

电缆密封结构的有限元分析

白 天¹ 王立峰² 高 健² 吴福迪² 曲衍敏³

(1 海军驻北京地区特种导弹专业军事代表室,北京 100076)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

(3 北京宇航系统工程研究所,北京 100076)

文 摘 针对新型电缆密封结构的密封挡板、密封结构板、橡胶密封板及其连接螺栓建立了有限元模型,考虑了几何、边界及材料非线性因素,计算了模型在螺栓预紧力和气压作用下电缆密封结构的应力和变形,校核该结构的强度是否满足设计要求。结果表明,密封结构的局部出现屈服,需更换更高强度的材料;密封结构密封性能良好,密封性能试验验证了计算结果的合理性。

关键词 电缆,密封,非线性,橡胶,有限元

Finite Element Analysis of Cable Seal Structure

Bai Tian¹ Wang Lifeng² Gao Jian² Wu Fudi² Qu Yanmin³

(1 Navy Stationed in Beijing Area of Special Professional Military Representative of the Missile Room, Beijing 100076)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(3 Beijing Institute of Aerospace System of Engineering Research, Beijing 100076)

Abstract Aimed at a new type of cable seal structure, the finite element model of sealing baffle plate, sealing plate, rubber plate and bolt were established. Considering the geometric nonlinear, boundary nonlinear and material nonlinear, the stress and strain of the structure under the action of pressure and bolt load were calculated. Moreover, the stiffness of the structure was investigated in the paper. The results show that the local stiffness of cable seal structure is yield and the material should be changed; Moreover, the sealing of the structure is finer, which is proved reasonable by the sealing experiment.

Key words Cable seal, Nonlinear, Stiffness, Rubber, Finite element

0 引言

在各种工业应用领域,经常涉及到线缆(电缆、光缆、绳线)或管通过通孔密封问题,一般应用于密封低压或可靠性要求不高的领域,经常采用灌胶或橡胶堵块进行密封,也有采用橡胶垫加螺母的密封形式。采用灌胶密封可以适应多线缆密封的要求,其缺点是安装工艺较复杂,线缆出现问题后维修不便;采用橡胶堵块只能满足低压密封要求;橡胶垫加螺母的密封形式密封可靠,但其线缆必须穿过螺母,安装和维修不方便。专利密封孔的密封装置(ZL200610057128.7)^[1]提供一种可密封一个或多个延伸件穿过的物体上的孔的密封装置,首先将一个或多个延伸件装入弹性密封件的孔中;其次将弹性密封件装入辅助连接装置的孔中,两个挡板依靠压紧装置

给弹性密封件提供挤压力。弹性密封件与辅助连接装置和延伸件的接触部位、弹性密封件的开缝部位涂具有润滑作用的胶黏剂,辅助连接装置采用带O型密封件或垫片法兰连接、焊接或胶结的密封连接方式连接并覆盖于被密封的物体的孔上,形成完整的孔密封装置。

航空、航天、船舶、电力等多个行业需要对铺设的穿墙(壁)电缆进行密封^[2-3],以达到防水、防辐射、防动物破坏等要求,保证系统正常工作。一般可以选取不同类型的填料、黏合剂、橡胶作为密封材料,而使用合适的电缆密封装置,可以显著提高密封的可靠性。本文对一种适应多根电缆密封的水下穿墙电缆密封结构进行详细的介绍,采用有限元方法对密封结构的应力应变进行分析,并对其密封性能进行试验。

