

铁基 SMA 防松螺母防断机理的有限元分析

李俊良¹, 沈英明², 杜彦良³

(1. 石家庄铁道大学 教务处, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 科技处, 河北 石家庄 050043;
3. 石家庄铁道大学 党政办公室, 河北 石家庄 050043)

摘要: 采用有限元分析软件 ANSYS 对铁基 SMA 防松螺母的防断机理进行了研究, 建立了参数化的螺栓连接有限元计算模型, 并与普通螺栓连接进行了对比分析。研究结果表明: 这种新型螺母具有很好的变形协调性, 并有效地降低螺纹联接受力较大的第一、二螺纹牙处的应力水平。

关键词: 铁基 SMA; 防松螺母; 螺栓连接; 防断; 有限元分析

中图分类号: TH131.3; TG139.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2015)01-0096-05

螺纹联接作为一种最普遍的联接件, 广泛地用于铁路、汽车、机械等各行各业, 但因为螺纹齿根部的严重应力集中等现象, 常常发生松动、松脱和疲劳断裂而引起结构系统失效。铁基 SMA 防松螺母是由 Fe₃₀Mn₆Si₄Cr₅Ni 合金材料制成, 利用该合金约束状态下的形状记忆和超弹性效应, 不仅可有效地防止螺纹联接发生松动、松脱, 而且还可提高螺纹联接的疲劳寿命, 所以这种螺母的研究具有重要的科学价值和广泛的应用前景^[1]。

有限元方法是一种有效的应力分析方法, 它比解析法方便、直观, 比试验法经济, 又能满足工程上的经济要求。本文在分析研究铁基 SMA 螺母防断机理的基础上, 借助大型有限元分析程序 ANSYS 软件^[2]建立了参数化的螺栓联接计算模型, 对这种新型螺栓连接中螺纹牙中的载荷传递规律及螺纹齿啮合面上接触应力的分布情况进行了分析研究, 并通过与普通螺栓连接比较, 验证了这种新型防松螺母的防断性能。

1 铁基 SMA 防松螺母的防断机理

螺母与螺栓构成螺栓连接, 二者有多圈螺纹牙旋合。在预紧力的作用力, 在螺栓杆上产生轴向拉力, 螺母本体承受压力的作用。而一般情况下, 螺母的刚度大于螺栓的刚度, 这样螺栓受压时的螺距的减小量也不同于螺栓受拉的增加量, 两者的变形差主要靠接触的各圈螺纹牙的变形来补偿。又根据胡克定律, 各螺纹牙变形的不同直接导致其相应的受力大小也不同。实际上诸多理论和实践也证明^[3], 螺栓连接的受力仅仅由少量的螺纹牙(第一、二螺纹牙)来承担, 而如何改善这种受力不均的状况是提高螺栓的疲劳强度的关键。

铁基 SMA 防松螺母主要是利用铁基合金弹性模量相对较小、变形大的特点来实现防断的。具体地, 由于 Fe₃₀Mn₆Si₄Cr₅Ni 合金的弹性模量较小, 用其制成的螺母压缩变形量较大, 从而使螺母受压时螺距的减少量接近于螺栓受拉时螺距的增加量, 因此各圈螺纹牙的变形大小就比较接近, 相对应的受力大小也比较相近, 从而有效地改善了螺纹牙受力不均的现象, 避免了螺栓连接的受力仅有极少量螺纹牙承担的现象, 达到防断的目的。另一方面, Fe₃₀Mn₆Si₄Cr₅Ni 合金还具有超弹效应^[4], 这一效应可使这种新型螺母具有良好的阻尼减振性能, 在振动、冲击和动载荷作用下可以吸收部分能量, 进而大大提高螺栓联接的

收稿日期: 2014-05-27 责任编辑: 刘宪福 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2015.01.20

作者简介: 李俊良(1978-), 女, 副教授, 主要从事铁基形状记忆合金的研究。lijunliang@stdu.edu.cn

基金项目: 教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET-13-0913), 河北省自然科学基金项目(E2011210058)

李俊良, 沈英明, 杜彦良. 铁基 SMA 防松螺母防断机理的有限元分析[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2014, 28(1): 96-100.

