

管材轴向压力内高压胀形数值分析及验证

董 楹,黑东盛,白 艳

(航空工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司,哈尔滨 150066)

[摘要] 随着我国航空航天事业的飞速发展,精密钣金件的应用日益广泛,根据不同的设计及应用要求,航空管材类零件也由原来的自由胀形工艺逐步改进为各类可控胀形工艺,大大提高了航空管材件的应用范围。其中,内高压胀形工艺是广泛应用于航空制造领域的金属成形工艺方法之一,成形难度大,影响因素复杂,一直是成形领域的难题。以航空用某卡箍类零件为例,对影响内高压胀形工艺的轴向材料补偿量、内压力、加载路径等因素进行深入研究,通过数值仿真分析,优化工艺参数,提出一套简单易行的管材轴向压力内高压胀形工艺方法,成功应用于该类零件的工程实践中,达到了缩短生产周期、节约生产成本的目的。

关键词: 航空;卡箍;内高压;轴向压力;数值分析

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.18.060



董 楹

哈飞钣金厂副主任,长期从事航空钣金零件成形技术研究和钣金零件数字化制造等工作,多年来一直投身于科研生产第一线,曾获得航空工业科技进步奖并立个人二等功。

内高压胀形工艺使金属毛坯或成形件的局部区域产生变形,通过表面积增大而获得有凸出形状零件的冲压加工方式。这类成形的优势在于可以获得表面质量好,回弹变形小,相对结构重量较轻,高精度的零件。

从20世纪70年代末德国开始内高压成形的基础研究^[1-2],90年代初德国、美国汽车公司开始在多个车型上应用了内高压成形的零件,目前该成形技术已广泛应用于汽车、航空等机械制造领域的实际生产中^[2-4]。Tseng等^[3]通过数值仿真模拟了板材液压成形过程中各因素(包括施加力、摩擦力、背压情况、毛坯尺寸等)对成形过程的影响,并进行了试验对比,仿真结果与试验结果相吻合。Chen等^[4]利用数值分析理论对管材内高压成形的褶皱形成原理及影响因素进行了研究,并将研究

结果应用于模具设计及管材内高压成形工艺中。国内,从21世纪初开始内高压成形的研究,但受设备的限制,大多只进行数值分析和成形机理方面的研究^[5-11]。初冠南等^[5]利用力学分析及数值仿真对薄壁高筋筒形件内高压成形的可行性进行了理论分析,研究了成形规律并为工艺设计奠定了理论基础。郎利辉等^[6,12]利用薄膜理论与塑性理论相结合,建立了弯曲异形复杂管材的理论模型,通过模拟仿真与试验对比得出了异性复杂管材在自由胀形过程中的破裂位置变化规律,通过对管材自由胀形分析以及材料性能测试为工艺设计提供了可信的材料参数。高振莉等^[7]利用数值模拟与试验结合的方法,分析研究了管材液压成形过程,研究了褶皱及破裂两种失效模式,分析了压力对成形过程的影响。Guo等^[8]对基于M-K理论的管材自由

胀形进行了研究分析,建立了连续性方程,并对数值仿真及试验结果进行了对比,证实了 Oyane 韧性断裂准则的准确性。随着相关院校、实验室及企业单位对内高压成形研究的深入,近些年该项成形技术的进步突飞猛进,已被广泛应用于汽车领域,在航空、航天领域也获得实际应用^[8]。此外,内高压胀形技术虽在管材、板料成形过程中与其他钣金成形方法相比优势非常突出,由于专用设备价格昂贵,成形影响因素较多,工艺复杂,在我国航空制造领域应用情况仍处于起步阶段。

本文以航空用某卡箍类零件为例,对影响内高压胀形工艺的轴向材料补偿量、内压力、加载路径等因素进行了深入研究,提出了一套简单易行的管材轴向压力内高压胀形工艺装置,依托传统液压设备即可实现零件成形。

典型零件的内高压轴向压缩胀形变形特点

图1所示为某1Cr18Ni9不锈钢卡箍零件,根据经验公式,空心毛坯胀形的变形程度用胀形系数 K 表示,通过手册可知材料1Cr18Ni9极限胀形系数 $K=1.28$,超出了零件变形极限^[13]。

