

运载火箭增压输送系统补偿器接头内高压成形

赵毕艳¹ 王小松² 丁夫存¹ 苗启斌²

(1 上海航天精密机械研究所,上海 201600)

(2 哈尔滨工业大学,哈尔滨 150001)

文 摘 采用外径 161 mm、壁厚 1.5 mm 的不锈钢激光焊管进行了补偿器接头的内高压成形实验研究,对成形后零件进行了测量,分析了内凹缺陷产生的原因,重点研究了轴向进给量对成形质量的影响。研究表明:轴向进给量小,圆角成形困难,成形区壁厚减薄量大;轴向进给量大,有利于成形圆角,成形区壁厚减薄量小,但轴向进给量过大,容易形成内凹现象。当轴向进给量在 21.5 ~ 22.8 mm 间,能够获得外形尺寸与最小壁厚均满足设计要求的零件。

关键词 补偿器,内高压成形,接头

Hydroforming of Compensator Joints in Rocket's Boost Transport System

Zhao B iyan¹ Wang Xiaosong² Ding Fucun¹ Miao Q ibin²

(1 Shanghai Spaceflight Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600)

(2 Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract Laser welding tube with outer diameter 161mm and thickness 1.5mm is used in the experimental research on hydroforming of compensator joint. Dimension and thickness of the part is measured and analyzed. Failure mode is analyzed, especially the influence of axial feeding on forming.

Key words Compensator, Tube hydroforming, Joint

1 前言

内高压成形技术采用液体作为成形介质,在管材内部施加压力的同时,通过两端的冲头进行轴向补料将材料推入型腔,达到成形零件的目的,适用于成形各种沿轴线截面形状发生变化的空心零件,并且适于获得外表面尺寸精度较高的零件^[1]。内高压成形工艺主要优点有:减轻质量节约材料;减少零件和模具数量,降低模具费用;可减少后续机械加工和组装焊接量;提高零件强度与刚度。

内高压成形技术在德国与美国等国家应用的比较广泛,主要集中在汽车工业中,并已替代了许多采

用冲压焊接工艺生产的空心结构件^[2]。但在航空航天领域中的应用报道不是很多,典型的零件有航空发动机空心曲轴等。

哈尔滨工业大学液力成形工程中心在国内最早系统地开展了内高压成形机理和工艺基础研究,研制了国内首台内高压成形机,并进行了铝合金变径管、空心不锈钢阶梯轴、变截面曲线轴线管件等零件的内高压成形实验研究^[3~5]。

补偿器接头为运载火箭增压输送系统中补偿管的一种关键部件,原制造工艺为首先压弯两个半环,然后焊接两条纵焊缝成形。该工艺方案主要存在以

收稿日期:2005-04-27;修回日期:2005-06-21

作者简介:赵毕艳,1959年出生,工程师,主要从事冲压成形工艺的研究

下不足: (1)压弯零件的尺寸保证困难,零件壁厚减薄严重; (2)两个半环零件采用钨极氩弧焊焊接,纵焊缝对焊困难,焊接变形造成焊后尺寸精度难以保证,并且清除焊漏工作量较大,且易碰伤工件; (3)焊接打磨后对零件进行 X射线探伤时,由于零件结构存在叠加现象,有些位置无法探伤,易造成焊接缺陷漏判。这些不足导致了零件合格率低,尺寸精度与质量保证困难,因此有必要对补偿器接头的生产方法进行改进,开展补偿器接头的内高压成形工艺研究。

2 产品结构分析

图 1 所示为研究的 接头零件,该接头为火箭动力系统中构成补偿管的重要零件之一,它一端连接波纹管,另一端连接半边管或(法兰)环,中部与钢丝网套焊接相连。

采用内高压成形工艺,即采用与零件最小外径相同的管坯进行成形。采用外径为 161 mm,壁厚为 1.5 mm 的激光焊接管坯,材料为 1Cr18Ni9Ti,管坯初始长度为 120 mm。

