顺序为 MA 时, 筒形件成形质量较好 (见图 3(b))。由此可见, 镁/铝双金属叠层板拉深时, 镁板与拉深凸模接触比铝板与拉深凸模接触具有较好 的拉深成形性能。



图 2 160 ℃时有限元模拟结果 Fig. 2 FEM simulation results at 160 ℃: (a) AM; (b) MA



图 3 200 ℃下时有限元模拟结果

Fig. 3 FEM simulation results at 200 °C: (a) AM; (b) MA

2 拉深实验

实验材料为 AZ31 镁合金板材、1060 铝合金板材 及由二者构成的镁/铝双金属叠层板,实验用镁合金、 铝合金的化学成分见表 1。

实验模具为一套自主设计的可控温拉深模具,其 结构简图如图 4 所示。通过控制模具中内嵌的电热丝 加热凸模、凹模及板料,控温精度为±5 ℃。采用电 火花线切割机将板材加工成 *d* 60、*d* 70、*d* 80、*d* 90 和 *d* 100 mm 的圆坯,依次用丙酮清洗表面油污,细 砂纸打磨。实验时模具安装在 DNS200 微机控制电子 万能试验机上,试验机的位移分辨率为 0.01 mm。拉 深凸模固定在试验机的上横梁十字夹头上,横梁移动 速度为 5 mm/min。采用聚四氟乙烯薄膜作为润滑剂, 拉深温度为 100~270 ℃^[15]。依据数值模拟结果,实验 时采用 MA 叠层顺序,将各组别的板坯加热到设定温 度,保温 10 min 后开始拉深。拉深结束后,观察筒形 件的成形状况,测量筒形件壁厚变化,并分析凸模载 荷-位移曲线。

表1 AZ31 镁合金和 1060 铝合金化学成分

 Table 1
 Chemical composition of AZ31 alloy and 1060 alloy sheets

Material	Mn	Zn	Ca	Si	Cu
AZ31 Mg alloy	0.20-0.60	0.7–1.3	0.04	0.30	0.05
1060 Al alloy	0.01	0.018	_	0.067	0.016
Material	Fe	Ti	Mg	Al	
AZ31 Mg alloy	0.005	_	Bal.	2.5-3.5	
1060 Al alloy	0.27	0.01	0.007	Bal.	



图4 拉深模具示意图

Fig. 4 Schematic diagram of deep drawing die

3 结果与讨论

3.1 组元金属板料厚度对叠层板拉深载荷的影响

为了研究组元金属板坯厚度对镁/铝双金属叠层 板拉深成形性能的影响,采用两种厚度的镁板分别与 4 种厚度的铝板组成不同厚度的镁/铝双金属叠层板, 组元金属分组情况见表 2。

图 5 所示为 0.8 mm 厚 AZ31 镁板与 4 种厚度的 1060 铝板组合的镁/铝双金属叠层板在不同温度下的 最大拉深载荷图。由图 5 可以看出,相同温度下,随着铝板厚度从 0.3 mm 增大到 1.0 mm,最大拉深力呈

表2 镁板与铝板厚度组合

Table 2 Thickness group of Mg and Al sheets					
Group	Thickness of	Thickness of			
No.	Mg sheet/mm	Al sheet/mm			
1	0.8	0.3			
2	0.8	0.5			
3	0.8	0.8			
4	0.8	1.0			
5	1.0	0.3			
6	1.0	0.5			
7	1.0	0.8			
8	1.0	1.0			



图5 镁板(厚度为 0.8 mm)与不同厚度铝板的组合在不同温度下的最大拉深力

Fig. 5 Maximum drawing forces of groups of Mg sheet and Al sheet with different thicknesses at different temperatures (thickness of magnesium sheet of 0.8 mm)

增大趋势。同时,随着成形温度从 130 ℃升高至 200 ℃,最大拉深力的增大趋势减缓,即随着成形温度的 增加,最大拉深力对板厚的敏感度降低。图 6 所示为 200 ℃时,2 种厚度的镁板与 4 种厚度的铝板各实验组 的最大拉深载荷图。由图 6 可见,相同温度下,铝板 厚度分别为 0.3、0.5、0.8 和 1.0 mm 时,镁板厚度从 0.8 mm 增加到 1.0 mm,最大拉深力分别提高了 18%、 22%、27%和 17%。即铝板厚度一定时,镁板厚度从 0.8 mm 增至 1.0 mm,最大拉深力呈增大趋势。