图2所示为管材胀形的示意图,对比图中轴向压缩胀形与自由胀形可知,轴向压缩胀形主要是对管材施加了轴向压力 F_q ,能够使轴向压力 F_q 与内压力 P_i 共同作用于管材,进而提高胀形的成形极限,改善了胀形区域的应力应变状态。适当施加轴向压力,可以使胀形区沿管材轴线方向的拉应力变为压应力,平面应力状态由两向拉伸、一向压缩变为一向拉伸、两向压缩,使得胀形区材料壁厚变化均匀,得到较好的胀形效果^[14-15]。

影响轴向压缩胀形的关键因素为轴向压力 F_q 、内压力 P_i 和加载路

径。其中,如果轴向压力施加过小,起不到将轴向方向拉应力变为压应力的作用,达不到提高成型极限的目的;如果轴向压力施加过大,管坯将受压失稳,易产生死皱,后期胀形无法修复;加载路径决定了轴向压力与内压力共同作用的形式,选择合理的加载路径才能获得更好的胀形效果。

典型零件的数值分析模型

通过CATIA软件,建立CAD模型,如图3所示,由左侧冲头、毛坯、下模、上模、右侧冲头5部分组成,

其中毛坯长度90mm、直径38mm,壁厚0.8mm,具体材料性能参数见表1。利用DYNAFORM进行数值分析,有限模型采用Belytschko-Tsay壳体单元,主要数值分析过程为:下模固定、上模向下运动、与下模合模、右侧冲头处于右初始固定不动、左侧冲头向右侧运动,提供轴向压力,毛坯内部均布内压力。本文基于Krupskowsky方程建立材料塑性硬化模型,公式为 $\sigma=K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n$;同时采用Barlat屈服准则,考虑摩擦因素对毛坯成形过程中的影响,摩擦系数为0.125。

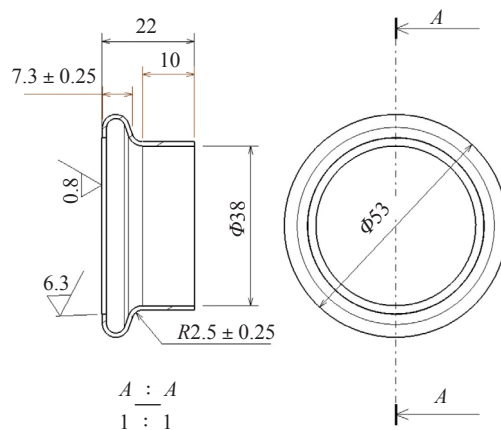


图1 某零件示意图
Fig.1 A part schematic diagram

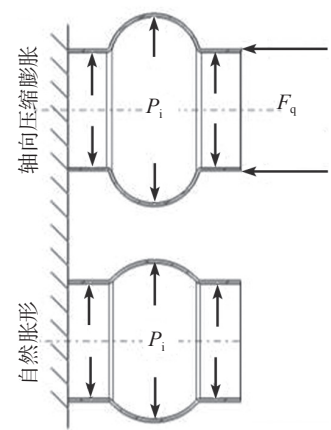


图2 管材胀形示意图
Fig.2 Pipe bulging schematic diagram

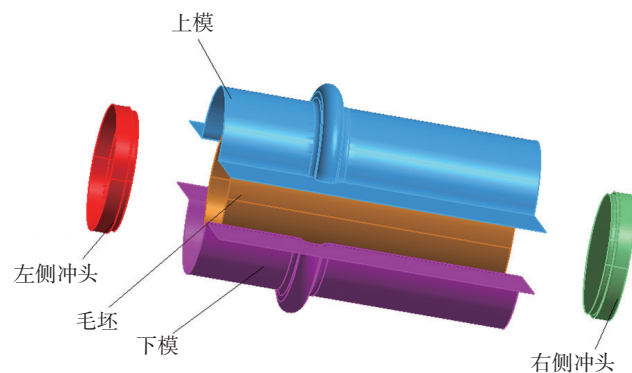


图3 轴向压力内高压成形几何模型
Fig.3 Geometric model of high pressure forming under axial pressure