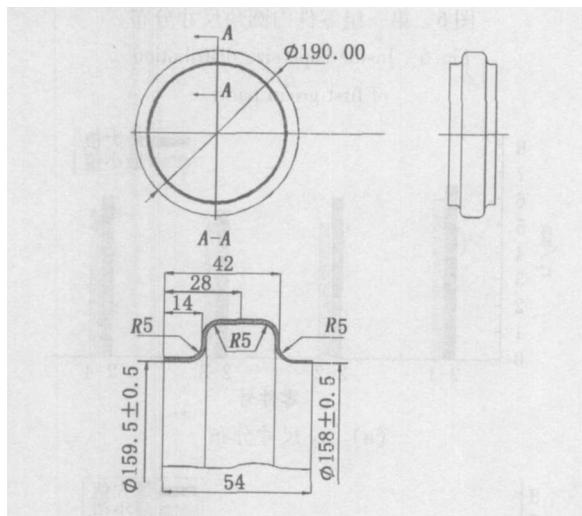


图 1 接头零件图

Fig 1 Part of joint

采用内高压成形工艺来成形 接头,也存在一定的困难。一般的内高压成形零件均具有过渡段,即具有一定角度的半锥角区,便于进行轴向进给补料,而该接头为直角过渡,如果轴向进给量过大,极易造成内凹。并且该零件的直径与壁厚比 (d/t) 达到 107,即管材相对厚度非常小,因此在内高压成形过程中,其高压密封的难度很大。

3 实验方案

宇航材料工艺 2006年 第6期

在内高压成形中,为了避免出现成形缺陷,并保证壁厚的均匀性,需要控制加载路径(轴向进给与内压的关系)。选定 15~30 MPa 的内压区间进行轴向进给,轴向进给量分别设定为 20、22、24 mm,每组 4 个零件,整形压力均为 150 MPa。图 2 所示为轴向进给量 20 mm 零件加载路径。

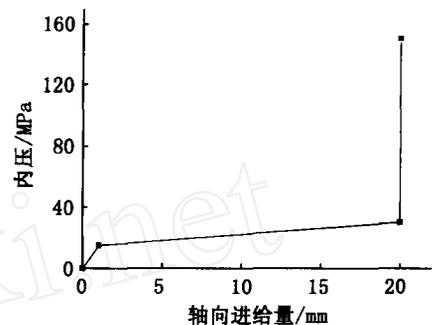


图 2 加载路径

Fig 2 Path of load

4 结果与分析

4.1 零件成形尺寸分析

由于摩擦情况等影响,实际轴向进给量与理论设定值有一定偏差。根据实际轴向进给量的不同,将成形零件分为三组进行讨论,如表 1 所示。

表 1 成形零件分类

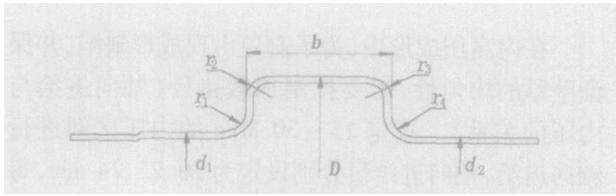
Tab 1 Category of formed parts

组号	试件代号	设计轴向进给量/mm	实际轴向进给量/mm
第一组	1-1, 1-2, 1-3, 1-4	20	19~21
第二组	2-1, 2-2, 2-3, 2-4	22	21.5~22.8
第三组	3-1, 3-2, 3-3, 3-4	24	23~25

成形后对零件尺寸进行测量,每个零件均沿环向取 6 个位置,测点沿圆周均匀分布,位置如图 3 所示,其中 D 为最大径直径, b 为最大径宽度,由于该接头左右不对称,称左端 d_1 为变径端,右端 d_2 为非变径端,称 r_2 与 r_3 为内圆角, r_1 与 r_4 为外圆角,其中尺寸 d_1 与 d_2 为关键配合尺寸。



