

6005A 铝合金薄壁型材压弯成形有限元分析及试验

廖斌¹, 张流锟², 吴晓东³, 卢有庆¹, 胡武¹

(1. 南南铝业股份有限公司, 广西 南宁 530031; 2. 中国航发贵州黎阳航空动力有限公司, 贵州 贵阳 550014;
3. 重庆大学 材料科学与工程学院 教育部轻合金材料国际合作联合实验室, 重庆 400044)

摘要: 针对薄壁型材在压弯过程中易产生的截面畸变缺陷, 借助于 Deform-3D 有限元模拟软件及压弯设备, 重点探讨了 6005A 铝合金薄壁型材 (厚度为 2.5 mm) 的型材结构、填充材料及填充方式对压弯后型材结构畸变的影响。结果表明: 除 PU 外, PA6、PP 及 PVC 均具有较高的屈服强度 (≥ 21 MPa), 在压弯过程中可有效支撑薄壁型材以降低型材结构的畸变率。由于型材上、下表面在弯曲过程中受力不一致, 造成上、下模接触面的截面畸变规律有所区别。不同型材结构 (未填充) 压弯后, 上、下模接触面的截面畸变率与填充压弯时截面畸变率的变化规律基本一致, 这说明更改型材结构可略微降低截面畸变率, 但改善效果并不明显。采用方案 9 (型材结构 2、PP-填充方式 2) 压弯后的截面畸变情况明显改善且优于方案 8 (型材结构 1、PP-填充方式 1), 并对方案 9 进行试验验证, 发现压弯后型材结构的截面畸变率较方案 5 (原始结构-未填充) 改善明显且满足设计需求。

关键词: 压弯; 薄壁型材; 截面畸变率; 型材结构; 填充材料; 填充方式

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.018

中图分类号: TG146.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 01-0128-08

Finite element analysis and experiment on press bending for 6005A aluminium alloy thin-walled profile

Liao Bin¹, Zhang Liukun², Wu Xiaodong³, Lu Youqing¹, Hu Wu¹

(1. Alnan Aluminum Co., Ltd., Nanning 530031, China;
2. Areo Engine Corporation of China Gui Zhou Liyang Aviation Power Co., Ltd., Guiyang 550014, China;
3. International Joint Laboratory for Light Alloys, Ministry of Education, College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: For the problem that the thin-walled profiles were easy to occur the section distortion defects in the press bending process, the influences of 6005A aluminium alloy thin-walled (the thickness of 2.5 mm) profile structure, filling material and filling method on the structural distortion of profile after press bending were explored by finite element simulation software Deform-3D and press bending equipment. The results show that except for PU, the filling material of PA6, PP and PVC all have high yield strength (≥ 21 MPa) and can effectively support thin-walled profiles during the press bending process to reduce the section distortion rate. Due to the inconsistent of the force on the upper and lower surfaces of profile during the press bending process, the section distortion law for the contact surface of the upper and lower dies is different. The variation law of section distortion rate at the contact surface of the upper and lower dies after press bending with different profile structures (without filling) is basically the same as that during the filled press bending, which shows that changing the profile structure can slightly reduce the section distortion rate, but the improvement is not obvious. The section distortion condition in scheme 9 (profile structure 2, PP-filling method 2) after press bending is significantly better than that in scheme 8 (profile structure 1, PP-filling method 1), and through the verification test of scheme 9, the section distortion rate after press bending is significantly better than that in scheme 5 (original structure-without filling) and meets the design requirements.

Key words: press bending; thin-walled profile; section distortion rate; profile structure; filling material; fill method

6000 系铝合金具有中等强度、优良的成形性能、焊接性能及耐腐蚀性能^[1-2], 被广泛应用于汽

车、轨道交通等领域^[3-5]。6005A 铝合金作为汽车工业中车身轻量化的重要合金, 主要应用于防撞梁、保险杠及纵梁等部件^[6-8]。在汽车应用领域, 铝合金弯曲型材也常作为车身结构件而引人关注, 且近年来得到了广泛应用^[9]。然而, 型材弯曲后易发生截面畸变、起皱、开裂及回弹等缺陷^[10]; 为保证型材的精度及装配要求, 除基本成形外, 还必须关注型材结构的畸变情况。

收稿日期: 2022-03-31; 修订日期: 2022-07-10

基金项目: 南宁市科学研究与技术开发计划项目 (20221028)

作者简介: 廖斌 (1992-), 男, 博士, 副高级工程师

E-mail: bin.liao@foxmail.com

通信作者: 吴晓东 (1974-), 男, 博士, 副研究员

E-mail: xiaodongwu@cqu.edu.cn

目前,国内铝合金型材弯曲的截面畸变已有部分研究,这些研究主要集中在研究填充柔性芯轴对型材弯曲成形后截面畸变量的影响^[11]、成形温度对铝合金型材挤压-弯曲一体化成形回弹及截面畸变的影响^[12],以及矩型截面汽车用铝合金型材弯曲成形的截面畸变问题^[13]等方面。而关于填充方式及型材结构对弯曲型材压弯后截面畸变的影响还未见有报道。