表1 毛坯材料的力学性能参数表

Table 1 Blank material mechanical performance parameters of the table

密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	强度系数K/MPa	硬化系数n
7.83	207	0.28	210	520.4	0.23

不同轴向材料补偿量的加载路径数值分析方案及结果

1 数值分析方案

整个零件成形数值分析过程分为两个阶段,第1阶段为上下模合模,整个加载时间为0.01s,第2阶段为轴向压力与内压力的加载阶段,整个加载时间为0.02s。第1阶段对整个零件成形没有影响,本文重点研究第2阶段成形过程及轴向压力、内压力的加载路径的影响。

在实际生产中,受到设备资源的限制,常采用可反复使用的聚氨酯橡胶棒作为胀形介质。同时由于摩擦等因素的影响,很难准确控制轴向压力,因此,在生产中通常采取控制轴向进给量或轴向材料补偿量替代控制轴向压力以完成胀形过程,为了与实际生产情况一致,本方案中以轴向材料补偿量为研究对象,替代轴向压力。同时根据聚氨酯橡胶棒材料的力学性能,建立了内压力加载路径,如图4所示。

本方案重点研究在上述内压力加载路径条件下,选取不同的轴向材料补偿量,不同的加载时间,对零件胀形后效果的影响。先根据体积不变原理,初步估算所需要材料补偿量为7.9mm,因此轴向材料补偿量分别选取8mm、12mm、16mm,在加载时间分别0.005s、0.01s内完成加载。具体加载路径见表2,加载曲线如图5所示。评判零件胀形后效果指标有两个,第一材料减薄率小于15%;第二成形后零件有效区域无破裂、内凹起皱的明显缺陷。

2 数值分析结果及验证

按上述数值分析方案,分析结果如表3所示,在轴向材料补偿量加载路径3的情况下零件成形效果最佳,具体如图6所示。其他加载路径均出现不同缺陷,其中加载路径1零件成形后出现了破裂情况,具体如图7所示;加载路径2零件材料减薄率

超过15%,达到了23.37%,具体如图8所示;加载路径4零件材料减薄率超过15%,达到了17.62%,具体如图

9所示;加载路径5、6零件均左侧出现了严重内凹起皱现象,具体如图10、11所示。

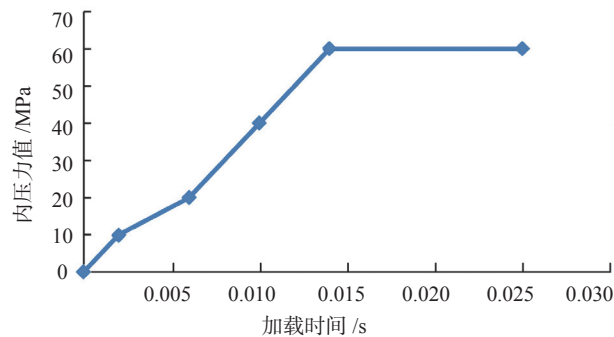


图4 聚氨酯橡胶棒材料内压力加载路径

Fig.4 Loading path of polyurethane rubber rod under inner pressure

表2 不同轴向材料补偿量加载路径参数

Table 2 Loading path parameter of different axial material compensation

方案	轴向材料补偿量 /mm	加载时间 /s	保持时间 /s
加载路径 1	8	0.005	0.015
加载路径 2	8	0.01	0.01
加载路径 3	12	0.005	0.015
加载路径 4	12	0.01	0.01
加载路径 5	16	0.005	0.015
加载路径 6	16	0.01	0.01