疲劳寿命。

2 有限元计算模型的建立

在预紧力的作用下,螺母的内螺纹和螺栓的外螺纹在一定的啮合点处旋合保持完全紧密的接触,这是空间曲面接触力学问题。为了计算方便,对螺纹连接有限元模型做如下假设:(1)螺母和螺栓的材料为各向同性;(2)螺齿的升角低于 4° 时,载荷沿螺齿的分布几乎不受螺齿升角的影响^[5]。因此在轴向载荷作用下,螺栓联接简化作轴对称问题处理。本文以 M10×1.5 的静载螺栓联接为研究对象,对其在预紧力作用下的力学特性进行研究分析。螺栓、螺母及其螺纹的结构参数见表 1、表 2、表 3 所示。有限元模型的建立过程中均采用国际制单位,因此最后计算结果应力的单位为 Pa。为了提高计算的效率,编制了参数化的前处理程序,程序适用于多种不同规格螺栓联接的计算分析。计算时只需修改批处理程序中螺栓和螺母螺纹的有关参数。

根据文献[6]研究结果,如果考虑铁基形状记忆合金的超弹性效应,折算后该合金的弹性模量将会大大减小,折算后螺母的弹性模量为 25.6 GPa,这样螺栓连接的防断性预计会更好些。为更清楚地说明该问题,对新型螺栓连接按是否考虑超弹性效应两种情况进行计算分析。下面表述中,新型螺栓连接 I 为不考虑超弹性效应,新型螺栓连接 II 为考虑超弹性效应。

表 1 螺栓联接的物理参数

零件	弹性模量/MPa	泊松比	拉伸屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
普通螺母	210 000	0.3	689	760
新型螺母	120 000	0.3	320	686.5
螺栓	210 000	0.3	689	760

表 2 螺母螺纹的几何参数

公称直径 d	螺纹小径 d_1	螺纹中径 d_2	螺距 p	齿高 h	螺母高度	E	S
10	8.376	9.026	1.5	1.299	8.4	15.8	18.244

表 3 螺栓螺纹的几何参数

公称直径 d	螺纹小径	螺纹中径	螺距 p	齿高 h
10	8.376	9.026	1.5	1.299

一种典型的螺栓联接的有限元网格如图 1 所示。在轴向预紧力下,每一螺齿只有一面相接触,而另一面相互分离。该有限元模型包含 1 351 个单元(其中接触单元 105 个) 4 269 个节点。单元类型有两类:螺栓和螺母采用 8 节点 4 边形轴对称实体单元,即 PLANE82 单元,该单元有 U_x 和 U_y 2 个自由度。螺栓和螺母在预紧力作用下螺纹面之间的受力分析用接触单元来模拟^[7],接触行为是一种高度的非线性行为,本文选用目标单元 TARGE169 和接触单元 CONTA172 来模拟这种接触状态。

2.1 边界条件

(1) 约束。图 1 所示的有限元模型的左端即螺栓联接的对称面的节点上,施加径向的移动约束(即 $U_x = 0$);为了模拟螺栓联接的工作过程,限制螺母底端节点所有 Y 方向的位移(即 $U_y = 0$),螺母右端所有节点所有 X 方向的位移($U_x = 0$)。

(2) 载荷。用张甫生的屈服点拧紧法^[8]确定 M10×1.5 的螺栓联接的轴向预紧力为 6 100 N。加载方式采用 ANSYS 有限元分析中的预紧力单元法^[9],首先在螺栓连接结构中创建一个预拉伸界面,产生预紧力单元 PRETS179,然后在预紧力单元上直接加载预紧力即可。

2.2 接触模型的设置^[2]

根据实际工作情况,将螺栓连接中螺纹旋合区域的接触类型设置为摩擦接触,摩擦系数设为 0.2,并假设接触面之间处于小滑动状态,满足库仑定理中有关小滑动状态的切向摩擦条件,库仑摩擦条件通过罚函数方式加以限制。螺栓联接中分别把螺栓和螺母的接触面为目标面和接触面,并生成接触单元,其中用 ESURF 命令建立接触对,采用 TARGE169 单元生成目标单元,用 CONTAC172 单元生成接触单元。并根据实际情况合理设置单元关键字和实常数。

