

一种空间异形三通半管成形工艺改进

黄福天¹, 孙桂川^{2,3}, 冯越鹏¹

(1. 哈尔滨东安发动机有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150060; 2. 伍玥航科(天津)精密制造有限公司, 天津 300499;
3. 苏州伍玥航空科技有限公司, 江苏 苏州 215400)

摘要:为解决一种空间异形三通半管零件在传统冲压成形过程中的成形失效、表面质量不佳及成形效率低等问题,根据零件特征,结合 AutoForm 有限元仿真软件,对该零件的传统冲压成形过程进行了数值模拟并优化,通过分析其成形失效原因,提出了采用充液拉深成形工艺代替传统冲压成形工艺,并对该零件的充液拉深成形过程进行数值模拟并优化。通过对两种工艺成形效果的对比,验证了工艺改进的可行性。最后,在 800 t 双动充液成形液压机上,分别采用两种成形工艺试制零件,验证了数值模拟的可靠性和实际的工艺改进效果。通过成形工艺的改进,有效地解决了成形失效问题,表面质量和成形效率得到了显著提升,零件成形效果满足工艺需求。

关键词:空间异形;三通半管;冲压成形工艺;充液拉深成形工艺;褶皱

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.11.021

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940(2022)11-0151-08

Improvement on forming process for a spatial special-shaped three-way half pipe

Huang Futian¹, Sun Guichuan^{2,3}, Feng Yuepeng¹

(1. Harbin Dongan Engine Co., Ltd., Harbin 150060, China;

2. Wuyue Aviation Technology (Tianjin) Precision Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300499, China;

3. Suzhou Wuyue Aviation Technology Co., Ltd., Suzhou 215400, China)

Abstract: In order to solve the problems of forming failure, poor surface quality and low forming efficiency for a spatial special-shaped three-way half pipe part in the traditional stamping process, according to the characteristics of part and combining with finite element simulation software AutoForm, the traditional stamping process of part was numerically simulated and optimized. Then, through the analysis of forming failure causes, a hydroforming process was proposed to replace the traditional stamping process, and the hydroforming process of the part was numerically simulated and optimized. Furthermore, the feasibility of process improvement was verified by comparing the forming effects of the two processes mentioned above. Finally, two forming processes were used to trial-produce parts on 800 t double-acting hydraulic press, and the reliability of numerical simulation and the effect of actual process improvement were verified. Thus, through the improvement of forming process, the problem of forming failure is effectively solved, the surface quality and forming efficiency are significantly improved, and the forming effect of part meets the process requirements.

Key words: spatial special shape; three-way half pipe; stamping process; hydroforming process; wrinkle

三通管件是航空航天领域流体传输系统的重要组件,尤其在燃油系统、液压传动系统和供氧系统方面^[1]得到了广泛应用。传统的三通管件成形是根据三通管的空间形状,分成若干瓣分别成形后拼焊,其力学性能、表面质量及管件整体精度差、制造效率低,很难满足日益发展的航空零部件制造需

求^[2],所以,目前航空制造企业常采用整管成形和半管成形。整管成形主要采用内高压工艺成形,通过管坯成形出三通支管,一般适用于成形形状相对规则且支管不高的三通管件^[3-4];半管成形则是根据三通管的空间形状,在分型时,避免环向焊缝及减少分形数量,采用两瓣三通半管零件分体成形。传统的三通半管成形大多采用落压或者冲压成形工艺,存在较为明显的缺点:表面质量差、效率低、成品率低等^[5]。本文借助 AutoForm 有限元仿真软件,针对一种空间复杂异形三通半管零件,分析了传统冲压成形工艺的成形问题,提出了以充液拉深成形

收稿日期: 2021-11-15; 修订日期: 2022-02-16

作者简介: 黄福天(1989-),男,硕士,高级工程师

E-mail: 374333595@qq.com

通信作者: 孙桂川(1988-),男,硕士,工程师

E-mail: sgc0814@163.com

工艺代替传统冲压成形工艺进行改进,对比两种成形工艺的成形效果,并通过试验验证了仿真结论。

1 零件简介和材料性能分析

本文研究的空间异形三通半管零件如图 1 所示。零件厚度为 1 mm,外形尺寸约为 280 mm×280 mm×

60 mm,主管外径为 $\Phi 88.6$ mm,支管外径为 $\Phi 76.4$ mm,支管处过渡圆角半径为 20 mm。

如图 1 所示,该零件 3 段直管的直径相近,且直管轴线两两异面;直管过渡圆角半径为 20 mm,相对较小,零件壁厚为 1 mm,相对较薄;可判定此零件为空间复杂异形三通半管零件,具有较大的成形难度。