板料拉深时的最大拉深载荷为筒壁部分所能传递的最大拉力^[16]:

$$F = \pi dt \sigma_{0} \tag{1}$$

式中: F 为拉深力(N); d 为凹模内径(mm); t 为材料 厚度(mm); σ_{ρ} 为筒壁内的总拉应力(MPa)。其中, σ_{ρ}



图 6 200 ℃不同板厚组合的最大拉深力

Fig. 6 Maximum drawing force of different thickness group at 200 $^{\circ}$ C

由变形区变形需要的径向拉应力最大值 σ_{1max} ,材料在 压边圈和凹模平面间的间隙里流动时产生的摩擦力 μF_Q 引起的附加拉应力 σ_M ,毛坯流过凹模圆角表面遇 到的摩擦阻力,毛坯经过凹模圆角时产生的弯曲变形 以及离开凹模圆角进入凸、凹模间隙后又被拉直产生 反向弯曲所需要的应力 σ_W 和拉深初期毛坯在凸模圆 角处的弯曲应力等几部分组成,可表示为

$$\sigma_{\rm p} = \left(\sigma_{\rm 1max} + \frac{2\mu F_{\rm Q}}{\pi dt}\right) \left(1 + 1.6\mu\right) + \frac{\sigma_{\rm b}}{2r_{\rm d} + t} + \frac{\sigma_{\rm b}}{4r_{\rm p} + 2t}t \quad (2)$$

式中: μ 为材料与模具间的摩擦因数; F_Q 为施加在坯料上的压边力(N); r_d 为凹模圆角半径(mm); r_p 为凸模圆角半径(mm); σ_b 为板料的抗拉强度(MPa)。

将式(2)代入式(1)即得板料拉深时最大拉深载荷。 式(2)中各项均与板料的抗拉强度 σ_b成正比,由此可将 式(1)表示为

$$F = K\pi dt\sigma_{\rm b} \tag{3}$$

式中: K为修正系数。

可见,最大拉深力除与被拉板料的力学性能有关 外,还与板料的厚度有关,在单层金属板拉深时,最 大拉深力随着板厚的增加而增大。由图 5 和图 6 可见, 镁/铝双金属叠层板拉深时,最大拉深力随组元金属板 厚的增加而增大,与单金属板拉深规律相似。当叠层 板厚度相同时(如 1.8 mm),镁板较厚时所需最大拉深 力比铝板较厚时的增大了约 7%,说明镁板厚度的增 加对叠层板最大拉深力的影响大于铝板厚度增加的 影响。

根据式(1)分析,由于本实验中所用镁板的抗拉强度大于铝板的抗拉强度(σ_{bMg}=210 MPa, σ_{bAl}=102

MPa), 镁板对镁/铝双金属叠层板强度的影响较大。可见, 双金属叠层板的拉深成形性能取决于组元金属的 力学性能, 而组元金属中强度较大的金属对叠层板的 拉深性能影响较大。这与文献[17]对铝与不锈钢构成 的双层金属板的研究结果一致。

3.2 成形温度对镁/铝双金属叠层板极限拉深比的影响

对镁/铝双金属叠层板在 100~270 ℃温度范围内 进行了等温拉深。其中,镁板厚 0.8 mm,铝板厚 0.8 mm。图 7 所示为实验得到的镁/铝叠层板极限拉深比 (LDR)随拉深温度的变化。由图 7 可见,随着拉深温 度的升高,镁/铝叠层板的极限拉深比呈先增大后减小 的趋势。当温度为 200 ℃时,镁/铝叠层板的极限拉深 比达到 2.4。





