

# 大直径不锈钢波纹管成型工艺及性能分析研究

**李金全 田 鑫 吴一川 王 硕 王 伟** (首都航天机械有限公司,北京 100076)



**摘要**:针对重型运载火箭增压输送系统管路的应用需求,开展了大直径不锈钢波纹管的成型工艺研究,突破了通径Φ470mm 且单层壁厚为 1.3mm 的双层大直径不锈钢波纹管的精密成型技术,成型精度及性能满足重型运载火箭的服役工况。大直径不锈钢波纹管在 2.25MPa 和 1.5MPa 条件下分别开展液压强度试验和气密试验并保压 5min,均未出现波纹管的失稳以及泄漏情况;通过液氮浸泡进行低温冷冲击试验,波纹管未出现开裂和变形等异常现象;通过压缩 10mm 的方式测试波纹管的机械刚度,刚度值达到 630N/mm;内部充液压 1.5MPa 并进行拉伸

60mm 的位移疲劳试验,经 300 次循环后未出现失稳,且气密检查未出现泄漏,极限拉伸至 120mm 时才开始出 现端波的平面失稳。

关键词:大直径波纹管;成型精度;位移疲劳试验;重型运载火箭

# Research on Forming Processes and Mechanical Performance of Large-diameter Stainless Steel Bellows

Li Jinquan Tian Xin Wu Yichuan Wang Shuo Wang Wei (Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076)

Abstract: To meet the application requirement of pipes in the pressurization and delivering system of the heavy-lift launch vehicle, the forming processes of large-diameter stainless steel bellows were conducted in this paper. The precise forming technology of double-layer large-diameter stainless steel bellows with an inner diameter  $\Phi$ 470mm and a single-layer thickness 1.3mm was broken through. Meanwhile, both the forming precision and its mechanical performance could meet the service conditions of the heavy-lift launch vehicle. As for the large-diameter stainless steel bellow, the hydraulic strength test of 2.25MPa and the gas leakage test of 1.5MPa were carried out respectively with a pressure-holding time 5min, and there was no instability or leakage phenomenon. The cold-impingement testing at cryogenic temperature was also carried out through the liquid nitrogen immersion, there was no abnormal phenomena such as cracking and deformation found on the bellow. The mechanical stiffness of the bellow was also tested through a compression process of 10mm, the mechanical stiffness value reached 630N/mm. The displacement fatigue test was carried out under the condition of an inner hydraulic pressure 1.5MPa and a tensile displacement 60mm. There was no instability after a test of 300 cycles and also no leakage during the gas leakage test, and the plane instability began to appear on the end wave when the bellow was ultimately stretched to an elongation of 120mm.

Key words: large-diameter bellows; forming precision; displacement fatigue test; heavy-lift launch vehicle

作者简介:李金全(1984),高级工程师,焊接专业;研究方向:导管产品自动化焊接技术、

导管柔性制造技术,以及导管三维数字化制造技术。

收稿日期: 2020-11-30

#### 1 引言

运载火箭的运载能力是一个国家开发外太空能力 的重要体现,对推动航天技术及其附属产业的发展起 着重要的作用,也推动着太空活动向纵深方向发展<sup>[1]</sup>。 为了满足我国载人登月和深空探测等重大航天任务的 需求,我国将立足航天活动需求,开展重型运载火箭 的研制,达到近地轨道 LEO 为 140t 而地月转移轨道 LTO 为 50t 的运载能力<sup>[2]</sup>。重型运载火箭是我国建设航 天强国的重要标志,是实现"两个一百年"发展目标 中的重大科技创新活动,也可能是我国化学推进最大 能力的终极火箭型号<sup>[3]</sup>。

为了实现重型运载火箭的大推力升空,发动机对 氧化剂和燃烧剂的需求量将显著增大,向发动机提供 推进剂的输送管通径也将显著增大<sup>[4]</sup>。据初步估算,输 送管的通径将达到**Φ**470mm。在运载火箭增压输送管 路系统中,为了实现管路在安装过程中的安装补偿以 及在服役过程中的应力补偿,通常需要采用波纹管补 偿器<sup>[5·6]</sup>。因此,在重型运载火箭中对直径达到**Φ**470mm 的大直径波纹管提出了明确的需求。对于波纹管补偿 器,其波形的成型精度直接决定了其补偿能力以及疲 劳性能等关键性能指标,需要开展大直径波纹管的成 型工艺研究<sup>[7·8]</sup>。

