

Stress Concentration Analysis of High Strength Bolts Based on Different Thread Forms

Xiantong He*, Honggang Lei#, Yajie Yan

School of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi
Email: 371403682@qq.com, #lhgang168@126.com

Received: Feb. 16th, 2019; accepted: Mar. 5th, 2019; published: Mar. 12th, 2019

Abstract

The fatigue performance of bolt-and-ball joints depends on the fatigue strength of high-strength bolts. A large number of theoretical tests have shown that stress concentration is the main cause of fatigue failure of high-strength bolts. This article has collected various forms of bolt threads and found that the main factors affecting the stress concentration of the bolt include the angle of the thread, the diameter of the bolt, the radius of the root of the thread, the pitch of the thread, the depth of the thread, the number of turns of the thread, the thread, and the form of the gap. In this paper, the finite element analysis software ABAQUS is used to quantitatively determine the stress concentration factor of high-strength bolts under different thread notch forms.

Keywords

High-Strength Bolt, Thread Form, Stress Concentration, Grid Structure

基于不同螺纹形式的高强螺栓应力集中分析

贺宪桐*, 雷宏刚#, 闫亚杰

太原理工大学建筑与土木工程学院, 山西 太原
Email: 371403682@qq.com, #lhgang168@126.com

收稿日期: 2019年2月16日; 录用日期: 2019年3月5日; 发布日期: 2019年3月12日

摘要

螺栓球节点网架的疲劳性能取决于高强螺栓的疲劳强度, 大量理论试验表明应力集中是高强螺栓疲劳破

*第一作者。

#通讯作者。

坏的主要原因。本文收集了各种形式的螺栓螺纹,发现影响螺栓应力集中的主要因素包括螺纹的升角、螺栓的直径、螺纹的牙根圆角半径、螺纹的螺距、螺纹的深度、螺纹的圈数以及螺纹的缺口形式。本文通过有限元分析软件ABAQUS,定量求得不同螺纹缺口形式下高强螺栓的应力集中系数。

关键词

高强螺栓, 螺纹形式, 应力集中, 网架结构

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

螺栓球节点网架结构应用广泛,在悬挂吊车的作用下容易发生疲劳破坏,而这关键在于高强螺栓的疲劳强度。高强螺栓根据自身特性,需要螺纹来进行连接,而螺纹势必会产生缺口效应,这样就容易发生应力集中,这是高强螺栓发生疲劳破坏的主要根源。根据已有学者所做的疲劳试验[1],疲劳源区一般出现在螺栓球与高强螺栓连接的第一个外露螺纹处,这也是应力集中最严重的部位。不同行业领域所用的螺栓不一样,螺纹形式不同,产生的应力集中大小也不尽相同。因此找出一种螺栓螺纹,使其应力集中最小,对于提高高强螺栓的疲劳强度,减少螺栓球节点网架疲劳破坏具有重要意义。

2. 高强螺栓的应力集中及其影响因素

2.1. 应力集中概述

构件表面由于不连续,存在缺口,导致应力分布不均,产生应力峰值的情况,称之为“应力集中”。应力集中系数 K_t 由缺口平面上局部峰值应力与名义应力之比表示,是衡量应力集中严重性的重要指标。

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_n}$$

式中, σ_{\max} ——峰值应力; ε_{\max} ——峰值应变; σ_n ——名义应力; ε_n ——应力及应变。

名义应力是高强螺栓在外力(轴向拉力)作用下缺口处产生的平均应力值。根据螺栓的加载方式,可以由下式确定:

$$\sigma_n = \frac{P \times \frac{\pi}{4} [d_k^2 - (d + 2r)^2]}{\frac{\pi}{4} d_r^2}$$

P ——螺栓所受均布面荷载(MPa); d_k ——螺帽直径(mm); d ——螺栓直径(mm); r ——螺帽过渡圆角半径(mm); d_r ——螺纹沟底直径(mm)。

