

板料成形

电机端盖 HC260 高强钢冲压工艺优化

张 勋^{1,2}, 李国林², 柳玉起¹, 林 滔², 张 镇²

(1. 华中科技大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 美的集团智能制造研究院, 广东 佛山 528311)

摘要: 为了将电机端盖用材料由厚度为 1.0 mm 的 DC54 热镀锌材替换为厚度为 0.8 mm 的 HC260 高强钢, 提出了一种新的冲压工艺方案。首先, 通过 FASTAMP 模拟和实验对常用的 3 工序成形工艺方案进行验证, 结果显示, 产品在中心反拉凸包位置发生严重破裂。其次, 通过冲压成形理论分析了破裂原因并制定了新的冲压工艺方案, 即在 OP10 拉深工序前增加 OP05 预拉深工序, 并增大 OP10 拉深的工序的凸凹模间隙, 使中心反拉区域断面线长增大, 使其与产品型面的比值 >0.9 , 确保在后续成形中反拉区域有足够的材料。再次采用 FASTAMP 冲压成形全工序数值模拟方法对新的 4 工序成形工艺方案进行验证, 结果显示, 新的 4 工序成形工艺方案解决了零件的破裂问题, 最大减薄率为 27%。最后, 根据新的 4 工序成形工艺方案制作了新模具并进行了试模验证, 现场 1 次试模成功, 证明了 FASTAMP 软件全工序数值模拟的有效性与准确性。

关键词: 电机端盖; HC260 高强钢; 冲压工艺; 预拉深; 成形破裂

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.06.004

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 06-0022-07

Stamping process optimization of HC260 high-strength steel for motor cover

Zhang Xun^{1,2}, Li Guolin², Liu Yuqi¹, Lin Tao², Zhang Zhen²

(1. Material Science and Technology College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Intelligence Manufacturing Research Center, Midea Group, Foshan 528311, China)

Abstract: For the motor end cover material, a new stamping process was proposed to replace DC54 hot-dip galvanized material of 1.0 mm with HC260 high-strength steel of 0.8 mm. Firstly, the existing 3-step forming process scheme was verified by FASTAMP numerical simulation and experiment, and the result shows that the product is serious cracked at the center of reverse pull convex hull. Secondly, the reason for rupture was analyzed through the stamping forming theory, and the new stamping process plan was formulated, that is, the OP05 pre-drawing process was added before the existing OP10 drawing process. Furthermore, the gap between punch and die of OP10 drawing process was increased to increase the section line length at the central reverse drawing area, which led to the ratio between it and product profile over 0.9, so as to ensure that there was enough material at the reverse drawing area to deform in the subsequent forming. Thirdly, the new 4-step forming process scheme was verified by using FASTAMP numerical simulation method for the whole process of stamping. The results show that the new 4-step forming process scheme solves the cracking problem of parts, and the maximum thinning rate is 27%. Finally, according to the new 4-step forming process scheme, a new die was made and tested for verification. The results show that the die is successfully tested once on site, which proves the validity and accuracy of the numerical simulation for the whole process by software FASTAMP.

Key words: motor end cover; HC260 high-strength steel; stamping process; pre-drawing; forming fracture

以电机端盖为研究对象, 用厚度为 0.8 mm 的 HC260 高强钢替代目前常用的厚度为 1 mm 的 DC54

热镀锌材, 探索高强钢材料替代普通材料的冲压工艺设计和优化方法。由于电机端盖属于复杂拉深零件, 需要多工序拉深成形, 工艺设计复杂, 单纯依靠经验进行工艺设计和优化则效率低、成本高^[1]。同时, 替换的材料易出现拉裂、起皱等成形缺陷, 需要进行相应的工艺优化设计^[2]。目前, 数值模拟已成为冲压零件生产重要的工艺设计与验证方法, 已广泛应用于汽车、家电等领域^[3-5]。

收稿日期: 2022-08-09; 修订日期: 2022-11-12

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2021B0101220001)