本文针对重型运载火箭增压输送系统对直径达到

Φ470mm的大直径波纹管的需求,开展大直径不锈钢 波纹管的成型工艺研究,确定大直径不锈钢波纹管的 成型工艺方案,测试并分析大直径不锈钢波纹管的性 能,为重型运载火箭的增压输送系统提供合理而有效 的补偿技术方案。

#### 2 大直径不锈钢波纹管的结构特征及性能要求

根据重型运载火箭要实现大推力的目标对推进剂 流量的需求,输送管路的直径将达到Φ470mm,实现 其装配补偿和服役应力补偿的补偿器波纹管的通径也 将达到Φ470mm。图1所示是重型运载火箭增压输送 系统所需的大直径不锈钢波纹管。波纹管的材料为不 锈钢 06Cr17Ni12Mo2(固溶-BA-PT,GB/T3280-2007),抗拉强度达到646MPa,断后伸长率达到42.5%。 波纹管为双层波纹管,其具体尺寸参数如表1所示。



图1 重型运载火箭增压输送系统所需的 大直径不锈钢波纹管

表1 重型运载火箭增压输送系统所需大直径不锈钢波纹管的尺寸特征											
单层壁厚/mm	层数	通径/mm	端部外径/mm	外径/mm	波高/mm	波距/mm	波峰 <i>R</i> /mm	波谷 <i>R</i> /mm			
1.3	2	470	475.2	550	37.4	35	10.05	7.45			

为了满足重型运载火箭增压输送系统对补偿器波 纹管的安装补偿和应力补偿的需求,在满足波纹管成 型精度后,需要开展液压强度试验、气密试验、液氮 冷冲击试验、机械刚度测试、位移疲劳试验,以及极 限拉伸性能的考核。

# 3 大直径不锈钢波纹管的成型工艺研究

#### 3.1 大直径不锈钢波纹管的成型工艺方法

针对大直径的波纹管,主要的成型方法包括:液 压成型法、滚压成型法和机械胀型法三种<sup>[9]</sup>。其中,液 压成型法是波纹管多波同步整体成型,具有成型精度 高以及周向成型受力均匀等特点;滚压成型法是通过 滚压轮以单波逐波连续滚压实现波纹管成型,具有局 部成型的工艺特点,波形一致性控制难度大且波距控 制精度较差;机械胀型法是通过锥形轴旋转并进给以 挤压分瓣式的成型模具使其外胀实现波纹管成型,以 单波逐波连续胀型的方式完成,存在波距控制精度较 差且波形尺寸较差等特点,尤其是分瓣式模具的开合 位置处在外胀的过程中,将形成直线段而非圆弧的波 形。在航天飞行器增压输送系统管路中,补偿用的波 纹管除了性能满足工况需求以外,对波纹管波形尺寸 成型精度要求也较高。因此,在本文大直径不锈钢波 纹管的成型工艺研究过程中,选用内部充压且多波同 步整体成型的液压成型法。

在波纹管的成型过程中,外部通过液压机为波纹 管成型提供轴向压力,内部通过液压泵为波纹管成型 提供成型压力。如图2所示,当液压机下行时,管坯 内的液压压力逐渐增大,同步对管坯内部进行泄压以 保持管坯腔内处于恒定的成型压力,实现波纹管波形 的成型和保持。外部压力机下压下行的速度以及内部 充压的液压压力是影响波纹管成型精度的关键参数。 并且,要实现内部充液压,波纹管管坯端部的密封也 是关键。对于中小直径且波距较大、波高较小的波纹 管,通常采用橡皮囊置于管坯内部并向橡皮囊充液压 的方式实现内部成型压力的充压;然而,对于大直径 且波高较高的厚壁波纹管,橡皮囊无法承受较大成型 压力的加载过程,容易出现破裂等问题。因此,在波 纹管管坯的两端焊接堵盖实现可靠密封,保证内部充 压达到精确成型所需的成型压力。同时,为了避免双 层波纹管管坯层间残留空气因挤压而导致管坯破坏, 实现双层管坯在成型过程中的完全贴合,在外层管坯 靠近端部位置钻**03.0mm**的排气孔。