2.2. 影响因素分析

已有部分学者[2]-[13]针对高强螺栓的应力集中问题,通过建模分析得出结论,影响高强螺栓应力集中系数的主要因素包括螺纹的升角、螺栓的直径、螺纹根部圆角半径、螺纹深度、螺栓螺距以及螺纹的齿数等。其中,螺栓直径、螺纹深度与应力集中系数成正相关,螺纹牙根圆角半径、螺纹齿数与应力集

中系数成负相关，而螺纹升角和螺距对应力集中影响微乎其微。

3. 螺纹缺口效应分析

3.1. 研究方法

根据规范[14]，螺栓球节点网架用高强螺栓主要是普通螺纹，规格为 M12~M64。本文以 M30 高强螺栓为研究对象，通过 ABAQUS 定量地求出高强螺栓在不同螺纹缺口形式下的应力集中系数。

3.2. 螺栓以及各种螺纹的主要尺寸

本文以 M30 高强螺栓为研究对象，其主要尺寸见下图 1。

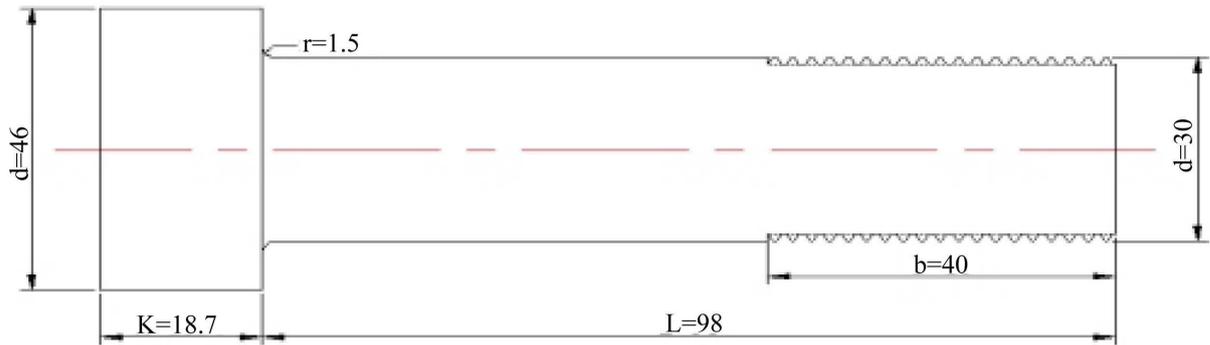


Figure 1. M30 high strength bolt size (unit: mm)

图 1. M30 高强螺栓尺寸(单位: mm)

通过查询各个领域所用螺栓种类、规格，发现不同类型的螺栓具有不同的螺纹形式，不同的螺纹具有不同的作用，除了常见的普通螺纹是用来连接构件，还有用于传动作用的梯形螺纹、锯齿形螺纹和方牙螺纹，还有用于航空航天方面的 MJ 螺纹，用于管道连接的管螺纹等。

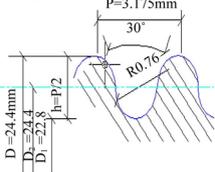
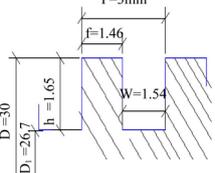
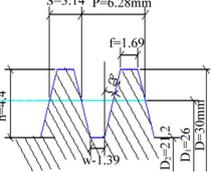
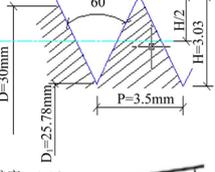
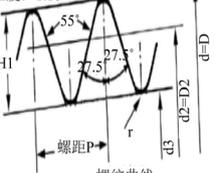
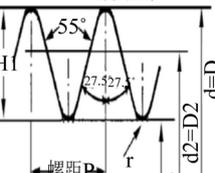
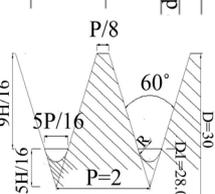
笔者将这些螺纹的基本牙型绘制出来，并把主要尺寸计算出来，整理见下表 1。