为此,本文以 6005A 铝合金薄壁型材为研究对象,重点研究型材结构、填充材料及填充方式对压弯后型

材结构畸变的影响,并为实际生产提供理论指导。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本试验用铝合金为 6005A 铝合金薄壁挤压型材(厚度为 2.5 mm),型材弯曲部位图及型材结构如图 1 所示。型材弯曲部位由两段圆弧(半径为 220 和 270 mm)和长度为 46.5 mm 的直线段组成;整个弯曲部位的水平面长度为 320 mm。

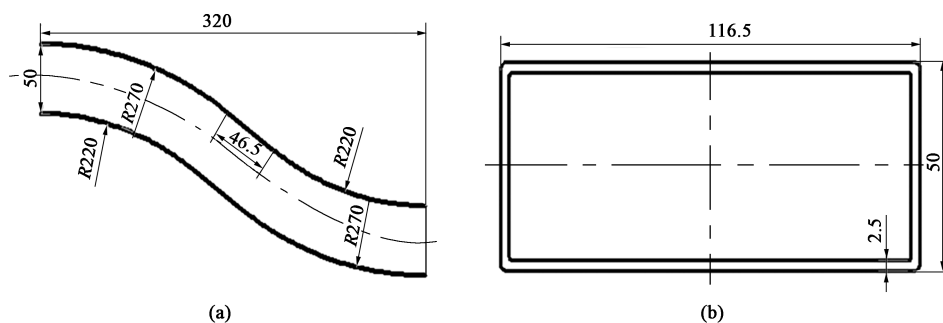


图 1 型材的弯曲部位 (a) 及结构 (b)

Fig. 1 Bending parts (a) and structure (b) of profile

1.2 截面畸变表征

为了描述薄壁型材弯曲后的截面畸变情况,采用三坐标(Tornado-C NCA152010)设备对压弯后的型材沿截面由 A 至 B 间隔一定距离取点测量(图 2 中 P1~P55 点),随后将测量数据进行作图得到截面轮廓情况。截面畸变率 ε ^[13] 可用于衡量变形后型材结构的畸变情况:

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_1}{H_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: H_0 为型材结构的原始高度; H_1 为压弯后截面最大偏移位置的高度。

由于压弯后型材内弧面具有装配要求,对截面畸变有较高要求,所以,本文仅测量内弧截面畸变,测量位置位于弧度与水平过渡位置。为表征不同位置型材结构的畸变情况,特选择距过渡位置 125 mm 作为起点(图 2b 中 C 位置),随后在距 C 位置不同距离处分别测量截面畸变情况。

1.3 有限元建立

本文基于三维模拟软件 Deform-3D,通过三维几何建模、装配、接触条件定义、网格划分等步骤建立了薄壁型材压弯的有限元模型(图 3)。通过该模型对不同型材结构及填充情况进行模拟,模拟型材结构及填充情况见图 4。

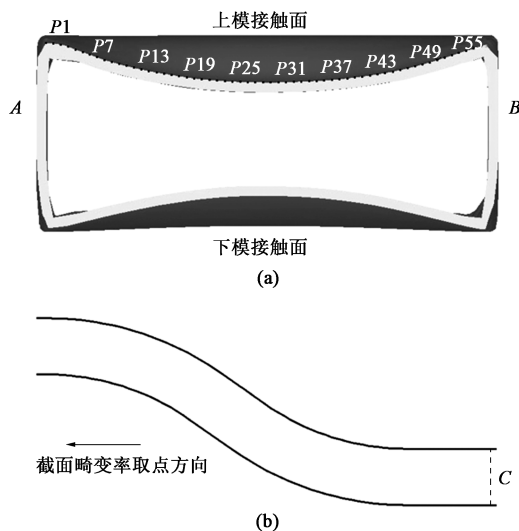


图 2 压弯后截面畸变表征 (a) 及取样 (b) 示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of representation for section distortion after press bending (a) and sampling (b)

