

液力成形在运载火箭增压输送系统中的应用

冯苏乐¹ 赵毕艳¹ 罗益民¹ 罗志强¹ 刘 钢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)



摘要: 为了解决长征系列运载火箭增压输送系统零件成形过程中的难题, 综述了运载火箭增压输送系统研制瓶颈, 并针对异形接头、三通、波形管等零件的液力成形及其在航天中的应用进行了分析, 通过数值模拟分析了进给量、内压、胀形方式对零件成形的影响, 最后确定了零件的加载路径, 并给出了该技术在航天制造领域推广应用的实际意义。

关键词: 液力成形; 增压输送系统; 异形管件; 数值模拟

Hydroforming Technology Application in Pressure Delivery System of Carrier Rocket

Feng Sule¹ Zhao Biyan¹ Luo Yiming¹ Luo Zhiqiang¹ Liu Gang²

(1. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600;

2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: In order to solve the forming process problem of the pressure delivery system parts in Long March series carrier rockets, hydroforming technology was used in this paper. Traditional forming problems of pressure delivery system parts were reviewed. Besides, hydroforming technology in forming special-shaped connectors, three way pipe, waveform-shape tube and its advantage in aerospace were analyzed. By using numerical simulation, forming parameters such as feed rate, internal pressure and bulging methods were researched in experimental test. Finally the right load path was determined and the practical significance of hydroforming technology in aerospace manufacturing was given.

Key words: hydroforming technology; pressure delivery system; special-shaped part; numerical simulation

1 引言

随着航天工业加工制造水平的进步, 航天产品逐步朝着减轻零件重量, 提高产品可靠性方向发展。运载火箭增压输送系统是运载火箭传输燃料的重要组成部分, 在运载火箭飞行过程中起着极为关键的作用。在运载火箭增压输送系统中存在较多异形管件, 而采用传统的冲压成形工艺已不能满足高可靠性、轻量化的需求, 因此迫切需要新成形技术应用于运载火箭增压输送系统加工制造。

2 增压输送系统研制现状分析

2.1 增压输送系统异形件结构特点

在长征系列运载火箭增压输送系统中, 经常使用如异形接头、三通、波形管等变截面异形管件(如图1所示), 其具有管径大、管壁薄、形状复杂等特点, 材料一般为不锈钢和铝合金。其中异形接头及波形管属于轴对称零件, 截面形状沿管材轴向产生凸起; 三通属于平面对称零件, 其中两主端口口径较大, 中间支管口径较小。

作者简介: 冯苏乐(1987-), 工程师, 材料加工工程专业; 研究方向: 金属塑性成形。

收稿日期: 2014-08-21

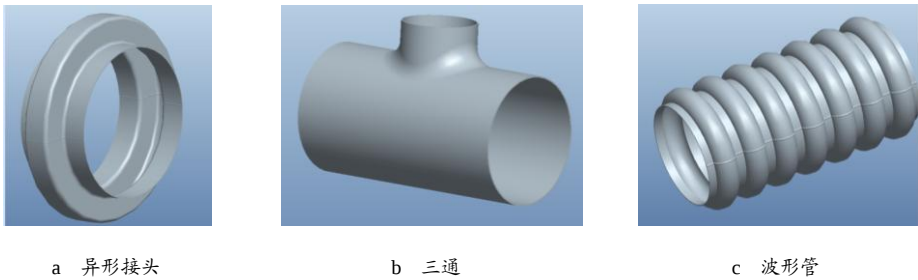


图 1 长征系列运载火箭管路零件三维示意图

2.2 存在的问题

异形接头在运载火箭动力系统中起着连接管路，提高系统强度的作用。图 2 所示为接头零件图。零件材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢，现有加工方法为先用模具压出两个半环，切边并修配后焊接成整圆，零件存在两条纵向焊缝，受纵缝形状限制，只能进行手工焊接，且焊接难度高，容易产生焊接变形。



图 2 对焊成形的异形接头

三通在运载火箭动力系统中起到燃料分流作用，材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢。现有加工方式为采用棒料经自由锻造成方块后再机加工成形。为防止零件加工变形，零件的壁厚增厚，导致零件重量增加；同时主管内孔与支管内孔过渡处为尖角，容易因毛刺去除不干净而产生多余物，且影响了内部液体的流动；此外因锻件需进行固溶处理，而 1Cr18Ni9Ti 不锈钢在固溶处理后处于软状态，强度较低，影响了零件的承压能力。