作者简介: 张 勋 (1991-), 男, 博士研究生

E-mail: xun_zhang101@163.com

通信作者: 柳玉起 (1966-), 男, 博士, 教授

E-mail: liuyq@hust.edu.cn

因此，冲压成形数值模拟与实验相结合便成为冲压工艺优化的重要手段^[6-7]，该方法能更高效地完成复杂冲压零件的工艺设计与优化。

1 电机端盖的成形工艺

电机端盖是电机的重要结构件，本文研究的该类零件如图 1 所示，外形尺寸为 $\Phi 81.6\text{ mm}\times 27\text{ mm}$ ，属于较复杂的圆柱曲面结构。该零件存在反向拉深、拉深系数较大等特点，在冲压成形过程中常见的缺陷形式为破裂和起皱，其通常采用 3 工序成形工艺：OP10 拉深、OP20 拉深和 OP30 拉深+整形，如图 2 所示。



图 1 电机端盖
Fig. 1 Motor end cover

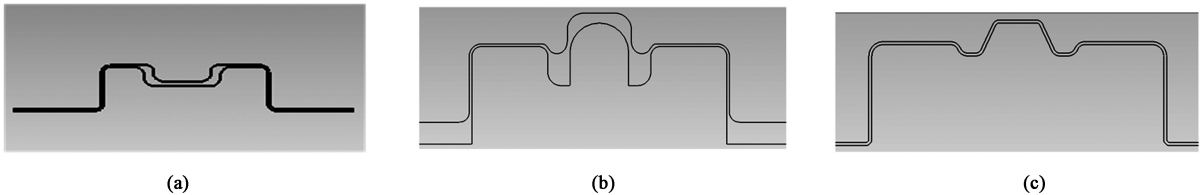


图 2 3 工序成形工艺
(a) OP10 (b) OP20 (c) OP30
Fig. 2 Forming process with three steps

HC260 高强钢和 DC54 热镀锌材的力学性能如表 1 所示，表 1 中数据来源于宝山钢铁股份有限公司供货材质书。由表 1 可知，HC260 高强钢具有更高的屈服强度和抗拉强度，但伸长率低于 DC54 热镀锌材，说明 HC260 高强钢的成形性能弱于 DC54 热镀锌材，在成形条件不变的情况下，HC260 高强钢具有更高的成形失效风险。

表 1 材料力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of materials

材料	伸长率/硬化指		屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	各向异性指数		
	%	数 n			r_0	r_{45}	r_{90}
DC54 热镀锌材	>36	0.24	160	260~350	2.35	1.72	1.95
HC260 高强钢	>35	0.184	285	405	1.40	1.50	1.77

根据实际生产情况，拉深类型为单动式拉深。OP10 的初始压边圈压力为 25 kN，上压板压力为 20 kN，使用拉深油润滑；OP20 的初始压边圈压力为 60 kN，上压板压力为 25 kN，使用拉深油润滑；OP30 的初始压边圈压力为 80 kN，使用拉深油润滑。根据该工艺情况，使用 NX 软件建立有限元模型，使用 FASTAMP 软件进行全工序

成形数值模拟。

2 数值模拟与工艺优化

2.1 厚工艺的数值模拟与试模结果

分别采用 DC54 热镀锌材和 HC260 高强钢对电机端盖进行原工艺下的全工序拉深数值模拟，结果如图 3 所示。由图 3 可知，采用 DC54 热镀锌材的电机端盖塑性变形充分，无开裂、起皱等严重成形缺陷，但改用厚度为 0.8 mm 的 HC260 高强钢后，OP30 工序出现严重开裂缺陷，集中在中心反拉凸包位置。通过对比两种材料在 OP10 工序拉深成形过程中的减薄情况（图 4）可以发现，DC54 热镀锌材的最大减薄率仅为 28.455%，未达材料的极限性能，而 HC260 高强钢的最大减薄率则达到了 36.110%，已超材料的拉深极限。

抗破裂性是板料成形重要的成形性能之一，常见的成形破裂有胀形破裂、拉深破裂和翻边破裂^[8]。HC260 高强钢在 OP30 工序时，其中心反拉凸包角在成形过程中处于双向拉应力状态，且由于材料流入量极少，使厚度过分减薄，导致在底部圆角位置出现破裂，这属于胀形破裂类型^[9]。

