

文章编号: 1008-1542(2012)02-0126-05

联接螺栓静强度的模糊可靠性设计研究

刘小宁^{1,2}, 张红卫¹, 韩春鸣¹, 刘 兵¹, 袁小会¹, 陈 刚¹

(1. 武汉软件工程职业学院机械工程系, 湖北武汉 430205; 2. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北武汉 430074)

摘要:应用信息熵理论, 将联接螺栓的模糊静强度和模糊载荷分别等效为随机静强度和随机载荷, 按联接螺栓安全等级确定其静强度的可靠指标, 建立按可靠指标进行联接螺栓静强度设计的方法, 得到联接螺栓静强度的可靠性安全系数。研究表明: 1) 对于安全等级为一般、比较重要和重要的联接螺栓, 其屈服强度的可靠指标分别为 0.815, 1.920 和 3.819, 抗拉强度的可靠指标分别为 3.740, 4.729 和 6.828; 2) 基于满足联接螺栓静强度的可靠指标, 对于安全等级为一般、比较重要和重要的联接螺栓, 在静载荷时, 螺栓屈服强度的最小可靠性安全系数分别为 1.10, 1.25 和 1.45, 抗拉强度的最小可靠性安全系数分别为 1.35, 1.50 和 1.75; 在变载荷时, 螺栓屈服强度的最小可靠性安全系数分别为 1.15, 1.35 和 1.60, 抗拉强度的最小可靠性安全系数分别为 1.60, 1.80 和 2.20。

关键词:联接螺栓; 模糊静强度; 可靠指标; 可靠性设计; 可靠性安全系数

中图分类号: TH131.3; TQ050.2 文献标志码: A

Fuzzy reliable design of conjunction bolt static strength

LIU Xiao-ning^{1,2}, ZHANG Hong-wei¹, HAN Chun-ming¹, LIU Bing¹, YUAN Xiao-hui¹, CHEN Gang¹

(1. Department of Mechanical Manufacture Engineering, Wuhan Polytechnic College of Software and Engineering, Wuhan Hubei 430205, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: With information entropy theory, the fuzzy static intensity and fuzzy load of conjunction bolt will be equivalent to the stochastic static intensity and the stochastic load, respectively. The static intensity reliable index according to conjunction bolt safety grade is determined. With the reliable index, the design method of conjunction bolt static strength is established, and the reliability safety factor of the static strength is obtained. The research results show that: 1) Regarding security rating for general, relatively important and important conjunction bolts, the reliable indexes of yield intensity are 0.815, 1.920 and 3.819, respectively; and the reliable indexes of bolt tensile strength are 3.740, 4.729 and 6.820, respectively. 2) Based on the reliable index which satisfies the conjunction bolt static intensity, regarding security rating for general, relatively important and important conjunction bolts and under static load condition, the smallest reliable safety factors of yield strength are 1.10, 1.25 and 1.45 respectively; the smallest reliable safety factors of tensile strength are 1.35, 1.50 and 1.60, respectively. Under changing load condition, the smallest reliable safety factors of yield strength are 1.15, 1.35 and 1.75, respectively; the smallest reliable safety factors of tensile strength are 1.60, 1.80 and 2.20, respectively.

Key words: conjunction bolt; fuzzy static strength; reliable index; reliable design; reliable safety factor

联接螺栓是工程上应用广泛的紧固件, 其安全性越来越受到人们重视。联接螺栓静强度是指其屈服和

收稿日期: 2011-10-08; 责任编辑: 冯 民

基金项目: 湖北省教育厅科研基金资助项目(B20097801); 武汉市创新人才开发资金重大创新项目

作者简介: 刘小宁(1963-), 男, 湖北武汉人, 教授, 正高职高级工程师, 主要从事机械结构、压力容器可靠性方面的研究和教学工作。E-mail:

lxngjxy@163.com

抗拉强度。目前,工程界采用确定性方法进行联接螺栓静强度设计^[1],其设计思路是将联接螺栓的载荷与静强度视为确定量,采用屈服安全系数确定螺栓材料的许用应力,计算螺栓最小直径,确定螺栓规格。

