

高压金属软管应力及参数敏感度分析

闫松¹, 谭永华², 陈建华¹

(1.西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2.航天推进技术研究院, 陕西 西安 710100)

摘要: 某型号发动机热试车考核中高压金属软管多次出现破坏。通过建立软管有限元模型, 采用非线性有限元分析了软管应力分布和各部分承载特点, 判断波峰处轴向应力是影响软管结构强度的主要因素, 有限元计算结果和试验破坏部位一致, 表明有限元模型的合理性。在此基础上, 通过参数化建模、设计中心复合实验和进行参数敏感度分析, 得出影响波峰处最大轴向应力的敏感参数, 为结构参数优化提供了依据。

关键词: 高压金属软管; 波纹管; 应力分布; 敏感度分析

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2013) 05-0060-05

Stress and parameter sensitivity analysis of high-pressure metal hose

YAN Song¹, TAN Yong-hua², CHEN Jian-hua¹

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

2. Academy of Aerospace Propulsion Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: Leakage happened to the high-pressure metal hose for several times in the hot test of a certain rocket engine. The stress distribution and bearing characteristics of the hose were analyzed with nonlinear FEM after the finite element model of the hose was established. It is found that the axial stress at the crown is the main factor affecting the strength of the hose. The results of the finite element calculation were consistent with the leakage position in the test, which shows that the finite element model is right. On this basis, through the parameterized modeling, the central composite experiment was designed, the parameter sensitivity analysis was performed, and the sensitive parameters affecting the maximal axial stress at the crown was acquired. The achievement can be used for optimization of structural parameters.

Keywords: high-pressure metal hose; bellows; stress distribution; sensitivity analysis

收稿日期: 2013-03-13; 修回日期: 2013-03-28

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2009JY03)

作者简介: 闫松 (1988—), 男, 硕士研究生, 研究领域为液氧煤油发动机动力学

0 引言

高压金属软管由波纹管、金属网套和接头三部分构成, 其中波纹管是软管的核心部件, 起挠性作用^[1]。波纹管是管壁具有褶皱形状的圆柱形薄壁件, 通过波纹处的变形来吸收管路的变形, 其常用波形有 U 形、 Ω 形、C 形和 S 形等。U 形截面允许较大的挠曲, 但承压能力相对较低, 一般采用多层结构和外加强的办法提高承压能力。多层波纹管与单层波纹管相比, 既能承受高压, 又有高柔性, 特别在高压下有大大补偿量、低弹性力、高疲劳寿命等特点^[2]。因此, 该高压金属软管的核心部件波纹管采用多层 U 形波方案。液体火箭发动机领域使用的波纹管吸收了工业所用波纹管的生产设计经验, 但在相同的尺寸下, 对其承载能力的要求比一般工业软管要高得多^[3]。

高压金属软管工作时, 其核心部件波纹管局部处于塑性变形范围内, 必须考虑材料非线性的影响。多层波纹管层与层之间, 波纹管与外层金属网套之间, 存在摩擦接触, 必须考虑接触非线性的影响。目前对单层波纹管的研究较多^[4-6], 文献 [7] 分别建立了两种高压软管接头组件的有限元模型, 对其装配、扣压和工作状态进行模拟, 得到了软管的应力分布。文献 [8] 计算了双层波纹管在轴向拉伸、内压及联合载荷下的应力分布, 分析了在不同工况下的应力分布规律, 有限元计算应力分布趋势与实验值基本吻合, 计算值与实测值误差在 15% 以内。文献 [9] 采用非线性有限元法研究了金属软管在横向以及内压载荷下的稳定性问题。

为了探讨内压载荷下高压金属软管的结构特性, 本文采用非线性有限元法建立了软管有限元模型, 得到了无加强和有加强两种方案下软管的应力分布规律, 分析软管结构各部分承载能力, 进行参数敏感度分析, 得出影响波峰处最大轴向应力的敏感结构参数, 为金属软管的改进和设计提供参考。

1 有限元应力分析

1.1 软管几何模型

高压金属软管采用三层环形波波纹管, 带金属网套结构: 方案(a)不加铠装环; 为了提高强度, 方案(b)在波谷处加铠装环。图 1 为两种方案的二维轴对称几何模型。