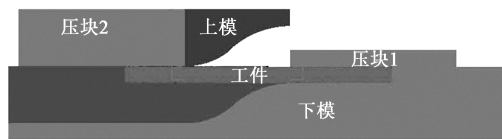


图 3 薄壁型材压弯有限元模型

Fig. 3 Finite element model of press bending for thin-walled profile

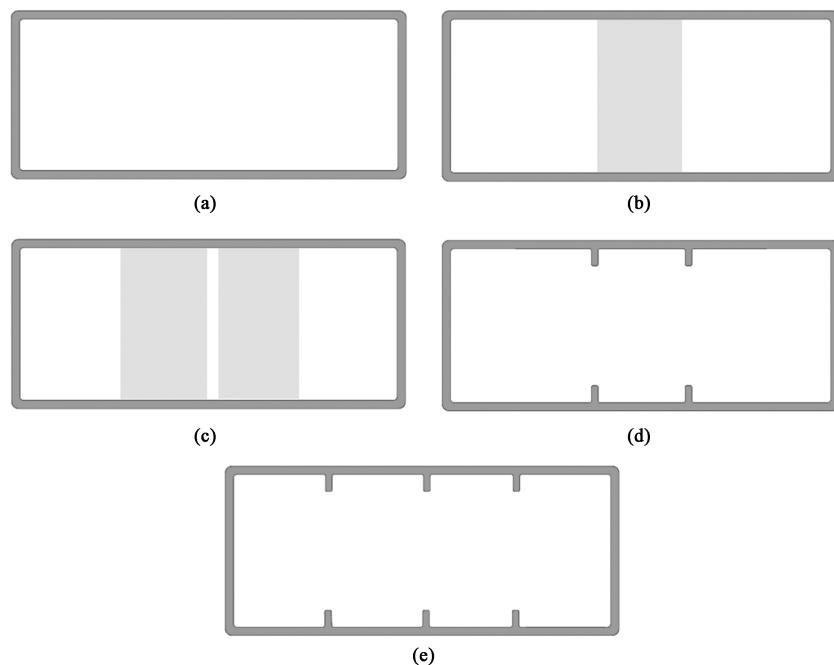


图 4 填充方式及型材结构

(a) 原始型材结构 (b) 填充方式 1 (c) 填充方式 2 (d) 型材结构 1 (e) 型材结构 2

Fig. 4 Filling methods and profile structures

(a) Original profile structure (b) Filling method 1 (c) Filling method 2 (d) Profile structure 1 (e) Profile structure 2

1.4 材料模型

模拟所涉及 6005A 铝合金、PU、PVC、PA6 及 PP 填充材料的本构模型均通过力学试验获得, 模拟所用试验材料的真应力-真应变曲线如图 5 所示, 对试验所获得的力学曲线进行数

据提取, 随后将提取的、模拟所需的材料性能数据导入软件。试验模拟方案见表 1, 方案 1~方案 7 分别模拟不同填充材料及型材结构对截面畸变的影响, 方案 8~方案 9 则为模拟的最佳填充方式。

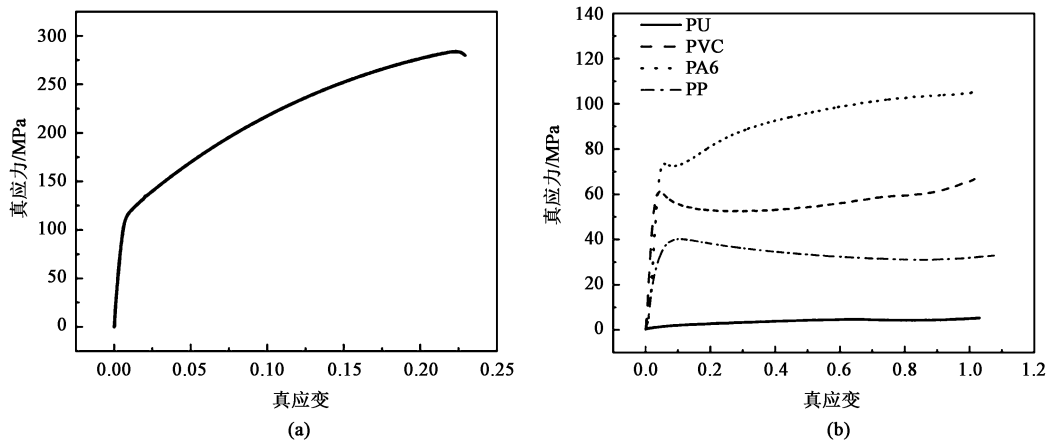


图 5 试验用材料的真应力-真应变曲线

(a) 6005A 铝合金 (b) 各填充材料

Fig. 5 True stress-true strain curves for test materials

(a) 6005A aluminium alloy (b) Various filling materials

1.5 压弯试验

压弯试验在 1600 t 液压机上进行, 压弯模具主

要分为 3 个部分, 分别为左、右压模和压弯成形部分, 模具的护边高度与型材高度一致, 均为 50 mm。

模具定位和模具如图 6 所示。

表 1 试验方案
Table 1 Test schemes

方案编号	型材结构	填充情况	模拟	试验
1	原始截面	PU-填充方式 1	✓	—
2	原始截面	PVC-填充方式 1	✓	—
3	原始截面	PA6-填充方式 1	✓	—
4	原始截面	PP-填充方式 1	✓	—
5	原始截面	无	✓	✓
6	型材结构 1	无	✓	—
7	型材结构 2	无	✓	—
8	型材结构 1	PP-填充方式 1	✓	—
9	型材结构 2	PP-填充方式 2	✓	✓

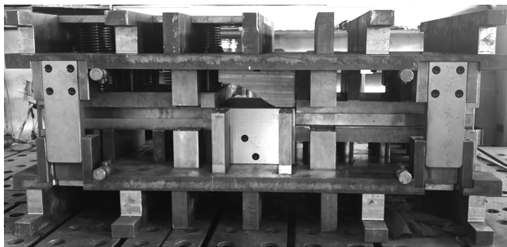


图 6 压弯试验模具
Fig. 6 Dies in press bending test

2 试验结果

2.1 填充材料对成形质量的影响

不同填充材料下，压弯后的各截面位置的截面畸变率如图 7 所示，可知压弯后型材各部位的截面畸变率随着距 C 位置距离的增加先增加。各填充材料的上模接触面的截面畸变率在距 C 位置 125 mm 处最先达到峰值，随后在距 C 位置 275 mm 处达到第 2 峰值；下模接触面截面畸变率最先在距 C 位置 250 mm 处达到第 1 个峰值，随后在距 C 位置 425 mm 处达到第 2 峰值。如图 7c 所示，在相同截面位置，型材上、下模接触面的应变并非呈对称状态，也即在压弯过程中，型材上、下模接触面所受应力并不相同，这是造成上、下模接触面的截面畸变率变化规律不一致的主要原因。其中，方案 1 中不同位置的截面畸变率大体高于其他方案，这与填充材料对薄壁型材的支撑能力有关，即与材料的弹性模量、屈服强度、应变硬化指数均相关。其中，填充材料的屈服强度起主导作用。综合不同填充材料的截面畸变率和力学性能可以看出，PP 材料的力学性能最低，但经填充压弯后型材仍具有较低的截面畸变率，可将 PP 材料填充时的受力情况作为填充材料选择的

