

螺栓连接强度的正交实验分析

黄家伟

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年10月13日; 录用日期: 2024年11月6日; 发布日期: 2024年11月13日

摘要

螺栓连接作为机械装配中常见的连接方式, 在工程实践中扮演着重要的角色。螺栓连接的强度直接关系到机械结构的安全性和可靠性。然而, 螺栓连接的强度受到多种因素的影响, 本文通过对螺栓连接关系进行简化建模, 通过ANSYS Workbench对其进行仿真, 得到了螺栓的总变形和应力特征。再通过设计正交实验, 分析了不同螺栓直径、螺栓预紧力、结合面摩擦系数对螺栓的总变形和等效应力的影响程度, 为优化螺栓连接设计提供了参考依据。

关键词

螺栓连接强度, ANSYS Workbench, 应力特征, 正交实验

Orthogonal Experimental Analysis of Bolt Connection Strength

Jiawei Huang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 13th, 2024; accepted: Nov. 6th, 2024; published: Nov. 13th, 2024

Abstract

Bolted connections are a common method of assembly in mechanical engineering and play a vital role in ensuring the safety and reliability of mechanical structures. The strength of a bolted connection is influenced by various factors. This study simplifies the relationship of bolted connections through modeling and uses ANSYS Workbench for simulation to obtain the total deformation and stress characteristics of the bolts. An orthogonal experimental design is employed to analyze the effects of different bolt diameters, bolt preload, and the coefficient of friction at the interface on the total deformation and equivalent stress of the bolts. The findings provide valuable insights for optimizing the design of bolted connections.

文章引用: 黄家伟. 螺栓连接强度的正交实验分析[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 5895-5901.

DOI: 10.12677/mos.2024.136537

Keywords

Bolt Connection Strength, ANSYS Workbench, Stress Characteristics, Orthogonal Experiment

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景介绍

螺栓连接作为一种重要的机械连接方式，广泛应用于各类工程结构和设备中。其强度和可靠性对于确保机械结构的安全性和稳定性至关重要。近年来，螺栓连接的研究不断深化，各类因素对其性能的影响也逐步受到重视，成为工程设计中的关键考量。

研究表明，螺栓连接的性能受到多种因素的影响，包括但不限于栓接部板的抗拉刚度、螺栓刚度以及接合面黏着刚度等。王晓婷等[1]对各部分刚度的计算进行了研究，指出这些刚度受不同设计参数和工况的显著影响，这为优化设计提供了理论基础。进一步探讨螺栓连接失效模式的研究中，唐洲[2]分析了螺栓松动对连接性能的影响，强调了松动引起的应力和位移变化，以及其对螺栓疲劳寿命的影响。这一发现使得在设计和维护阶段考虑螺栓的长期稳定性变得更加重要。在具体影响因素的研究方面，钟茂平[3]则聚焦于配合精度对复合材料螺栓连接静态强度的影响，详细分析了孔周围的应力分布特征。这一研究强调了制造精度在螺栓连接中的关键作用，为相关材料的设计和选用提供了参考。此外，Hang Li 等[4]通过对宏观和微观形貌的分析，以及腐蚀产物和力学性能的研究，揭示了高强度螺栓在腐蚀条件下的性能变化，并与普通碳钢高强度螺栓连接进行了对比。这些研究表明环境因素(如腐蚀)对螺栓连接的长效性能影响不可忽视。关于高强度螺栓连接的剩余强度问题，Yao Zhu 等[5]的研究探讨了在经历冲击损伤后的剩余强度，为高强度螺栓在极端工况下的应用提供了重要数据支持。姜晓伟[6]建立了三维有限元模型，研究了间隙和干涉两种配合方式对单钉单剪螺栓连接的影响，深入分析了其刚度变化问题，为连接设计时的选择提供了新的思路。最后，张岐良等[7]综合研究了钉孔配合、螺栓预紧力和接触面间摩擦对接头强度的影响，指出了合理设计这些参数的重要性。这一研究进一步证实了预紧力、螺栓直径和摩擦系数在连接性能中的关键作用。

综上所述，螺栓连接领域的研究涵盖了从理论分析到实验验证的多个方面，极大地推动了连接技术的发展。如图 1 所示螺栓连接示意图，本文将利用 ANSYS Workbench 进行静力学交叉试验，通过合理选择螺栓直径、预紧力和结合面摩擦系数，深入研究这些因素对螺栓连接强度的影响，为螺栓连接的优化设计提供依据。