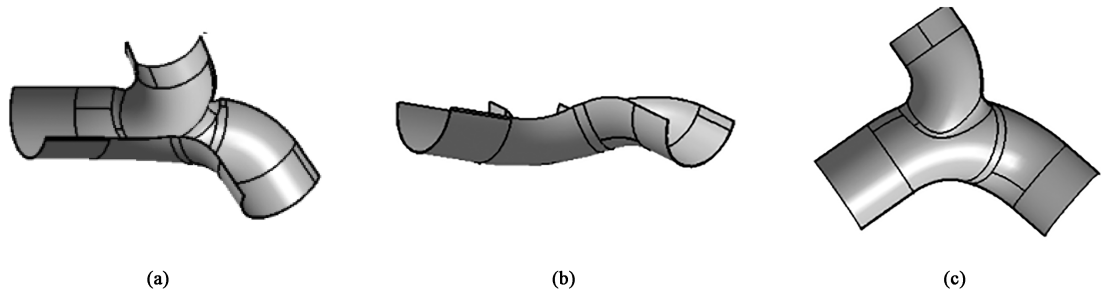


图 1 三通半管零件
(a) 等轴侧图 (b) 正视图 (c) 俯视图
Fig. 1 Three-way half pipe part
(a) Isometric side view (b) Front view (c) vertical view

该零件所用材料为 0Cr18Ni9 不锈钢 (SUS304 不锈钢)。该材料具有高的耐蚀性,在低温、室温及高温下均有较高的塑性和韧性,以及较好的冷作成形性和焊接性。按照国家标准 GB/T 228.1—2021^[6],获得材料的力学性能参数,详见表 1。

表 1 0Cr18Ni9 不锈钢的力学性能
Table 1 Mechanical properties of 0Cr18Ni9 stainless steel

参数	屈服比 R_{eL}/R_m	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	伸长率 $A/\%$	硬化指数 n
数值	0.51	350	690	65	0.39