收稿日期:2011-09-30

作者简介:白天,1976年出生,硕士,主要从事航天复合材料技术研究

1 电缆密封结构有限元分析

1.1 结构简述

为了满足水下多根穿墙电缆密封要求,使用硅胶材料、金属结构板设计了专用密封结构。图 1 给出适应多根电缆密封的水下穿墙电缆密封结构。

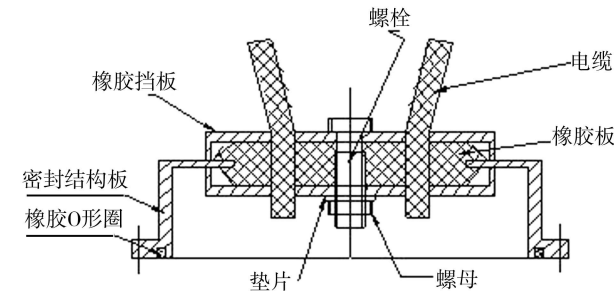


图 1 电缆密封结构示意图

Fig.1 Figure of cable seal structure

1.2 有限元模型

1.2.1 模型建立

将整个电缆密封结构分为密封结构板、密封挡板、密封橡胶板和连接螺栓独立建模,最后将其组合成完整的电缆密封结构,实体模型如图 2 所示。

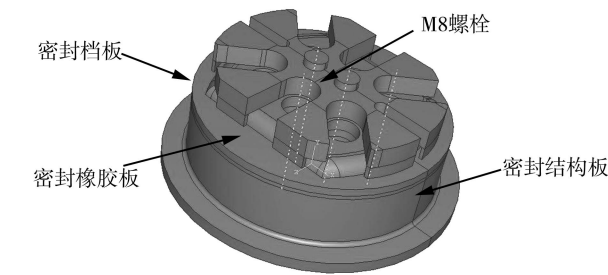


图 2 电缆密封结构实体模型

Fig.2 Model of cable seal structure

密封结构板、密封橡胶板、密封挡板及其连接螺栓间存在复杂的接触关系,接触计算对网格划分要求较高(既要保证计算的精度,又要保证离散几何的精度),所以在可能发生接触的区域采用尽可能细的六面体网格,适当放宽其他区域的网格要求,尤其是远离关注区域的部分,采用较粗的六面体单元进行离散。

1.2.2 材料参数

密封结构板采用铝合金^[4],其参数为: $E=70$ GPa, $\mu=0.33$, $\sigma_{0.2}=305$ MPa, $\sigma_b=440$ MPa。螺栓和密封结构挡板材料为不锈钢,其参数为: $E=210$ GPa, $\mu=0.25$, $\sigma_{0.2}=210$ MPa, $\sigma_b=540$ MPa。 $\mu=0.33$ 。橡胶密封板是超弹性材料,其应力—应变行为呈超弹性。使用 Abaqus 计算时假设:(1)材料是弹性各向同性;(2)考虑几何非线性效应,其应力—应变曲线见图 3。

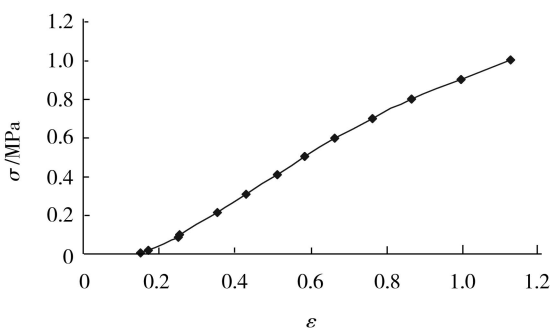


图 3 橡胶材料应力应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of rubber

1.2.3 边界条件及载荷

(1)在螺栓上施加很小的预紧力,让各个接触关系平稳地建立起来。

(2)将螺栓上的预紧力增加到实际工况。

M8 螺栓的 $Q_p=10$ N·m,拧紧力矩产生的预紧力 T 的大小为

$$T = \frac{Q_p}{k \cdot d} = \frac{10}{0.18 \times 8 \times 10^{-3}} = 6944.4(N) \quad (1)$$

式中, k 为拧紧力矩系数(0.18~0.22), k 取 0.18, d 为螺栓直径 8 mm。

(3)施加 0.4 MPa 气压。

边界条件的设置:

(1)施加辅助约束消除刚体位移,在底座底部自由度约束;

(2)接触属性的设置,在密封结构板、密封挡板及其连接螺栓间设置接触连接,法向为“硬”接触,切向为库伦摩擦接触,摩擦因数设为 0.2。

建模和计算所用的软件为 Abaqus 程序^[5]。

1.3 计算结果及分析

电缆密封结构在螺栓预紧力及 0.4 MPa 气压作用下的应力如图 4 所示,变形如图 5 所示。由图可见,电缆密封结构应力偏大的部位处于密封结构板与密封挡板、密封挡板与其连接螺栓处,最大变形出现在密封橡胶上。

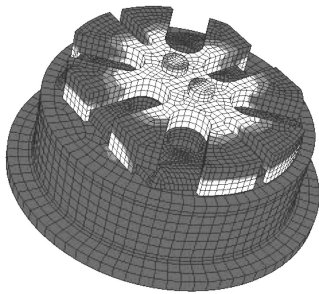


图 4 电缆密封结构应力

Fig.4 Stress of cable seal structure

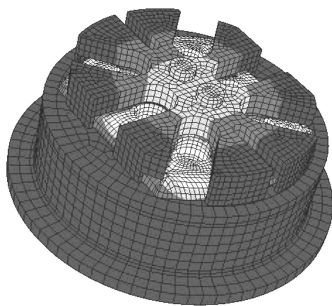


图5 电缆密封结构变形

Fig. 5 Deformation of cable seal structure

1.3.1 密封结构板和密封挡板计算结果

电缆密封结构板在螺栓预紧力及 0.4 MPa 气压作用下的应力云图及变形如图 6 所示。电缆密封结构板上的最大应力为 115 MPa, 远低于铝合金材料的屈服强度 305 MPa; 密封结构板的最大变形出现在结构板中间开口边缘处, 最大变形为 0.08 mm。