(a) 测点示意图



(b) 测量尺寸示意图

图 3 接头测量示意图

Fig 3 Sketch of joint measuring

零件测量结果表明:三组零件变径端直径 d_1 、非变径端直径 d_2 、最大胀形区直径 D 及胀形区的宽度 b 都能满足设计的要求。外圆角 r_1 和 r_4 尺寸比较稳定,在不出现内凹情况下,尺寸在 4.5~5 mm 之间,主要问题为内圆角 r_2 和 r_3 尺寸变化较大。轴向进给量在 21.5~22.8 mm 的第二组零件均为尺寸合格零件,如图 4 所示。

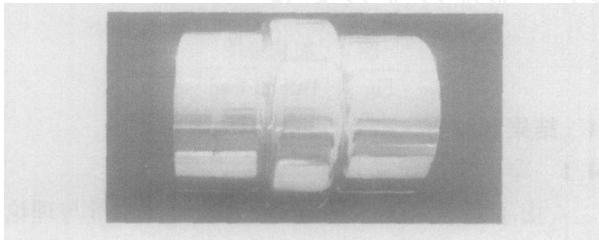


图 4 内高压成形合格零件

Fig 4 Eligible part of hydroforming

第一组零件内圆角 r_2 与 r_3 尺寸与设计值相比偏大,第三组中有两个零件出现了内凹现象,如图 5 所示。圆角偏大零件与内凹零件均属于不合格零件,下面分别进行讨论。

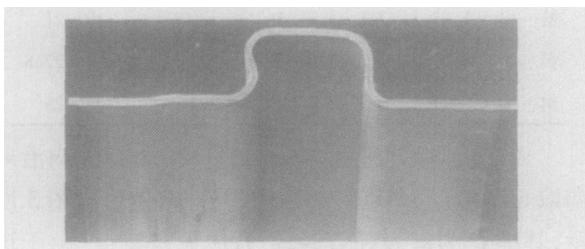


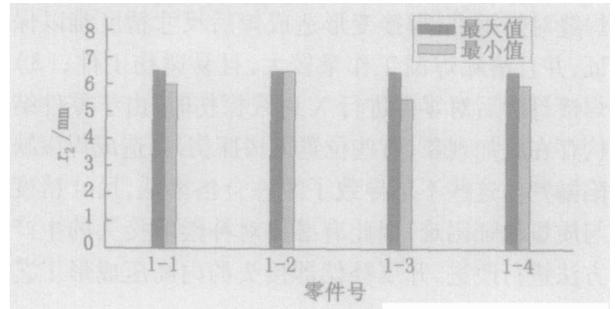
图 5 内凹零件 (零件 4-3)

Fig 5 Concave part

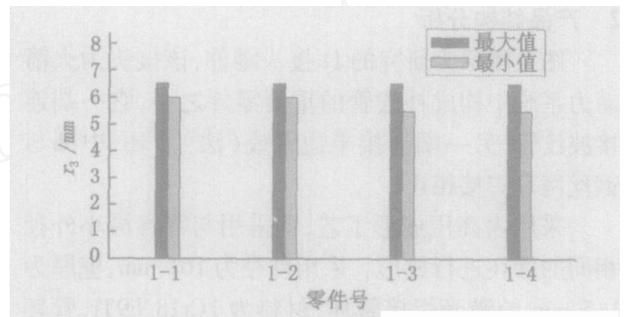
图 6~图 8 给出了三组零件内圆角 r_2 与 r_3 的尺寸分布图,每个零件只取 6 个测量值中的最大值与最小值。

第一组零件中的所有零件 r_2 与 r_3 的最大值均大于设计值 6 mm,不符合设计要求。零件 1-2 的 r_2 最小值也大于设计值 6 mm,整体内圆角尺寸偏大。