Table 1. Summary of the dimensions of each part of different types of threads (unit: mm) [15]-[20]

表 1. 不同型式螺纹的各部分尺寸汇总(单位: mm) [15]-[20]

螺纹牙型	型式尺寸表现图	牙型角 α	不同直径对应的螺距 P			牙型高度 h	外径	内径	牙顶宽 f	牙底宽 W	圆角半径 r
			20	30	39						
普通螺纹 GB192~197-63		60°	2.5	3.5	4	0.5413P	D	D-2h	0.125P	0.125P~0.166P	0.125P
梯形螺纹		30°	2	3	3	0.5P	D	D-P-0.5	0.366P	0.366P	0.2
锯齿型螺纹		33°	-	10	-	0.75P	D	D-2h	0.264P	2.84	1.24

Continued

圆弧螺纹		30°				$P = 25.4/n$ (n-每英寸牙数)	0.5P	D	D-2h	间隙 $z = 0.05P$	0.2385P
方牙螺纹		-	2	3	3		$0.5P+$ (0.1~0.2)	D	D-2h	$0.5P+$ (0.03~0.05)	P-w 螺旋升角 $\lambda = 1^\circ 49'$
阿基米德螺纹		14.5°				πmc	2.157 mc	D	D-2h	1.054 mc	轴向模数 $mc = 2$
三角形螺纹		30°	2.5	3.5	4		0.5413P	D	D-2h	0.125P	$0.125P-0.166P$ $0.108P-0.144P$
55°圆锥管螺纹		55°				$P = 25.4/n$ (n-每英寸牙数)	0.64P	D	D-2h	锥度角 Φ $1^\circ 47' 24''$	0.137P
55°圆柱管螺纹		55°				$P = 25.4/n$ (n-每英寸牙数)	0.64P	D	D-2h	-	0.137P
MJ 螺纹		60°	1.5	2	2		0.487P	D	D-2h	0.125P	$0.3125P$ $0.15P-0.18P$

3.3. 计算模型建立

3.3.1. 确定缺口位置和形式

《规程》[21]中规定，由于锥头或封板的存在，高强度螺栓旋进螺栓球的最大长度会受到限制，一般为 $L = 1.1 \times d$ (d 为螺栓直径)。同时大量疲劳试验[22] [23]说明高强螺栓与螺栓球啮合的第一扣螺纹处为主要断裂区。因此，考虑螺栓破坏的最不利状况，将螺栓的缺口位置定在 $1.1d$ 处，对于研究其应力集中较有意义。

