

高强度螺栓连接副

扭矩系数的影响因素

文/ 孙欣华、张先鸣

扭矩系数是评定高强度螺栓连接副性能等级的重要参数。本文讨论了高强度螺栓连接副扭矩系数的影响因素，结果表明，影响因素主要有连接副自身质量状况、检测环境、检测仪器精度、检测操作过程、连接副表面处理方式、螺栓预紧力等。任一条件稍有变化，对检测资料都会产生影响。

近年来，中国风电行业尤其是大容量的兆瓦级别大型风力发电机组得到快速发展，风电设备用的高强度紧固件由于长期野外服役，环境恶劣，维修条件差，所以要求风机稳定性强，正常连续工作情况下要求必须保证15 a以上的使用寿命。风电机组紧固件主要的品种有钢结构用高强度大六角头螺栓连接副及六角头螺栓连接副。与其他一般螺栓不同之处在于，连接副不仅具有高强度，而且在生产管理中，使其扭矩系数为一定值。扭矩系数不同于其他机械性能，它是连接副的总使用性能。连接副的扭矩系数是保证高强度螺栓在高应力下能达到一定紧固程度的重要性能，且连接副的扭矩系数直接关系到风电机组安装过程中高强度螺栓的紧固力，扭矩系数 $\bar{\kappa}$ 值及标准偏差的不准确会导致螺栓连接副紧固力的超拧或欠拧，对工程质量产生影响。

GB/T1231-2006标准中对钢结构用高强度大六角螺栓连接副扭矩系数的试验方法及验收做了严格规定；GB50205-2001标准中也对钢结构用高强度螺栓连接副的验收进行说明与规定。但是，随著高强度大六角头螺栓连接副及六角头螺栓连接副应用范围的扩大，尤其是低温双馈风电机组使用量的扩大，对螺栓连接副扭矩系数的重视程度也逐渐提高，由于标准中对M30以上螺栓标准没有明确技术指标，为此，笔者对高强度螺栓连接副扭矩系数的影响因素进行初步分析和研究，望与同行一起技术交流和探讨。

连接副的扭矩系数是保证高强度螺栓在高应力下能达到一定紧固程度的重要性能，且连接副的扭矩系数直接关系到风电机组安装过程中高强度螺栓的紧固力。

扭矩系数的确定

高强度螺栓连接副的组成和安装

每一连接副包括一个螺栓、一个螺母和两个垫圈，并应分属同批制造。组装连接副时，螺栓头下的垫圈有倒角的一面应朝向螺栓头，螺母下之垫圈有倒角的一面应朝向螺母支承面。

检测设备

- ① CSZ-1500A高强度螺栓扭矩系数试验机， $\geq M30$ 螺栓采用。
- ② YJZ-500高强度螺栓轴力智慧检测仪和手动扭矩扳手， $\leq M27$ 螺栓采用。

性能等级、材料及使用配合

高强度六角头螺栓连接副分为8.8和10.9级两个级别，具体性能等级、材料及使用配合见表1。

表1 连接副的性能等级、材料和使用配合

连接副	等级	材料牌号	使用配合
螺栓	10.9S 10.9	ML20MnTiB、 35VB、42CrMoA、 B7	10.9S级、 10.9级
	8.8S	45、40Cr	8.8级
螺母	10H	45、35、35CrMoA	10H级
	8H	45、SWRCH35K	8H级
垫圈	35~45HRC	45、SWRCH35K	35~45HRC

注：1、10.9S的含义为数位10表示公称抗拉强度的1/100，数位9表示公称屈服强度或公称规定非比例延伸强度与公称抗拉强度比值的10倍；10.9S Rm1040~1240Mpa；10.9级 Rm≥1040Mpa。

2、S表示钢结构用高强度大六角头螺栓，H表示钢结构用高强度大六角头螺母。

计算公式

单个螺栓连接副扭矩系数K的计算公式为：

$$K = \frac{T}{P \cdot d} \dots\dots\dots(1)$$

式中 T=施行扭矩（峰值），N.m

P=螺栓预拉力，KN

d=螺栓螺纹公称直径mm

同批螺栓扭矩系数平均值 \bar{k} 的计算公式为：

$$\bar{k} = \frac{\sum k_i}{n} \dots\dots\dots(2)$$

式中n为试样个数

同批扭矩系数的标准偏差 σ_{n-1} 的计算公式为：

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum (k_i - \bar{k})^2}{n-1}} \dots\dots(3)$$

验收标准

GB/T1231-2006规定：按批抽取8套连接副，检验并计算各连接副的扭矩系数，最后计算扭矩系数的平均值 \bar{k} 及标准偏差 σ_{n-1} 。平均值要求为0.110~0.150，标准偏差采用贝塞尔公式进行计算，应 ≤ 0.010 。

