

文章编号:1674-8190(2017)02-130-05

# 直升机中防锈螺栓的有限元建模与 强度计算方法研究

韩观林,李成虎,孙一方

(南昌航空大学 飞行器工程学院,南昌 330063)

**摘要:** 目前,国内外关于带有储油孔和螺旋导油槽的螺栓的强度问题的研究较少,为了获得该类防锈螺栓在工作受载时的应力、应变情况并研究其承载能力,提出一种关于该类防锈螺栓强度的折减计算方法,通过有限元软件 Patran/Marc 对其进行有限元建模与强度分析。结果表明:采用渐进失效与最大应力准则的结果相对没用采用渐进失效的结果减小较大,采用折减计算方法得出的结果与不采用折减计算得出的结果误差较小,验证了该防锈螺栓折减计算方法的可靠性,简化了该防锈螺栓在工程应用中的强度分析问题。

**关键词:** 防锈螺栓;螺旋导油槽;有限元建模;强度分析;折减计算

**中图分类号:** V215.2

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2017.02.003

## Finite Element Modeling and Strength Analysis of Anti-rust Bolts in Helicopter

Han Guanlin, Li Chenghu, Sun Yifang

(School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** A finite element model of the anti-rust bolts with oil reservoir and helical groove is developed and its strength is analyzed by Patran/Marc to obtain its stress distribution and bearing capacity. In the strength analysis, a reduction calculation method of the rust bolts is proposed. Results show that the errors of the progressive failure analysis and the maximum stress criterion are smaller than that of the non-progressive failure analysis, and the results of reduction calculation are similar to the original results. The reliability of the reduction calculation method is verified which simplifies the rust bolt strength analysis in engineering application.

**Key words:** anti-rust bolts; helical groove; finite element modeling; strength analysis; reduction calculation

## 0 引言

直升机中的某些舱门不经常开关,致使其与机体的连接螺栓易生锈。例如维修舱门等,一旦维修舱门的螺栓锈死,将会给直升机的维护带来极大的不便,因此防锈成为诸如维修舱门螺栓等亟待解决的技术难题。

螺栓生锈,其实质是铁与空气中的氧气、水发

生了化学反应,要解决螺栓的防锈问题,隔绝空气和水是有效的手段。具体方法包括以下三种:一是直接在螺栓表面涂覆覆盖材料,二是采用防锈螺栓帽<sup>[1]</sup>,三是发明并使用新型防锈螺栓<sup>[2-3]</sup>。

关于普通螺栓的强度分析,国内外已进行了诸多研究,例如,袁桂芳<sup>[4]</sup>介绍了一种电测法,可对螺栓的应力、应变进行实时监测和失效分析;杜洪奎等<sup>[5]</sup>给出了一个可以计算螺栓应力分布的解析式;J. R. Cho 等<sup>[6]</sup>通过拉格朗日弹塑性有限元分析,研究了螺栓的力学性能;A. Du 等<sup>[7]</sup>研究了碳纤维增强聚合物螺栓连接的失效行为;M. A. Bradford 等<sup>[8-9]</sup>、Wu Z Q 等<sup>[10]</sup>和李德山等<sup>[11]</sup>分别研究了连接钢梁和混凝土柱的螺栓的有限元模型,并通过有

收稿日期:2016-12-12; 修回日期:2017-04-07

基金项目:南昌航空大学博士启动基金(EA201606185)

通信作者:李成虎,lichenghu111@126.com

限元分析讨论了螺栓的力学性能;何英等<sup>[12]</sup>、方栋等<sup>[13]</sup>和雷宏刚等<sup>[14]</sup>分别采用有限元软件 ANSYS 对螺栓的力学性能进行分析,而且他们关于高强度螺栓的应力集中问题的研究结果,对螺栓力学性能的改进和其在工程上的应用具有重要的指导意义。

然而,关于防锈螺栓的强度问题,尤其是带有储油孔和螺旋导油槽的螺栓的强度分析问题,国内外的研究还比较少。本文将介绍具有储油孔和螺旋导油槽的螺栓的有限元建模和强度分析。

## 1 具有储油孔和螺旋导油槽的螺栓的有限元建模

### 1.1 几何模型

由于存在三维螺旋导油凹槽,使得螺栓的几何模型不能在有限元软件中直接建立。本文利用 Catia 软件建立具有储油孔和螺旋导油槽的螺栓三维模型,如图 1 所示,螺杆长度为 50.0 mm、直径为 6.0 mm,螺旋导油槽宽度为 1.0 mm、深度为 0.5 mm,螺帽长度为 10.0 mm,储油孔直径为 3.0 mm、深度为 40.0 mm。