已有许多学者[24] [25] [26] [27]通过研究螺纹升角，发现当升角小于 4° 时，螺纹上的应力分布几乎不

受影响。本文模型中，螺栓在轴向拉力作用下，简化为带有环状牙形的单缺口轴对称模型。

3.3.2. 几何模型

本文通过 ABAQUS 有限元分析软件，以上述不同螺纹缺口形式的高强螺栓为研究对象。建模过程见下图 2。

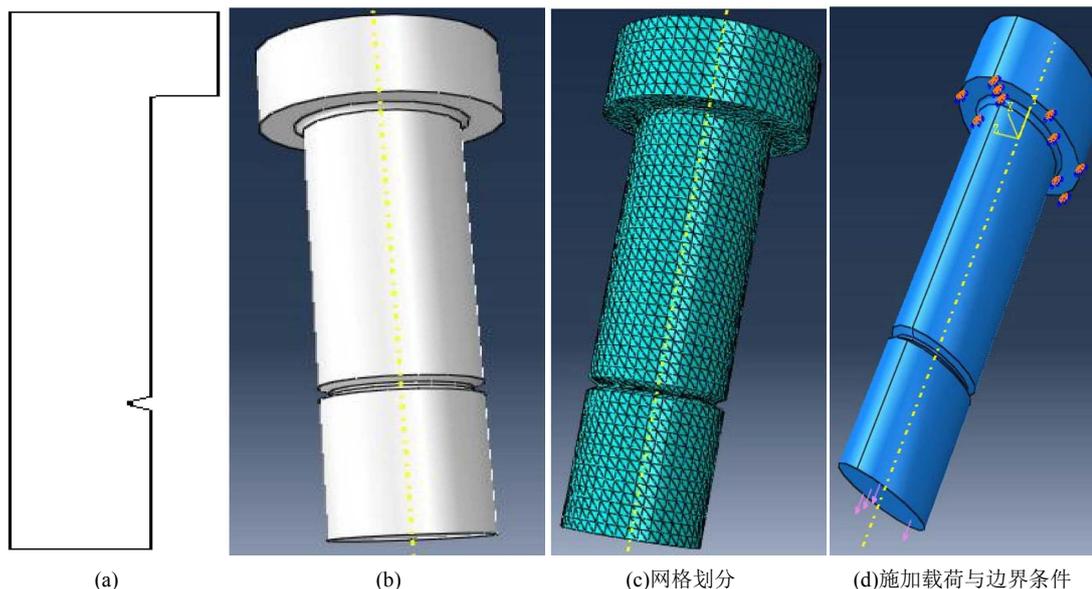


Figure 2. Modeling process

图 2. 建模过程

3.3.3. 材料性质

对构件赋予材料特性，根据 40Cr 高强螺栓，取弹性模量： $E = 2.06 \times 10^5$ MPa；泊松比： $\nu = 0.3$ 。

3.3.4. 施加载荷及边界条件

螺栓球节点网架中，高强螺栓通常仅受到轴力作用，《规程》[22]规定其受拉承载力为

$$N_t^b \leq \varphi A_{eff} f_t^b$$

N_t^b ——高强螺栓拉力设计值； φ ——螺栓直径 d 对承载力影响系数， $d < 30$ mm 时， $\varphi = 1.0$ ， $d \geq 30$ mm 时， $\varphi = 0.93$ ； A_{eff} ——高强螺栓的有效面积； f_t^b ——高强螺栓抗拉强度设计值。

以公式为依据，在螺栓端部施加 100 MPa 的轴向均布载荷，使螺栓受力小于其屈服强度，同时保证螺栓峰值应力在弹性范围内。螺帽周边通过施加固端约束，达到实际工程中锥头或封板对螺栓的约束固定作用。

3.3.5. 计算结果

计算分析得出普通螺纹螺栓的应力云图如下图 3。可以发现峰值应力出现在螺纹根部，与螺栓的疲劳破坏试验结果相符合。

将本文的计算结果与其他相关文献的相关数据整理见下表 2，经过比较发现计算值有所差异。这与模型的差异性、网格划分精度、螺栓约束以及端部荷载加载方式有关。同时说明了不同形式的缺口所产生的应力集中大小确实不同。将其进行排序可得：矩形螺纹 < 梯形螺纹 < 锯齿形螺纹 < 三角形螺纹 <