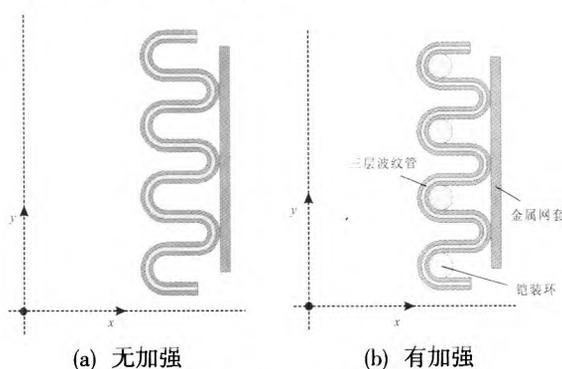


图 1 两种结构的金属软管

Fig. 1 Two metal hoses with different structures

1.2 非线性弹塑性模型

波纹管材料为 00Cr17Ni14Mo2, 在常温下有较好的力学性能 (如表 1 所示)。

有限元计算时, 材料本构关系采用双线性等向强化模型, Von-Mises 屈服准则^[10]。

表 1 00Cr17Ni14Mo2 力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of 00Cr17Ni14Mo2

弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	屈服极限/MPa	强度极限/MPa	伸长率/%	断面缩减/%
195	0.3	8 030	310	620	30	40

1.3 网格及载荷条件

由于数值计算中涉及塑性和接触等非线性问题，为了提高计算效率，采用二维轴对称有限元模型。使用 PLANE183 单元划分网格。PLANE183 单元是一个高阶 2 维 8 节点轴对称单元，具有二次位移函数，能够很好地适应不规则模型，具有模拟塑性、应力刚化、大变形和大应变能力。

波纹管层与层之间，波纹管与外层金属网套之间定义摩擦接触，由于各层波纹管的材料均相同，该接触为柔体-柔体接触，定义对称接触，即波纹管层与层互为目标面和接触面，摩擦系数为 0.15。为了模拟软管真实受力情形，波纹管的上下端面及网套上下两条边的轴向位移约束为 0，径向位移自由，在波纹管内壁面施加 20 MPa 的均布压力。

1.4 有限元结果与分析

有限元计算结果表明，软管周向、径向应力较小，而轴向应力较大。图 2 是软管轴向应力云图。从图中可以看出，软管波峰、波谷处轴向应力较大，其他区域轴向应力较小。如图 3，内压作用在波纹管上时，导致每一层波纹管波峰的内表面受轴向拉应力，外表面受轴向压应力，同理，波谷的内表面受轴向拉应力，外表面受轴向压应力。轴向拉应力的最大值为 391.47 MPa，出现在波峰位置，远远高于屈服极限 310 MPa，是软管强度校核需要重点考虑的部位。

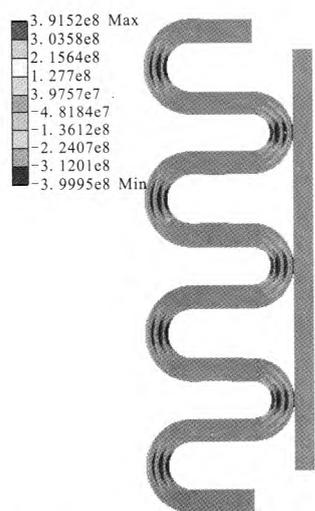


图 2 轴向应力云图 (单位: Pa)

Fig. 2 Axial stress distribution

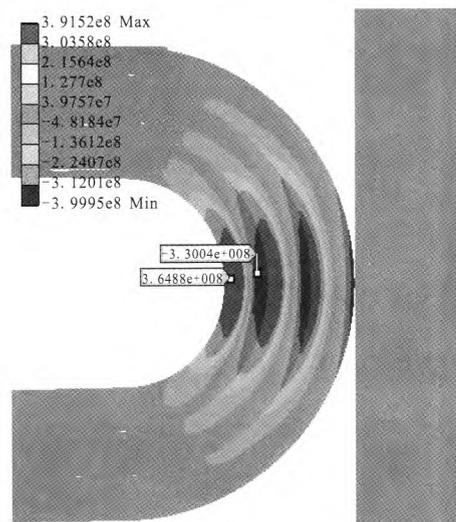


图 3 波峰处应力云图 (单位: Pa)

Fig. 3 Stress distribution at crown

为了仔细考察软管结构的薄弱环节，分别在软管的波峰和波谷位置取两条路径。波纹管壁厚为 h ，绘制的轴向应力随路径的变化曲线见图 4 所示。从应力线性化结果可以看出，波峰和波谷处轴向应力量值水平相当，不同的是波峰处轴向应力大部分为正，即拉应力；而波谷处轴向应力大部分为负值，即压应力。软管正常工作时承受脉冲压力载荷，压应力可以提高波谷处疲劳强度，波峰处受到了接近其疲劳极限的交变应力作用，多次脉冲载荷下软管疲劳开裂。图 5 为某次试车后软管断裂形貌，断裂处位于距离法兰焊接第 4 个波峰处，开裂处位于波峰，方向沿波纹周向。对断口进行扫描电镜观察，断口呈多源特征，断裂方向为由波纹管内壁向外壁扩展，这和有限元计算结果波峰处轴向拉应力最大相一致。