采用 3 工序成形工艺，使用厚度为 0.8 mm 的

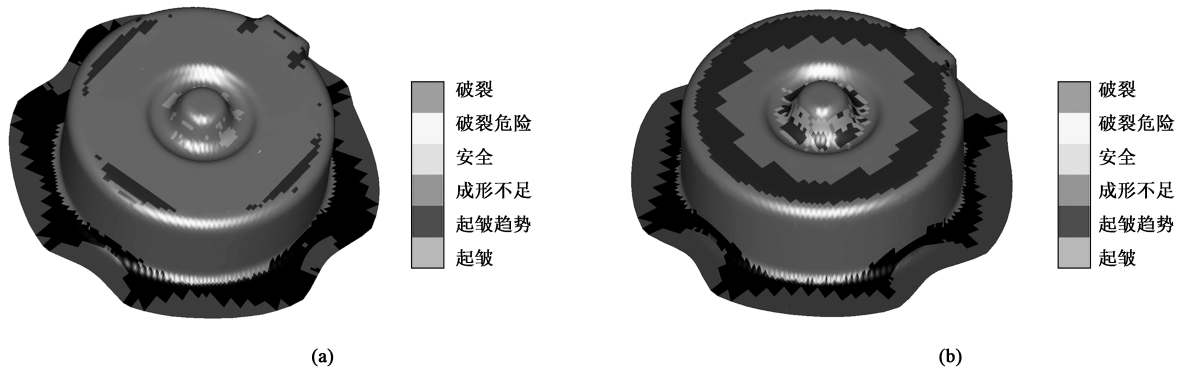


图 3 3 工序成形工艺下 OP30 的数值模拟结果

(a) DC54 热镀锌材 (b) HC260 高强钢

Fig. 3 Numerical simulation results of forming process with three steps at OP30

(a) DC54 hot-dip galvanized material (b) HC260 high-strength steel

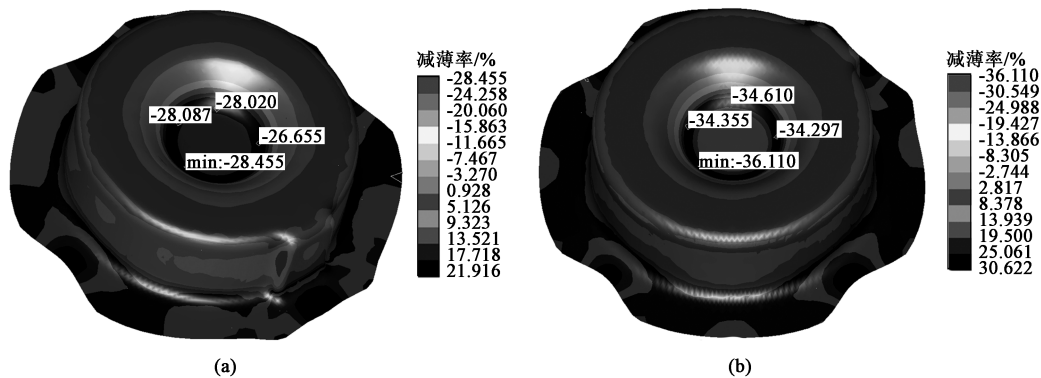


图 4 DC54 热镀锌材 (a) 与 HC260 高强钢 (b) 在 OP10 工序时的减薄率对比

Fig. 4 Comparison of thinning rate between DC54 hot-dip galvanized material and HC260 high-strength steel at OP10

HC260 高强钢进行试模验证, 结果如图 5 所示。由试模结果可知, 破裂位置与数值模拟结果一致, 均是在中心反拉凸包底部圆角处。因此, 需要进一步分析 HC260 高强钢发生破裂及减薄率大的原因, 并针对性地对工艺进行优化。

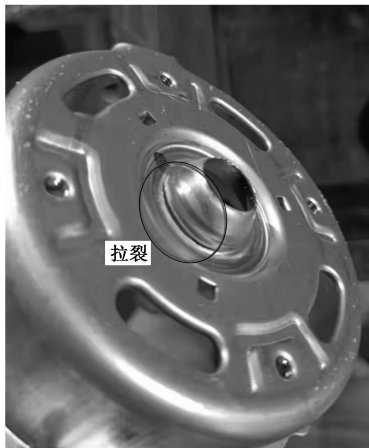


图 5 0.8 mm 厚度的 HC260 高强钢电机端盖的试模结果

Fig. 5 Tryout result of motor end cover using HC260 high-strength steel with thickness of 0.8 mm