2 传统冲压成形工艺有限元分析

使用 AutoForm 软件仿真传统冲压成形工艺,采用刚性模具进行一次拉深。

2.1 坯料模型

坯料计算利用 AutoForm 中的 One-step 求解,快速得到展开坯料的形状和最小尺寸^[7],获得坯料模型图如图 2 所示。

2.2 传统冲压成形工艺仿真分析设置

根据成形工艺对零件进行工艺形面补充并创建分析模型,如图 3 所示。

按传统冲压成形工艺设置经验参数如下^[8]:压边力为 1000 kN,凸、凹模间隙为 1.1 mm,凹模入

口圆角半径为 10 mm,凸模摩擦因数为 0.125,压边圈与凹模摩擦因数为 0.050。仿真分析结果(距拉深

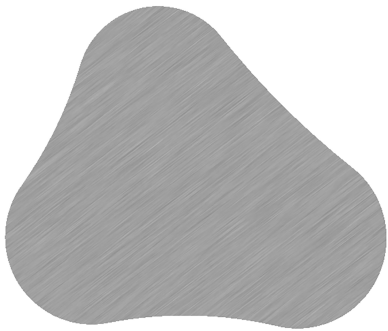


图 2 坯料模型
Fig. 2 Blank model

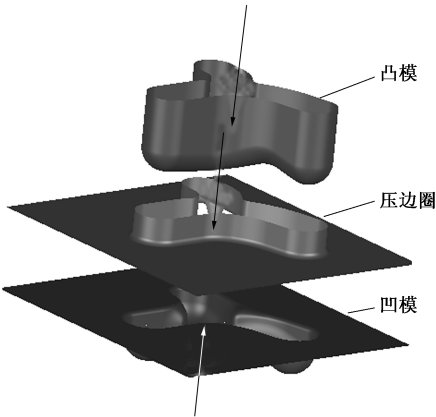


图 3 传统冲压成形分析模型
Fig. 3 Analysis model of traditional stamping

到底 5 mm) 如图 4 和图 5 所示。

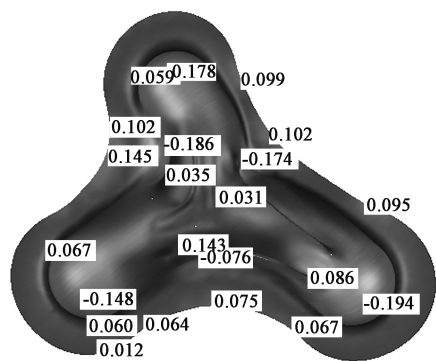


图 4 传统冲压成形零件减薄云图
Fig. 4 Thinning nephogram of traditional stamping part

图 5 显示零件成形出现严重褶皱, 选取褶皱最严重的 A-A 截面和 B-B 截面, 分析其成形过程。如图 6 和图 7 所示。

A-A 截面的凸模较早接触板料, 因此, 在拉深早期阶段, 板料贴合凸模下行, 如图 6a 所示; 到拉深中

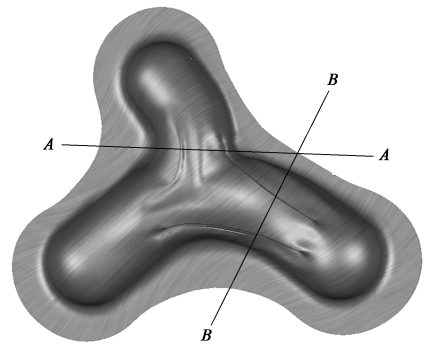


图 5 传统冲压成形零件的成形状态
Fig. 5 Forming state of traditional stamping part

期, 受周围截面的拉深作用力, 板料开始脱离凸模, 形成局部悬空, 如图 6b 所示; 随后悬空区越来越大, 直至最终叠料形成死皱, 如图 6c 和图 6d 所示。

B-B 截面的凸模较晚接触板料, 因此, 在传统拉深成形的早中期阶段, 板料在周围截面拉深力的作用下变形, 始终未与凸模接触, 如图 7a 和图 7b 所示; 到传统拉深成形后期, 板料与凸模局部接触,

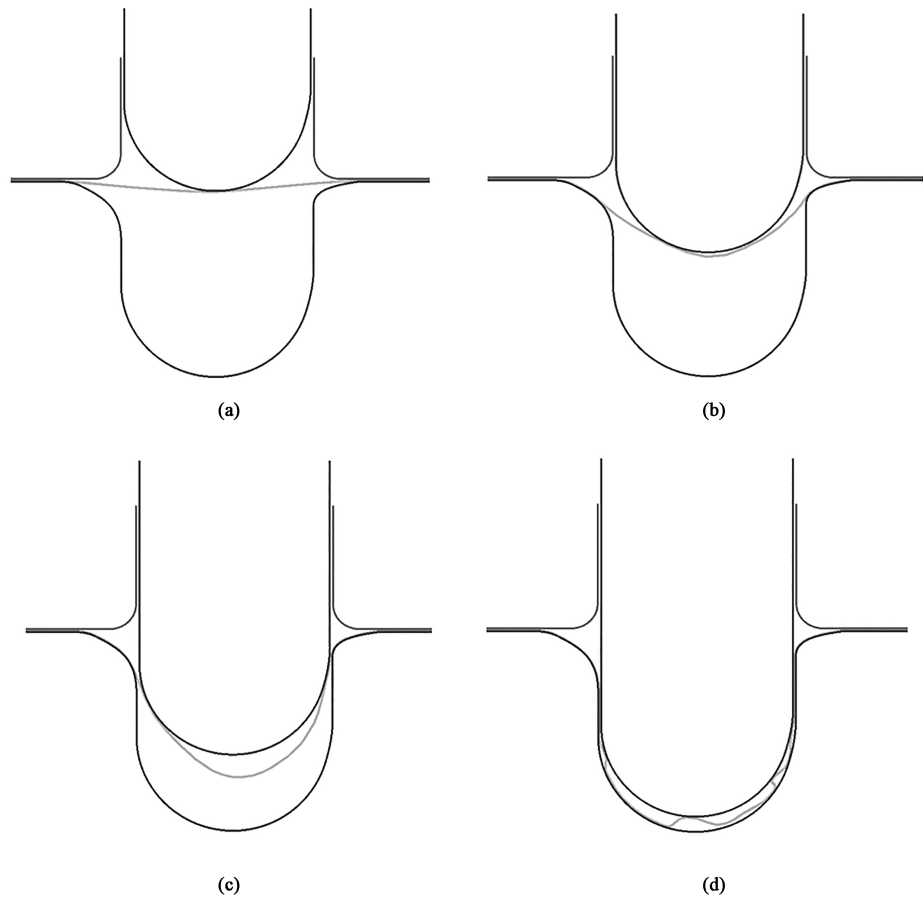
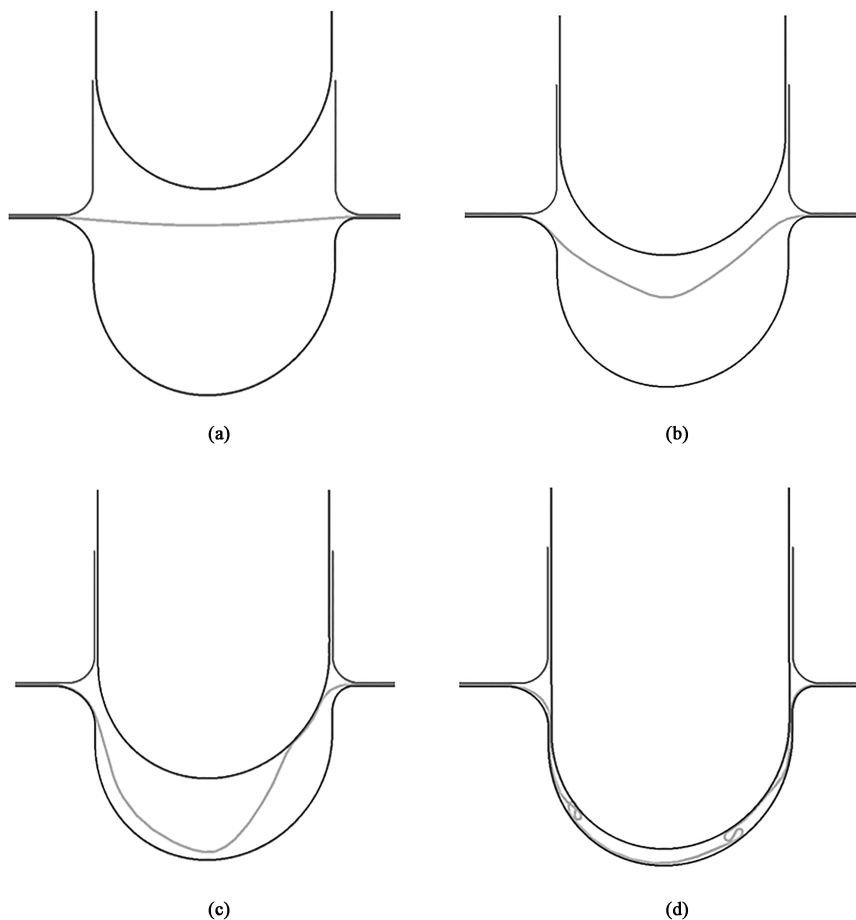