随着变形温度的升高,镁合金的非基面滑移系被 激活,镁合金的变形能力增强,且热激活作用引起的 动态回复减弱了镁合金的应变硬化能力^[18],使抗拉强 度 σ_b降低,最大拉深力随之减小,镁合金的成形能力 得到提高。但当温度高于 200 ℃时,由于抗拉强度 σ_b 继续降低,镁板的塑性流动加快,容易发生局部流变 失稳即缩颈,导致严重变薄而破裂,限制了镁/铝双金 属叠层板极限拉深比的提高,而铝板的最佳塑性成形 温度也在 180~220 ℃范围内^[19]。因此,本实验中镁/ 铝双金属叠层板在 200 ℃左右拉深时获得了最大的极 限拉深比,表明此时镁/铝双金属叠层板具有较好的拉 深性能。

3.3 镁/铝叠层板拉深所得筒形件的壁厚变化

将筒形件沿轴向线切割,通过测量构成叠层板(镁

板厚度为 0.8 mm)的各层板的厚度变化,各取点位置 如图 8 所示;得到拉深筒形件的壁厚分布如图 9 和 10 所示。其中,图 9 所示为 200 ℃时各组合筒形件中镁 板的壁厚分布;图 10 所示为相应铝板的壁厚变化。可 见,在研究中所有镁合金板与铝合金板的组合,均在 位置 5 即凸模圆角处,板厚变薄最严重。因此,镁/ 铝双金属叠层板的拉裂危险区域同单金属板拉深类似 均位于凸模圆角处。

表 3 所列为 200 ℃时 0.8 mm 厚镁板与 4 种厚度 铝板组合拉深成形后的筒形件最大壁厚减薄率。由表 3 可见,铝板厚度分别为 0.3、0.5 和 1.0 mm 的叠层板 拉深成形后的筒形件,其壁厚减薄严重,有拉裂的可 能。而铝板厚度为 0.8 mm 的叠层板拉深的筒形件, 最大壁厚减薄率最小。0.8 mm 厚镁板相比 1.0 mm 的 镁板所需的最大拉深力较小,因此,选用 0.8 mm 厚 镁板。从图 5 可以看出, 0.8 mm 厚镁合金板与 0.3、 0.5 和 0.8 mm 厚铝合金板组合后,镁/铝双金属叠层板



图 8 拉深筒形件壁厚测量取点位置

Fig. 8 Location of thickness measuring points on drawn cup





Fig. 9 Thickness distribution in Mg layer of Mg/Al alloy sheet drawn cup at 200 $^\circ\!\!C$



图 10 200 ℃镁/铝拉深筒形件中铝板的壁厚分布

Fig. 10 Thickness distribution in Al layer of Mg/Al alloy drawn cup at 200 $^\circ\!\! C$

表 3 200 ℃拉深后危险断面的最大壁厚减薄率(镁板厚度 0.8 mm)

Table 3 Maximum thickness thinning rates of risk region at $200 \degree$ (thickness of Mg sheet of 0.8 mm)

	Maximum thickness	Maximum thickness	
Al thickness/mm	thinning rate of	thinning rate of	
	Mg sheet/%	Al sheet/%	
0.3	21	20	
0.5	12	18	
0.8	13	13	
1.0	19	21	

的厚度增加,拉深筒形件所需的最大拉深力增加幅度 较小,1.0 mm 铝合金板最大拉深力增加的幅度较大。 因此,镁合金和铝合金板的厚度均为 0.8 mm 时,叠 层板内的应力较小,其应变即壁厚减薄率相应较小。 综合各因素分析,镁/铝合金双金属叠层板组元厚度比 为 1:1 时拉深后危险断面的最大壁厚减薄率最小。

3.4 双金属叠层板拉深对镁/铝组元金属板拉深性能 的影响

图 11 所示为镁、铝单金属板和镁/铝双金属叠层 板在 200 ℃拉深所得的筒形件。其中,图 11(a)所示为 单镁板拉深筒形件;图 11(b)所示为单铝板拉深筒形 件;图 11(c)所示为镁/铝双金属叠层板拉深筒形件。 可以看出,单镁板和单铝板拉深筒形件凸耳严重,镁/ 铝双金属叠层板拉深筒形件凸耳最小。凸耳高度较大 时,需要较大的修边余量,造成了材料的浪费。在凸耳 的波峰或波谷分别有产生开裂的危险,严重影响产品质 量,增大废品率。