2.2 HC260 高强钢成形工艺优化措施

由表 1 可知, HC260 高强钢的屈服强度和抗拉强度高于 DC54 热镀锌材, 关键在于 HC260 高强钢的厚向平均各向异性指数 r 和硬化指数 n 上的区别。材料的厚向平均各向异性指数 r 的计算公式如式 (1) 所示:

$$r = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/2 \quad (1)$$

式中: r_0 、 r_{45} 和 r_{90} 分别为与轧制方向成 0° 、 45° 和 90° 的厚向异性指数。

由此可计算得出 HC260 高强钢的 r 值为 1.54, DC54 热镀锌材的 r 值为 1.94。HC260 高强钢的硬化指数 n 及厚向平均各项异性指数 r 均小于 DC54 热镀锌材。根据材料成形理论, n 和 r 越大, 则材料的成形性能越好^[10-11], 因此, 在 DC54 热镀锌材已经基本达到成形极限的情况下, HC260 高强钢必然会出现破裂。

从工艺角度分析, 材料减薄最大的位置应该在反拉圆角位置。底部反拉凸包属于锥形件成形, 其 1 次成形极限 $[D_0/d_1]_{\max}$ 可由以下经验公式计算^[12]:

$$\ln \left[\frac{D_0}{d_1} \right]_{\max} = \frac{0.4044 + 2.848(t_0/d_1) + 2236(t_0/d_1)^2 \cos \alpha}{42.79(t_0/d_1) \cos \alpha + 0.5349 \cos \alpha - 2.142(t_0/d_1)} \quad (2)$$

式中: D_0 为坯料直径; d_1 为拉深后底部直径; t_0 为坯料原始厚度; α 为半锥角。

式(2)是关于 t_0/d_1 的单调递增函数, HC260 高强钢若采用原始的 3 工序成形工艺, 在 α 、 d_1 和 D_0 不变的条件下, 不考虑材料性能的差异, 材料减薄 0.2 mm 后, 成形极限会显著降低, 因此, 破裂风险相对厚度为 1.0 mm 的材料更大。

通过计算产品型面与 OP10 拉深工序型面的断面线长, 可以推算反拉成形部分的材料流动和减薄情况, 进而分析是否出现破裂、起皱等缺陷^[13]。如图 6 所示, 产品型面的断面线长为 61 mm, 为 OP20 工序成形中心反拉部分, OP10 工序向下拉深的型面断面线长设为 54 mm, 相对比值为 0.885, 相当于成形后板料平均减薄 11.5%。在 HC260 高强钢成形性能低于 DC54 热镀锌材的情况下, 仍然使用原有工艺必然会导致材料减薄率加大。因此, 使用 HC260

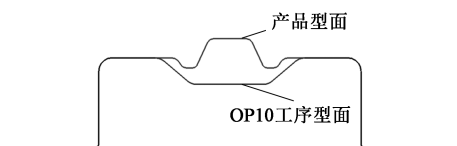


图 6 产品型面与 OP10 工序型面的对比

Fig. 6 Comparison between product profile and OP10 profile

高强钢时, 应适当加大成形反拉部分材料与产品材料的相对比值, 确保有足够的材料参与成形。

根据以上分析, 为解决厚度为 0.8 mm 的 HC260 高强钢冲压成形中的破裂问题, 在原 3 工序成形工艺的 OP10 工序前增加 OP05 预拉深成形工序, 并增加 OP10 工序中的凸凹模间隙, 压边力保持不变, 增大半锥角 α 和反拉部分型面断面线长, 使其与产品型面的比值 >0.9 , OP20 及 OP30 保持原工艺, 新的工艺方案结果如图 7 所示。