图 6 A-A 截面的传统冲压成形过程
(a) 距拉深到底 75 mm (b) 距拉深到底 50 mm (c) 距拉深到底 30 mm (d) 距拉深到底 5 mm
Fig. 6 Traditional stamping process of section A-A
(a) 75 mm from drawing to end (b) 50 mm from drawing to end (c) 30 mm from drawing to end (d) 5 mm from drawing to end

图 7 $B-B$ 截面的传统冲压成形过程

(a) 距拉深到底 75 mm (b) 距拉深到底 50 mm (c) 距拉深到底 30 mm (d) 距拉深到底 5 mm

Fig. 7 Traditional stamping process of section $B-B$

(a) 75 mm from drawing to end (b) 50 mm from drawing to end (c) 30 mm from drawing to end (d) 5 mm from drawing to end

其余大部分已形成极大悬空, 最终严重叠料形成死皱, 如图 7c 和图 7d 所示。

控制褶皱的有效手段为减少法兰的流料, 但同时会牺牲破裂风险点的减薄^[9]。图 4 所示零件的最大减薄为 0.194, 存在一定的工艺余量, 因此, 尝试通过增加拉深筋的方式来控制法兰流料, 从而控制褶皱, 这也是半管类零件传统冲压成形的典型工艺。

图 8 和图 9 为在保证破裂风险可控的情况下, 最终的拉延筋优化结果。图 8 分析显示, 在破裂风险可控的情况下 (最大减薄为 24.8%), 褶皱仍难以控制。图 9 显示最终褶皱未被撑开, 形成死皱。考虑成形硬化效应, 且材料为不锈钢 (屈服强度及抗拉强度均较高), 可判定实际制件中该处褶皱不能被展平, 会形成死皱。因此, 根据上述分析结果, 可考虑采用一次充液拉深成形来改善成形失效状况。