铝合金波形管主要起到输送氧化剂，隔绝燃料剂的作用，材料为 5A06 铝合金，现有加工方式为采用平板压凸筋后再逐次压弯成筒形，打磨纵缝后焊接成形。在实际成形过程中，零件在压筋及压弯时在波形处易产生压伤，材料减薄较严重；同时弯曲成形及后续焊接时由于残余应力存在，零件变形严重，图 3 为弯曲成形的波形管。

表 1 为长征系列运载火箭增压输送系统异形件成形工艺。



图 3 弯曲成形的波形管

表 1 长征系列运载火箭增压输送系统异形件成形工艺

序号	产品名称	材料	现有成形工艺	改进工艺
1	异形接头	1Cr18Ni9Ti	压制半环，弯曲，焊接	液力成形
2	T 型三通	1Cr18Ni9Ti	自由锻造加机加工	
3	波形管	5A06	压筋，弯曲，焊接	

3 管材液力成形在航天中的应用分析

3.1 管材液力成形技术特点

管材液力成形采用液体作为传力介质，通过向管材中施加液压而成形零件^[1]，成形装置主要包括：管材、上模、下模、左冲头、右冲头等 5 部分，其成形原理如图 4 所示，由合模充液和加压成形两部分构成^[2]，相对于传统钢模冲压成形，液力成形具备如下特点：

- a. 因液体流动性好，液压施加均匀稳定，液力成形零件表面质量较好，零件尺寸精度较传统钢模冲压成形有较大改善；
- b. 液力成形可整体成形变截面异形管件，替代传统“冲压+焊接装配”成形方式，有效减少焊缝数量，提高产品可靠性；
- c. 液力成形有效减少了零件加工工序，提高了产品生产效率，对于运载火箭增压输送系统中异形管件的成形具有较强优势。

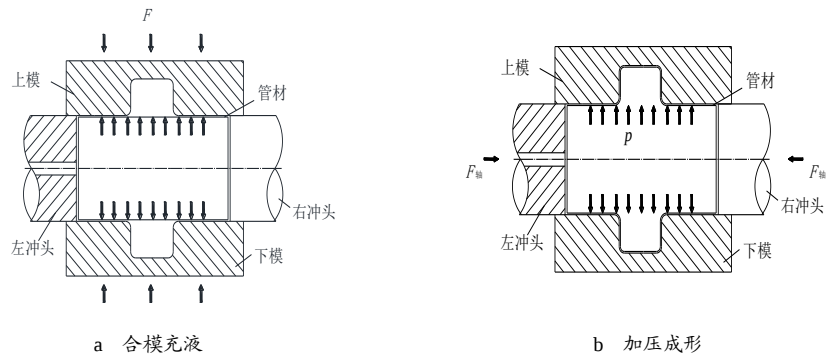


图 4 液力成形原理

3.2 管材液力成形在航天中的应用优势

采用液力成形异形接头，板材经过滚弯后，自动焊接成管坯，然后加压胀形，不仅减少了成形模具数量，而且采用自动化焊接，较传统手工焊接稳定性更高，有效降低了焊接缺陷的产生，消除了焊后热变形，提高了接头尺寸精度；

采用液力成形三通，加工工序相比机加工减少了 5 道工序，同时液力成形薄壁三通可有效减重 30%，燃料在管材内部流量增加了 15%，达到了轻量化的研制要求。

采用液力成形波形管，管坯采用无缝管，较传统“钢模弯曲+焊接”成形波形管减少 1 条焊缝，大大提高了增压输送系统成形质量和可靠性。

4.1 仿真软件及材料性能

利用数值模拟方法对液力成形过程进行成形前仿真分析，预判成形缺陷，分析零件成形后壁厚分布，为调整工艺参数提供指导依据。

采用有限元分析软件 Dynaform 以及与之相配套的有限元求解器 LS-DYNA 作为仿真工具。采用单向拉伸试验测定所需材料的抗拉强度、屈服强度、延伸率等力学性能指标，如表 2 所示。

表 2 运载火箭管路零件材料力学性能

材料	σ_s /MPa	σ_b /MPa	Δ /%	E /GPa	K /MPa	n
1Cr18Ni9Ti	335	637	49.5	206	1284	0.325
5A06	136	334	22	662	682	0.3