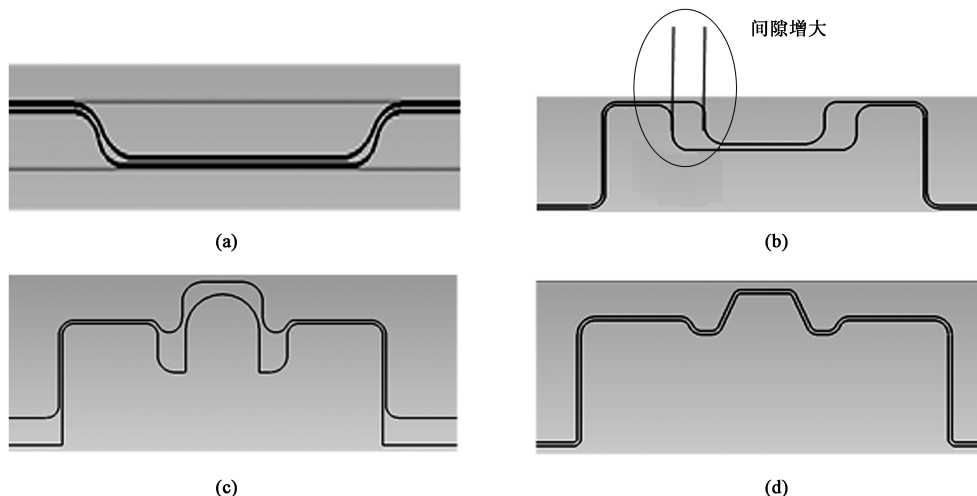


图 7 新的 4 工序成形工艺

(a) OP05 (b) OP10 (c) OP20 (d) OP30

Fig. 7 New forming process with four steps

2.3 HC260 高强钢新工艺数值模拟

为验证新的 4 工序成形工艺的可行性, 采用新工艺成形厚度为 0.8 mm 的 HC260 高强钢, 并使用 FASTAMP 软件进行数值模拟, 结果如图 8 所示。由图 8 可知, 增加 OP05 预拉深工序后, HC260 高强钢的 4 个工序均成形充分, 未出现破裂缺陷。OP20 工序顶面出现的起皱风险主要是由于凸凹模间隙较大, 导致在 OP20 工序成形时锥面需要被拉直而产生的, 在实际试模中此处主要表现为数道成形痕迹, 但不影响整体成形质量。从减薄率来看, 如图 9 所示, 4

工序成形工艺中, OP05 时的最大减薄率为 8.316%, OP10 时的最大减薄率为 22.067%, OP20 时的最大减薄率为 21.934%, OP30 时的最大减薄率为 27.022%, 均在安全范围内。由此可知, 采用 OP05 预拉深成形, 并加大 OP10 的凸凹模间隙可以有效地减小材料的变形, 避免 HC260 高强钢在拉深过程中反拉凸包底部圆角的开裂现象, 实现用厚度为 0.8 mm 的 HC260 高强钢替代厚度为 1 mm 的 DC54 热镀锌材的目的。