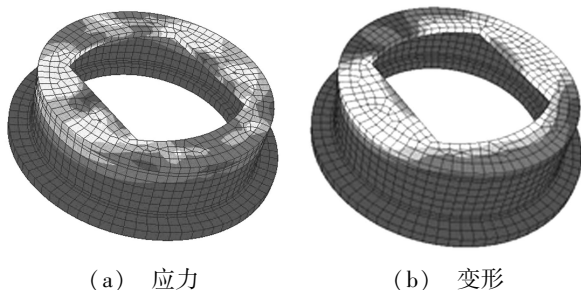


图6 电缆密封结构板应力及变形

Fig. 6 Stress and Strain of sealing plate

电缆密封挡板在螺栓预紧力及 0.4 MPa 气压作用下的应力云图如图 7 所示。

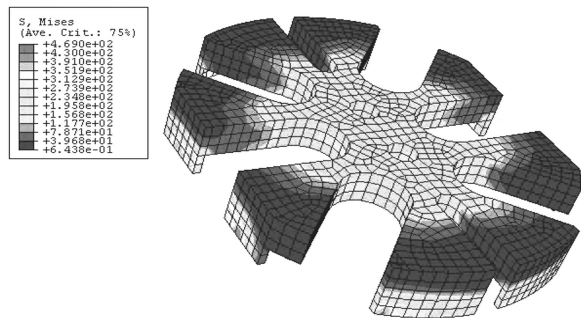


图7 电缆密封挡板应力

Fig. 7 Stress and Strain of sealing baffle plate

等效塑性应变如图 8 所示, 材料中的等效塑性应变用来表示材料的非弹性变形的标量, 该变量大于零则表示材料已经屈服。除去由于网格的畸变引起的应力集中单元, 得到电缆密封挡板上的最大应力为 385 MPa, 高于不锈钢材料的屈服强度 210 MPa, 低于其破坏强度 540 MPa, 出现在密封挡板与密封结构板

接触的部位。从图 8 可以看出, 密封挡板与密封结构板接触的部位以及密封挡板与其连接螺栓部位存在明显屈服。当应力最大值高于材料的屈服强度低于材料的破坏强度时, 应考虑更改为强度更高的材料。

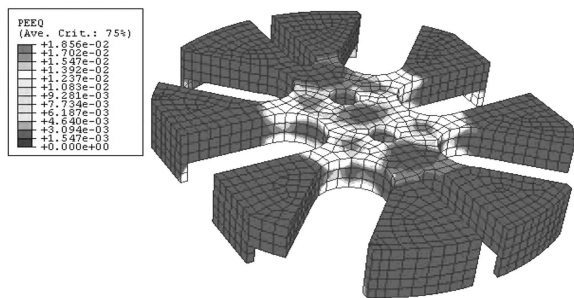


图8 电缆密封挡板等效塑性应变

Fig. 8 PEEQ of sealing baffle plate

1.3.2 螺栓校核

M8 螺栓在 10 N·m 预紧力及 0.4 MPa 气压作用下的应力云图及等效塑性应变见图 9。

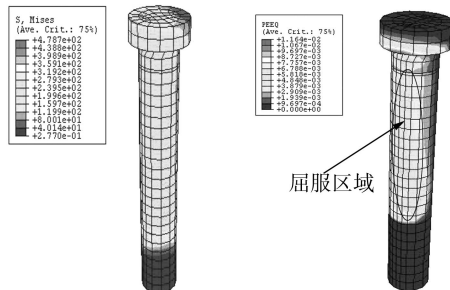


图9 螺栓强度

Fig. 9 Stiffness of bolt

除去由于网格的畸变引起的应力集中单元, 得到螺栓上的最大应力为 230 MPa; 螺栓内侧应力偏大, 局部区域存在屈服, 但只集中在螺栓表面。

1.3.3 橡胶密封板

图 10 给出只在 10 N·m 螺栓预紧力作用下橡胶密封板的应力云图, 橡胶密封板与密封结构板接触部位应力为 0.1 ~ 0.16 MPa。

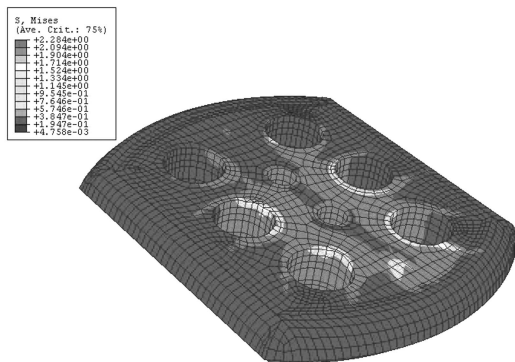


图10 螺栓预紧力作用下橡胶密封板的应力云图

Fig. 10 Stress of rubber plate under the action of bolt load

在装配状态下,橡胶密封板受密封结构板和密封挡板约束,连接挡板上的螺栓通过密封挡板将拧紧力矩产生的压力传递到橡胶密封板,从而在橡胶密封板与电缆及密封结构板间的密封面上产生一定的初始密封预紧力。