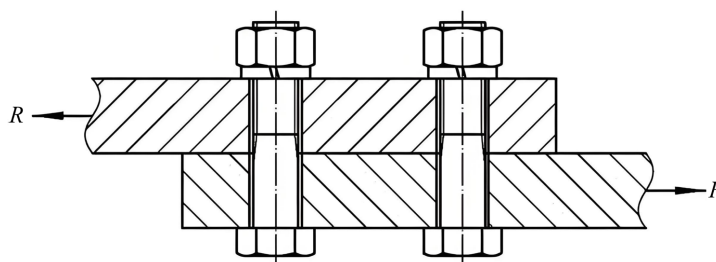


Figure 1. A diagram of bolt connections
图 1. 螺栓连接示意图

2. 参数化建模

螺栓连接简化模型主要包括螺母、正方形试件及螺钉如下图所示，其中将螺栓直径与与其相接触的曲面直径都设置为可调参数并命名为“DS_DDD”，其余参数如表 1 所示：

Table 1. Modeling size table
表 1. 建模尺寸表

名称	尺寸
螺钉头	Ø50 × 20 mm
螺钉长度	100 mm
正方形试件	40 (30 + 10) mm
六角螺母	高 30 mm × Ø35 mm

建模示意图如图 2 所示：

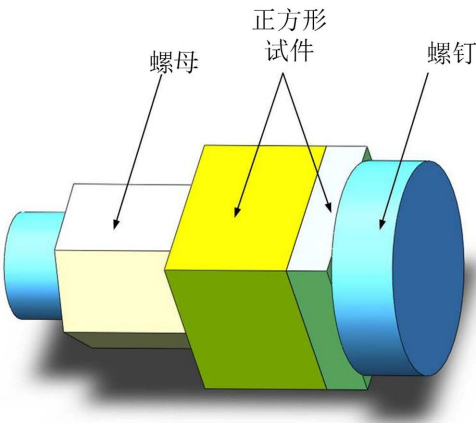


Figure 2. Modeling diagram
图 2. 建模示意图

3. 有限元分析

A: Static Structural
Fixed Support 2
Time: 1. s
2024/9/23 14:55
A Fixed Support
B Fixed Support 2

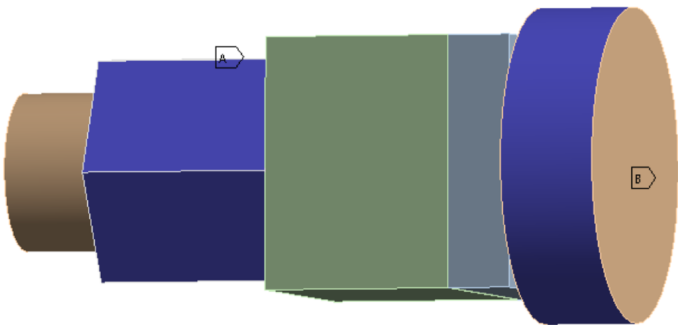


Figure 3. Boundary condition settings
图 3. 边界条件设置

A: Static Structural
Bolt Pretension
Time: 1. s
2024/9/23 14:56
Bolt Pretension: 1000. N

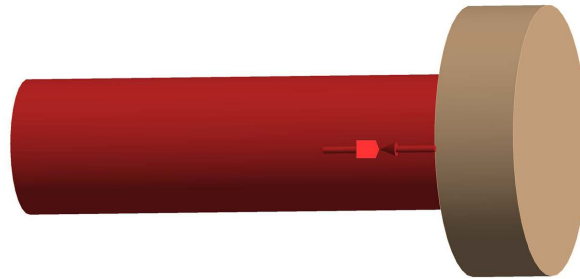


Figure 4. Location of bolt preload
图 4. 螺栓预紧力施加位置

在进行了参数化建模后，将带有参数变量的螺栓连接简化模型导入 ANSYS Workbench，进行有限元分析的相关操作，其中需要定义材料参数为螺栓直径、预紧力和结合面摩擦系数，并将结合面调整为 frictional 并定义为变量参数。

其中边界条件设置为如图 3 所示：螺钉头固定与六角螺母固定。螺栓预紧力施加位置如图 4 所示。为了探究变量厚度对应力、应变分布情况的影响，将上述三个因子分别赋予 3 个水平，得到的因子 - 水平情况如表 2 所示：

Table 2. Level table of factors
表 2. 各因素水平表

因子水平	螺栓直径(mm)	预紧力(N)	结合面摩擦系数
1	25	1000	0.1
2	28	2000	0.2
3	32	3000	0.3

4. 正交试验设计

4.1. 正交实验

进行了前述准备工作后，开展正交试验设计，本次关于螺栓连接强度的正交试验包含 3 个因子，分别 DS_DDD、Friction Coefficient、Bolt Pretension Preload，采用 SPSSAU 进行正交试验设计，得出的三因子三水平正交试验表如表 3 所示。