2.4 HC260 高强钢新工艺试模验证

为验证通过 FASTAMP 冲压成形数值模拟软件设计

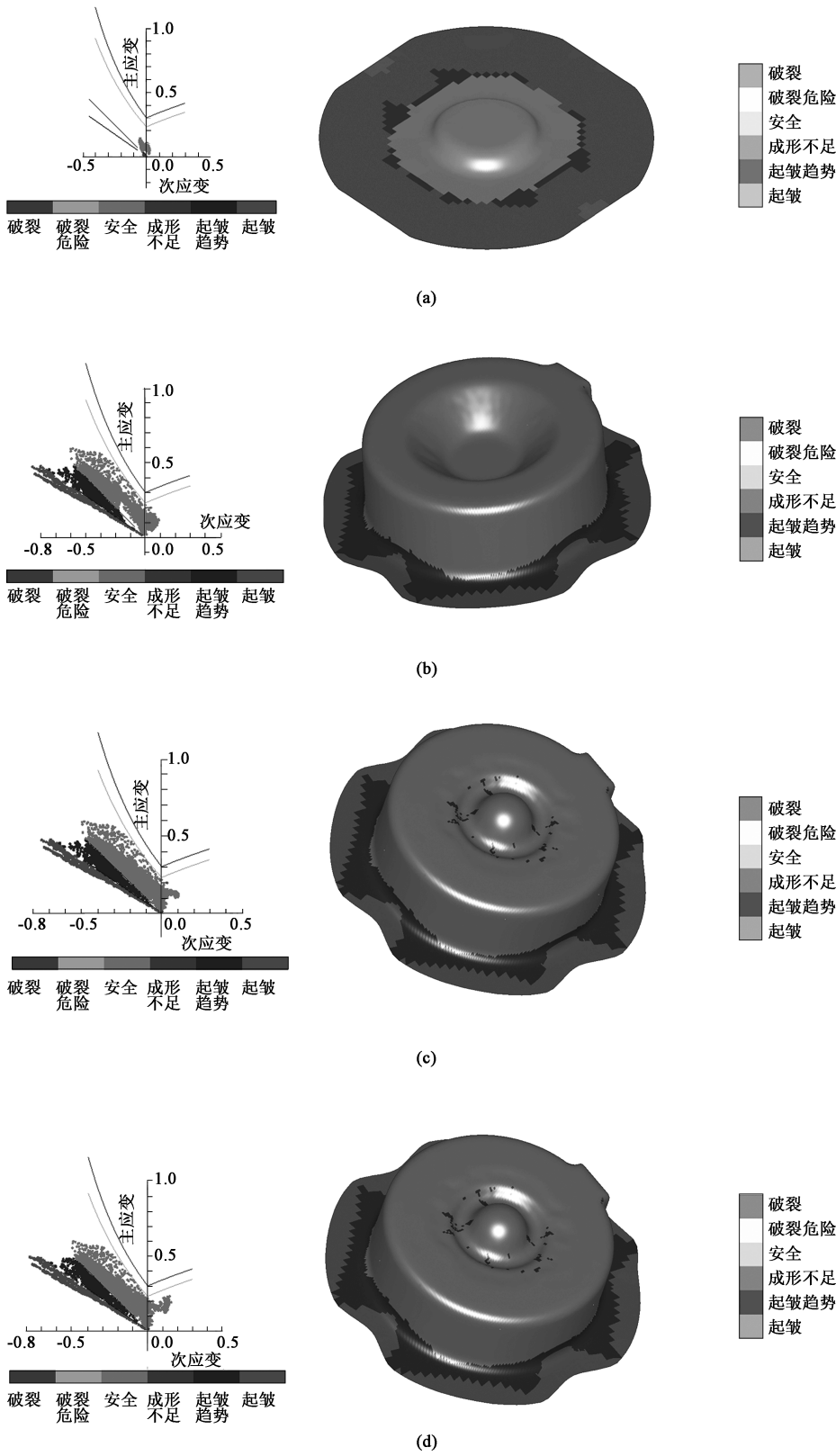


图 8 HC260 高强钢在新的 4 工序成形工艺下的数值模拟结果

(a) OP05 (b) OP10 (c) OP20 (d) OP30

Fig. 8 Simulation results of HC260 high-strength steel under new forming process with four steps