图 11 给出 0.4 MPa 气压作用下橡胶密封板的应力云图,橡胶密封板与密封结构板接触部位应力为 0.38 ~ 0.97 MPa。当密封结构受压时,外部压力通过橡胶密封板也传递到密封面上,产生附加密封预紧力,密封结构密封性能良好。

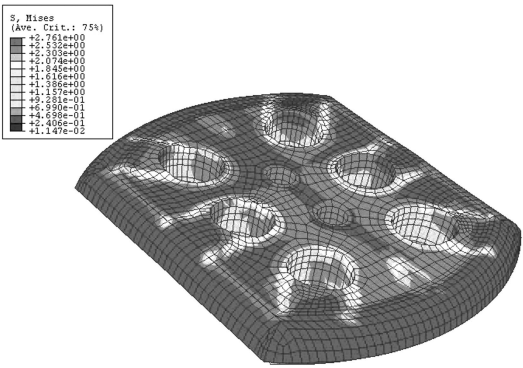


图 11 施加气压后橡胶密封板的应力云图

Fig. 11 Stress of rubber plate under the action of pressure

2 密封试验

在高温 150℃ 和低温 -40℃ 压力试验前,分别将试验件在试验箱中恒温 1 h,确保密封结构温度恒定,然后在恒温条件下施加气压,采用氦质谱检漏仪测试密封结构气密性。试验温度为 -40 ~ 150℃,压力为 0 ~ 0.4 MPa,时间 1 h,试验气体为氦气。试验系统如图 12 所示。

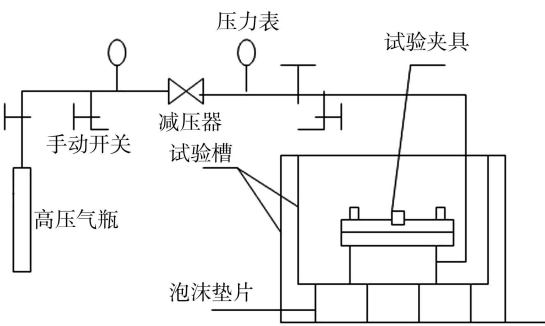


图 12 试验系统

Fig. 12 System of experiment

选用两种典型电缆密封结构件(表 1)。装配贮存 6 个月后,在常温、150℃、-40℃ 条件下,测试漏率小于 10^{-4} Pa·m/s。试验后分解密封结构,观察橡胶密封板外观,无破坏损伤,说明橡胶材料性能满足密封结构要求。

表 1 两种典型电缆密封结构件状态

Tab. 1 Two type of cable seal structure

密封件	密封通孔直径/mm	密封电缆参数
1	150	6 根 $\Phi 15$ mm 电缆
2	150	5 根 $\Phi 15$ mm, 1 根 $\Phi 5$ mm 电缆

3 结论

(1)在螺栓预紧力和 0.4 MPa 的气压作用下,电缆密封挡板与密封结构板接触部位以及密封挡板与其连接螺栓部位存在屈服,当应力最大值高于材料的屈服强度低于材料的破坏强度时,应考虑更改为强度更高的材料。

(2)螺栓最大应力为 230 MPa,高于屈服强度,局部区域存在屈服。但屈服区域仅集中在螺栓内侧,且处于螺栓表面,螺栓整体强度是可靠的。

(3)当密封结构受压时,外部压力通过橡胶密封板传递到密封面上,产生附加密封预紧力。橡胶密封板计算结果显示设计的密封结构密封性能良好,密封性能试验验证了计算结果的合理性。

参考文献

[1] 吴福迪,等. 密封孔的密封装置[P]. 发明专利, ZL200610057128. 7

[2] 李雨康. 船舶电缆密封技术[J]. 粘接, 2002, 23(3): 45-47

[3] 王佩龙,等. 电缆隧道入口处堵水装置[J]. 电线电缆, 2000(4): 30-33

[4] 导弹结构强度计算手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978: 86

[5] Abaqus 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 332

(编辑 李洪泉)