临界情况。通过对 PP 材料填充时的应力进行分析，并计算出表面所受的平均应力为 21 MPa，即填充材料的屈服强度超过该值时，可保证压弯后型材具有较低的截面畸变率。

由于本试验重点关注直线段的截面畸变情况，因此，分析了距离 C 位置 125 mm 处截面位置的等效应变。由图 8 可以看出，不同方案下，型材过渡处截面的等效应变最大位置均位于上模接触面两端位置，这是由于在变形过程中，上模最先接触型材上表面所造成的。为进一步研究填充材料对截面畸变的影响，对过渡位置处截面分别沿型材上、下模接触面取点以表征截面的凹陷情况，其结果如图 9 所示，其中横轴位置为 A 至 B 方向依次取点（图 2a）。

由图 9 可以看出，经不同填充材料填充后，型材依旧会发生凹陷，但经不同填充材料填充后，凹陷深度有所差别。PP、PVC、PA6、PU 填充材料下的截面畸变率分别为 5.68%、6.50%、5.60% 和 10.80%，填充材料在压弯过程中对薄壁型腔的支撑能力由强至弱排序为：PA6>PP>PVC>PU。此外，综合填充材料成本及增重情况，选择性价比较高且密度较轻的 PP 材料进行后续工作。

2.2 型材结构对成形质量的影响

由 2.1 节选定 PP 材料作为型材弯曲的填充材料，但由于原始型材内腔在生产过程中难以准确地将填充材料填充至填充位置。遂决定对原有型材结构进行更改以固定填充材料，并对不同型材结构经未填充压弯后的截面畸变情况进行了模拟，其结果如图 10 所示。

由图 10a、图 10b 可知，不同型材结构未填充压弯后的截面畸变率的变化趋势基本一致，与填充后压弯相比，截面畸变率的变化规律基本一致，均存在双峰现象及上、下部变化规律不一致的情况。其中，上模接触面截面畸变率第 1 个峰值的位置在距 C 位置 150 mm 处，第 2 个峰值位于距 C 位置 290 mm 处；下模接触面截面畸变率第 1 个峰值的位置在距 C 位置 225 mm 处，第 2 个峰值位于距 C 位置 400 mm 处。无填充材料压弯时，型材在各方向自由变化；而经填充后压弯时，由于填充材料的存在，限制了型材变形，在压缩方向上表现为截面畸变率下降，而水平方向则表现为截面畸变率峰值位置向填充材料变形的反方向偏移。

由图 10c、图 10d 可以看出，方案 5、方案 6 及方案 7 中不同型材结构的截面畸变率分别为 21.3%、20.2%和 19.9%。表明更改型材结构对空腔型材压弯后的截面畸变有一定改善作用，但改善作用并不明显。