MJ 螺纹 < 普通螺纹 < 圆弧形螺纹 < 阿基米德螺纹。

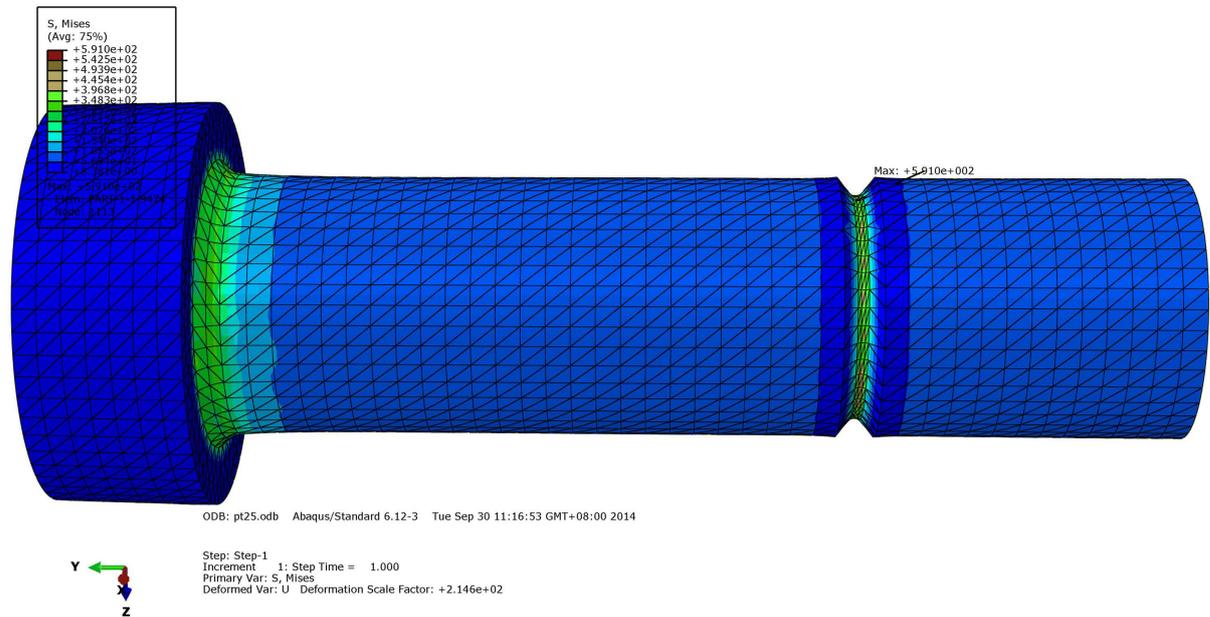


Figure 3. Ordinary threaded bolt stress cloud

图 3. 普通螺纹螺栓应力云图

Table 2. Summary of notch stress concentration factor of M30 high strength bolt

表 2. M30 高强螺栓缺口应力集中系数汇总

螺纹名称	本文计算结果			文献[28]	文献[29]	文献[30]	文献[31]
	σ_{max} (MPa)	σ_n (MPa)	K_t				
普通螺纹	591.6	149.5	3.94	3.80	3.15	3.37	3.91
梯形螺纹	616.9	178.3	3.46	2.69	-	3.15	-
锯齿型螺纹	2442.6	642.8	3.8	2.57	3.06	-	4.12
圆弧螺纹	1292	197.6	6.54	2.67	5.84	5.4~6.0	3.25
矩形(方牙)螺纹	400.5	144.1	2.78	2.93	2.09	-	-
阿基米德螺纹	1528.7	228.5	6.69	4.08	5.04	-	-
三角形螺纹	601.1	154.5	3.89	5.59	2.31	-	-
MJ 螺纹	523.7	134	3.9	-	-	-	-