第二组零件的内圆角值有两点超出公差带,但主要数值均在允许范围内。



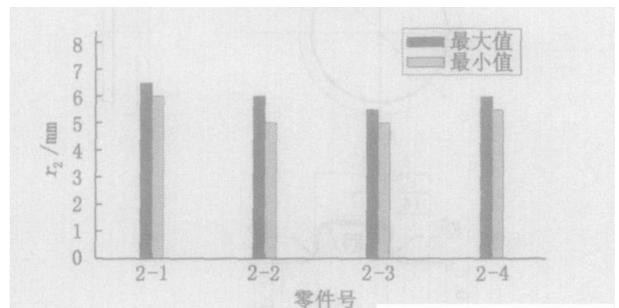
(a) r_2 尺寸分布



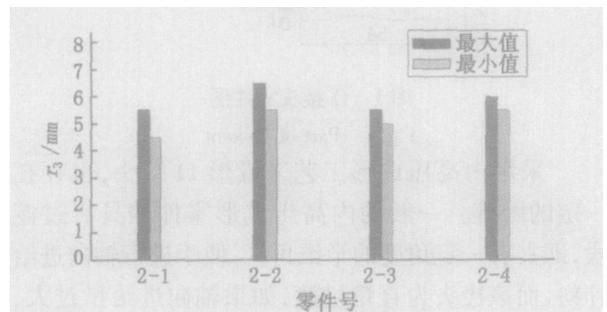
(b) r_3 尺寸分布

图 6 第一组零件内圆角尺寸分布

Fig 6 Inside cape size distribution of first group parts



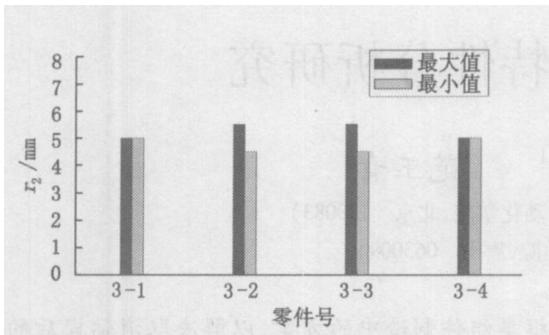
(a) r_2 尺寸分布



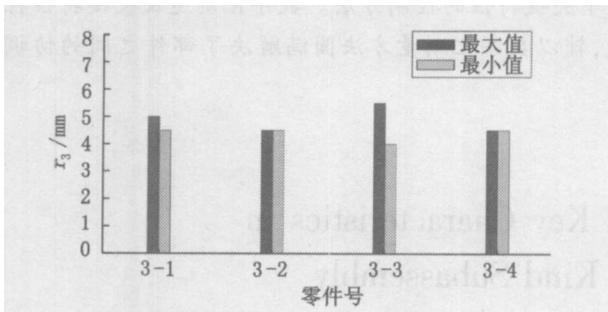
(b) r_3 尺寸分布

图 7 第二组零件内圆角尺寸分布

Fig 7 Inside cape size distribution of second group parts



(a) r_2 尺寸分布



(b) r_3 尺寸分布

图 8 第三组零件内圆角尺寸分布

Fig 8 Inside cape size distribution of third group parts

第三组零件的内圆角均小于 6 mm, 而大于 4 mm, 圆角完全符合公差带范围, 但在 4 个零件中, 有两件出现了内凹现象, 说明在该轴向进给量区间零件失效的可能性很大。

图 9 给出三组实验内圆角 r_2 与 r_3 的平均值随轴向进给量的变化曲线, 第一组零件的内圆角 r_2 平均值为 6.33 mm, r_3 平均值为 6.25 mm。第二组零件 r_2 平均值为 5.77 mm, r_3 平均值为 5.6 mm。第三组零件 r_2 平均值为 4.76 mm, r_3 平均值为 4.67 mm。