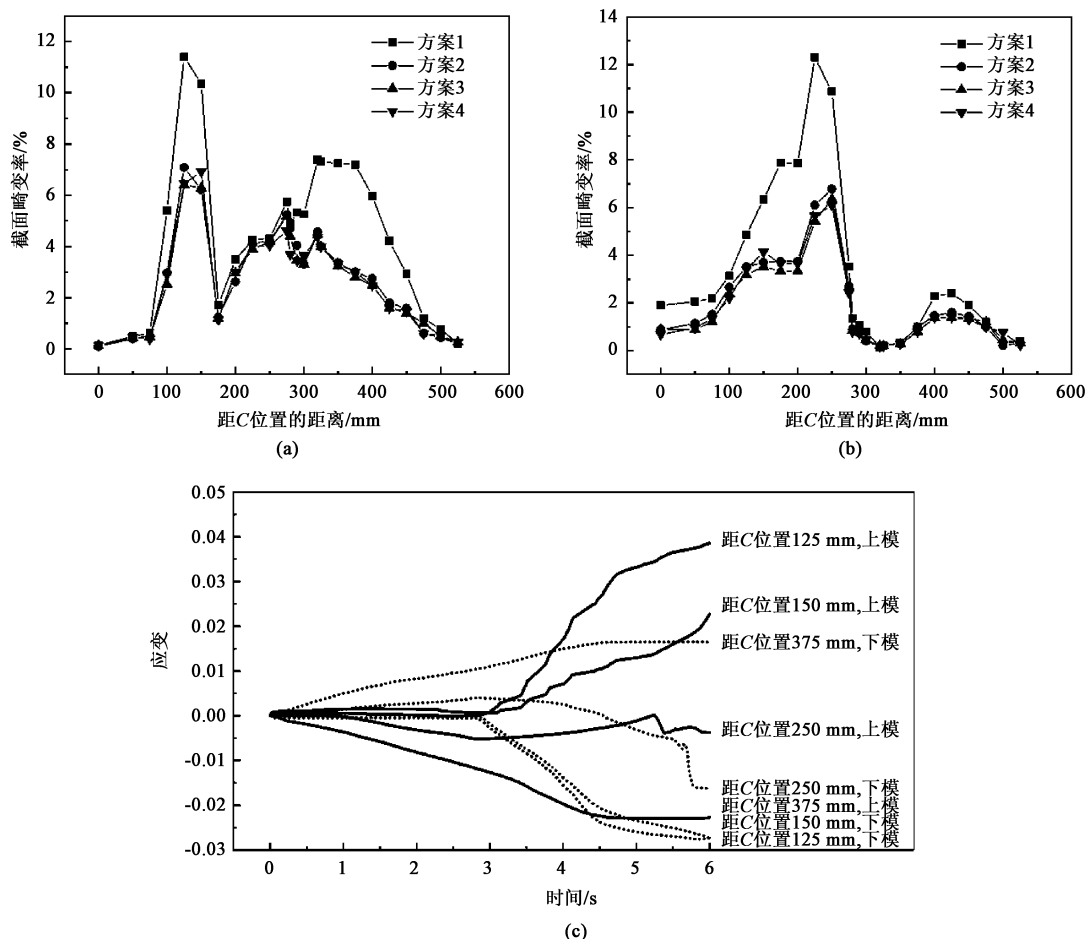


图 7 不同填充材料压弯后不同位置处的截面变化情况

(a) 上模接触面截面畸变率 (b) 下模接触面截面畸变率 (c) 不同位置上、下模接触面应变情况

Fig. 7 Variation conditions of sections at different positions after press bending with different filling materials

(a) Section distortion rate of upper die contact surface (b) Section distortion rate of lower die contact surface

(c) Strain conditions at contact surfaces of upper and lower dies in different positions

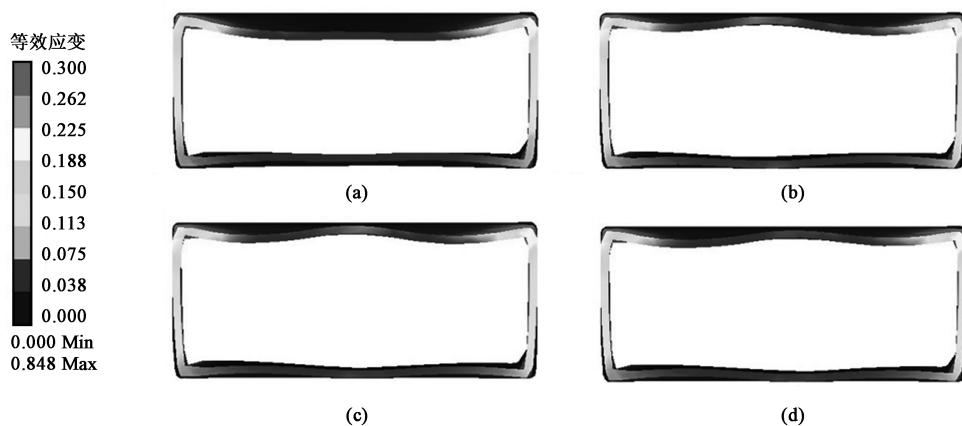


图 8 不同填充材料压弯后距 C 位置 125 mm 处截面的等效应变分布

(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3 (d) 方案 4

Fig. 8 Equivalent strain distributions of section stayed 125 mm away from C position after press bending with different filling materials

(a) Scheme 1 (b) Scheme 2 (c) Scheme 3 (d) Scheme 4

2.3 型材结构及填充方式对成形质量的影响

结合前文模拟结果对生产的可行性方案进行模

拟, 主要模拟了型材结构及填充方式对压弯后成形性能的影响, 其结果如图 11 所示。可以看出, 方案

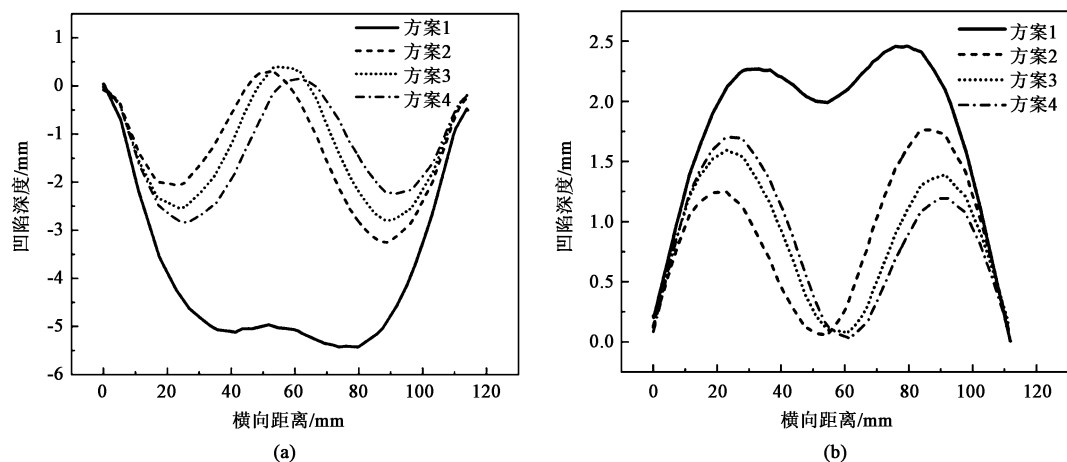


图9 不同填充材料压弯后过渡处截面凹陷情况

(a) 上模接触面 (b) 下模接触面

Fig. 9 Sinking conditions of section at transition location after press bending with different filling materials