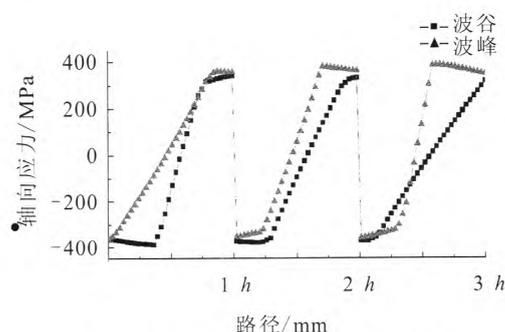


图 4 波峰和波谷处应力线性化结果

Fig. 4 Results of linearized stress at crown and root

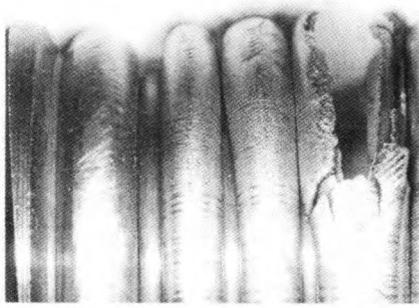


图 5 某次试车软管断裂形貌
Fig. 5 Picture of cracked hose

图 6 (a)为 20 MPa 内压下软管的径向位移云图。连接波峰和波谷的直边段处径向位移较大, 而波峰处径向位移较小 (图示波峰处径向位移为 $2.09e-4$ mm), 说明波纹管的薄壁褶皱特征使得波纹管的径向刚度较大, 在内压作用下向外膨胀较小。波峰与金属网套之间接触较弱, 软管压力主要靠波纹管自身吸收, 金属网套的作用主要是防止波纹管在内压下失稳。而在波谷的部分区域, 受到直边段压力的影响, 反而出现了径向位移为负的情况。图 6(b)给出了内压作用下, 波纹管横截面变形的示意图。

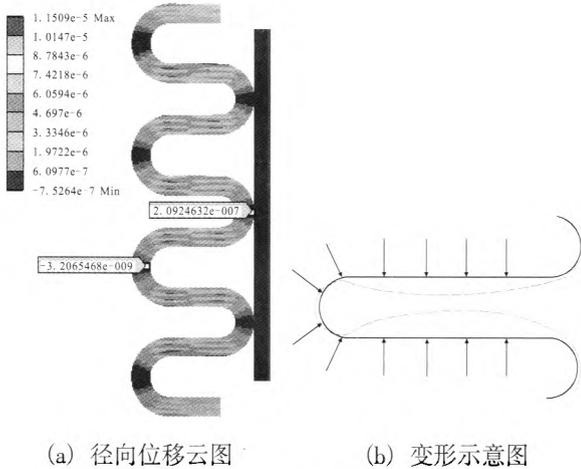


图 6 软管变形 (单位: m)
Fig. 6 Deformation of hose

波峰处轴向应力较大, 是软管工作时的薄弱环节, 为了考察铠装环加入对结构的影响, 对比分析两种方案最内层波纹管的轴向应力, 如图 7 所示。从图 7 中可以看出, 加入铠装环后, 波谷和直边段处的轴向应力得到明显改善。而波峰处

的轴向拉应力较没有铠装环时减少了大约 30 MPa, 说明铠装环的加入可以大幅改善波谷和直边段的受力, 对波峰处受力改善相对较小, 波峰仍然是波纹管工作的薄弱环节。

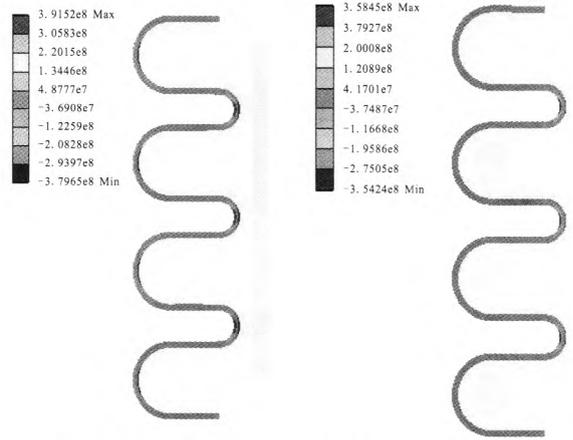


图 7 两种方案最内层波纹管轴向应力 (单位: Pa)
Fig. 7 Axial stress of bellows in innermost layer

2 参数敏感度分析

波纹管是软管的核心部件, 其结构参数由 5 个独立的设计变量确定, 分别是: 波纹管内半径 R ; 波谷内半径 r_1 ; 波峰内半径 r_2 ; 壁厚 h ; 直边段长 L 。图 8 为波纹管参数化几何模型。

