

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.03.025

有限元仿真研究不同栽桩深度下 AG 螺纹受力分析

周长涛¹, 王洪林², 卫晓栋¹, 裴鑫^{3a}, 朱佳伟^{3a}, 原梅妮^{3a, 3b}, 鲁辉虎^{3c}

(1. 航空工业新乡航空工业(集团)有限公司, 河南 新乡 453049;

2. 中国兵器工业第五二研究所, 山东 烟台 264003;

3. 中北大学 a. 航空宇航学院; b. 机电工程学院; c. 机械工程学院, 山西 太原 030051)

摘要:为解决螺栓预紧力退化的难题,采用有限元仿真的方法,探究螺纹结合面间的微观接触运动,对不同栽桩深度下 AG 系列螺纹进行受力分析。结果显示:当栽桩深度为 5P、6P、7P、8P 时,计算得到的转矩结果符合使用标准,AG6×1 螺纹副实现过盈螺桩连接功能。根据研究结果,AG6×1 栽桩深度建议为 6 mm。

关键词:栽桩深度;转矩;AG 螺纹;有限元仿真

中图分类号:TH16; V262.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)03-0119-04

Finite Element Simulation Study on Force Analysis of AG Series Threads under Different Pile Planting Depths

ZHOU Changtao¹, WANG Honglin², WEI Xiaodong¹, PEI Xin^{3a}, ZHU Jiawei^{3a}, YUAN Meini^{3a, 3b}, LU Huihu^{3c}

(1. AVIC Xinxiang Aviation Industry (Group) Co., Ltd., Xinxiang 453049, China;

2. No.52 Institute of China North Industry Group, Yantai 264003, China;

3. a. School of Aeronautics and Astronautics; b. School of Mechanical and Electrical Engineering;

c. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract:In order to solve the problem of bolt preload degradation, finite element simulation is applied to investigate the microscopic contact motion between the thread bonding surfaces, and force analysis of AG series threads at different pile planting depths is conducted. The results show that the calculated torque results meet the use standard when the planting depths are 5P, 6P, 7P and 8P, and the AG6×1 thread vice achieves the function of overload screw pile connection. According to the reserch results, 6 mm of AG6×1 pile planting depths is suggested.

Keywords:planting depth; torque; AG series thread; finite element simulation

0 引言

随着航空航天工业水平的快速发展,航空部件逐渐趋于复杂化和庞大化^[1-2],例如机身、机翼、航空发动机等,而这些结构中少有独立生产的整体,往往是由各零件通过连接结构装配而成,其中螺纹连接结构因其可靠性高、成本低及拆卸方便等优点,成为众多连接形式中应用最广泛的一种^[3]。对于在高振动、高加速度、高温环境下工作的航空装备组件,部分紧固性能未达标的螺栓节点可能产生不可预期的预紧力退化甚至螺栓松脱等故障^[4-6],大幅降低航空机械的安全稳定性,轻则增加维修时间及费用,重则酿成空难事故,严重危害人民生命及财产安全^[7]。

对于航空螺栓来说,存在的难题主要是:如何

对螺栓进行防松和预紧操作,如何充分发挥过盈螺纹在双头螺柱上的作用。为此研究过盈螺纹中径过盈量、螺纹小径以及栽桩深度这 3 个因素对装配转矩的影响,为螺栓失效问题提供坚实的研究基础,进而为航空连接件设计提供理论依据,进一步提高航空发动机等航空部件的性能及寿命。近年来,随着计算机运算速度的惊人提升,科学问题的研究模式逐渐从“经验指导实验”转向“理论计算+仿真模拟指导实验”^[8]。基于这种新模式,本文采用有限元仿真模拟方法探究螺纹结合面间的微观接触运动,对不同栽桩深度下 AG 螺纹进行了受力分析。