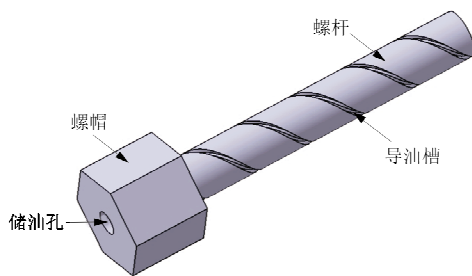


图 1 具有储油孔和导油槽的螺栓的几何模型

Fig. 1 Geometry model of the bolt with oil reservoir and helical groove

因为螺杆上的螺纹远离主要受剪区域,所以在其几何模型中并未画出。为了在有限元软件中划分网格方便,对螺栓的几何模型进行简化与分割,共分为两部分:一是螺栓的外层圆柱,其厚度与螺旋导油槽的深度相同,为 0.5 mm,其长度为 50.0 mm,如图 2 所示;二是螺栓的内圆柱,其直径为 5.0 mm,长度为 50.0 mm,储油孔直径为 3.0 mm,长度为 30.0 mm,如图 3 所示。

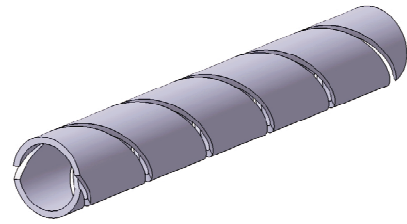


图 2 螺栓的外层圆柱

Fig. 2 Outer cylinder of the bolt



图 3 螺栓的内圆柱

Fig. 3 Inner cylinder of the bolt

### 1.2 有限元模型

将螺栓外层圆柱的几何模型导入 Patran 软件中进行网格划分,但该外层圆柱的几何模型不能进行映射网格划分(IsoMesh),只能采用自由网格划分,相应的网格质量也不高。在 Patran 中不能直接创建带有螺旋导油槽的三维实体几何模型,原因是在生成螺旋实体时,只能选择基面和导线,不能选择参考圆柱面,致使生成的螺旋实体会与参考圆柱面发生分离,如图 4 所示。

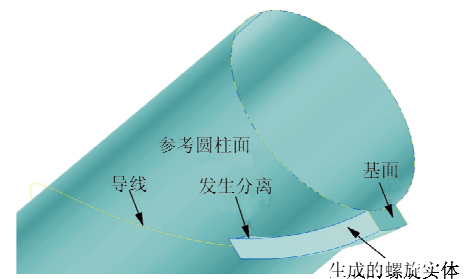


图 4 Patran 中生成的螺旋实体

Fig. 4 Helical entity built in Patran

本文采用间接方法在 Patran 中创建具有螺旋导油槽的三维实体模型,具体步骤为:①将螺栓外层圆柱几何模型分割成五等份,每份长度为 10.0 mm;②通过每一等份的实体边界线生成导线和基线,如图 5 所示(每等份有两部分,取其中一个部

分),生成的导线为内侧导线 1、2 和外侧导线 1、2,生成的基线为内侧基线和外侧基线;③由内侧基线、内侧导线 1 和内侧导线 2 生成曲面 1,同理生成曲面 2,如图 6 所示;④由曲面 1 和曲面 2 生成螺旋实体;⑤采用同样的方法生成其余九部分的螺旋实体。最终生成的螺旋实体可以进行映射网格划分且网格质量较好,如图 7 所示。