在工程实践中,人们发现影响联接螺栓载荷与静强度的因素比较多,存在不确定性。例如,为确保压力容器密封的可靠性,必须控制密封结构所需的螺栓最小预紧载荷,而确定螺栓最小预紧载荷的密封垫片特性具有不确定性^[2],螺栓尺寸和材料机械性能的理论值与实际值之间存在差异,表明其也具有不确定性^[3];这些不确定性是由随机性和模糊性造成的,文献[4]和文献[5]基于随机不确定性,文献[6]和文献[7]基于模糊不确定性,对联接螺栓静强度的可靠性设计方法进行了有益的探索,但有待于系统化。信息熵理论认为^[8],随机不确定性是模糊不确定性的特例,当模糊熵与随机熵相等时,可将模糊变量等效随机变量,因此,把联接螺栓的静强度与载荷视为模糊变量是合理的。

本文以联接螺栓为研究对象,应用信息熵理论,将其模糊静强度与模糊载荷分别等效为随机静强度与随机载荷,按联接螺栓的安全等级或者重要性,确定其静强度的可靠指标,建立按可靠指标进行联接螺栓静强度设计的方法,得到其静强度可靠性安全系数。

1 建立模型

1.1 基本理论

联接螺栓静强度的可靠度是指其初始模糊屈服与抗拉强度大于模糊载荷的概率,联接螺栓静强度的可靠指标是指度量许用可靠度的数值指标。

如果联接螺栓模糊静强度和模糊载荷能分别等效为符合正态分布的随机变量,则其可靠指标与分布参数之间存在如下关系^[9-10]:

$$[\beta_r] = \frac{za_r - a_F}{\sqrt{z^2 a_r^2 V_r^2 + a_F^2 V_F^2}} \quad (1)$$

式中:[β_r]为可靠指标,在屈服与抗拉准则下分别为 $[\beta_s]$ 与 $[\beta_b]$; z 为螺栓个数; a_r 为单个螺栓模糊静强度等效随机的均值,在屈服与抗拉准则时分别取 a_s 与 a_b ; a_F 为模糊载荷等效随机的均值; V_r, V_F 分别为模糊静强度与模糊载荷等效随机的变异系数, V_r 在屈服与抗拉准则时分别取 V_s 与 V_b 。

V_r 与 V_F 可分别表示为

$$V_r = \frac{\sqrt{2}k_r}{2a_r}, \quad V_F = \frac{\sqrt{2}k_F}{2a_F} \quad (2)$$

式中: k_r 为模糊静强度的分布参数,在屈服与抗拉准则时分别取 k_s 与 k_b ; k_F 为模糊载荷的分布参数。

可靠指标对应的许用可靠度为

$$P = \Phi([\beta_r]) \quad (3)$$

式中: P 为许用可靠度; $\Phi([\beta_r])$ 为标准正态积分。

1.2 螺栓最小直径均值的计算公式

根据联接螺栓静强度可靠指标计算最小直径,是其可靠性设计的主要内容。

单个联接螺栓模糊静强度等效随机的均值为

$$a_r = \frac{\pi}{4} d^2 R \quad (4)$$

式中: d 为螺栓最小直径的均值,mm; R 为螺栓材料机械性能的均值,MPa。当 R 分别取螺栓材料屈服应力的均值 R_{el} 与抗拉应力的均值 R_m 时, a_r 分别为 a_s 与 a_b 。

由式(1)、式(4)可得螺栓最小直径均值的计算公式:

$$d = \sqrt{\frac{4a_F}{z\pi R} \cdot \frac{1 + [\beta_r] \sqrt{V_r^2 + V_F^2} - [\beta_r]^2 V_r^2 V_F^2}{1 - [\beta_r]^2 V_r^2}} \quad (5)$$