1 有限元模型的建立

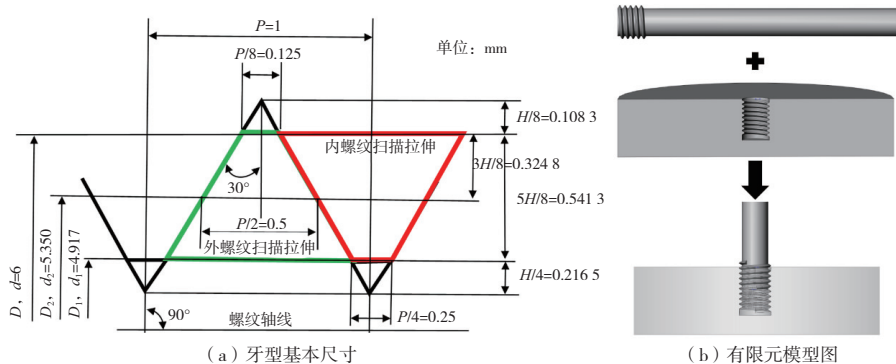
为了尽量符合实际情况,本文采用 Solidworks

基金项目:国家自然科学基金项目(51201155)

第一作者简介:周长涛(1977—),男,河南新乡人,工程师,研究方向为机加工工艺研究,s2001108@st.nuc.edu.cn。

软件精准建立 AG6×1 过盈螺桩装配不锈钢基体三维实体模型图,导入 ABAQUS 有限元分析软件中获取有限元模型(图 1)。因本文的计算需要更高的精度,此处螺纹配合应用草图对草图重合的方式,使螺纹副配合更紧密。即在同一基准面上画不同深度的螺纹牙草图,点击配合—标准配合—选择草图两条边一点重合,使两个草图实现

完全重合,从而控制两个实体模型精确装配。AG6×1 过盈螺桩原材料为双相不锈钢 Cr17Ni2,镁合金基体为 ZM6。双相不锈钢 Cr17Ni2 密度为 7.75 g/cm^3 ,弹性模量为 210 GPa,屈服强度为 550 MPa,拉伸强度为 1 175 MPa。铸造镁合金 ZM6 基体密度为 1.8 g/cm^3 ,弹性模量为 43 GPa,屈服强度为 160 MPa,拉伸强度为 250 MPa。



d —外螺纹大径; d_2 —外螺纹中径; d_1 —外螺纹小径; D —内螺纹大径; D_2 —内螺纹中径; D_1 —内螺纹小径;
 P —螺距; H —原始三角形高度; $H=0.8660P$; $H/4=0.2165P$; $3H/8=0.3248P$; $5H/8=0.5413P$; $H/8=0.1083P$

图 1 AG6×1 牙型基本尺寸^[9]和 AG6×1 过盈螺纹副有限元模型图

图 2 为铸造镁合金 ZM6 基体和 AG6×1 螺桩有限元网格图网格种子布置参数。AG6×1 螺桩和铸造镁合金 ZM6 基体均采用 C3D8R 单元划分。AG6×1 螺桩网格设置非均匀生长,参数为 1,自由网格,全局尺寸为 0.6,曲率控制 0.1;局部尺寸为 0.2,曲率控制为 0.01。铸造镁合金 ZM6 基体部件网格同样设置非均匀生长,参数为 1.2,自由网格,全局尺寸为 2,曲率控制为 0.1;局部尺寸为 0.2,曲率控制为 0.01。施加的约束条件为镁合金基体底面全部约束。安装转矩施加在 AG6×1 螺桩的无螺纹一端曲面上。

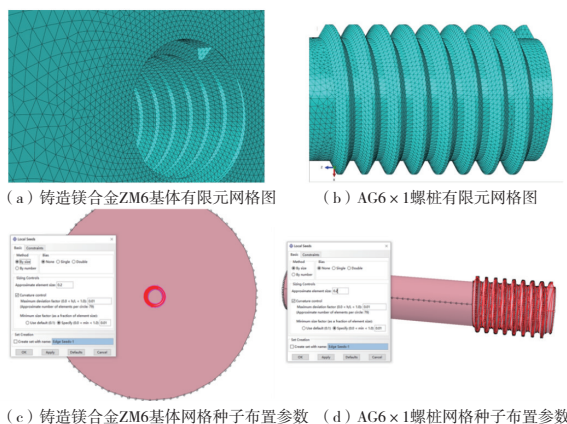


图 2 铸造镁合金 ZM6 基体和 AG6×1 螺桩有限元网格图与网格种子布置参数

2 基于 ABAQUS 的有限元分析

当螺纹栽桩深度较长时会产生干涉的现象,旋合性不能保证。旋合长度越长,直线度误差则越大,对旋合性的影响也就越大。与此相反,当螺纹栽桩深度较短时,旋合性虽得以保证,但却出现啮合间隙偏大的现象^[10-11]。