(a) Upper die contact surface (b) Lower die contact surface

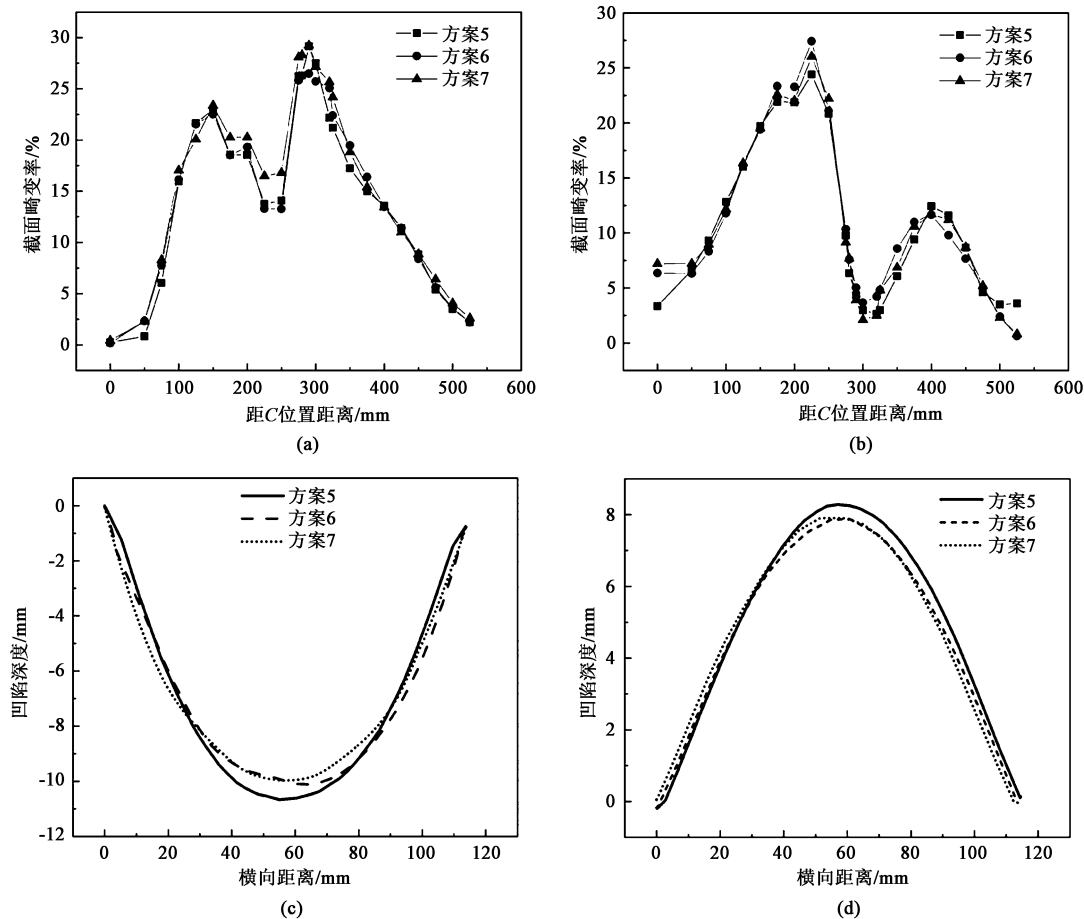


图10 型材结构对压弯后成形的影响

(a) 上模接触面不同位置截面畸变率 (b) 下模接触面不同位置截面畸变率 (c) 上模接触面过渡处截面凹陷情况 (d) 下模接触面过渡处截面凹陷情况

Fig. 10 Influences of profile structure on formation after press bending

(a) Section distortion rates of upper die contact surface at different positions (b) Section distortion rates of lower die contact surface at different positions (c) Sinking condition of section at transition location of upper die contact surface (d) Sinking condition of section at transition location of lower die contact surface