1.3 可靠性安全系数的计算公式

可靠性安全系数的定义为

$$n = \frac{za_r}{a_F} \quad (6)$$

式中: n 为可靠性安全系数,在屈服与抗拉准则时,分别取 n_s 与 n_b 。

由式(1)、式(6)可得可靠性安全系数的计算公式:

$$n = \frac{1 + [\beta_r] \sqrt{V_r^2 + V_F^2} - [\beta_r]^2 V_r^2 V_F^2}{1 - [\beta_r]^2 V_r^2} \quad (7)$$

在不同失效准则下,可靠性安全系数的确定值不得小于不同工况计算值中的较大值。

2 模糊静强度与模糊载荷等效随机的分布规律与分布参数

2.1 分布规律

由于影响联接螺栓静强度与载荷的因素基本符合正态分布,例如,材料的屈服与抗拉应力、螺栓的制造误差以及载荷的控制值等^[2,9-10],因此,可将联接螺栓的静强度与载荷视为隶属函数基本符合正态分布的模糊变量,根据信息熵理论中的模糊性度量与随机性度量相等可实现模糊变量等效随机变量的原理,等效的随机静强度与随机载荷基本符合正态分布^[8]。

2.2 分布参数

1) 静强度的分布参数

联接螺栓模糊静强度的分布参数为

$$k_r = \frac{\pi}{4} \sqrt{(2dR)^2 k_d^2 + d^2 k_R^2} \quad (8)$$

式中: k_d 为螺栓模糊最小直径等效随机的标准差,mm; k_R 为螺栓材料机械性能的分布参数,MPa,在屈服与抗拉准则时分别取 k_{Rs} 与 k_{Rb} 。

根据中国机械和冶金行业的制造水平,建议取 $k_d = 0.02d$, $k_{Rs} = 0.10R_{eL}$, $k_{Rb} = 0.05R_m$ 。

把有关数据代入式(8),再由式(4)与式(2)可得模糊静强度等效随机的变异系数: $V_s = 0.07616$, $V_b = 0.04528$ 。

2) 载荷的分布参数

工程上把联接螺栓的实际载荷分为静载荷和变载荷,用设计载荷预测螺栓的实际载荷^[1],即模糊载荷等效随机的均值等于设计载荷。由于螺栓的静强度设计并不考虑疲劳强度,因此,可认为模糊静载荷的分布参数 $k_F \leq 0.10a_F$,模糊变载荷的分布参数 $k_F \leq 0.20a_F$ 。

从偏于安全的角度,把有关数据代入式(2),可得模糊静载荷与变载荷等效随机的变异系数 V_F 分别为0.07071与0.14140。

3 可靠指标与可靠性安全系数

3.1 可靠指标

可靠指标是进行联接螺栓静强度可靠性设计和确定其静强度可靠性安全系数的重要指标,因此,可基于机械设计手册^[1]的长期应用实践,按联接螺栓的安全等级或者重要性确定其可靠指标。

按中国工程结构可靠性统一设计标准^[11]的思想,联接螺栓的安全等级或者重要性也可分为一般、比较重要和重要3个级别;文献^[9]和文献^[10]从等可靠度观点确定了压力容器概率安全评定的可靠指标,因此,在屈服与抗拉准则下,对于安全等级为一般、比较重要和重要的联接螺栓,其可靠指标可分别与压力容器在屈服与爆破准则下的液压试验、气压试验与正常操作的概率安全评定可靠指标相对应,具体见表1。

表1 联接螺栓静强度的可靠指标

Tab.1 Reliable index of conjunction bolt static strength

材料	失效准则	可靠指标与许用可靠度	静载荷或变载荷		
			一般	比较重要	重要
碳素钢	屈服准则	$[\beta_s]$	0.815	1.920	3.189
		$\Phi([\beta_s])$	0.7925	0.97257	0.992886
合金钢	抗拉准则	$[\beta_b]$	3.740	4.729	6.828
		$\Phi([\beta_b])$	0.99990799	0.999998876	0.99999999951