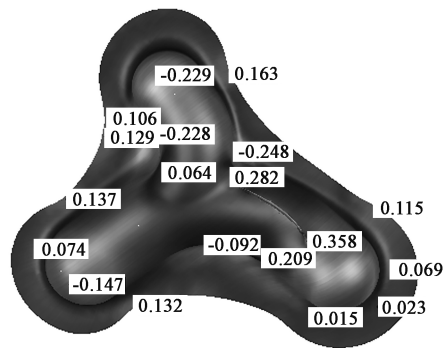


图 8 优化后的传统冲压成形零件减薄云图

Fig. 8 Thinning nephogram of traditional stamping part after optimization

3 充液拉深成形工艺有限元分析

采用充液拉深成形工艺, 补充的凸模型面与刚

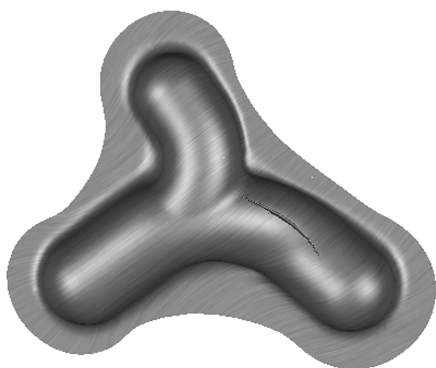


图 9 优化后的传统冲压成形零件的成形状态

Fig. 9 Forming state of traditional stamping part after optimization

性拉深时所用的型面一致，选取的板料大小和刚性拉深也一致，凹模采用液室形式^[10]。利用软件进行仿真分析，分析模型设置如图 10 所示。

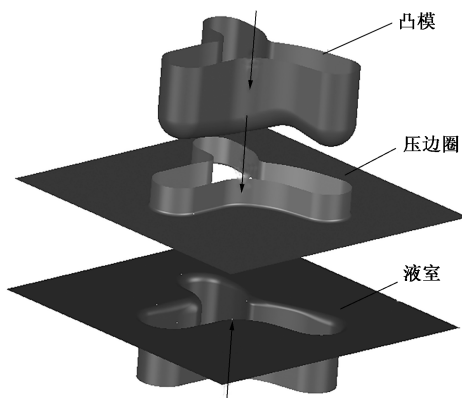


图 10 充液拉深成形工艺分析模型

Fig. 10 Analysis model of hydroforming process

按充液拉深成形工艺设置经验参数^[11-12]，经优化后的最终成形参数如下：压边力为 1000 kN，凸、凹模间隙为 1.1 mm，凹模入口圆角半径为 10 mm，板料与凸模的摩擦因数为 0.125，压边圈与凹模的摩擦因数为 0.050。液压加载曲线如图 11 所示。仿真分析结果如图 12 和图 13 所示。

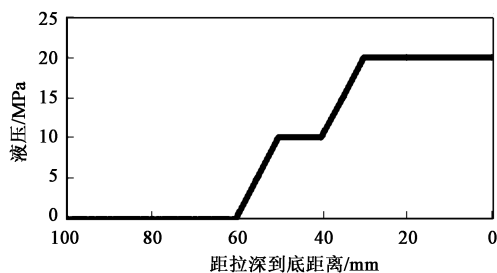


图 11 液压加载曲线

Fig. 11 Hydraulic loading curve

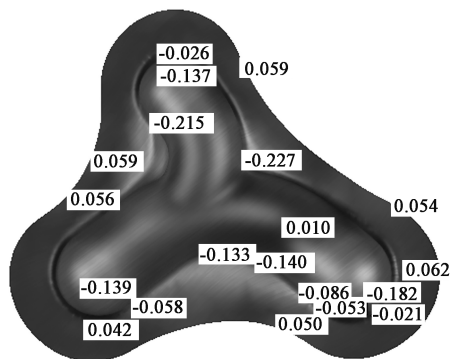


图 12 充液拉深零件减薄云图

Fig. 12 Thinning nephogram of hydroforming part

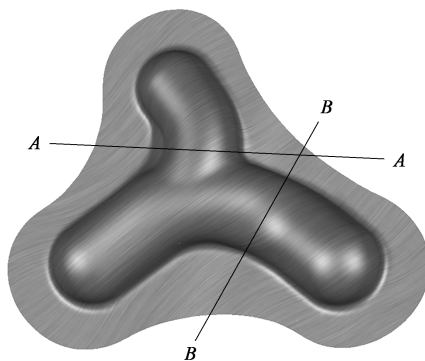


图 13 充液拉深零件的成形状态

Fig. 13 Forming state of hydroforming part

图 12 和图 13 显示，在未增加拉延筋控制的情况下，通过对成形液压加载的调整，充液拉深成形零件的成形效果良好，无褶皱、破裂发生。同样选取上述 A-A 截面和 B-B 截面，分析其成形过程。

A-A 截面的凸模较早地接触板料，因此，在充液拉深成形早期阶段，板料贴合凸模下行，如图 14a 所示；到充液拉深成形中期，受周围截面的拉深作用力，有脱离凸模的趋势，此时适时给予适当液压支撑，使板料紧贴凸模，板料在凸模和液压的“夹持”作用下拉深，能够有效地抑制悬空区的产生，直至充液拉深成形结束，无褶皱产生，如图 14b~图 14d 所示。