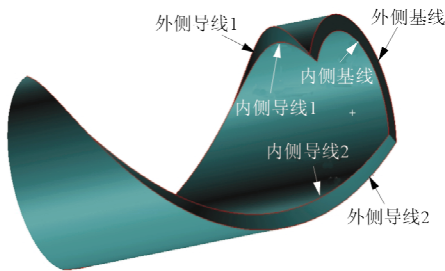


图 5 导线和基线  
Fig. 5 Guiding line and baseline

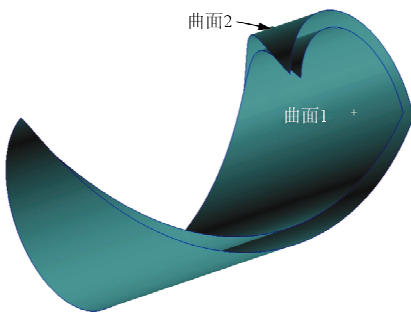


图 6 螺旋曲面  
Fig. 6 Helical surface

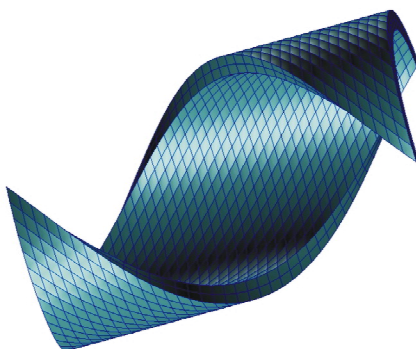


图 7 螺旋实体的有限元网格  
Fig. 7 Finite element mesh of helical entity

螺栓内圆柱的有限元模型网格划分较简单,此处不再赘述。把螺栓内圆柱的有限元模型与外层圆柱的有限元模型粘接(gluing)起来,便形成了螺

栓整体的有限元模型,如图 8 所示。

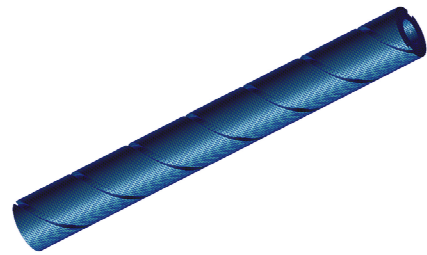


图 8 螺栓的有限元模型  
Fig. 8 Finite element model of the bolt

## 2 螺栓有限元分析

### 2.1 边界条件

螺栓套会对螺栓产生剪切作用,因此需要相应地约束螺栓有限元模型的边界条件。其边界条件为:约束螺栓两端长度均为 12.2 mm 区域的上半部分表面所有结点的径向位移自由度,螺栓中间 25.6 mm 区域的下半部分表面所有结点通过刚性约束单元 RBE2 与加载结点相连,螺栓的约束区域如图 9 所示。在加载结点上加竖直向上的 0.1 mm 位移,如图 10 所示。两端面所有结点也通过 RBE2 与相应的两个结点相连,约束这两个结点的轴向位移自由度。

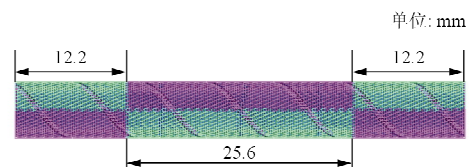


图 9 螺栓的约束区域  
Fig. 9 Restrict area of the bolt

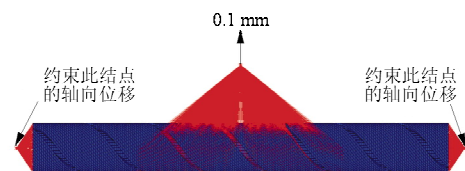


图 10 螺栓的部分约束条件  
Fig. 10 Partial restraints of the bolt

### 2.2 有限元计算结果及分析

材料的弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3,屈服极限为 882 MPa。模拟中设置材料的屈服应力点,所得未加入渐近失效分析的加载结点的载荷一位移曲线如图 11 所示。

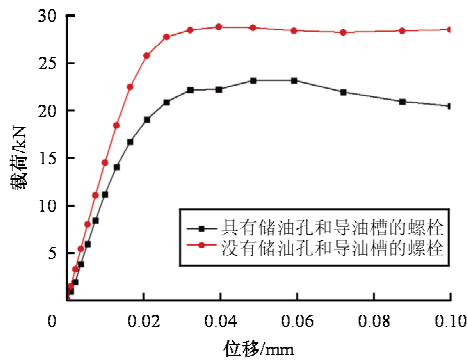


图 11 加载结点载荷-位移曲线  
Fig. 11 Load-displacement curves of the loading node

从图 11 可以看出:具有储油孔和导油槽的螺栓所能承受的最大载荷为 23 377 N,比没有储油孔和导油槽的螺栓所能承受的最大载荷减小了 19.5%;具有储油孔和导油槽的螺栓达到最大载荷的剪切位移更大。