4 液力成形数值模拟

4.2 不同轴向进给对异形接头成形的影响

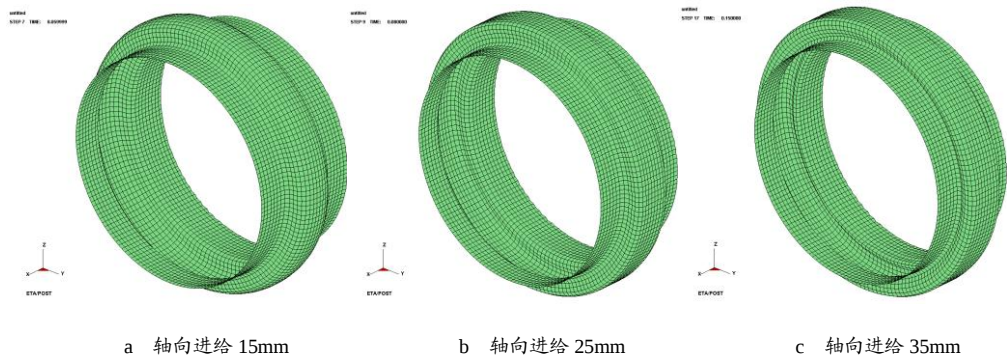


图 5 不同轴向进给下异形接头成形效果图

图5分析了不同轴向进给下异形接头的成形效果，当液室压力等参数保持不变，轴向进给为15mm时，零件中部外圆角尚未成形，内圆角距离贴模较大；轴向进给为25mm时，零件中部已基本成形，内外圆角尺寸已达设计要求；轴向进给增大至35mm时，外

圆角不再变化，内圆角处材料堆积在入口处形成内凹缺陷。因此合理控制内压与进给量的关系，采用合理的加载路径是成形的关键^[3]。

4.3 不同内压对三通成形的影响

图 6 为 T 型三通在不同成形内压下的数值模拟，

从图中可以看出，T 型三通壁厚呈左右对称分布，支管靠近顶部区域壁厚减薄，主管壁厚增厚，在 40MPa 压力下支管端部的圆角难以成形，导致圆角过大，直边段高度不足，当成形内压增大至 67MPa 时，模拟结果如图 6b 所示，此时支管处的最小壁厚为 0.59mm，

最大减薄率为 26.46%，此时内压产生的整形压力使得支管处小圆角得以成形。在实际成形过程中，合理的内压可以成形出较小的圆角，但内压过大将造成支管端部材料难以流入而破裂。

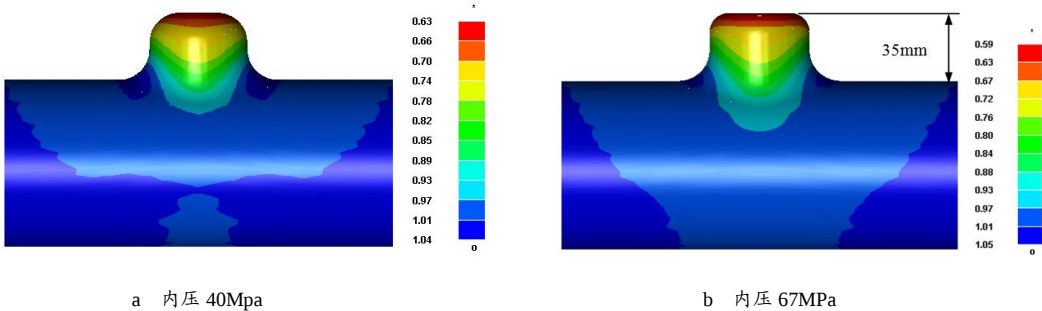


图 6 不同内压下三通数值模拟壁厚分布

4. 4 不同胀形方式对波纹管壁厚的影响

图 7 为波纹管在不同胀形方式下壁厚分布云图，从图中可以看出，在一次整体胀形时，由于补料量不足，材料难以流入中间波纹，该处波纹的成形仅靠管 0.82mm，最大减薄率为 18%；在单波逐次胀形时，