B-B 截面的凸模较晚接触板料，因此，在充液拉深成形的早中期阶段，板料在周围截面拉深力的作用下变形，未与凸模接触，如图 15a 所示；需要在褶皱形成前给予适当液压，液压反胀效果使得板料紧贴凸模，板料在凸模和液压的“夹持”作用下拉深，能有效抑制悬空区的产生，直至充液拉深成形结束，无褶皱产生，如图 15b~图 15d 所示。

需要特别注意的是，必须根据各截面尤其是褶皱风险截面的成形情况，严格控制液压加载曲线。

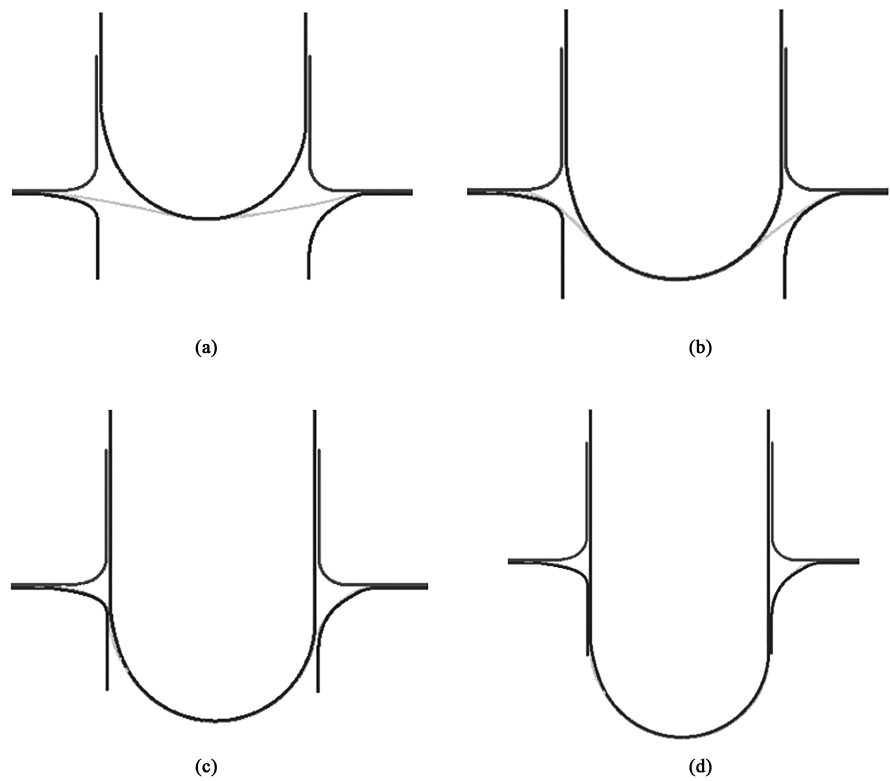


图 14 A-A 截面充液拉深成形过程

(a) 距拉深到底 75 mm (b) 距拉深到底 50 mm (c) 距拉深到底 30 mm (d) 距拉深到底 5 mm

Fig. 14 Hydroforming process of section A-A

(a) 75 mm from drawing to end (b) 50 mm from drawing to end (c) 30 mm from drawing to end (d) 5 mm from drawing to end