镁/铝双金属叠层板同时拉深能减小凸耳高度,可 能是双金属板之间的摩擦以及板料轧制方向互相影响 所致。镁/铝双金属叠层板拉深时凸耳高度减小的机理 还有待进一步研究确定。



图 11 镁、铝和镁/铝拉深筒形件

Fig. 11 Drawn cups of Mg (a), Al (b) and Mg/Al (c)

4 结论

 由数值模拟及实验结果的分析可知,在镁/铝 双金属叠层板拉深成形过程中,叠层顺序、板料厚度 和成形温度是影响其拉深成形性能的重要因素。

2)模拟结果表明,镁/铝双金属叠层板拉深时镁板与凸模接触,其拉深成形性能较好。

3) 镁/铝双金属叠层板拉深时,随着组元金属板 厚的增加,最大拉深力增大。且抗拉强度较大的镁板 对叠层板最大拉深力的影响较大。综合考虑筒形件的 壁厚减薄情况,在本研究中,合理的板坯厚度组合为 镁、铝合金板厚度均为 0.8 mm。

4)随着拉深温度的升高,镁/铝叠层板的极限拉 深比呈先增大后减小的趋势。当温度为 200 ℃时,镁/ 铝叠层板的极限拉深比达到最大值 2.4,镁/铝叠层板 的最佳成形温度为 200 ℃左右。

5) 镁/铝双金属叠层板拉深筒形件厚度分布与单 金属板拉深筒形件相似,其危险区域也出现在凸模圆 角处。

6) 镁/铝双金属叠层板拉深减小了镁/铝合金板拉 深筒形件的凸耳,减少了修边余量,可提高材料利用 率。

REFERENCES

 马志新,胡 捷,李德富,李彦利. 层状金属复合板的研究和 生产现状[J]. 稀有金属,2003,27(6):799-803.
 MA Zhi-xin, HU Jie, LI De-fu, LI Yan-li. Overview of research and manufacture of layer-metal composite plate[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2003, 27(6): 799-803. 第24卷第9期

- [2] 周德敬, 尹 林, 张新明, 唐建国, 刘星兴. 轧制复合铝/不锈 钢界面金属间化合物的生长动力学[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(9): 2461-2468.
 ZHOU De-jing, YIN Lin, ZHANG Xin-ming, TANG Jian-guo, LIU Xing-xing. Growth kinetics of intermetallic compounds at aluminum/stainless steel interface bonded by rolling[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(9): 2461-2468.
- [3] 李小兵,祖国胤,王 平. 退火温度对异步轧制铜/铝复合板 界面组织及力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(5): 1202-1207.
 LI Xiao-bin, ZU Guo-yin, WANG ping. Effect of annealing temperature on microstructure and mechanical properties of Cu/Al clad sheet fabricated by asymmetrical roll bonding[J]. The
- Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(5): 1202-1207.
 [4] 邹东平,刘 勇.双金属板拉深性能影响因素的模拟及分析
 [J]. 锻压技术, 2008, 33(2): 120-123.
 ZOU Dong-ping, LIU Yong. Numerical simulation and analysis of effect factors on deep-drawing property for bimetal-laminated sheet[J]. Forging and Stamping Technology, 2008, 33(2): 120-123.
- [5] BAGHERZADEH S, MOLLAEI-DARIANI B, MALEKZADEH K. Theoretical study on hydro-mechanical deep drawing process of bimetallic sheets and experimental observations[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212: 1840–1849.
- [6] TAKUDA H, MORI K, FUJLMOTO H, HATTA N. Prediction of forming limit in deep drawing of Fe/Al laminated composite sheets using ductile fracture criterion[J]. Journal of Material Processing Technology, 1996, 60: 291–296.
- [7] ATRIAN A, FERESHTEH-SANIEE F. Deep drawing process of steel/brass laminated sheets[J]. Composites: Part B, 2013, 47: 75–81.
- [8] LANG L H, DANCKERT J, NIELSEN K B. Multi-layer sheet hydroforming: Experimental and numerical investigation into the very thin layer in the middle[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 170: 524–535.
- [9] 董运涛,张家毓,李选明. 钛/钢双金属的可控气氛热复合工 艺初探[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(9): 141-144. DONG Yun-tao, ZHANG Jia-yu, LI Xuan-ming. Preliminary study of controlled atmosphere roll bonding process for the titanium-steel bimetal system[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 41(9): 141-144.
- [10] 王敬忠,颜学柏,王韦琪,闫静亚,容 耀,严 平.带夹层 材料的爆炸-轧制钛钢复合板工艺研究[J].稀有金属材料与工 程,2010,39(2):310-313.
 WANG Jing-zhong, YAN Xue-bai, WANG Wei-qi, YAN Jing-ya, RONG Yao, YAN Ping. Titanium cladding steel plates with interlayer by explosion and rolling bonding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010, 39(2): 310-313.
- [11] 朱旭霞, 彭大暑, 黎祚坚. 不锈钢/铝(合金)/不锈钢多层复合板的冲压成型性能[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(4): 914-918.
 ZHU Xu-xia, PENG Da-shu, LI Zuo-jian. Numerical simulation of deep drawing procedure of stainless steel/aluminum