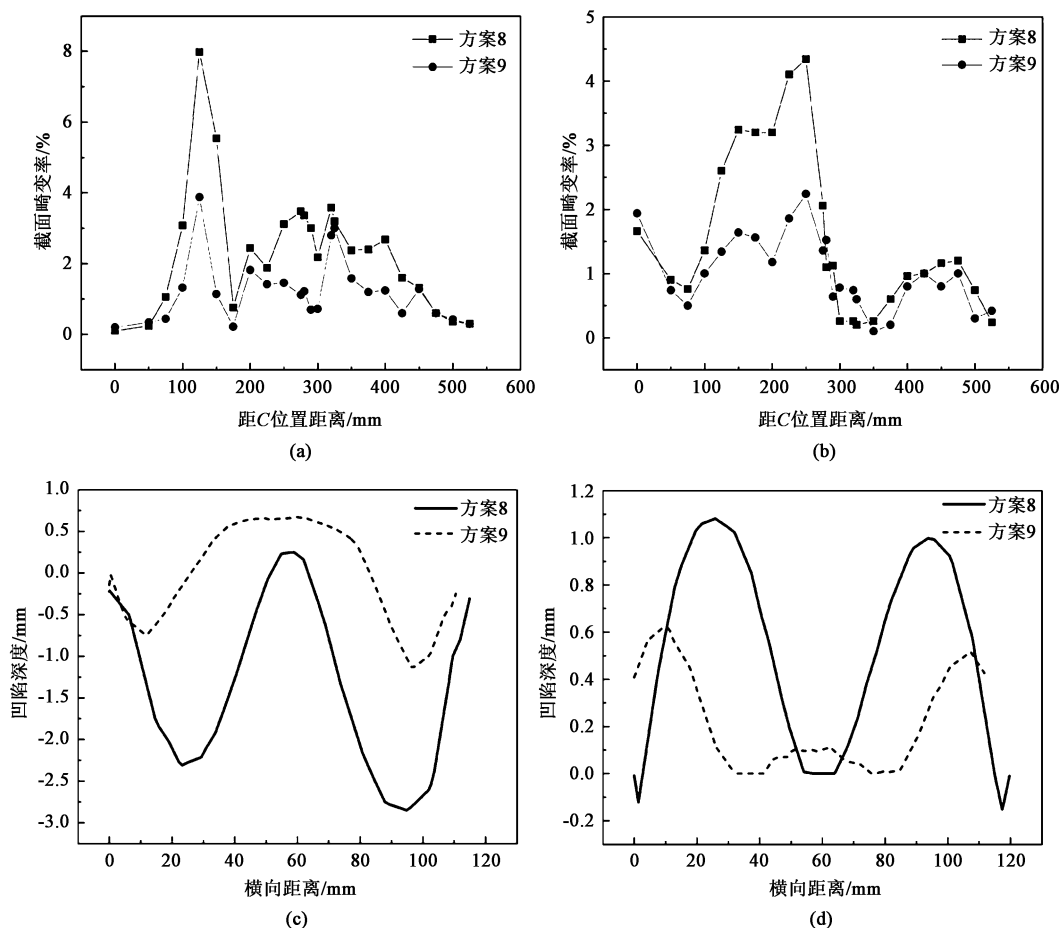


图 11 型材结构和填充方式对压弯后成形的影响

(a) 上模接触面不同位置截面畸变率 (b) 下模接触面不同位置截面畸变率 (c) 上模接触面过渡处截面凹陷情况
(d) 下模接触面过渡处截面凹陷情况

Fig. 11 Influences of profile structure and filling method on formation after press bending

(a) Section distortion rates of upper die contact surface at different positions (b) Section distortion rates of lower die contact surface at different positions
(c) Sinking condition of section at transition location of upper die contact surface (d) Sinking condition of section at transition location of lower die contact surface

8 和方案 9 在不同位置的截面畸变率的变化规律基本一致,但方案 9 中同一位置的截面畸变率均低于方案 8。由过渡处截面凹陷深度的分布情况(图 10c、图 10d)可以看出:方案 8 和方案 9 的上模接触面截面的凹陷深度分别为 2.85 和 1.13 mm,截面畸变率分别为 5.70% 和 2.26%;下模接触面的凹陷深度分别为 1.3 和 0.6 mm,截面畸变率为 2.6% 和 1.2%。

2.4 试验结果

选取可行性方案中的最佳方案(方案 9)及原始方案(方案 5)在 1600 t 压力机上进行压弯试验,压弯后型材在过渡位置的截面畸变情况如图 12 所示。由图 12a 可以看出,原始截面型材压弯后上、下两面明显凹陷;而经更改型材结构及填充方式后,压弯截面较压弯前截面未见有明显改变(图 12b);为表征

实际压弯后的截面畸变情况,对过渡位置上处的模接触面畸变情况进行三坐标测量,由图 12c 可知:相较于方案 5,方案 9 的最大凹陷深度由 8.1 mm 下降至 0.83 mm;截面畸变率由 16.2% 下降至 1.7%,满足凹陷深度不超过 1.5 mm(截面畸变率为 3%)的设计需求。试验结果与模拟数据的截面畸变的变化规律一致,有限元模拟结果与试验结果吻合较好。