图 3 为不同栽桩深度下 AG6×1 螺纹副安装转矩和分析步之间关系图。由图 3 可知,对于铸造镁合金(ZM6)零件,采用双相不锈钢(Cr17Ni2) AG6×1 过盈螺纹栽桩。当栽桩深度分别为 $1P$ 、 $2P$ 、 $3P$ 、 $4P$ 、 $5P$ 、 $6P$ 、 $7P$ 、 $8P$ 时,通过有限元软件 ABAQUS 仿真计算获得:施加的安装转矩分别为 0.049 Nm、1.462 Nm、2.259 Nm、2.992 Nm、3.684 Nm、4.391 Nm、5.109 Nm、5.830 Nm。ABAQUS 仿真计算结果显示栽桩深度和施加的安装转矩呈现良好的线性关系。图 4 为采用 Origin 拟合的 AG6×1 螺纹副安装转矩和栽桩深度之间关系,拟合公式^[12]为

$$Y = -0.302 + 0.783X \quad (1)$$

式中: Y 为转矩; X 为螺旋圈数。

图 5 为不同栽桩深度下,AG6×1 螺纹副横截面应力分布云图。由图 5(a)、图 5(b)可知,当栽桩深度为 $1P$ 、 $2P$ 时,铸造镁合金(ZM6)基体应力远远低于屈服强度,而且在 AG6×1 螺桩周围的铸

造镁合金 (ZM6) 基体大约有 2/3 几乎没有预紧力,或者预紧力接近 0。当栽桩深度为 3P、4P 时,如图 5(c)、图 5(d)所示,铸造镁合金 (ZM6) 基体应力为 193 MPa、184 MPa,超过铸造镁合金 (ZM6) 基体应力屈服应力,会导致内螺纹磨损等失效现象,且 AG6×1 螺桩周围的铸造镁合金 (ZM6) 基体存在 1/3 部分截面几乎没有承载预紧力。由图 5(e)——图 5(g)可知,当栽桩深度为 5P、

6P、7P 时,铸造镁合金 (ZM6) 基体应力分别为 167 MPa、166 MPa、167 MPa,此时 AG6×1 螺纹副达到预紧状态。而当栽桩深度为 8P 时,如图 5(h)所示,铸造镁合金 (ZM6) 基体应力为 176 MPa,此时 AG6×1 螺纹副达到预紧状态。所以当栽桩深度为 5P、6P、7P、8P 时,AG6×1 螺纹副实现过盈螺桩连接功能。