alloy/stainless steel composite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(4): 914–918.

- [12] 李线绒,梁 伟,赵兴国,刘奋成,张 艳,付晓鹏.共晶合金中间层连接镁/铝异种金属的界面组织及结合强度研究[J].稀有金属材料与工程,2008,37(11):2016-2019.
 LI Xian-rong, LIANG Wei, ZHAO Xing-guo, LIU Fen-cheng, ZHANG Yan, FU Xiao-peng. Study on the microstructures and bond strength of Mg/Al heterogenous metal bonded with eutectic alloy interlayer[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(11): 2016-2019.
- [13] 冯世杰,梁 伟,薛晋波. AZ91D 镁合金表面真空蒸镀锌铝复合涂层的研究[J]. 稀有金属, 2010, 34(5): 678-683.
 FENG Shi-jie, LIANG Wei, XUE Jin-bo. Zinc-aluminum composite coating of AZ91D magnesium alloy by vacuum evaporating technique[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2010, 34(5): 678-683.
- [14] 颜银标,王进华,申小平,张立奎,周 熙. 铝合金/镁合金爆 炸复合界面低温退火后的结构演化[J].中国有色金属学报, 2010,20(4): 674-680.

YAN Yin-biao, WANG Jin-hua, SHEN Xiao-ping, ZHANG Li-kui, ZHOU Xi. Microstructure evolution of interface of aluminum alloy/magnesium alloy explosive composite plates after low temperature annealing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(4): 674–680.

- [15] 曹晓卿,刘 毅,王敬伟,池成忠,李黎忱,王红霞. AZ31 镁合金薄板在热态下的成形极限图及其应用[J].稀有金属材料与工程,2013,42(3):550-554.
 CAO Xiao-qing, LIU Yi, WANG Jing-wei, CHI Cheng-zhong, LI Li-chen, WANG Hong-xia. Forming limit diagram and application of AZ31 magnesium alloy sheet at elevated temperatures[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(3):550-554.
- [16] 陈文琳,陈学文,曹晓卿. 金属板料成形工艺与模具设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 122-123.
 CHEN Wen-lin, CHEN Xue-wen, CAO Xiao-qing. Sheet metal forming process and die design [M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 122-123.
- [17] MOROVVATI M R, MOLLAEI-DARIANI B, ASADIAN-ARDAKANI M H. A theoretical, numerical, and experimental investigation of plastic wrinkling of circular two-layer sheet metal in the deep drawing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210: 1738–1747.
- [18] 张凯峰, 尹德良, 吴德忠, 蒋少松. AZ31 镁合金板的热拉深 性能[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(6): 1505-1509.
 ZHANG Kai-feng, YIN De-liang, WU De-zhong, JIANG Shao-song. Deep drawability of AZ31 magnesium alloy sheets at elevated temperatures[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(6): 1505-1509.
- [19] 王 辉,高 霖,陈明和,金玲玲. T6 态 7075 铝合金的温拉 深成形研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(2): 232-235.
 WANG Hui, GAO Lin, CHEN Ming-he, JIN Ling-ling. Deep drawing of A7075 with T6 temper at elevated temperature[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(2): 232-235.