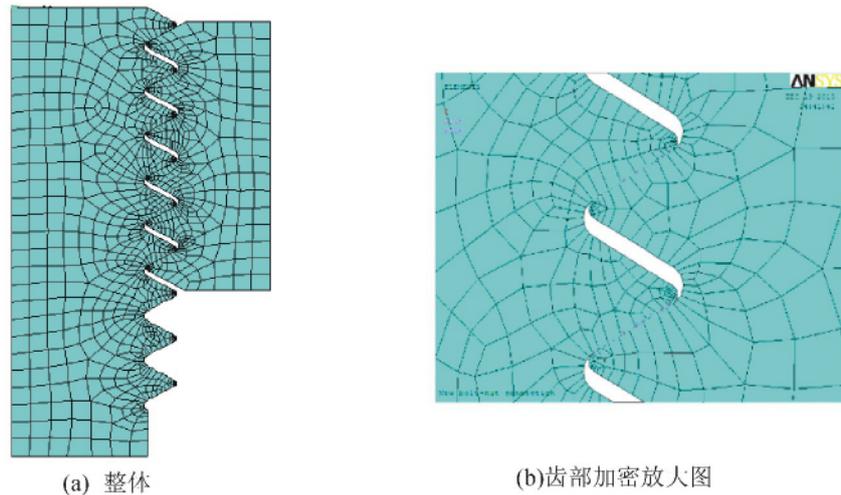


图 1 螺栓联接的有限元网格图

接触单元的分析中,接触刚度的确定对于求解的收敛十分重要。即在 ANSYS 有限元分析中,要合理地确定罚刚度比例系数 (FKN)。 FKN 取值通常在 $0.01 \sim 10$, 本文研究中反复尝试求解,最后确定 $FKN = 0.1$ 。

3 模型求解及计算结果分析

3.1 整个螺栓联接的变形

通过有限元计算可得普通和新型螺栓联接 I、II 在预紧力作用下的变形图如图 2 ~ 图 4 所示。当螺栓受到轴向预紧力时,通过多圈旋合螺纹传给螺母,使螺母本体受压。因此螺栓受到的应力基本上为拉力,其轴向伸长,而横向由于泊松效应而缩小;螺母本体由于承受压力而被轴向压缩。又由图 2、图 3 和图 4 比较可以看出,新型螺栓联接比普通螺母具有较好的变形协调性,并且考虑铁基合金超弹性的螺栓联接 II 的变形协调性最好。

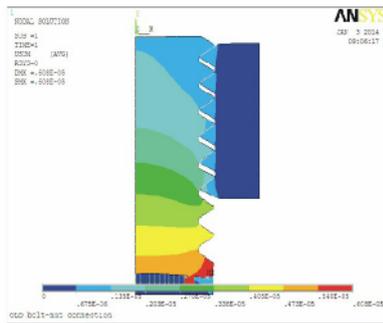


图 2 普通螺栓联接的 USUM 图

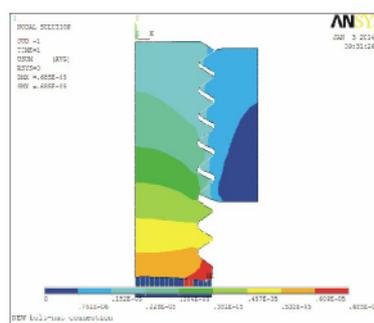


图 3 新型螺栓联接 I 的 USUM 图

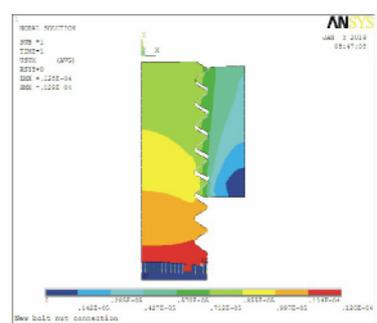


图 4 新型螺栓联接 II 的 USUM 图

3.2 螺栓联接的应力分布情况

普通和新型螺栓联接 I、II 及其第一对螺纹齿啮合面的 Von-Mises 分布云图见图 5 ~ 图 10 所示。研究结果表明:

(1) 新型螺栓联接的应力水平比普通螺栓联接的应力水平有所降低,从而有效地改善了轴向力沿螺母高度分布的均匀性。

(2) 第一对螺纹齿承受的载荷最大,是最危险的区域,最容易发生塑性屈服,直至破坏;实际工程应用中,螺栓的疲劳断裂也经常发生在这一部位。这主要是由于螺母和螺栓对应的断面面积不同,刚度不一致,变形不协调等因素造成的。