此时由于两侧材料补料充分，成形零件壁厚较均匀，最小壁厚为 0.86mm，最大减薄率为 14%，因此采用单波逐次胀形，减小波纹顶端材料减薄是成形的关键。

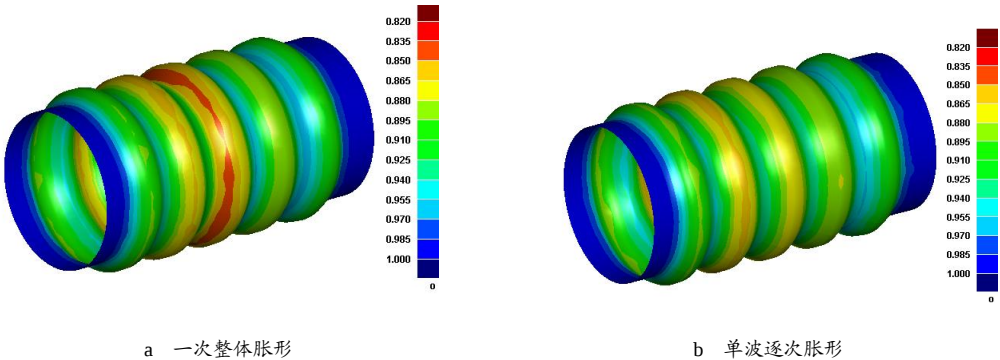


图 7 不同胀形方式下波纹管壁厚分布云图

5 液力成形试验研究

在液力成形试验中，对运载火箭增压输送系统异形接头、波纹管和三通零件进行了工艺试验，研究各工艺参数对零件成形的影响。通过数值模拟和成形试验，最终得出了异形接头、波纹管和三通的最佳加载路径如图8、图9所示。

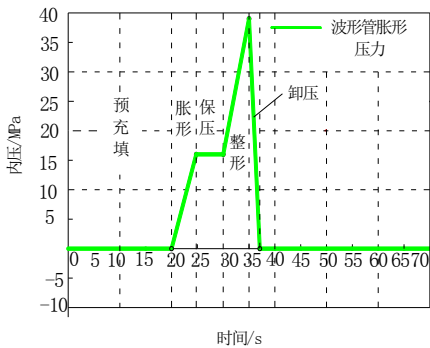


图 8 波纹管成形加载路径

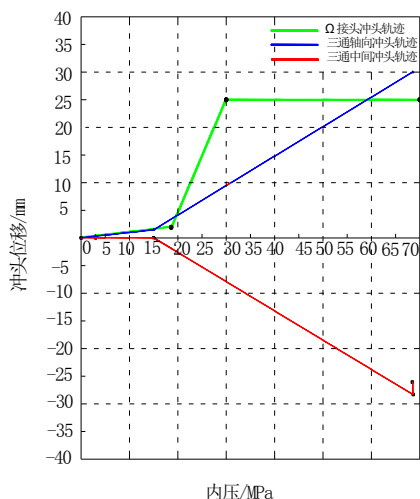


图9 异形接头、三通成形最佳加载路径

波形管选定0~38MPa的内压区间进行液压试验, 试验过程由预充填—胀形—保压—整形—卸压五部分构成。首先对管材进行预充填, 持续时间为20s; 然后进行胀形, 成形初期迅速增大内压至16MPa, 零件开始产生塑性变形, 形成波纹, 由于零件体积增大, 需要及时补充液体实现保压过程, 该过程持续时间约5s; 成形后期, 增大内压至38MPa, 以成形零件的圆角并对零件进行整形, 该过程持续时间为5s; 零件成形完成后, 对管内液体卸压, 而后移动增压装置至下一波纹进行胀形。

T型三通成形初期右冲头的补料量较小, 而内压迅速增大至15MPa, 此后内压的增大随冲头的行程成线性上升, 左右冲头不断进给至30mm, 中间冲头回退至28mm, 三者间相互配合进行, 当内压到达68MPa后, 进行零件保压、整形。

Ω 接头成形初期迅速增大内压至18MPa, 随后轴向补料与内压呈线性变化, 最大补料量为25mm, 成形后期, 增大内压至70MPa, 以成形零件的圆角及对零件的整形。在合理的加载路径下, 最终成形的增压输送系统零件如图10~图12所示。



图10 波形管液压成形件



图11 液力成形不锈钢三通零件图



图12 液力成形异形接头零件图

6 结束语

a. 采用管材液力成形, 有效提高了运载火箭增压输送系统零件表面质量, 减少了焊缝数量, 有效降低了焊接缺陷及焊后热变形, 提高了产品尺寸精度及可靠性;

b. 通过有限元数值模拟, 对异形接头、三通、波形管零件液压成形过程进行仿真, 分析进给量、内部压力及胀形形式对零件成形质量的影响, 最终制定了合理可行的加载路径;

c. 采用液力成形技术可满足航天零件高可靠性、轻量化的研制需求, 对于运载火箭增压输送系统变截面管件的成形具有广泛的应用前景。

参考文献

- 1 苑世剑, 刘欣, 徐永超. 薄壁件液压成形新技术[J]. 航空制造技术, 2008(20): 26~28
- 2 苑世剑. 现代液压成形技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009
- 3 丁夫存, 何光荣, 王小松. 异形接头液力成形数值仿真[J]. 上海航天, 2006(3): 56~60