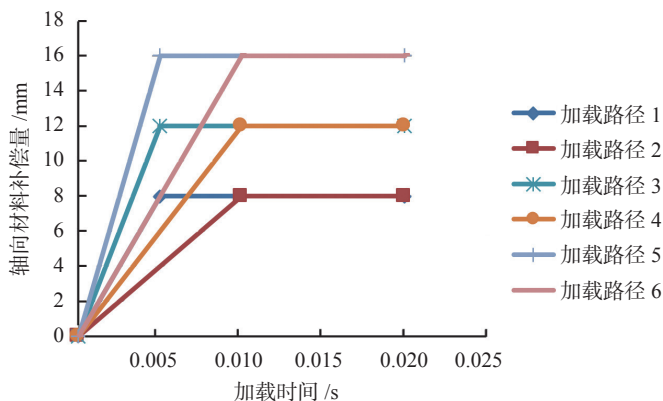


图5 不同轴向材料补偿量加载曲线

Fig.5 Loading curves of different axial material compensations

表3 不同轴向材料补偿量加载路径数值分析结果统计

Table 3 Statistical analysis results of loading paths for different axial material compensation

方案	材料最小厚度 /mm	材料减薄率 /%	存在缺陷	是否合格
加载路径 1	0.392	51.00	破裂	否
加载路径 2	0.613	23.37	破裂风险	否
加载路径 3	0.706	11.75	无	是
加载路径 4	0.659	17.62	无	否
加载路径 5	0.722	9.75	内凹起皱	否
加载路径 6	0.688	14.00	内凹起皱	否

通过比较加载路径1、加载路径3、加载路径5可以看出,在相同的加载时间0.005s条件下,不同的轴向材料补偿量8mm、12mm、16mm分别得到了不同胀形结果,由图7中截面图所示,在零件成形前期0.005s内,8mm的材料补偿量过小,仅起到了补偿零件成形区域左侧的作用,在0.005s后,随着内压力持续增大,零件左侧已无材料补入,零件右侧仅能依靠原有材料自由胀形,导致零件成形区域右侧发生破裂;如图6中截面图所示,在零件成形前期0.005s内,12mm的材料补偿量恰好满足了成形区域的需求,在0.005s后,随着内压力持续增大,成形区域材料受力均匀,有效减缓了材料变薄;如图10中截面图所示,在零件成形前期0.005s内,16mm的材料补偿量过大,导致零件成形区域左侧内凹现象,在0.005s后,随着内压力持续增大,导致零件成形区域左侧出现褶皱现象。因此,在合适加载时间下,选择适合轴向材料补偿量则是成形的关键因素,可以根据体积不变原理,初步估算所需要材料补偿量,再根据预估值通过数值分析方法,来确定最终的数值。

通过比较加载路径3与加载路径4可以看出,在相同的轴向材料补偿量12mm的条件下,不同的加载时间0.005s、0.01s所得到的胀形效果也有所差异,对于加载路径3来说,在成形0.005s内,内压力相对较小,在20MPa以下,轴向力与内压力相对平衡,更利于轴向材料流动补入,而对加载路径4来说,在成形0.01s内,从0.005s至0.01s,内压力增加至40MPa,大于轴向力,材料很难再补入,而出现成形缺陷。因此,建议轴向材料补偿量在成形前期内压力较小的阶段进行。

综上所述,轴向材料补偿量与加载时间两个因素相互影响,在一定内压力的条件下,需要在内压力增加前期,完成材料补偿,成形效果相对较为

理想。当工艺参数轴向压力 F_q 、内压力 P_i 以及加载路径不能较好匹配时,通常会出现图12所示的失效件。本文最终采用加载路径3相关工艺参数开展了零件的实际生产,零件胀形后效果如图13所示,经过去除端头余量,及打磨加工后卡箍零件,如图14所示。其中模拟加载时间与实际时间

是不相同的,这与仿真过程中左侧冲头虚拟冲压速度的设定有关,本质上虚拟冲压速度应该与真实冲压速度一致,但是那样的计算时间过长,本文冲压速度设定为2000mm/s,因此实际生产过程中,要根据实际设备冲压速度与材料补偿量按本文时间分布原则重新确定加载时间。