由图 8 ~ 图 10 可见,①③ 种情况下螺栓齿根部的应力分布规律基本一致,但新型螺栓联接 2 螺纹齿根

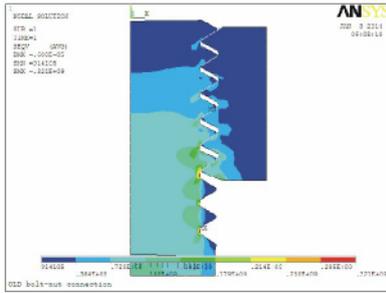


图 5 普通螺栓联接的 Von-Mises 图

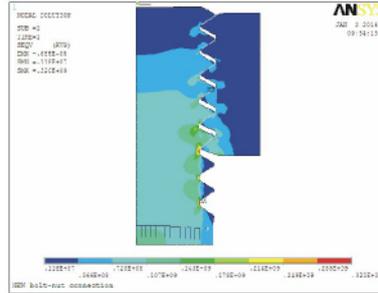


图 6 新型螺栓联接 I 的 Von-Mises 图

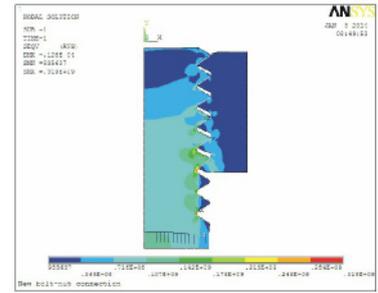


图 7 新型螺栓联接 II 的 Von-Mises 图

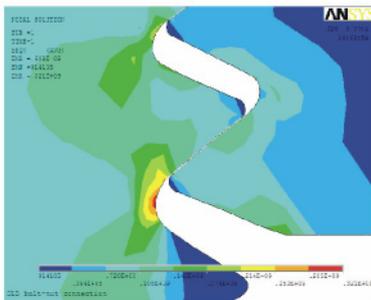


图 8 普通螺栓联接第一对螺纹齿的 Von-Mises 图

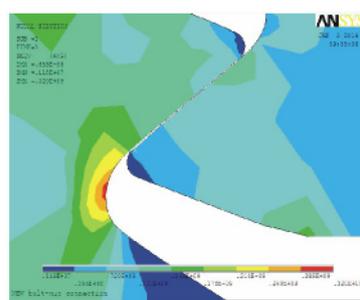


图 9 新型螺栓联接 I 第一对螺纹齿的 Von-Mises 图

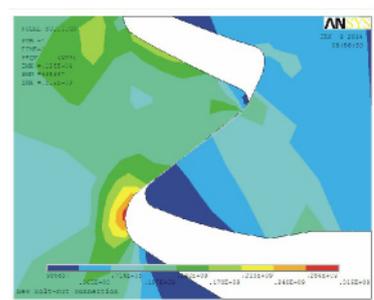


图 10 新型螺栓联接 II 第一对螺纹齿的 Von-Mises 图

部的最大应力值与普通联接降低了 0.63%；②螺母齿根部的应力分布规律在 3 种情况下有很大不同。由图可见，最大应力的分布位置大致相同，次应力开始分布整个齿根部，随着螺母弹性模量的逐渐降低，最后分布区域大大减少，很明显这样的受力状况对整个螺栓联接的应力分布情况是非常有利的。分析其原因主要是螺纹啮合面上接触应力的变化引起的。

(3) 每个齿上虽然应力水平不同，但分布规律大致相同；在承压侧有接触压力作用，此负荷使各齿承载侧沿切向产生拉力，而在另一侧则为压应力；在齿的根部，存在较大的应力集中，形成各齿的最大应力区。这是由于接触压力的分布不均和应力集中综合所致。