Table 3. Orthogonal experimental design scheme and results
表 3. 正交实验设计方案及结果

编号	螺栓直径(mm)	预紧力(N)	结合面摩擦系数	总应变 $\times 10^{-5}$	等效应力(MPa)
1	25	1000	0.1	38.124	5.457046935
2	25	2000	0.2	72.8634	10.49550055
3	25	3000	0.3	108.1884	15.56586685
4	28	1000	0.2	32.4212	3.971078956
5	28	2000	0.3	61.1253	6.988034704

续表

6	28	3000	0.1	90.6992	10.26255366
7	32	1000	0.3	44.5307	1.857646951
8	32	2000	0.1	89.3913	3.88498326
9	32	3000	0.2	134.2526	5.949271642

4.2. 极差分析

由表 3 所述的正交试验结果对试验指标的应变与应力进行极差分析, 得到分析结果如下表 4 所示:

Table 4. Total strain range analysis table

表 4. 总应变极差分析表格

项	水平	螺栓直径	结合面摩擦系数	预紧力
K 值	1	219.18	218.21	115.08
	2	184.25	239.54	223.38
	3	268.17	213.84	333.14
K 平均值	1	73.06	72.74	38.36
	2	61.42	79.85	74.46
	3	89.39	71.28	111.05
最佳水平		32	0.2	3000
R 值		27.98	8.56	72.69
水平数量		3	3	3
每水平重复数 r		3.0	3.0	3.0

由表 4 及图 5 所示可知, 3 个因素中, 结合面摩擦系数极差最小, 是对总应变幅值影响最小的因素; 预紧力极差最大, 对指标影响最为显著。

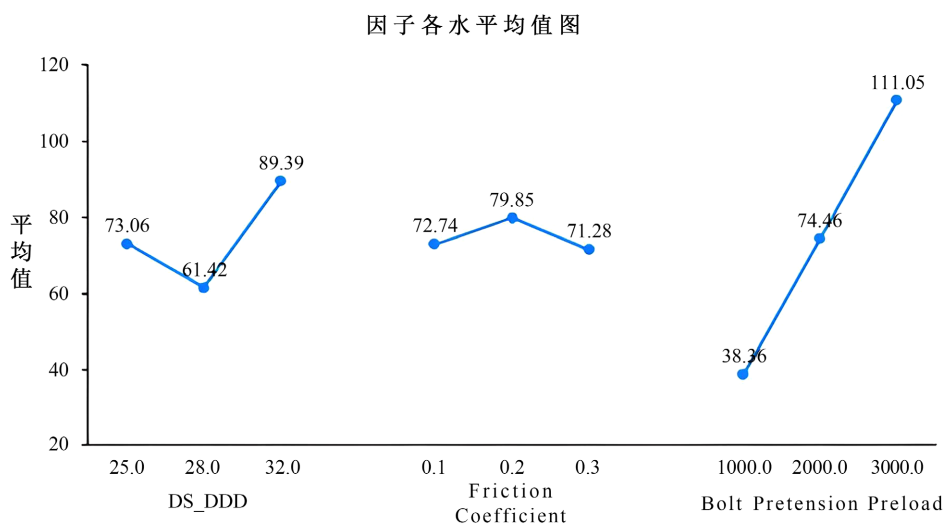


Figure 5. Change trend of the mean value of each level

图 5. 各水平平均值变化趋势

Table 5. Equivalent stress range analysis table
表 5. 等效应力极差分析表格

项	水平	螺栓直径	结合面摩擦系数	预紧力
K 值	1	31.52	19.6	11.29
	2	21.22	20.42	21.37
	3	11.69	24.41	31.78
K 平均值	1	10.51	6.53	3.76
	2	7.07	6.81	7.12
	3	3.9	8.14	10.59
最佳水平		25	0.3	3000
R 值		6.61	1.60	6.83
水平数量		3	3	3
每水平重复数 r		3.0	3.0	3.0