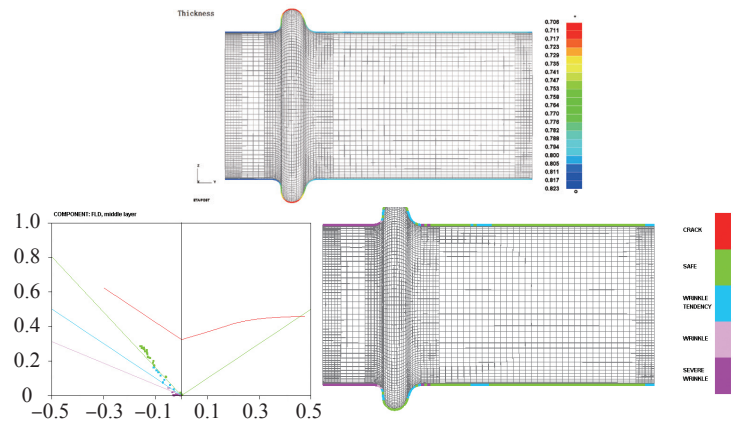


图6 加载路径3材料厚度截面分布图与成形极限图

Fig.6 Material thickness section distribution diagram and FLD in loading path 3

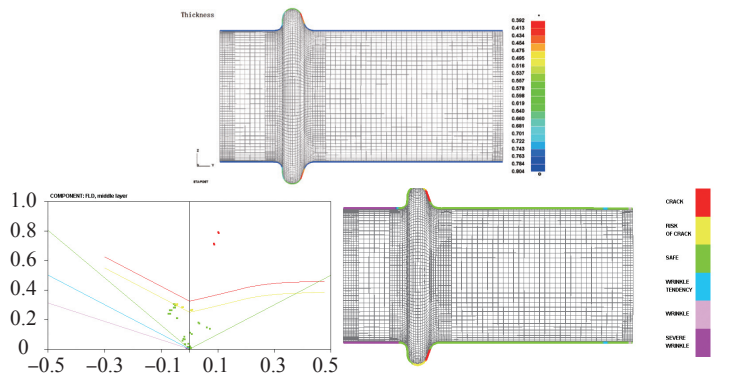


图7 加载路径1材料厚度截面分布图与成形极限图

Fig.7 Material thickness section distribution diagram and FLD in loading path 1

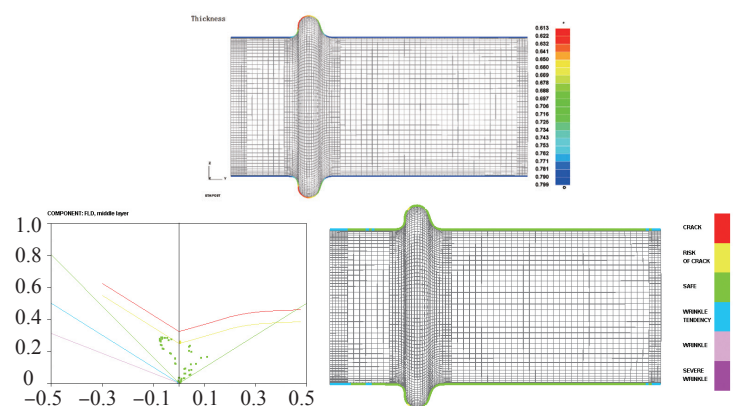


图8 加载路径2材料厚度截面分布图与成形极限图

Fig.8 Material thickness section distribution diagram and FLD in loading path 2

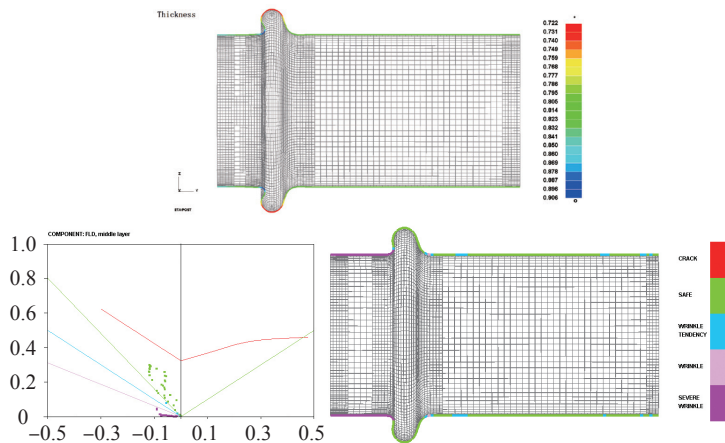


图9 加载路径4材料厚度截面分布图与成形极限图

Fig.9 Material thickness section distribution diagram and FLD in loading path 4

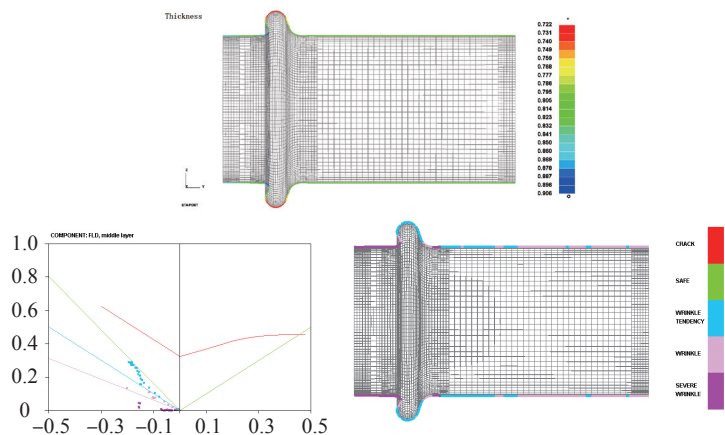


图10 加载路径5材料厚度截面分布图与成形极限图