在具有储油孔和导油槽的螺栓的有限元计算中加入渐进失效分析,失效准则采用最大应力强度准则,材料的强度为 1 078 MPa。在渐进失效分析中,材料在达到失效点之前均被认为是线弹性的,当失效发生时,单元刚度开始降阶,失效指数(FI)大于 1,材料的刚度开始下降,降低系数为  $r_i$ ,降低之后材料的弹性模量等于降低系数乘以原始弹性模量,在计算时,注意弹性模量类型应与降低系数类型相对应, $r_i$  的计算公式为

$$r_i = e^{1-FI} \quad (1)$$

采用渐进失效分析和最大应力准则后,得到的加载结点的载荷-位移曲线如图 12 所示。

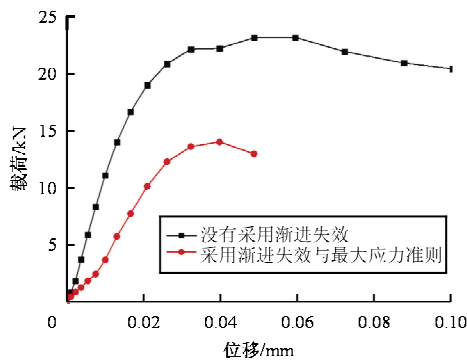


图 12 加载结点载荷-位移曲线  
(未采用渐进失效和采用渐进失效与最大应力准则)  
Fig. 12 Load-displacement curves of the loading node  
(progressive failure and maximum stress criterion & without progressive failure)

从图 12 可以看出:当加载结点的位移为 0.039 6 mm 时,载荷达到最大(14 113 N),相对未采用渐进失效分析的结果减小了 39.3%。

此时,螺栓的应力分布如图 13 所示,可以看出:在距离两端 12.2 mm 的区域应力最大,该区域也是受剪切载荷最大的区域。

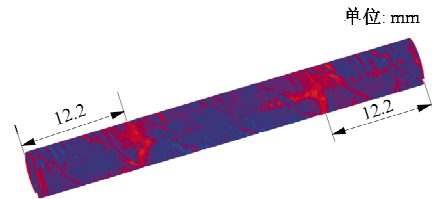


图 13 载荷达到最大时螺栓的应力分布  
Fig. 13 Stress distribution of the bolt when the load is maximum

### 2.3 具有导油槽的螺栓的折减计算

建立具有螺旋导油槽的螺栓的有限元模型是比较复杂的,因此采用折减计算方法来简化有限元模型的建立过程。通过对螺栓半径进行折减来考虑导油槽对螺栓强度的影响,折减公式为

$$r = \sqrt{\frac{\pi R^2 - 2WH}{\pi}} \quad (2)$$

式中: $r$  为螺栓折减半径; $R$  为螺栓半径; $W$  为导油槽的宽度; $H$  为导油槽的深度。

通过计算,可得折减半径为 2.946 mm,保守取折算后的半径为 2.9 mm。折减之后重新建立有限元模型,计算得到的加载结点载荷-位移曲线如图 14 所示。

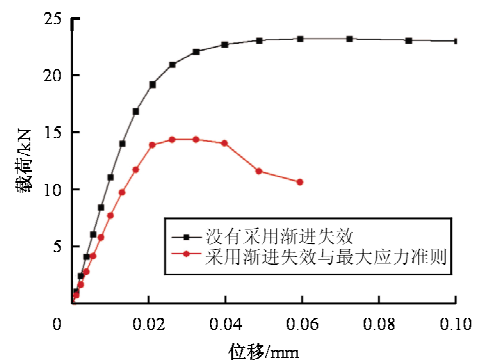


图 14 加载结点载荷-位移曲线(折减模型)  
Fig. 14 Load-displacement curves of the loading node(reduction model)

从图 14 可以看出:没有采用渐进失效时的最

大载荷为 23 275 N, 比不采用折减计算的结果 (23 237 N) 大 0.16%; 采用渐进失效与最大应力准则时的最大载荷为 14 457 N, 比不采用折减计算的结果 (14 113 N) 大 2.4%。

### 3 结 论

(1) 从 Catia 中导入的螺旋实体不能在 Patran 中得到较好的有限元网格, 并且在有限元软件中不能直接建立螺旋实体, 因此只能采用间接方法: 首先生成螺旋导线和基线, 再由两条螺旋导线和基线生成螺旋曲面, 最后由两个对应的螺旋曲面生成螺旋实体, 此实体可以得到较好的有限元网格。

(2) 具有储油孔和导油槽的螺栓所能承受的最大载荷为 23 237 N, 比没有储油孔和导油槽的螺栓所能承受的最大载荷减小了 19.5%; 采用渐进失效与最大应力准则的结果相对没用采用渐进失效的结果减小较大; 在距离两端 12.2 mm 的区域应力最大, 该区域也是受剪切载荷最大的区域。