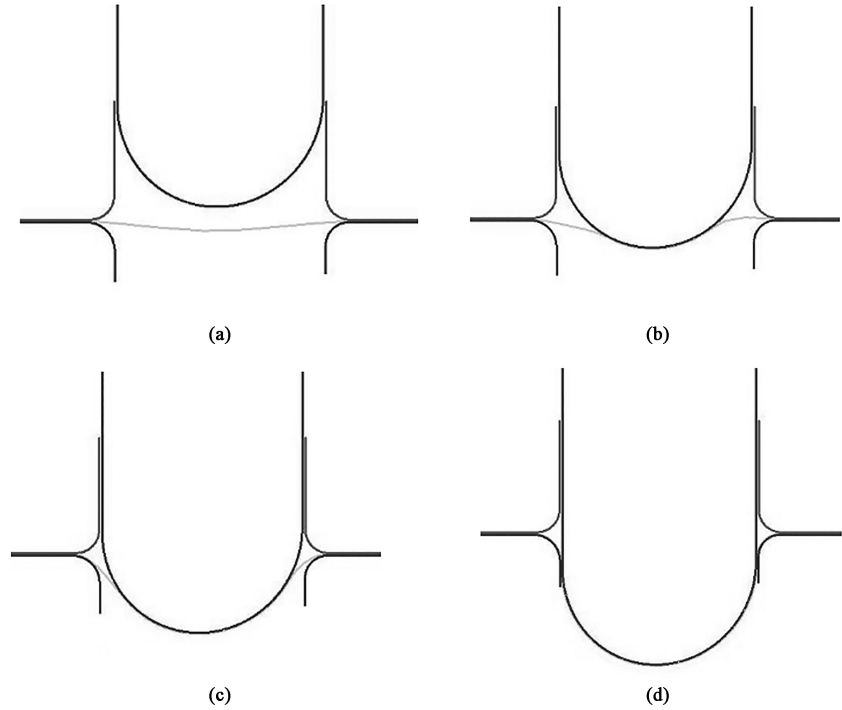


图 15 B-B 截面充液拉深成形过程

(a) 距拉深到底 75 mm (b) 距拉深到底 50 mm (c) 距拉深到底 30 mm (d) 距拉深到底 5 mm

Fig. 15 Hydroforming process of section B-B

(a) 75 mm from drawing to end (b) 50 mm from drawing to end (c) 30 mm from drawing to end (d) 5 mm from drawing to end

合适的液压加载需要既能满足液压支撑抑制褶皱的需要，同时也要避免反胀过高导致凹模圆角处的反

胀叠料，如图 16 所示，仿真得出的液压加载参考工艺窗口如图 17 所示。

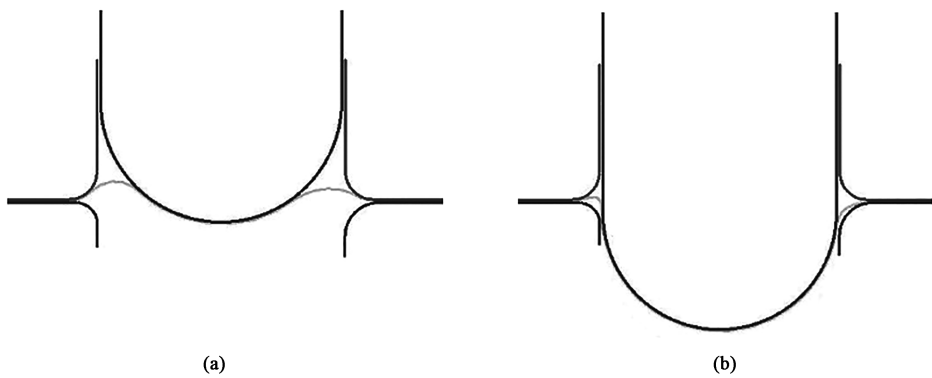


图 16 B-B 截面凹模圆角处的叠料
(a) 距拉深到底 55 mm (b) 距拉深到底 10 mm
Fig. 16 Stacking at die fillet of section B-B
(a) 55 mm from drawing to end (b) 10 mm from drawing to end

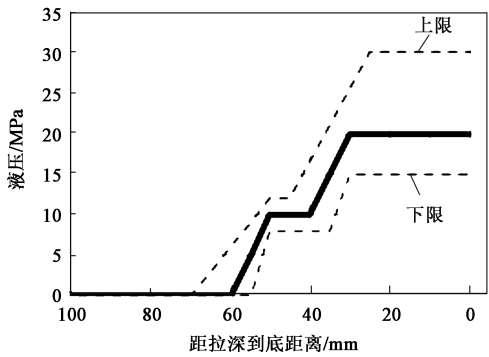


图 17 液压加载参考工艺窗口
Fig. 17 Referenced process window of hydraulic loading

4 试验验证

分别采用上述两种成形工艺，在 800 t 双动充液成形设备上进行样件的开发和试验。

图 18 为采用传统冲压成形工艺试制的零件，零

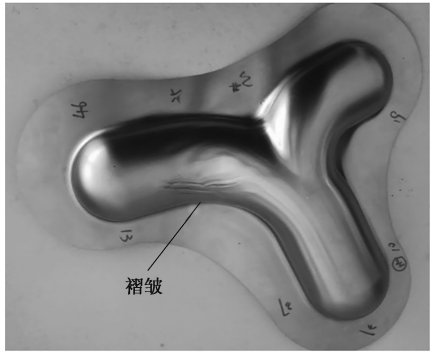


图 18 传统冲压工艺成形零件实物
Fig. 18 Physical part formed by traditional stamping process

件产生了死皱。

图 19 为采用充液拉深成形工艺试制的零件。零件无起皱、破裂，且对比传统冲压成形工艺试制件，表面质量好，满足零件设计要求。

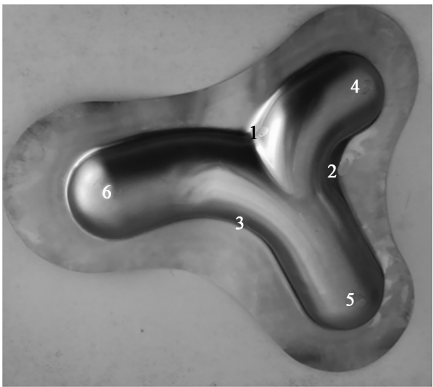


图 19 充液拉深工艺成形零件实物
Fig. 19 Physical part formed by hydroforming process

实测坯料厚度为 (0.97 ± 0.01) mm，实测充液拉深工艺成形零件图 19 所示 6 个点的零件厚度，测量结果如表 2 所示。

表 2 零件减薄分析						
Table 2 Thinning analysis of part						
测量点	1	2	3	4	5	6
厚度/mm	0.73	0.76	0.81	0.85	0.85	0.79
实际减薄率/%	24.7	21.6	16.5	12.4	12.4	18.5
仿真减薄率/%	22.7	21.5	14.0	13.7	13.9	18.2