Fig.10 Material thickness section distribution diagram and FLD in loading path 5

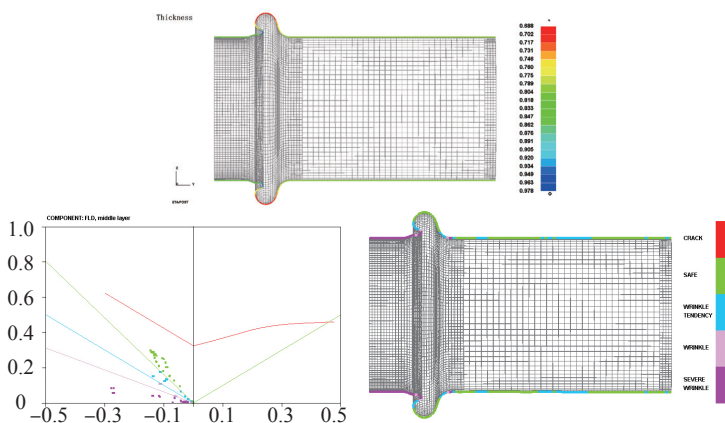


图11 加载路径6材料厚度截面分布图与成形极限图

Fig.11 Material thickness section distribution diagram and FLD in loading path 6

具体成形工装结构

根据上述仿真结果及现有设备资源条件,制定如下成形工装结构。工装主要由5个部分组成,即模具体、

送料滑块、加载芯棒、胀压介质及径向压力调整螺母,具体结构如图15所示。其主要作用是模具体与加载芯棒一起为胀形介质提供密闭腔,与送料滑块组成零件最终型面。由加

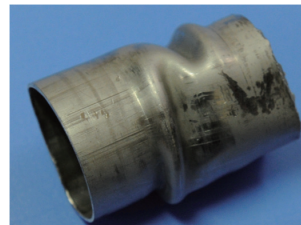


图12 失效件

Fig.12 Failure part

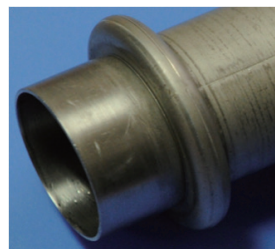


图13 试验胀形效果

Fig.13 Experimental effect



图14 最终零件

Fig.14 Final part

载芯棒压缩胀形介质提供成形所需的径向压力,推动送料滑块与模具体闭合,由送料滑块给坯料施加轴向压力。轴向压力调整螺母主要是调节送料滑块和加载芯棒的位置关系,从而控制轴向材料补偿量、径向压力加载路径,以获得最佳的成形效果。