4. 结论与建议

1) 通过定量求得八种不同缺口形式的单螺纹应力集中系数,发现锯齿形和 MJ 螺纹的疲劳强度较高,性能好,应用范围广,可以尝试应用于螺栓球节点网架的高强螺栓。

2) 建议在本文研究基础上,可以继续探讨大口径高强螺栓不同缺口下的应力集中系数,得到更普遍的规律。

3) 本文针对的是高强螺栓单螺纹形式下的应力集中分析,建议今后开展不同螺纹缺口形式下高强螺栓多螺纹的应力集中分析。

4) 本文将单螺纹缺口定义在螺栓 1.1 d 的位置上,今后可以设想高强螺栓假拧的状况下,改变缺口位置来观察应力集中的变化情况。

基金项目

国家自然科学基金(51578357)资助。

参考文献

- [1] 雷宏刚. 螺栓球节点网架结构高强螺栓连接疲劳性能的理论及试验研究[D]: [博士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- [2] 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(S1): 49-53 + 81.
- [3] 雷宏刚, 刘丽君, 裴艳, 等. 螺栓球节点网架中高强螺栓的缺口效应分析[C]//中国钢结构稳定与疲劳分会. 2004年学术交流会论文集. 太原: 太原理工大学, 2004: 356-362.
- [4] 刘丽君. 螺栓球节点网架用高强螺栓的疲劳影响因素及缺口效应分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2003.
- [5] 雷宏刚. 高强螺栓疲劳缺口系数的有限元分析[C]//中国力学学会. 第16届全国结构工程学术会议论文集. 太原: 太原理工大学, 2007: 267-274.
- [6] 刘丽君. 网架螺栓球节点用高强螺栓的缺口效应分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2005, 44(6): 783-786.
- [7] 雷宏刚, 吴谨辉. 螺栓球节点网架结构中高强螺栓的疲劳影响因素分析[J]. 科学之友, 2011(14): 1-3.
- [8] 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.
- [9] 苗德华, 薛强, 王平. 提高钢轨螺栓疲劳强度的有效方法[J]. 铁道建筑, 2005(2): 33-35.
- [10] 苗德华, 方沂, 薛强, 白卫卫. 钢轨螺栓结构参数对其强度的影响[J]. 天津工程师范学院学报, 2006, 16(2): 5-7.
- [11] 薛强, 苗德华, 汪文颖. 钢轨螺栓螺纹根部圆弧半径对螺栓强度的影响[J]. 天津科技大学学报, 2004, 19(1): 52-54.
- [12] 袁伟杰, 杜新胜, 张国峰, 等. 钢轨接头螺栓的疲劳失效影响因素分析[J]. 机械制造, 2012, 50(8): 78-81.
- [13] 郑慧敏. 网架结构中高强螺栓螺纹对应力集中的影响[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会. 中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会 2008年学术交流会论文集. 沈阳: 中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会《钢结构》杂志编辑部, 2008: 4.
- [14] 郑慧敏. 网架螺栓球节点的应力集中分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2008.
- [15] 网架螺栓球节点用高强度螺栓(GB/T16939-1997).
- [16] 普通螺纹基本牙型(GB192-81).
- [17] 普通螺纹基本尺寸(GB196-81).
- [18] 梯形螺纹牙型(GB5796.1-86).
- [19] 国际螺纹手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [20] 金关梁, 金在富. 螺纹加工与测量手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [21] 网架结构设计及施工规程(JGJ7-91)[M]. 中华人民共和国建设部, 1991.
- [22] 雷宏刚. 螺栓球节点网架常幅疲劳试验数据再分析[C]//中国钢协结构稳定与疲劳分会 2000年学术交流会论文集. 太原: 太原理工大学, 2000: 202-205.
- [23] 冯秀娟, 黄炳生, 林醒山. 网架悬挂吊车吊点的疲劳性能试验研究[J]. 东南大学学报, 1994(3): 99-105.
- [24] 张盛霞, 汪明伟. 35CrMo 连杆螺栓断裂失效分析[J]. 机械, 1995(6): 39-41.
- [25] 卜炎. 螺纹联接设计与计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995: 88-94.
- [26] 赵长富. 张紧螺栓的断裂分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1995(4): 115-119.
- [27] Zhao, H. (1994) Analysis of the Load Distribution in a Bolt-Nut Connector. *Computer and Structures*, **53**, 1465-1472.
- [28] 雷宏刚, 裴艳, 尹德钰. 螺栓球节点网架中高强螺栓的应力集中分析[C]//第十届空间结构学术会议论文集. 北京, 2002: 138-145.
- [29] 西天正孝. 应力集中[M]. 机械工业出版社, 1986.
- [30] 约翰 H 比克福德. 螺纹紧固件的疲劳破坏[M]. 日本螺丝协会志.
- [31] CB 谢联先. 机器零件的承载能力和强度计算[M]. 1984.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org