3.2 可靠性安全系数

把表 1 及有关数据代入式(7),可得可靠性安全系数的计算值和确定值,见表 2。

表 2 联接螺栓静强度安全系数的计算值与确定值

Tab. 2 Predicted and the definite values of safety factor for conjunction bolt static strength

材料	失效准则	安全系数的 计算值与确定值	静载荷			变载荷		
			一般	比较重要	重要	一般	比较重要	重要
碳素钢	屈服准则	计算值	1.089	1.225	1.410	1.135	1.334	1.594
		确定值 n_s	1.100	1.250	1.450	1.150	1.350	1.600
合金钢	抗拉准则	计算值	1.350	1.457	1.718	1.594	1.768	2.177
		确定值 m_b	1.350	1.500	1.750	1.600	1.800	2.200

3.3 讨论

1) 由式(5)、式(7)可得:

$$d = \sqrt{\frac{4a_F n}{z\pi R}} \quad (9)$$

虽然式(9)与传统的确定性设计方法中计算联接螺栓最小直径公式形式相同^[1],但是传统的确定性设计方法中的安全系数是经验性的,而式(9)中的安全系数考虑了可靠指标的要求,可以定量分析螺栓静强度的可靠度,因此,借用可靠性设计思想,按可靠指标确定可靠性安全系数,可提高联接螺栓静强度确定性设计方法的水平,同时,确定性设计方法的长期应用实践,为可靠性设计方法的建立提供了基础,因此,可靠性设计方法是传统确定性设计方法的发展,借用可靠性设计思想,可推动联接螺栓静强度设计技术的进步。

2) 传统的确定性设计方法按屈服准则进行联接螺栓静强度设计,按静载荷和变载荷工况推荐的屈服安全系数见表 3^[1]。

表 3 文献[1]推荐的螺栓屈服安全系数

Tab. 3 Bolt yield safety factor of reference[1]

材料	静载荷			变载荷		
	M6—M16	M16—M30	M30—M60	M6—M16	M16—M30	M30—M60
碳素钢	4~3	3~2	2~1.3	10~6.5	6.5	6.5~10
合金钢	5~4	4~2.5	2.5	7.5~5	5	5~7.5

由以上分析和表 2、表 3 可知:确定性设计方法仅按屈服准则进行联接螺栓静强度设计似不周全,应该考虑抗拉准则对螺栓最小直径的影响;除碳素钢的 M30—M60 螺栓外,文献[1]推荐的屈服安全系数较大,表明其对螺栓屈服强度的设计偏于安全。

4 结 语

1) 应用信息熵理论,将联接螺栓的模糊静强度和模糊载荷分别等效为随机静强度和随机载荷,建立按可靠指标进行螺栓静强度设计的方法。

2) 按联接螺栓的安全等级确定其静强度的可靠指标。安全等级为一般、比较重要和重要的联接螺栓,屈服强度的可靠指标分别为 0.815,1.920 和 3.819,抗拉强度的可靠指标分别为 3.740,4.729 和 6.828。

3) 根据联接螺栓静强度的可靠指标,得到计算螺栓最小直径均值的通用公式。

4) 在静载荷和变载荷工况下,基于满足不同安全等级联接螺栓静强度的可靠指标,分别得到其静强度的最小可靠性安全系数。安全等级为一般、比较重要和重要的联接螺栓,在静载荷工况下,屈服强度的最小可靠性安全系数分别为 1.10,1.25 和 1.45,抗拉强度的最小可靠性安全系数分别为 1.35,1.50 和 1.75;在变载荷工况下,屈服强度的最小可靠性安全系数分别为 1.15,1.35 和 1.60,抗拉强度的最小可靠性安全系数分别为 1.60,1.80 和 2.20。

5) 传统的确定性设计方法仅按屈服准则进行联接螺栓静强度设计似不周全,应该考虑抗拉准则对螺栓

最小直径的影响。

参考文献:

- [1] 成大先. 机械设计手册(第2卷)[M]. 第5版. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [2] 刘小宁, 张红卫, 刘 岑, 等. 基于信息熵的垫片密封模糊可靠度[J]. 工业安全与环保(Industrial Safety & Environmental Protection), 2011, 37(9): 61-62.
- [3] 倪洪启, 谷耀新. 现代机械设计方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [4] 牟致忠. 螺栓联接的可靠性设计[J]. 机械设计(Journal of Machine Design), 1986, 4(5): 11-16.
- [5] 卢立新, 刘飞飞, 蔡改贫. 螺栓联接的可靠性研究[J]. 机械设计(Journal of Machine Design), 1995, 13(5): 20-21.
- [6] 楼文高, 潘德隆. 受轴向变载紧螺栓组联接的模糊可靠性优化设计[J]. 机械设计(Journal of Machine Design), 1998, 16(3): 28-30.
- [7] 陈金梅, 金誉辉, 金长义. 螺栓联接的模糊可靠性分析[J]. 石油化工设备(Petro-Chemical Equipment), 2011, 40(5): 29-33.
- [8] 刘小宁, 张红卫, 韩春鸣. 基于模糊可靠度的薄壁外压力容器稳定性设计[J]. 机械强度(Journal of Mechanical Strength), 2011, 33(2): 217-224.
- [9] 张红卫, 刘 兵, 刘 岑, 等. 压力容器概率安全评定的可靠指标研究[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology), 2011, 32(2): 192-196.
- [10] 刘小宁, 潘传九, 刘 岑, 等. 钢制内压力容器安全系数与试验压力系数研究[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology), 2011, 32(4): 321-325.
- [11] GB 50153—2008, 工程结构可靠性统一设计标准[S].

(上接第 121 页)

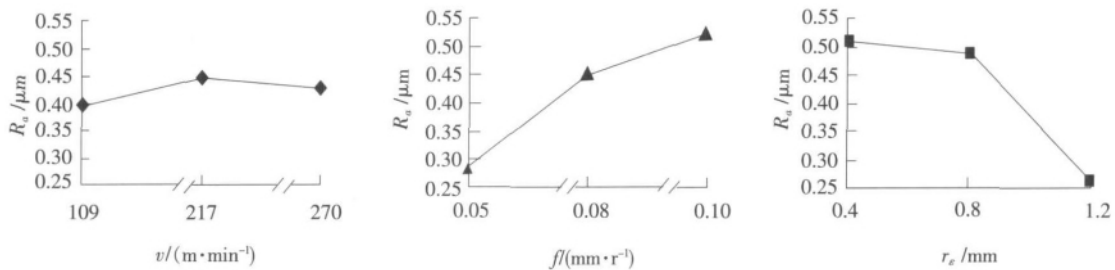


图 5 表面粗糙度的各因素影响趋势

Fig. 5 Changes of roughness value in various factors

精密硬态切削表面粗糙度的主要的因素;

3) 经正交试验优化后, 获得了相当于精磨加工的硬态切削加工表面, 其粗糙度 R_a 值为 $0.203 \mu\text{m}$ 。

参考文献:

- [1] ÖZEL T, KARPAT Y. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks[J]. Machine Tools and Manufacture, 2005, 42: 467-479.
- [2] 曹永泉, 张弘强. PCBN 刀具切削淬硬钢 GCr15 的磨损实验研究[J]. 中国机械工程(China Mechanical Engineering), 2006, 17(21): 2 305-2 308.
- [3] 陈 涛, 刘献礼. PCBN 刀具硬态切削淬硬轴承钢 GCr15 表面粗糙度试验与预测[J]. 中国机械工程(China Mechanical Engineering), 2007, 18(24): 2 973-2 976.
- [4] CHEN Guang-jun, LIU Xian-li, YUE Cai-xu. Study on causes of material plastic side flow in precision hard cutting process[J]. Advanced Materials Research, 2010(97-101): 1 875-1 878.
- [5] 陈光军. 淬硬钢高速精密切削过程稳定性与表面塑性侧流研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2011.