结论

(1) 在管材承受径向压力的同时,对其施加一定的轴向压力,使更多的材料参与零件成形,从而提高材料的胀形能力,降低材料成形区域的减薄量。

(2) 在本文所述的径向压力加载路径下,轴向材料补偿量和加载时间的关系直接影响着胀形效果。可以根据体积不变原理,初步估算所需要材料补偿量,在此基础上逐步加大,并在径向压力加载前期完成材料补入,可以获得较好胀形效果。

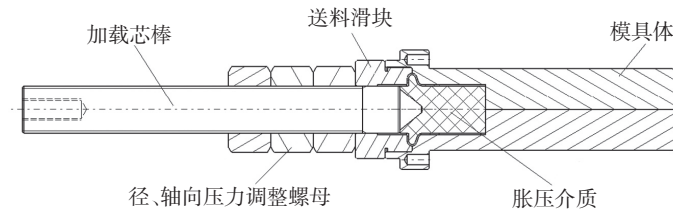


图15 胀形工装简图
Fig.15 Mold sketch

(3) 本文所提供的工装结构,只需要配备传统压力装置,便可以实现管材轴向压力内高压胀形。在不具备专业内高压成形设备资源条件下,成形类似零件,可以借鉴本文所提供的方法。

参考文献

- [1] NEFUSSI G, COMBESCURE A. Coupled buckling and plastic instability for tube hydroforming[J]. *International Journal of Mechanical Science*, 2002, 44: 899-914.
- [2] 苑世剑, 朗利辉, 王仲仁. 内高压成形技术研究与应用进展[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2000, 32(5): 60-63.
- YUAN Shijian, LANG Lihui, WANG Zhongren. Developments in researches and applications of tube hydroforming[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2000, 32(5): 60-63.
- [3] TSENG H C, HUNG J C, HUNG C, et al. Experimental and numerical analysis of titanium/aluminum clad metal sheets in sheet hydroforming[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 54(1-4): 93-111.
- [4] CHEN Y, NGAILE G. Preform design for tube hydroforming based on wrinkle formation[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011(6): 06014-1-061014-11.
- [5] 初冠南, 杨帅, 王建勋. 薄壁高筋筒形件内高压成形力学条件分析[J]. *有色金属学报(英文版)*, 2012(Z2): 280-286.
- CHU Guannan, YANG Shuai, WANG Jianxun. Mechanics condition of thin-walled tubular component with rib hydroforming[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012(Z2): 280-286.
- [6] 孔德帅, 郎利辉, 阮尚文. 基于自由胀形的弯曲管材变形行为[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017(7): 1395-1402.
- KONG Deshuai, LANG Lihui, RUAN Shangwen. Deformation behavior of a bent tube based on free expansion[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017(7): 1395-1402.
- [7] 高振莉, 张晶贤. 管件液压成形过程的有限元分析及实验研究[J]. *中北大学学报*, 2008(4): 308-311.
- GAO Zhenli, ZHANG Jingxian. FEM simulation and experimentation analysis for tube hydroforming process[J]. *Journal of North University of China*, 2008(4): 308-311.
- [8] GUO X Z. A calculating method of tube constants of ductile fracture criteria in tube free bulging process based on M-K theory[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 128: 140-146.
- [9] 赵长财, 周磊, 张庆. 薄壁管液压胀形加载路径研究[J]. *中国机械工程*, 2003, 14(13): 1087-1089.
- ZHAO Changcai, ZHOU Lei, ZHANG Qing. Research on loading route of thin tube bulge forming [J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(13): 1087-1089.
- [10] 袁安营, 王忠堂, 梁海城, 等. 变径管内高压成形有限元模拟[J]. *机械工程与自动化*, 2006(4): 1-3.
- YUAN Anying, WANG Zhongtang, LIANG Haicheng, et al. Finite element simulation of internal high pressure forming of tubular components with variable cross sections[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2006(4): 1-3.
- [11] 苑世剑, 王小松. 内高压成形技术研究与新进展[J]. *塑性工程学报*, 2008, 15(2): 22-30.
- YUAN Shijian, WANG Xiaosong. Developments in researches and applications of tube hydroforming[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2008, 15(2): 22-30.
- [12] 程鹏志, 郎利辉, 葛宇龙, 等. 威海力约束管材自由胀形试验研究与材料性能测试[J]. *北京航空航天大学学报*, 2015, 41(4): 686-692.
- CHENG Pengzhi, LANG Lihui, GE Yulong, et al. Tube free bulging experiment with force-end and material properties testing[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(4): 686-692.
- [13] 杨玉英. 实用冲压工艺及模具设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- YANG Yuying. Practical stamping process and die design manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [14] 宋忠财. 三通管液压胀形成型过程分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.
- SONG Zhongcai. Research into the T-shaped tube hydroforming Process[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2005.
- [15] 马占永. 飞机设计手册(第二册)[M]. 北京: 航空工业出版社, 1997.
- MA Zhan Yong. Aircraft design manual[M]. 2nd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 1997.