表 2 显示,有限元仿真分析基本反应了实际零件的减薄情况,分析存在的误差主要由液压设备精度、定位精度和材料性能偏差等导致。

5 结论

(1) 有限元仿真分析表明,由于该异形空间三通半管零件复杂的空间结构,采用传统冲压成形工艺成形该零件,极易在 3 段管过渡部分形成褶皱,且通过控制法兰流料不能抑制其形成。采用充液拉深成形工艺,通过不同成形阶段适宜的液压加载,使整个拉深过程中板料紧密地贴合在凸模上,通过液压与凸模的“夹持”作用,抑制了褶皱形成,工艺改进的效果明显。

(2) 试制零件的成形效果表明,相较于传统冲压成形工艺,充液拉深成形工艺成形该零件可以有效地控制零件减薄及起皱趋势,能够获得较好的成形效果,提高零件表面质量,提高效率及成品率,工艺改进的效果得到了验证。

参考文献:

- [1] 中国锻压协会. 航空航天钣金冲压件制造技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
Confederation of Chinese Metalforming Industry. Aerospace Sheet Metal Stamping Parts Manufacturing Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [2] Saha P K. Aerospace Manufacturing Processes [M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2016.
- [3] 苑世剑. 现代液压成形技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
Yuan S J. Modern Hydroforming Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [4] Manabe K I, Chu X, Kobayashi D, et al. Development of in-process fuzzy control system for T-shape tube hydroforming [J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 2518-2523.
- [5] 白颖, 钟李欣, 范子翠, 等. A286 薄壁大径双曲排气半管拼焊拉深工艺探索 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (9): 65-72.
Bai Y, Zhong L X, Fan Z C, et al. Exploration of tailor welding and deep drawing process of A286 thin-walled large diameter hyperbolic exhaust pipe [J]. Journal of Plasticity and Engineering, 2021, 28 (9): 65-72.
- [6] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [7] 张向奎, 王洋, 王长生, 等. 基于逆有限元法和网格映射的板材成型坯料优化 [J]. 上海交通大学学报, 2019, 53 (11): 1389-1394.
Zhang X K, Wang Y, Wang C S, et al. Blank optimization for sheet metal forming using inverse finite element method and mesh mapping [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2019, 53 (11): 1389-1394.
- [8] 王昕, 张成祥, 胡蓝, 等. 镍基合金火焰筒拉深成形工艺研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (3): 63-69.
Wang X, Zhang C X, Hu L, et al. Research on deep drawing of nickel based superalloy flame tube [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (3): 63-69.
- [9] 肖景容, 姜奎华. 冲压工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
Xiao J R, Jiang K H. Stamping Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [10] 苑世剑, 刘伟, 徐永超. 板材液压成形技术与装备新进展 [J]. 机械工程学报, 2015, 51 (8): 20-28.
Yuan S J, Liu W, Xu Y C. New development on technology and equipment of sheet hydroforming [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51 (8): 20-28.
- [11] Abedrabbo N, Zampaloni M A, Pourboghra F. Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005, 47 (3): 333-358.
- [12] 陈一哲, 刘伟, 苑世剑. 薄板液压成形起皱预测及控制研究进展 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (4): 20-28.
Chen Y Z, Liu W, Yuan S J. Research development on wrinkling prediction and suppression for sheet hydroforming of thin-walled deep drawing parts [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (4): 20-28.

《锻压技术》读者信息反馈卡声明

《锻压技术》杂志自 2008 年起设立“读者信息反馈卡”,旨在加强刊物与读者的交流,促进刊物质量的提高,并竭诚为读者服务。反馈卡填写要求:内容填写完整、没有遗漏,提供的信息准确、详细,字迹书写清晰、整洁。如收到的反馈卡内容填写不完整,字迹不清、无法辨认,通讯地址模糊、不详细等,编辑部将不予邮寄杂志,特此声明。

“读者信息反馈卡”1~12 期刊登,位置在正文后,请读者注意查看,以免遗漏。

《锻压技术》编辑部