的 4 工序成形工艺的可行性，进行实际试模验证。如图 10 所示，端盖可正常成形，无起皱、破裂等缺陷，

与数值模拟分析结果一致，验证了采用 FASTAMP 进行数值模拟来优化端盖冲压成形工艺的可行性。

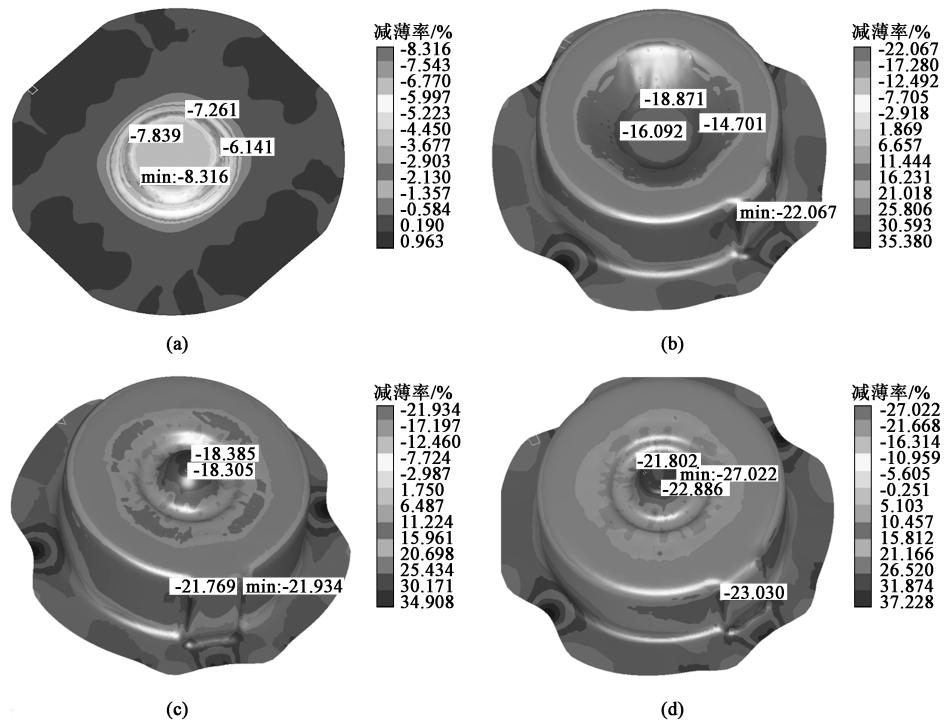


图 9 HC260 高强钢在新的 4 工序成形工艺下的减薄率分布
(a) OP05 (b) OP10 (c) OP20 (d) OP30

Fig. 9 Thinning rate distrutions of HC260 high-strength steel under new forming process with four steps

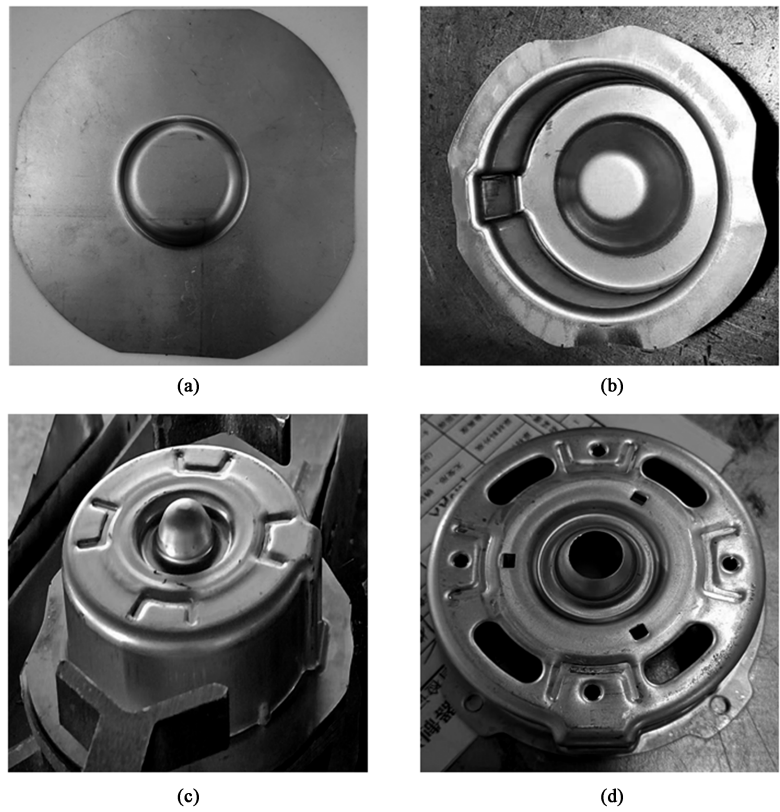


图 10 新的 4 工序成形工艺的试模结果
(a) OP05 (b) OP10 (c) OP20 (d) OP30

Fig. 10 Tryout results of new forming process with four steps

3 结语

采用 FASTAMP 软件对厚度为 0.8 mm 的 HC260 高强钢和厚度为 1 mm 的 DC54 热镀锌材的 3 工序成形工艺进行了数值模拟, 结果显示, 该工艺下 HC260 高强钢会在反拉凸包底部圆角处发生严重的破裂缺陷, 并对此结果进行了试模验证。基于此提出了新的 4 工序成形工艺, 通过在 OP10 前增加 OP05 预拉深工序, 并增大 OP10 拉深工序的凸凹模间隙, 确保反拉区域有足够的材料在后续成形中变形, 可实现厚度为 0.8 mm 的 HC260 高强钢的良好成形, 消除破裂缺陷, 现场 1 次试模成功, 证明了新的 4 工序成形工艺的可行性。

参考文献:

- [1] 康俊远. 电机端盖冲压工艺分析与级进模设计 [J]. 模具工业, 2007, 33 (3): 34-38.
Kang J Y. Technological analysis and design of progressive die for stamping of cover [J]. Mold Industry, 2007, 33 (3): 34-38.
- [2] 周建明, 付延宜. 冷轧板汽车冲压件开裂和裂纹缺陷的原因及预防 [J]. 南方金属, 2019, 231 (6): 39-41.
Zhou J M, Fu Y Y. Defects in cold rolled automobile stamping parts [J]. Southern Metals, 2019, 231 (6): 39-41.
- [3] 李晓达, 占向辉, 张向奎, 等. KMAS 冲压仿真在压力锅盖工艺优化中的应用 [J]. 机械设计与制造, 2012, 262 (12): 74-76.
Li X D, Zhan X H, Zhang X K, et al. The application of KMAS punching simulation in optimization design of pressure cooker [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012, 262 (12): 74-76.
- [4] 易国锋, 李巧敏, 钟文, 等. 基于应变梯度塑性理论的纪念币压印成形数值模拟 [J]. 中国机械工程, 2018, 29 (6): 1369-1374.
Yi G F, Li Q M, Zhong W, et al. Coining simulation of commemorative coins based on strain gradient plasticity theory [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29 (6): 1369-1374.
- [5] 韩龙帅, 王刚, 郑学斌, 等. 基于 Autoform 的门内板冲压仿真分析 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (4): 82-88.
Han L S, Wang G, Zheng X B, et al. Simulation analysis of door inner panel stamping based on Autoform [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (4): 82-88.
- [6] 张翔, 皇甫兆阳, 孙庆东, 等. 基于 Fastamp 和正交试验的汽车门框冲压工艺参数优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 70-75.
Zhang X, Huangfu Z Y, Sun Q D, et al. Optimization on stamping process parameters of automobile door frame based on Fastamp and orthogonal test [J]. Forming & Stamping Technology, 2021, 46 (1), 70-75.
- [7] Bao X J, He D N, Lyu D, et al. Optimization of autobody panel stamping process based on dynamic explicit finite element method [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 113 (1): 387393.
- [8] GB/T 15825.1—2008, 金属薄板成形性能与试验方法 第 1 部分: 成形性能和指标 [S].
GB/T 15825.1—2008, Sheet metal formability and test methods—Part 1: Formability and indexes [S].
- [9] 王苏静, 邓沛然, 宣守强, 等. 7005 高强铝合金胀形性能 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (1): 73-78.
Wang S J, Deng P R, Xuan S Q, et al. Expansion performance of 7005 high-strength aluminum alloy [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (1): 73-78.
- [10] 解后循, 张敏中, 贾海斌. 材料结构参数对薄板冲压成形仿真结果的影响 [J]. 金属成形工艺, 2003, 21 (2): 16-18.
Xie H X, Zhang M Z, Jia H B. Study on sensitivity of material constitutive parameters [J]. Metal Forming Technology, 2003, 21 (2): 16-18.
- [11] 包向军, 蒋宏范, 何丹农, 等. 材料参数对汽车覆盖件冲压成形性能影响的数值模拟 [J]. 机械工程材料, 2001, 25 (7): 15-17.
Bao X J, Jiang H F, He D N, et al. Numerical simulation of the influence of material parameters on autobody panel stamping formability [J]. Material for Mechanical Engineering, 2001, 25 (7): 15-17.
- [12] 郭斌, 郎利辉. 锻压手册: 第 2 卷 冲压 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
Guo B, Lang L H. Forging Manual: The Second Volume Stamping [M]. Beijing: China Machine Press, 2021.
- [13] 蒋磊, 马培兵, 王龙, 等. 翼子板成形数值模拟与工艺优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 113-123.
Jiang L, Ma P B, Wang L, et al. Numerical simulation and process optimization on fender forming [J]. Forming & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 113-123.

《锻压技术》郑重声明

为充分尊重作者权益, 坚决抵制学术不端行为, 积极倡导优良学风, 努力为学术创新营造良好氛围, 本刊郑重声明: 对一稿多投, 重复发表, 存在署名有争议, 引用他人著述未注明出处, 抄袭、剽窃、弄虚作假, 或以上情况的变相形式等学术不端行为的文章, 坚决拒绝刊登。一经发现, 立即撤稿, 并由本刊视情节轻重给予书面警告、拒绝刊登有其署名的稿件、通知其所在单位等处理。轻者给予 3~5 年不允许刊发其论文的处罚, 情节严重者, 将以适当方式予以公布, 该作者的论文永久不得刊用。

《锻压技术》编辑部