#### 3.2 大直径不锈钢波纹管成型模具的设计

波纹管成型模具是波纹管成型的基础,通过模具 尺寸保证波纹管的波形尺寸。在模具设计过程中需要 考虑成型尺寸的精度、模具自身的刚度和强度,以及 不锈钢材料在成型过程中的回弹等问题。最终,实现 大直径不锈钢波纹管的稳定成型并保证波纹管的波形 尺寸。从图3中可以看出,大直径不锈钢波纹管的成 型模具主要包括盖板组件、下底板、上直边模片、下 直边模片、中间模片、成型垫块和导向柱等部分。中 间模片等成型组件采用 45#钢, 淬火至 HRC35-38; 导 向柱等对摩擦磨损性能要求较高的组件采用 40Cr,进 行渗氮处理:连接件等对强度要求比较高的组成结构 采用 35CrMo, 调质处理至 HB226~269。在波纹管成 型过程中,盖板组件和下底板为压力机下压时提供稳 定的轴向均布力,实现在整个圆周方向波形成型的均 匀性; 上、下直边模片是保证波纹管成型后两端直边 段的外径尺寸以及直边段到端波的过渡 R 角;中间模 片是决定波纹管成型后的波形和波距的关键因素,波 纹管的波距与中间模片的厚度以及成型后的回弹有

关,波峰 R 值与中间模片台阶宽度以及成型后的回弹 有关,也与成型压力有关,波谷 R 值与中间模片的 R 值以及成型后的回弹有关;波纹管的波外径与成型垫 块的高度以及成型压力有关,调整垫块的高度可以调 整波纹管波形的展开料以实现对波高的调整;导向杆 确保波纹管成型的外部轴向压力均衡且沿轴向,保证 波纹管端面与轴线垂直、不歪斜。



# 3.3 大直径不锈钢波纹管成型尺寸精度控制

对于多层波纹管,应在成型过程中实现层间完全 贴合,既有利于波纹管的成型又有利于波纹管成型后 的服役性能。然而,管坯间隙过小则容易在管坯套合 过程中造成管壁损伤。不锈钢波纹管的通径为 Φ470mm,管坯单层壁厚为1.3mm,直边段外径为 Φ475.2mm,以内外层管坯的中间厚度处直径计算内外 层管坯的展开料。预留两层间的间隙为0.5mm并考虑 管坯纵向焊缝的焊接收缩,计算获得内、外层管坯的 展开料宽度分别为(1477±0.5)mm和(1489±0.5)mm,为 波纹管成型后直径的控制奠定了基础。

波纹管的波形尺寸是决定波纹管补偿能力和机械 性能的关键参数,通过单波的轴向展开料以及成型过 程中的成型压力和保压时间,最终确保波纹管的波形 尺寸。根据波纹管的波高 37.4mm、波峰 R 为 10.05mm 以及波谷 R 为 7.45mm,同时考虑波形成型过程中发生 的塑性变形,波纹管的单波展开长度为 91.6mm,成型 垫块的高度为 61.5~66.5mm。经过成型工艺的摸索试 验,以波纹管的波形外径以及波峰、波谷 R 值为控制 目标,优化调整成型垫块的高度为 64.8mm。在大直径 不锈钢波纹管的成型过程中,确定波纹管成型的单波 展开料以及对应的成型垫块高度后,波纹管成型的单波 常充压压力和中间停留保压时间是影响波纹管成型尺 寸精度的关键工艺参数。通过波纹管成型工艺参数的 优化,确定成型过程分三阶段进行,对应的成型垫块

mm

高度分别是 64.8mm、40mm 和 24.8mm,并且在压力 机下行压缩至成型垫块高度时停留保压 10min。其中, 垫块高度为 64.8mm 时为初波成型阶段,初波成型时 的内部压力为 7.5MPa,以确保成型膜片与管坯紧密贴 合并发生向外的塑性变形而形成初始波,防止中间膜 片在后续发生轴向滑动,实现对波纹管波距的精确控 制:垫块高度为 40mm 和 24.8mm 时,均采用波纹管 终成型压力 10.0MPa。图 4 是大直径不锈钢波纹管采 用内部充压的液压成型法的成型过程及成型后的波纹 管产品。表 1 是大直径不锈钢波纹管成型后的主要波 形尺寸的测量结果。按照 GB/T12777—2008《金属波 纹管膨胀节通用技术条件》中的规定,U 形波纹管波 峰、波谷 R 值的极限偏差应不超过±15%,线性尺寸按 照自由公差,波纹管成型后的尺寸精度满足规定范围。