(3) 采用折减计算来考虑导油槽对螺栓强度影响的方法得出的结果与不采用折减计算得出的结果误差较小。

#### 参 考 文 献

- [1] 夏文. 防锈螺栓: 中国, CN202971522U[P]. 2013-06-05. Xia Wen. Anti-rust bolts; China, CN202971522U [P]. 2013-06-05. (in Chinese)
- [2] 韩翔. 防锈螺栓: 中国, CN203532485U[P]. 2014-04-09. Han Xiang. Anti-rust bolts; China, CN203532485U [P]. 2014-04-09. (in Chinese)
- [3] 潘天银. 一种防锈螺栓: 中国, CN204082866U[P]. 2015-01-07. Pan Tianyin. A rust-proof bolt; China, CN204082866U [P]. 2015-01-07. (in Chinese)
- [4] 袁桂芳. 高强度螺栓的应力测试[J]. 起重运输机械, 2004 (5): 53-54. Yuan Guifang. Stress testing of high tensile screw [J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2004 (5): 53-54. (in Chinese)
- [5] 杜洪奎, 徐向红, 翟羽, 等. 螺栓联接结构的有限元模拟计算[J]. 压缩机技术, 2004(2): 11-12. Du Hongkui, Xu Xianghong, Zhai Yu, et al. Finite elements simulation calculation for bolt structure [J]. Compressor Technology, 2004(2): 11-12. (in Chinese)
- [6] Cho J R, Lee D Y, Yoo W S, et al. Numerical investigation of bolt fitting and fastening forces by elastoplastic finite element analysis [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(1): 71-81.
- [7] Du A, Liu Y Q, Xin H H, et al. Progressive damage analysis of PFRP double-lap bolted joints using explicit finite element method [J]. Composite Structures, 2016, 152: 860-869.
- [8] Liu X P, Bradford M A, Chen Q J, et al. Finite element modelling of steel-concrete composite beams with high-strength friction-grip bolt shear connectors [J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2016, 108: 54-65.
- [9] Ataei A, Bradford M A, Valipour H R. Finite element analysis of HSS semi-rigid composite joints with precast concrete slabs and demountable bolted shear connectors [J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2016, 122: 16-38.
- [10] Wu Z Q, Zhang S M, Jiang S F. Simulation of tensile bolts in finite element modeling of semi-rigid beam-to-column connections [J]. International Journal of Steel Structures, 2012, 12(3): 339-350.
- [11] 李德山, 王志滨. 加强型单边螺栓连接节点静力性能有限元分析 [J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2016, 37(4): 427-430. Li Deshan, Wang Zhibin. Finite element analysis on static behavior of blind bolted joints with reinforcing components [J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 2016, 37(4): 427-430. (in Chinese)
- [12] 何英, 韩秀杰, 鱼胜利, 等. 应用有限元法对起吊螺栓的随机应力分析 [J]. 机床与液压, 2005(3): 119-120. He Ying, Han Xiujie, Yu Shengli, et al. Random stress analysis for connective bolt by ANSYS [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2005(3): 119-120. (in Chinese)
- [13] 方栋, 陈继志. 高强度螺栓螺纹根部应力集中的有限元分析 [J]. 材料开发与应用, 2007, 22(2): 37-39. Fang Dong, Chen Jizhi. Finite element analysis of stress concentration at the root of screw thread of high strength bolt [J]. Development & Application of Materials, 2007, 22(2): 37-39. (in Chinese)
- [14] 雷宏刚, 裴艳, 刘丽君. 高强度螺栓疲劳缺口系数的有限元分析 [J]. 工程力学, 2008, 25(增刊 1): 49-53. Lei Honggang, Pei Yan, Liu Lijun. FEA analysis of fatigue notch coefficients for high-strength bolts [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(S1): 49-53. (in Chinese)

#### 作者简介:

韩观林(1992-), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 复合材料结构设计与力学分析、有限元模拟与力学分析等。

李成虎(1980-), 男, 博士, 讲师。主要研究方向: 飞行器结构设计、复合材料结构设计与力学分析、有限元模拟与力学分析、力学试验等。

孙一方(1992-), 男, 硕士研究生。主要研究方向: 飞行器结构设计、有限元模拟与力学分析等。

(编辑: 马文静)