通讯作者: 董楹, E-mail: 13574975@qq.com。

Simulation and Validation of Axial Force and Internal Pressure Bulging Process for Tube

DONG Ying, HEI Dongsheng, BAI Yan

(AVIC Harbin Aircraft Industry Group Co., Ltd., Harbin 150066, China)

[ABSTRACT] With the rapid development of our country's aerospace industry, precision sheet metal parts are more increasingly used. According to different design and application requirements, aviation pipe parts have also been improved from the original free bulging process to various controllable bulging processes, which have greatly broaden the application range. One of the metal molding processes is internal high pressure bulging process, which is widely applied in aviation manufacturing fields. The difficulty form, multiple influencing factors and the complex process are always hard to resolve. In this study, an example of the aviation clamp part is investigated. Axial material compensation amounts, internal pressure and loading paths have been discussed. Through the numerical simulation analysis, the process parameters can be optimized, a simple high-pressure tube bulging process method has been successfully applied, which is beneficial to shorten production cycle and save production costs.

Keywords: Aviation; Clamp; Internal high pressure; Axial pressure; Numerical analysis

(责编 大漠)

(上接第52页)

[9] CHABOCHE J L. On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratchetting effects[J]. International Journal of Plasticity, 1991, 7(7): 661-678.

[10] CHABOCHE J L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories[J]. International Journal of Plasticity, 2008, 24(10): 1642-1693.

[11] 姜志远, 刘郁丽, 杨合, 等.

B550CL 高强度钢轮辐反拉深-翻边复合成形损伤开裂研究[J]. 材料科学与工艺, 2015, 23(3): 71-75.

JIANG Zhiyuan, LIU Yuli, YANG He, et al. Research about flange cracking in the high-strength steel spokes forming process[J]. Materials Science and Technology, 2015, 23(3): 71-75.

[12] 孔炎, 薛克敏, 李萍, 等. 基于正交试验和灰色系统理论的高强度钢板折弯优化成形模拟及实验[J]. 塑性工程学报, 2014,

21(5): 11-14, 40.

KONG Yan, XUE Kemin, LI Ping, et al. Optimized simulation and experiment on high-strength thick steel plate bending based on orthogonal test and grey system theory[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21(5): 11-14, 40.

通讯作者: 张学广, E-mail: zhang-xueguang@cccar.com.cn.

Material Properties Fluctuation Effects on Bending Springback of High Strength Steel

ZHANG Xueguang¹, LU Kaijun², HE Guangzhong¹, CHEN Weiye², LUO Jianxi², ZOU Tianxia², LI Dayong²

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China;

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[ABSTRACT] This paper has studied how material properties fluctuation effects on bending spring back of the high strength steel, through uniaxial tensile tests by sampling based on the orthogonal test, and found out the material mechanical properties have great fluctuation by analyzing the uniaxial tensile test data. Then FE model is established according to working condition of the actual bending machine, and the model is proved to be accurate by comparing the simulated result with the bending experimental result. At last all the uniaxial tensile data are input into the FE model respectively and the result shows that the fluctuation of the material properties has a great influence on the bending springback of the high strength steel, among which the influence of material thickness on the bending springback has reached to 2.12° and material orientation to 0.21°.

Keywords: High strength steel; Material property; Bending process; Springback; FEM (Finite Element Model)

(责编 大漠)