图 4 大直径不锈钢波纹管内部充压的液压成型法的成型过程及成型后的波纹管产品

测量项目	理论值	第1个波	第2个波	第3个波	第4个波	第5个波	
波纹管外径	550	551.06	551.74	551.21	550.22	551.30	
波峰 R 值	10.05	9.24	9.15	9.38	9.37	9.44	
波谷 R 值	7.45	7.19	7.29	7.26	7.28	7.29	
波距	35	/	35.75	35.51	35.63	35.21	
测量项目	理论值	第6个波	第7个波	第8个波	第9个波	第10个波	
波纹管外径	550	551.54	551.01	551.47	551.92	551.16	
波峰 R 值	10.05	9.47	9.64	9.62	9.44	9.64	
波谷 R 值	7.45	7.32	7.27	7.37	7.21	/	
波距	35	35.21	35.46	35.55	35.69	35.78	

表1 大直径不锈钢波纹管成型后的主要波形尺寸测量结果

#### 3.4 大直径不锈钢波纹管的管坯成型变形

根据 Q/Dy89—2010《弹(箭)体波纹管制造验收 技术条件》和 GB/T 12777—2019《金属波纹管膨胀节 通用技术条件》中的规定,对双层大直径不锈钢波纹 管沿轴向剖切,波纹管的两层管坯在端部直线段、波 峰、波侧壁及波谷等部位均实现了良好的贴合,并且 内层管坯外壁和外层管坯内壁都未出现因成型过程中 的相对滑移而产生的表面划伤等缺陷。同时,测量沿 轴向剖切的截面上不同部位的波纹管管坯壁厚,确定 在成型过程中的管坯变形情况。从图 5 可以看出,波 峰位置处的管坯成型减薄量最大,外层管坯壁厚由 1.30mm 减薄至 1.20mm,内层管坯壁厚由 1.30mm 减 薄至 1.21mm; 波谷位置处的管坯成型减薄量次之,外 层管坯壁厚由 1.30mm 减薄至 1.28mm,内层管坯壁厚 由 1.30mm 减薄至 1.29mm; 波纹管端部直线段以及波 侧壁,管坯壁厚基本不减薄。



针对波纹管的波峰、波谷、波侧壁以及端部直线 段等不同部位,测试显微硬度(维氏硬度),加载载 荷 200gf,加载保持时间 10s,每个部位选取 5 个测点 测试。从图 6 中可以看出,相对于端部直线段的显微 硬度(平均值为 189Hv),波纹管的波峰、波谷及波 侧壁处的显微硬度值都出现了明显的增大。其中,波 峰处的显微硬度值最大(平均值达到 279Hv),波谷 处的显微硬度值次之(平均值达到 211Hv)。在波纹 管的成型过程中,波峰、波谷及波侧壁均发生了明显 的塑性变形;波峰处的壁厚减薄量最大,发生的塑性 变形最大,材料发生显著的形变强化,从而导致波峰 处的显微硬度增大也最显著,形成良好的对应关系。



4 大直径不锈钢波纹管的性能考核与分析

为了满足重型运载火箭增压输送系统管路对补偿 器波纹管的安装补偿能力和服役应力补偿能力,需要 开展波纹管的液压强度试验、气密试验、液氮冷冲击 试验、机械刚度测试以及位移疲劳试验和极限拉伸试 验等试验项目考核。

## 4.1 大直径不锈钢波纹管液压强度及气密试验考核

图 7 是大直径不锈钢波纹管的液压强度试验和气 密试验过程。通过液压机下行至与波纹管的端部接触, 对波纹管进行限位使其保持在自由长度,在波纹管内 部缓慢充液压至 2.25MPa 并保压 5min,未发生泄漏和 失稳现象,液压试验系统的压力表也未出现压降。泄 压后测量波纹管的波距,在不同位置处测量波距均未 出现超过 1.0mm 的残余变形。将波纹管烘干,通过液 压机下行至与波纹管的端部接触,对波纹管进行限位 使其保持在自由长度,在波纹管内部缓慢充气压至 1.5MPa 并保压 5min,未发生泄漏和失稳现象,气密试 验系统的压力表也未出现压降。由此可见,大直径不 锈钢波纹管满足设计指标中关于液压强度和气密性试 验的考核要求。