3 结论

(1) 填充材料对薄壁型材压弯过程中的支撑能力由强至弱为:PA6>PP>PVC>PU。

(2) 不同填充材料压弯后,型材上、下部截面畸变率的变化规律有所区别。

(3) 更改型材结构有助于改善弯曲后截面的畸变情况,但截面畸变率下降并不明显。

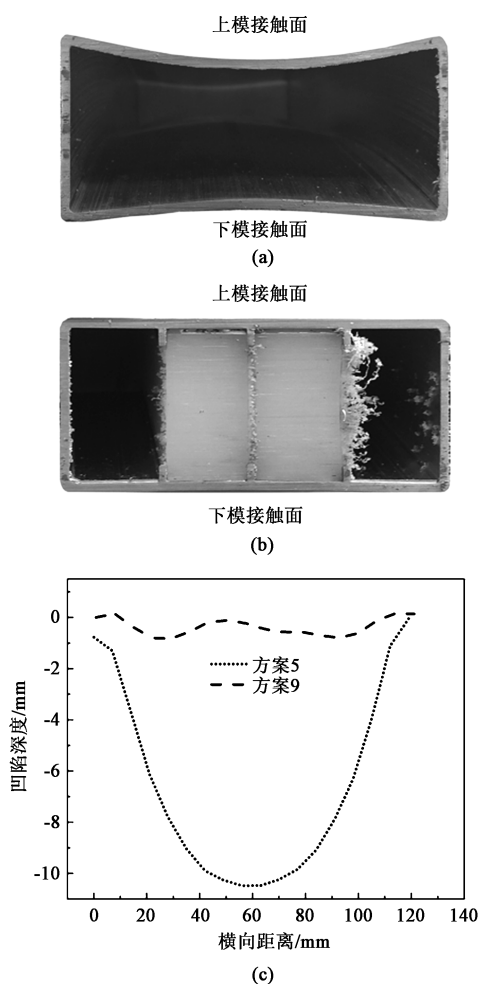


图12 型材压弯后截面畸变情况

(a) 方案5 (b) 方案9 (c) 上模接触面凹陷情况

Fig. 12 Section distortion conditions after press bending of profile

(a) Scheme 5 (b) Scheme 9 (c) Sinking conditions of upper die contact surface

(4) 方案9(型材结构2、PP-填充方式2)压弯后的结果优于方案8(型材结构1、PP-填充方式1)且符合设计要求,并通过压弯试验进行了验证。

参考文献:

- [1] 潘德聪,刘竝,于庆斌,等.微量Sc对6005A合金微观组织与拉伸性能的影响[J].中国有色金属学报,2021,32(7):1855-1862.
Pan D C, Liu B, Yu Q B, et al. Effect of trace Sc on the microstructure and tensile properties of 6005A alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 32 (7): 1855-1862.
- [2] Yao R, Ji H C, Jin J F, et al. High temperature constitutive model of 6005A aluminum alloy [J]. Metallurgy, 2021, 60 (3-4): 265-268.
- [3] 王宇,石娇,刘欢,等.6005A地铁铝型材皮层对组织及性能的影响[J].铝加工,2020,(5):20-23.
Wang Y, Shi J, Liu H, et al. The influence of the cortical layer on the microstructure and performance of 6005A subway aluminum profiles [J]. Aluminium Fabrication, 2020, (5): 20-23.

- [4] 王宇,韩世涛,王周冰,等.轨道车体6005A铝合金大截面复杂制品性能分析[J].热处理技术与装备,2018,39(3):44-48.
Wang Y, Han S T, Wang Z B, et al. Analysis on properties of 6005A aluminum alloy complex product of rail car body with large cross section [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2018, 39 (3): 44-48.
- [5] 沈智,石一馨,周英丽,等.6014铝合金热冲压流变行为的本构模型修正[J].锻压技术,2021,46(12):67-73.
Shen Z, Shi Y Q, Zhou Y L, et al. Modification on constitutive model for rheological behaviour of 6014 aluminium alloy in hot stamping [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (12): 67-73.
- [6] 曹东升,姜珊,何金,等.6005A合金挤压型材压溃性能研究[J].铝加工,2020,(3):25-27.
Cao D S, Jiang S, He J, et al. Study on crushing property of 6005A alloy extrusion profile [J]. Aluminium Fabrication, 2020, (3): 25-27.
- [7] 朱涵超.简析铝合金汽车防撞梁设计[J].科技风,2014,(2):35-37.
Zhu H C. Brief analysis of aluminium alloy automotive beam design [J]. Ke Ji Feng, 2014, (2): 35-37.
- [8] 卢寿超.浅谈铝合金汽车后保险杠连接板加工工艺[J].福建冶金,2019,48(1):26-28.
Lu S T. Brief discussion on connecting plate process analysis of vehicle rear bumpers [J]. Fujian Metallurgy, 2019, 48 (1): 26-28.
- [9] 黄传演,李承波,周旺,等.铝合金型材在汽车上的应用[A].中国铝加工产业年度大会[C].中国有色金属加工工业协会:佛山,2018.
Huang C Y, Li C B, Zhou W, et al. Application of aluminum alloy profile in automobile [A]. Annual Conference of China Aluminum Processing Industry [C]. China Non-Ferrous Metals Fabrication Industry Association: Foshan, 2018.
- [10] 李光俊,孙红,曾元松,等.铝合金小弯曲半径薄壁管数控绕弯模具设计[J].锻压技术,2021,46(4):150-155.
Li G J, Sun H, Zeng Y S, et al. Research on CNC draw-bending die design for aluminum alloy thin-walled tube with small bending radius [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 150-155.
- [11] 谷净巍,吕萌萌,卢睿,等.铝型材弯曲成形截面畸变缺陷控制方法研究[J].汽车工艺与材料,2012,(6):72-74.
Gu Z W, Lyu M M, Lu R, et al. Study on control method of section distortion defect in bending forming of aluminum profile [J]. Automobile Technology & Materials, 2012, (6): 72-74.
- [12] 许亮,徐从昌,李落星.成形温度对铝合金型材挤压-弯曲一体化成形回弹及截面畸变的影响[J].锻压技术,2021,46(9):154-162.
Xu L, Xu C C, Li L X. Influence of forming temperature on springback and cross-section distortion for aluminum alloy profile during extrusion-bending integration forming [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (9): 154-162.
- [13] 白梅杉,陆彬,崔振山.矩形截面铝型材弯曲成形特性分析[J].塑性工程学报,2013,20(3):55-59.
Bai M S, Lu B, Cui Z S. Analysis for bending forming behaviour of rectangular aluminium section-beam [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20 (3): 55-59.