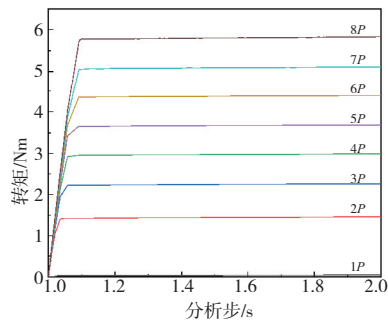


图 3 不同栽桩深度下 AG6×1 螺纹副安装转矩和分析步之间关系图

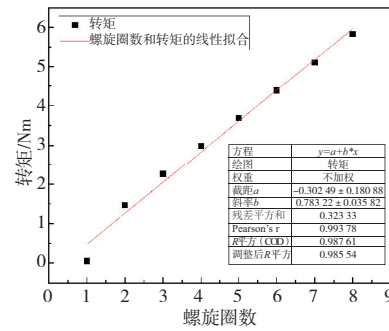


图 4 AG6×1 螺纹副安装转矩和栽桩深度拟合公式图

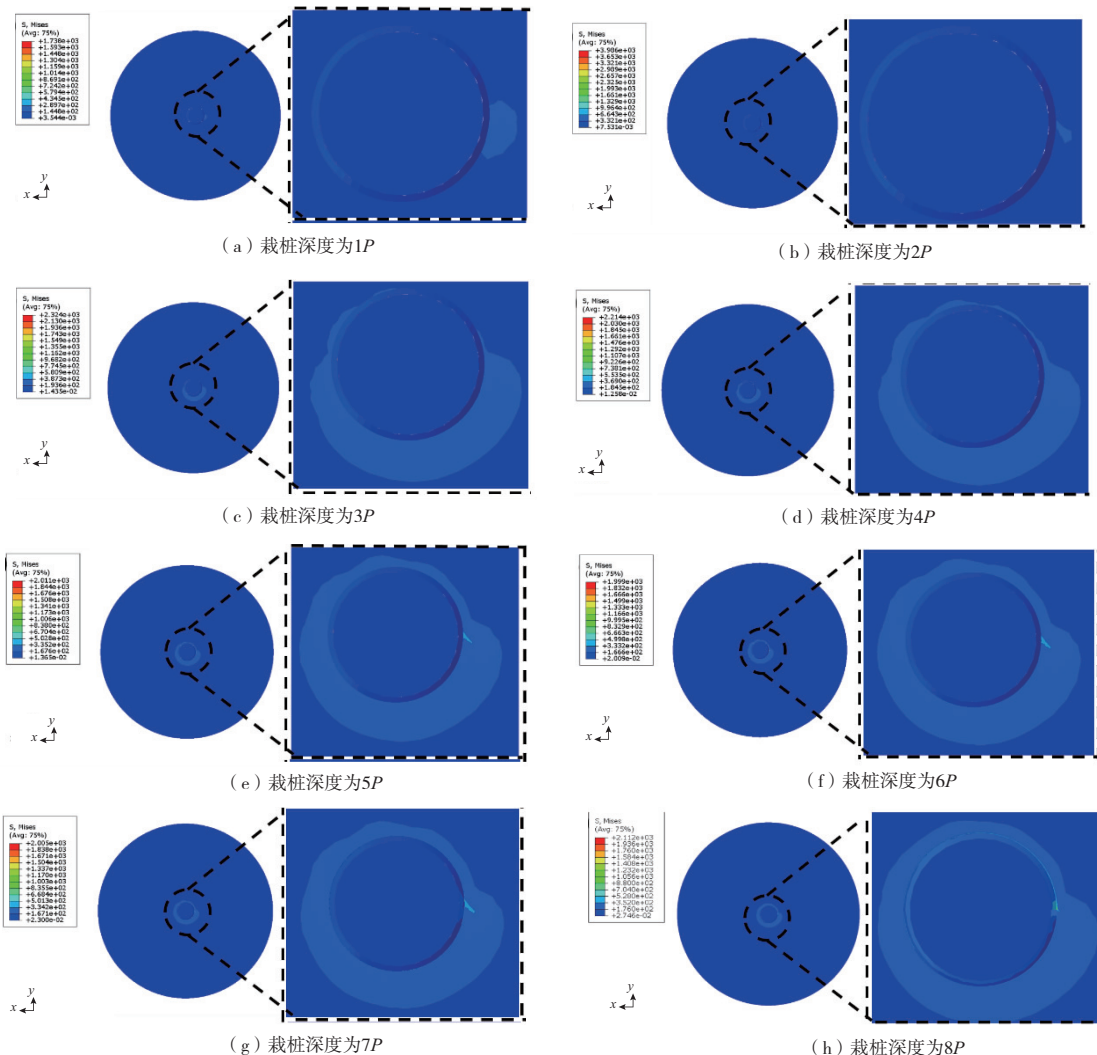


图 5 不同栽桩深度下,AG6×1 螺纹横截面应力分布云图

当栽桩深度分别为 $1P$ 、 $2P$ 、 $3P$ 、 $4P$ 、 $5P$ 、 $6P$ 、 $7P$ 、 $8P$ 时,AG6×1 过盈螺桩大径和小径应力分别为 0 MPa 和 0 MPa、1 417 MPa 和 850 MPa、606 MPa 和 151 MPa、585 MPa 和 291 MPa、568 MPa 和 142 MPa、463 MPa 和 154 MPa、761 MPa 和 380 MPa、547 MPa 和 410 MPa,如图 6 所示。如当栽桩深度为 $1P$ 、 $2P$ 、 $3P$ 、 $4P$ 时,会出现严重的螺牙磨损、变形现象^[13],此时 AG6×1 过盈螺桩甚至会出现剪切失效现象^[14]。