图 7 大直径不锈钢波纹管的液压强度试验和气密试验过程

# 4.2 大直径不锈钢波纹管的低温冷冲击试验考核

将大直径不锈钢波纹管浸入液氮槽,保持液面高 于波纹管的条件浸泡 10min,使波纹管充分冷却;然 后,取出波纹管并将其恢复至室温,再重新浸入液氮 槽并保持液面高于波纹管的条件浸泡 10min。将经过 两次浸泡液氮的波纹管按照 NB/T 47013.5—2015《承 压设备无损检测 第5部分:渗透检测》的要求对波纹 管表面进行着色检查。从图8中的试验过程及波纹管 的表面状态可以看出,波纹管外观无变形且未出现表 面裂纹等其他异常现象,表面着色检查的结果达到I 级的性能要求,灵敏度等级为C级。



图 8 大直径不锈钢波纹管的液氮冷冲击试验及其在试验后进行着色检查的过程

## 4.3 大直径不锈钢波纹管的机械刚度测试与分析

根据 Q/Dy89—2010《弹(箭)体波纹管制造验收 技术条件》和 GB/T 12777—2019《金属波纹管膨胀节 通用技术条件》的规定,开展波纹管的机械刚度的测 试,获取波纹管的机械刚度值,判断其补偿能力。将 波纹管放置于刚度试验机的测量平台上,上端放置压 盘,预测试(压缩 2mm 后恢复至初始状态)一次后再 进行正式测试。在试验过程中,均匀加载,避免波纹 管出现平面或柱状的失稳现象。将波纹管缓慢压缩 10mm,记录测试过程中的载荷值、位移值和时间。图 9 是大直径不锈钢波纹管的机械刚度试验过程及"位移 -载荷"关系图。根据拟合计算,大直径不锈钢波纹管 的拟合刚度值为 630N/mm,满足设计提出的刚度值要 求。并且,根据重型运载火箭初步的贮箱压力和液柱 压力计算,在该机械刚度的条件下波纹管将产生 30mm 的伸长量。



图 9 大直径不锈钢波纹管的刚度试验

#### 4.4 大直径不锈钢波纹管的位移疲劳性能考核

根据 Q/Dy89-2010《弹(箭)体波纹管制造验收 技术条件》和 GB/T 12777-2019《金属波纹管膨胀节 通用技术条件》的规定,开展大直径不锈钢波纹管的 位移疲劳试验,考核其在室温条件下加载至工作压力 后的位移疲劳性能。为了实现波纹管内部容腔体积不 变、内部充压压力值不变,采用2个波纹管组对的方 式进行位移疲劳试验。图 10 是大直径不锈钢波纹管组 对进行位移疲劳试验的过程。将2件波纹管对接并安 装在专用位移疲劳试验工装上,初始状态是下波纹管 为自由长度状态而上波纹管为拉伸 60mm 的状态,当 位移疲劳试验工装的中间板向上运动 60mm 时,则为 上波纹管处于自由长度状态而下波纹管为拉伸 60mm 的状态。对波纹管的内部缓慢充液压至1.5MPa,并且 设定位移循环速率小于 25mm/s。在位移疲劳试验过程 中,每进行50次位移循环后暂停试验,并采用皂泡法 及压力表压降情况检查波纹管的气密性,未发生泄漏 再继续进行位移疲劳试验。经过 300 次循环的位移疲 劳试验,大直径不锈钢波纹管未出现异常变形,气密 性检查也未出现泄漏。为了进一步考核大直径不锈钢 波纹管的极限拉伸性能,继续缓慢拉伸以增大波纹管 的拉伸位移量,当波纹管拉伸至 120mm 位移时,波纹 管的端波开始发生平面失稳。由此可见,大直径不锈

钢波纹管的补充能力远远超出实际需求的约 30mm 的 补偿量。



图 10 大直径不锈钢波纹管组对位移疲劳试验

#### 5 结束语

为了满足重型运载火箭的大直径输送管路对大直 径波纹管的需求,本文开展了大直径不锈钢波纹管的 成型工艺研究并且针对服役工况条件开展了性能测试 与分析。通过大直径波纹管成型模具的设计以及成型 工艺的优化,突破了通径达到Φ470mm 且单层壁厚为 1.3mm 的双层大直径厚壁高刚度不锈钢波纹管的精密 成型技术,波纹管成型精度满足设计指标及标准的要 (下转第18页)