新型螺栓连接 I、II 和普通螺栓连接及第一螺纹齿的接触应力云图如图 11 ~ 图 16 所示。

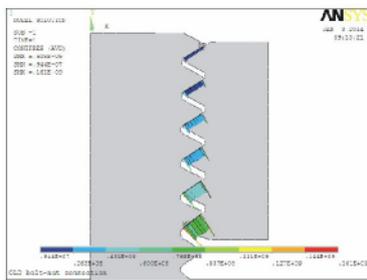


图 11 普通螺栓联接的接触应力云图

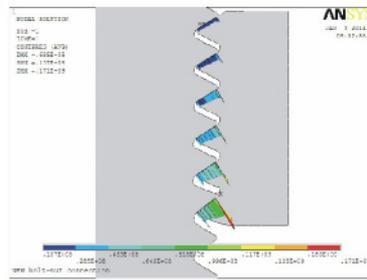


图 12 新型螺栓联接 I 的接触应力云图

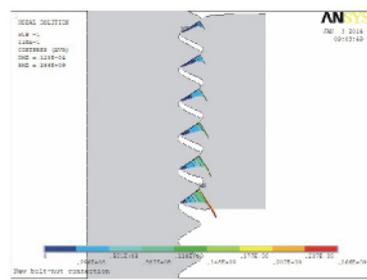


图 13 新型螺栓联接 II 的接触应力云图

结果表明，每个齿上虽然应力水平不同，但是分布规律大致相同：对于普通螺栓连接接触区域，接近螺栓和螺母的齿根部存在较大的应力集中，形成各齿的最大应力区，此处也是螺栓连接最容易断裂的部位；新型螺栓连接 I 接触区域的分布规律稍微有些不同，最大的应力发生的部位接近螺母的根部，螺栓根部的应力水平有所降低；新型螺栓连接 II 的接触区域，仅在螺母的齿根部存在较大的应力集中，接近螺栓根部的应力几乎为零，这样就大大改善了螺栓第一圈螺纹处的应力集中现象，有效地降低了螺栓连接的断裂几率。

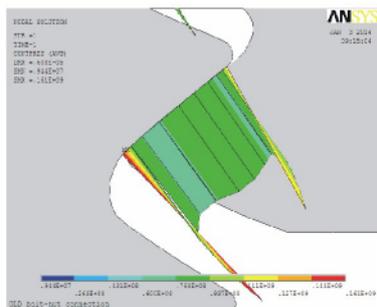


图 14 普通联接第一
螺纹齿的接触应力云图

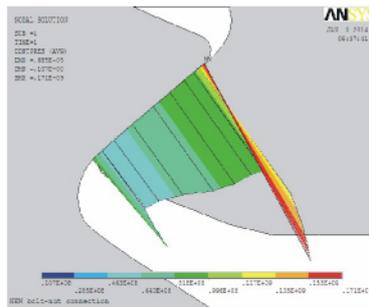


图 15 新型联接 I 第一
螺纹齿的接触应力云图

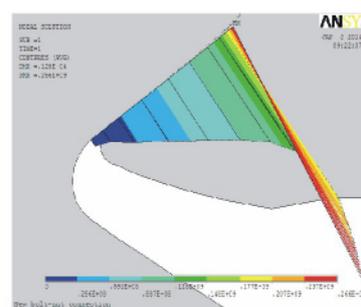


图 16 新型螺栓联接 II
的接触应力云图

4 结论

本文主要借助 ANSYS 分析软件对铁基合金防松螺母组成的新型螺栓联接的防断机理进行了有限元分析和研究,并与普通螺栓联接($M10 \times 1.5$)的进行比较。研究表明,这种新型螺母具有很好的变形协调性,能有效地降低螺纹联接受力较大的第一、二螺纹牙处的应力水平,大大提高整个螺栓联接的疲劳寿命。另外,编制了螺栓联接的参数化前处理程序,该程序适用于多种不同规格螺栓联接的计算分析。

参 考 文 献

- [1]李俊良,杜彦良,孙宝臣,等.一种新型智能防松螺母的研究[J].工程设计学报,2003,10(3):154-157.
- [2]王新敏.ANSYS 工程结构数值分析[M].北京:人民工业出版社,2007.
- [3]卜炎.螺纹联接的设计与计算[M].北京:高等教育出版社,1995.
- [4]张初阳,王小祥.FeMnSiCrNi 形状记忆合金超弹性的研究[J].材料科学与工程,1999,17(2):42-45.
- [5]Zhao H. Analysis of the load distribution in a bolt-nut connector [J]. Computer and Structure, 1994, 53(1): 1465-1473.
- [6]沈英明,李俊良,杜彦良.形状记忆合金在螺栓防断中的应用[J].机械设计与制造,2005(10):107-109.
- [7]李运生,王慧佳,张彦玲.钢桁梁桥高强螺栓连接的节点板局部受力性能分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2014,26(3):1-7.
- [8]张甫生.采用屈服点拧紧法的螺栓联接计算方法[J].机械设计,1989(2):30-34.
- [9]余娟,余明友,金健伟,等.螺栓连接中预紧力的有限元分析[J].软件导刊,2013(9):64-66.

Finite Element Analysis of Anti-breaking Performance of Fe-Based SMA Locknut

Li Junliang¹, Shen Yingming², Du Yanliang³

(1. Dean's Office, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Science and Technology Division, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. The Party and Administrative Office, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The anti-breaking mechanism of Fe-based SMA locknut is analyzed and studied by the finite element software-ANSYS, the parameterized finite element calculation model of the load distribution in the newly-designed bolt connection is established based on the comparison with the ordinary bolt connection. The results show that the new type of nut has the better deformation compatibility, and the stresses of the first and second screw thread in the bolt connection are effectively reduced.

Key words: Fe-base shape memory alloy; locknut; the bolt connection; anti-breaking; finite element analysis