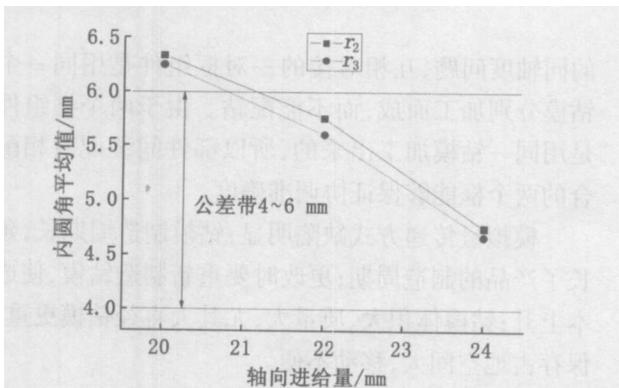


图 9 三组零件内圆角尺寸分布

Fig 9 Inside capes size distribution of three groups parts

随着轴向进给量的增大, 内圆角 r_2 与 r_3 的平均值都是减小的。第一组零件内圆角平均值均超出公差带上限, 不符合设计要求, 第二组零件与第三组零件的内圆角平均值均符合设计要求, 但第三组出现了内凹零件。采用第二组零件的轴向进给量, 可以获得尺寸合格的零件。

当轴向进给量较小时, 内圆角的成形主要依靠材料的减薄变形完成, 由于不锈钢回弹大, 内压卸载后造成圆角变大; 当轴向进给量较大时, 管坯向模具型腔流入的多, 整形时在高压下多余的管坯向模具贴合, 这时对圆角处有推力作用, 帮助克服管坯与模具间摩擦力, 从而有利于较小圆角的成形, 圆角较小。但当轴向进给量过大, 流入型腔的坯料过多, 圆角贴模后仍有多余坯料, 这时将造成内凹。控制合理的轴向进给量是保证圆角顺利成形并避免内凹现象出现的关键。

4.2 零件壁厚分析

将零件 1-1、2-1 沿轴向剖开, 测量轴向壁厚, 图 10 为零件壁厚测点位置分布示意图, 取点 8 为坐标原点, 其余各点的坐标见表 2。

表 2 接头壁厚测量点 x 坐标

Tab 2 X-coordinate of measuring point on joint's thickness

所测点	x 坐标 /mm	所测点	x 坐标 /mm	所测点	x 坐标 /mm
1	-44	6	-12	10	12
2	-34	7	-9	11	16
3	-24	8	0	12	19
4	-19	9	9	13	29
5	-16				

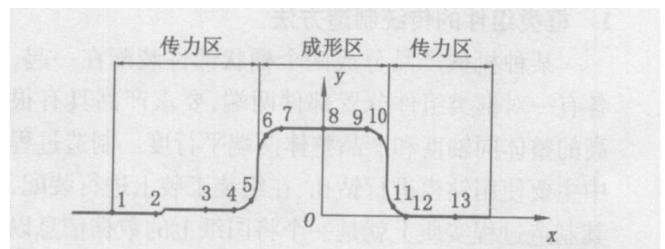


图 10 接头测点位置示意图

Fig 10 Location sketch of joint's point

图 11 为两个零件的壁厚分布曲线, 在成形区减薄较严重, 在传力区减薄较小, 局部壁厚还可能增大。

(下转第 60 页)

制造过程中对关键特性控制的步骤如下:

(a)根据生产中的测量数据绘制控制图,对关键特性进行监控并保持控制图;

(b)确定关键特性是否受控。如果关键特性的测量点接近控制限,虽然说明过程并未失控,但已经是过程产生变化的预兆,因此必须采取纠正措施;