由表 5 及图 6 所示可知，3 个因素中，结合面摩擦系数极差最小，是对等效应力影响最小的因素；预紧力极差最大，对指标影响最为显著。

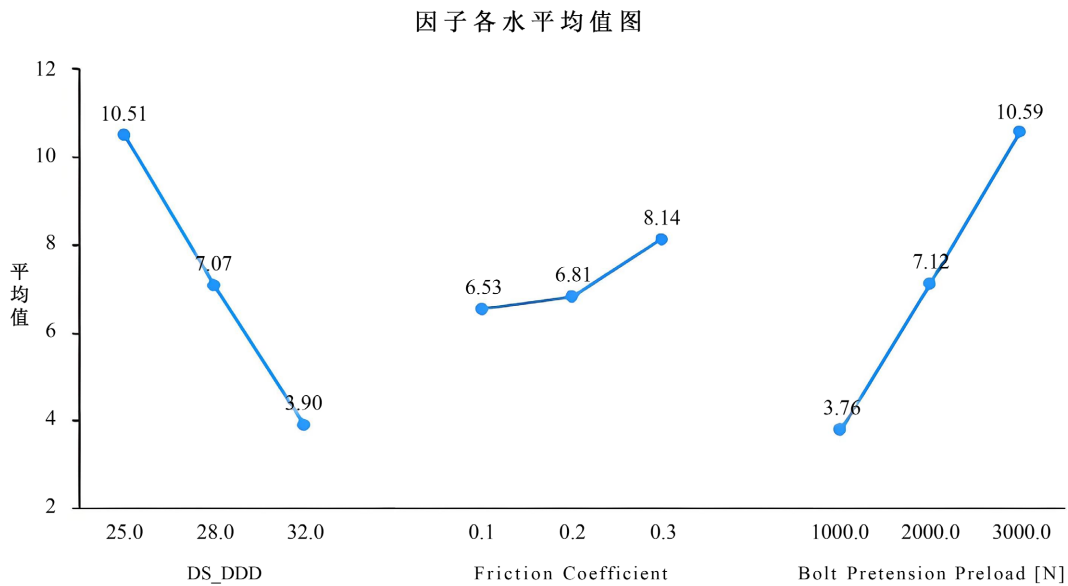


Figure 6. Variation trend of the mean value of each level
图 6. 各水平平均值变化趋势

根据表极差分析的结论，确定了在三因子三水平正交试验中对总应变影响最优组合为：螺栓直径 28 mm；结合面摩擦系数 0.3；预紧力 1000 N；对等效应力影响最优组合为：螺栓直径 32 mm；结合面摩擦系数 0.1；预紧力 1000 N。

5. 总结与展望

本文以螺栓连接结构为研究对象，采用正交试验设计方法，并结合 ANSYS Workbench 软件进行静力学仿真，重点分析了螺栓直径、结合面摩擦系数及预紧力对总应变与等效应力的影响。通过极差分析，

确定了不同因素对总应变与等效应力的影响顺序,并提出了相应的优化方案。研究表明,预紧力是对总应变和等效应力影响最大的因素,其次是螺栓直径和结合面摩擦系数,优化后的参数组合在两方面均取得了较好的性能表现,得到以下结论:对正交试验结果数据进行了极差分析,确定影响总应变因素的主次顺序为:预紧力 > 螺栓直径 > 结合面摩擦系数,并比较了因素水平的影响趋势,得到较优的方案水平组合:螺栓直径 28 mm;结合面摩擦系数 0.3;预紧力 1000 N。影响等效应力因素的主次顺序为:预紧力 > 螺栓直径 > 结合面摩擦系数,得到较优的方案水平组合:螺栓直径 32 mm;结合面摩擦系数 0.1;预紧力 1000 N。

展望未来的研究方向,本研究的设计仅涵盖了三因素三水平,分析了螺栓直径、结合面摩擦系数及预紧力对结构力学性能的影响。然而,在实际工程应用中,螺栓连接系统的性能还受到其他诸多因素的影响。今后的研究可以从以下几个方面进行扩展:材料参数的影响,外部尺寸变化,水平数的增加等因素研究螺栓连接性能。

参考文献

- [1] 王晓婷. 剪切载荷作用下单搭接螺栓连接板的刚度与强度研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学, 2023.
- [2] 唐洲. 风力发电机组高强度螺栓连接有限元模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 绍兴: 绍兴文理学院, 2022.
- [3] 钟茂平. 配合精度对复合材料螺栓连接静强度的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
- [4] Li, H., Liu, D., Guo, G., Zhang, J. and Ge, H. (2024) Experimental Study on the Corrosion Performance of Weathering High-Strength Bolt Connections. *Journal of Constructional Steel Research*, **219**, Article 108614. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108614>
- [5] Zhu, Y., Zhang, X., Kong, W., Chen, Y., Chen, W. and Jiang, L. (2023) Experimental and Numerical Investigations on Shear Behavior of High-Strength Bolted Connections after Impact. *Journal of Building Engineering*, **79**, Article 107872. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107872>
- [6] 姜晓伟, 曾建江, 曾昭炜, 等. 配合方式对复合材料单钉单剪螺栓连接接头刚度的影响及其机制[J]. 复合材料学报, 2016, 33(3): 589-596.
- [7] 张岐良, 曹增强. 复合材料螺栓性能的影响因素研究[J]. 航空学报, 2012, 33(4): 755-762.