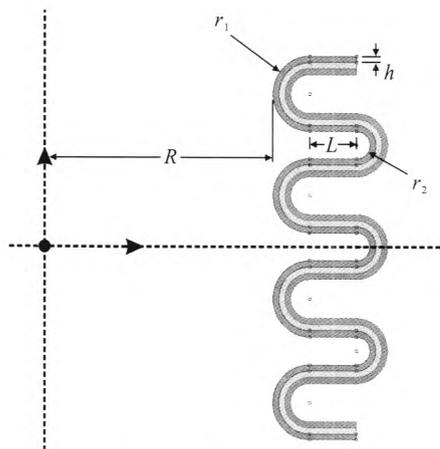


图 8 参数化模型
Fig. 8 Parametric model

每个参数在现有软管结构尺寸基础上变化 10%。通过中心复合试验设计方法在其组成的决

策空间中构造出 53 个试验点, 得到波峰处最大轴向应力对各个设计变量的响应敏感幅度如图 9。

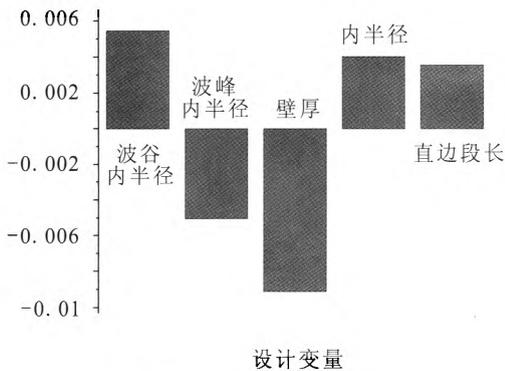


图 9 轴向应力参数敏感度

Fig. 9 Parameter sensitivity of axial stress

从图 9 可以看出, 波纹管壁厚变化对轴向应力影响最大。壁厚增加, 轴向应力显著下降。后续设计使用的波纹管壁厚在原尺寸基础上增加了 10%, 提高了软管强度。波谷半径增加, 由于内压作用面积增加, 轴向应力增加。波峰半径增加, 减小了波峰处应力集中, 轴向应力减小。

3 结论

1) 波纹管波峰处轴向应力远大于周向和径向应力, 是软管工作时的危险点。

2) 铠装环可以大幅度改善波谷和直边段的受力状况, 对波峰处的受力改善较小, 波峰依然是软管工作时危险点。

3) 波纹管的薄壁褶皱特征使其径向刚度较大。内压作用下, 最外层波纹管向外膨胀较小, 与外层金属网套之间接触较弱。

4) 波峰处最大轴向应力对壁厚变化最为敏

感, 增加壁厚可显著改善波纹管波峰处轴向应力。

参考文献:

- [1] 葛子余. 金属软管[M]. 北京: 宇航出版社, 1985.
- [2] 李永生, 李建国. 波形膨胀节实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [3] ECKARDT D. Liquid rocket lines, bellows, flexible hoses, and filters, NASA-SP-8123[R]. USA: NASA, 1978.
- [4] 陈晔, 李永生, 顾伯勤, 等. 用 ANSYS 软件对 U 形波纹管的有限元分析[J]. 压力容器, 2000, 17(3): 34-36.
- [5] 贾志刚, 寿比南, 梅林涛. 有限元方法在膨胀节强度分析中的应用[J]. 压力容器, 2001, 18(4): 43-45.
- [6] 张兵, 王心丰. 用非线性有限元分析波纹管的稳定性[J]. 压力容器, 2001, 18(1): 40-44.
- [7] 杜金强, 朱伯伟, 王鹏, 等. 两种高压软管接头组件的非线性有限元对比分析 [J]. 机械设计. 2010, 27 (11): 83-86.
- [8] 杨义俊, 王心丰. 多层波纹管非线性有限元应力分析[J]. 压力容器, 2003, 20(9): 13-16.
- [9] WILLIAMS D K. Catastrophic failure of flex hose bellows due to lateral offset & internal pressure [C]// 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference. San Antonio, Texas: ASME, 2007:1-9.
- [10] 刘伟, 高维成, 于广滨, 等. ANSYS 12.0 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [11] 李永生. 波形膨胀节实用技术-设计、制造与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [12] 晏飞. 纤维缠绕/金属内衬复合材料气瓶应力分析[J]. 火箭推进, 2011, 37(1): 46-50.
- [13] 杨义俊. 基于 ANSYS 的金属软管非线性有限元应力分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- [14] 孔凡超, 沈冰妹, 胡旭坤. 有限元分析在大推力火箭动力系统试验台承力架结构优化中的应用[J]. 火箭推进, 2011, 37(5): 41-46.

(编辑: 王建喜)