(c)如果过程失控必须寻找波动源以便采取纠正措施。

(5)生产过程中控制的是关键特性最后一级,即螺栓孔的位置度、销孔的位置度、销孔直径、装配工装左右端同轴度,基准就是框及工装的中心线。

(6)为了保证装配时使得相协调两框能够协调组装,在装配工装右端和左端装配到装配工装上时要用数字化测量设备瞄准各自的销孔位置进行定位。

(7)工装上的关键特性属于第二类关键特性,由于样本量唯一,所以不进行统计过程控制,但必须保证关键特性值且进行定期检查。

5 结论

框类组件的数字化制造方式有效地解决了传统

制造方式的难题,显著降低了制造成本并缩短了制造周期;而关键特性统计过程控制技术应用于框类组件的制造可以解决大尺寸产品数字化制造中的协调难题并使产品质量稳定。

参考文献

- 1 王巍. AQS在波音飞机舱门上的应用. 航空制造技术, 2003; (7): 62~67
- 2 庄建平. 先进质量体系(AQS)在沈飞民机生产上的应用研究. 北京航空航天大学硕士学位论文, 1999
- 3 王惠琴, 王克学. 产品特性过程能力波动研究的新方法. 计量技术, 1998; (2): 2~5
- 4 Mathieu L, Marguet B. Integrated design method to improve producibility based on product key characteristics and assembly sequence. Annals of CIRP, 2001; 5(1): 85~88
- 5 Lee D J, Thomson A C. The identification and use of key characteristics in the product development process. In: Proceedings of the 1996 ASME design engineering technical conferences and computers in engineering conference, Irvine, California, 1996: 1~14

编辑 李洪泉)

(上接第 55 页)

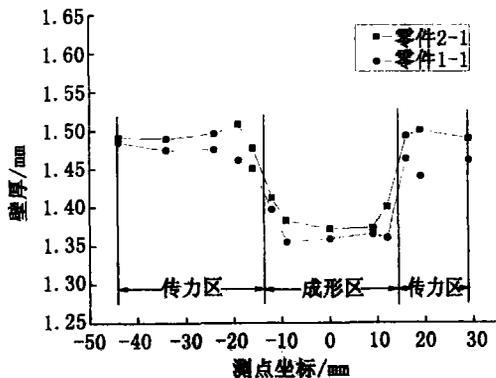


图 11 零件壁厚分布

Fig 11 Distribution of part's thickness

零件 1-1 在膨胀区与内圆角 r_2 相切处减薄最大, 壁厚为 1.35 mm, 在整个膨胀区的减薄也较大。该零件补料较少, 仅 20.67 mm, 各处壁厚均有所减薄。

零件 2-1 在膨胀区与内圆角 r_3 相切处减薄最大, 壁厚为 1.37 mm, 在整个膨胀区的减薄也较大。在变径端与外圆角 r_1 相切处、非变径端与外圆角 r_4 相切处, 壁厚稍有增大。

零件 1-1 轴向进给量为 20.67 mm, 零件 2-1 轴向进给量为 22.25 mm, 零件 2-1 各处壁厚均大于 1 号零件, 控制轴向进给量可以有效控制零件的壁厚。两零件的壁厚均大于 1.3 mm, 满足设计要求。

5 结论

— 60 —

采用焊制的管坯, 在内高压成形机上进行了成形试验研究, 并对零件尺寸与成形缺陷进行了分析, 得出以下结论。

(1) 使用的外径 161 mm, 壁厚 1.5 mm 的 1Cr18Ni9Ti 激光焊管, 在 15~30 MPa 内压区间进行轴向进给, 轴向进给量介于 21.5~22.8 mm 间, 能够获得外形尺寸与壁厚均合格的零件。

(2) 轴向进给量对成形结果影响很大, 轴向进给量小, 圆角成形困难; 轴向进给量大, 有利于成形圆角, 但轴向进给量过大, 容易形成内凹现象。控制轴向进给量是成形合格的零件的关键。

(3) 成形零件轴向壁厚分布为: 在胀形区壁厚减薄较大, 传力区减薄小, 局部壁厚可能增大; 轴向进给量大的零件壁厚减薄量小。

参考文献

- 1 苑世剑, 王仲仁. 内高压成形应用研究. 中国机械工程, 2002; 13: 783~786
- 2 Dolmann F, Hartl Ch. Tube hydroforming-research and practical application. J. Mater. Proc. Technol., 1997; 71: 174~186
- 3 苑世剑. 我国内高压成形技术现状与进展. 锻压技术, 2004; 3: 1~6
- 4 刘钢, 谢文才等. 大截面差空心件内高压成形研究. 材料科学与工艺, 2004; 12(4): 398~401
- 5 苑世剑, 苗启斌, 王仲仁. 轿车后轴纵臂内高压成形研究. 金属成形工艺, 2004; 22(3): 1~3

(编辑 任涛)

宇航材料工艺 2006年 第6期