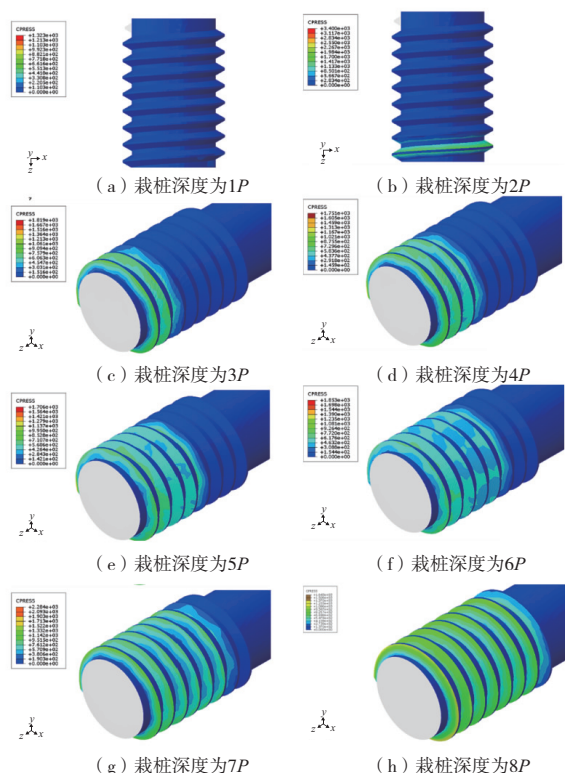


图 6 不同栽桩深度时,AG6×1 螺桩压应力分布云图

经过多次实验,对不同栽桩深度下转矩进行测量,转矩测试结果与有限元仿真计算结果一致,如表 1 所示,说明本论文有限元计算结果与实际较吻合。

表 1 实验测试不同栽桩深度下的转矩值

单位: Nm

栽桩深度	1P	2P	3P	4P	5P	6P	7P	8P
测量值	0.15	1.01	2.12	2.99	3.55	4.23	5.12	5.58

3 结语

本文采用有限元仿真的方法,通过实际实验测试研究了螺纹结合面间的微观接触运动;对不同栽桩深度下 AG 系列螺纹进行了受力分析。ABAQUS 仿真计算结果显示:AG6×1 栽桩深度和

施加的安装转矩范围呈现良好的线性关系,当栽桩深度为 $5P$ 、 $6P$ 、 $7P$ 、 $8P$ 时,AG6×1 螺纹副实现过盈螺桩连接功能。在工程实践中,螺纹旋合长度一般不能少于 5 倍螺距长度,因此,AG6×1 栽桩深度建议为 6 mm。

参考文献:

- [1] WANG Y T, WANG D, ZHANG S Z, et al. Design and development of a five-axis machine tool with high accuracy, stiffness and efficiency for aero-engine casing manufacturing [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(4): 485-496.
- [2] YANG K, GUO Y L, LI D H, et al. Design and static testing of wing structure of a composite four-seater electric aircraft [J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2020, 27(1): 258-263.
- [3] 陈岩. 螺栓松动的失效机理以及对整体结构力学行为的影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020: 34-48.
- [4] 郑琪. 螺纹联接结构在轴向冲击载荷作用下的松动机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020: 25-33.
- [5] 田乐. 交变载荷下螺纹连接松动机理与防松方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020: 9-23.
- [6] 胡阳, 姜东, 王旻睿, 等. 横向载荷作用下螺栓连接松动过程研究[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(6): 1091-1098, 1230.
- [7] YANG G W, YANG L, CHEN J S, et al. Competitive failure of bolt loosening and fatigue under different preloads [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1): 1-11.
- [8] HUANG J Y, LIU J H, GONG H, et al. A comprehensive review of loosening detection methods for threaded fasteners [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 168: 108652.
- [9] HBI—304—1983 拧入铝镁合金过盈螺纹螺桩[S].
- [10] YANG L, YANG B, YANG G W, et al. Analysis of competitive failure life of bolt loosening and fatigue[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 129: 105697.
- [11] DING B D, ZHAO Y Q, HUANG Z H, et al. Tensile bearing capacity for bolted spherical joints with different screwing depths of high-strength bolts [J]. Engineering Structures, 2020, 225: 111255.
- [12] 方汝璐, 张行, 徐阿玲. 过盈螺纹装配扭矩的计算[J]. 航空标准化与质量, 1993(4): 15-20.
- [13] NOROOZI S, SEWELL P, VINNEY J. Investigation of bolt group configurations on load distribution and joint failure [J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2014, 21(5): 422-432.
- [14] CHENG X Q, WANG S W, ZHANG J, et al. Effect of damage on failure mode of multi-bolt composite joints using failure envelope method [J]. Composite Structures, 2017, 160: 8-15.

收稿日期: 2022-10-26