影响因素

钢结构大六角螺栓连接副扭矩系数是一个必检参数，除对连接副自身质量要求较高外，连接副的检测环境、检测设备和方法等的要求也较为严格，任一条件稍有变化，对检测资料就会产生影响。

连接副自身质量对扭矩系数的影响

螺栓及螺母、垫圈表面状况对扭矩系数有较大影响。螺栓出厂后，在运输过程中会产生碰撞，可能对螺纹造成损伤，影响扭矩系数。螺母、垫圈表面是否有油污、是否存在氧化皮等也会对扭矩系数产生影响。同时连接副是否锈蚀也会影响检测结果。分别取两组GB/T1231-2006 M30×150连接副，其中一组螺栓的螺纹有轻微磕碰伤，测得两组连接副的扭矩系数见表2。

通过比较，可知螺纹碰伤的连接副扭矩系数增大且标准偏差也增大。分析认为，螺栓螺纹被碰伤后会影响到连接副的施拧，在施加同等大小预紧力的情况下，所需施拧的扭矩会增加，故最终计算得出的扭矩系数相应增大且标准偏差也会增大。针对该种情况，要求大六角高强度螺栓连接副在滚丝工序、运输和装卸过程中需多加注意，尽量避免螺栓被碰撞后导致螺纹损伤，若螺纹损伤严重，更会使螺母无法拧紧而导致连接副失效。

检测室环境的变化对扭矩系数有较大影响，冬季和夏季环境因素影响明显。表3资料可见随著温度下降， \bar{k} 值增大，温度升高 \bar{k} 值减小。

检测环境对扭矩系数的影响

表3 环境温度对扭矩系数的影响

温度℃	扭矩系数平均值
-20	0.144
-10	0.137
0	0.130
10	0.126
20	0.122
30	0.117
40	0.112

检测仪器精度对扭矩系数的影响

CSZ-1500A高强度螺栓扭矩系数试验机是通过高精度轴力感测器和扭矩感测器测，得到螺栓轴力和施拧扭矩。轴力感测器与扭矩感测器连接至相应的电子电脑显示出数值，并且自动采集、记录、处理、列印试验资料和报告。受电压稳定情况影响，电子电脑显示数值会在一定范围内波动。若电压不稳，被显示数值波动情况可能较大，从而对连接副扭矩系数检测结果造成影响，在检测过程中应予以注意。

表2 螺纹完好和磕碰伤状况下的扭矩系数

螺栓螺纹状况	连接副的扭矩系数								平均值	标准偏差
	1	2	3	4	5	6	7	8		
完好	0.138	0.128	0.138	0.136	0.140	0.129	0.132	0.142	0.134	0.0053
碰伤	0.131	0.149	0.151	0.132	0.138	0.148	0.150	0.153	0.144	0.0089

表4 连接副在保证期内的扭矩系数

放置时间	连接副的扭矩系数								平均值	标准偏差
	1	2	3	4	5	6	7	8		
保证期内	0.133	0.140	0.130	0.132	0.142	0.130	0.128	0.128	0.133	0.0053
保证期外	0.145	0.130	0.150	0.152	0.131	0.132	0.145	0.140	0.140	0.0087

试验机驱动总成成为液压系统，液压油牌号为46号抗磨液压油，液压油的更换应该视机器使用时间而定，一般每年调换一次，否则因油污气泡影响驱动精度，以至波动示值。试验机加荷架导轨与滑块导轨轴承为油脂润滑，使用锂基润滑脂，要定期检查润滑情况，且要适时加注，以免丧失精度，对扭矩系数造成影响。

检测操作对扭矩系数的影响

高强度螺栓连接副扭矩系数检测应严格按照GB/T1231-2006标准中相关规定，检测人员操作细节的注意与否则对检测结果会造成一定影响。具体表现在：

- ①安装连接副时，螺母下之垫圈有倒角的一面应朝向螺母支撑面，螺栓头部下垫圈有倒角的一面应朝向螺栓头部。
- ②每套连接副只能试验一次，不得重复使用。
- ③试验时垫圈不得发生转动，否则无效，此规定常在检测操作中被忽略。检测时由于垫圈被螺母遮挡，无法观测，导致部分检测人员忽视垫圈转动对扭矩系数产生的影响。若检测操作中垫圈发生转动，则视转动表面情况不同而造成不同影响。若转动面表面光滑，摩擦系数比经过磷皂化润滑处理后的垫圈小，测得的连接副扭矩系数会偏低，反之则偏高。一般情况下，垫圈转动测得的扭矩系数偏高。

表面处理对扭矩系数的影响

在≤M27钢结构大六角高强度螺栓连接副上螺栓表面，采用较多的是磷酸盐（磷化）或氧化（发黑）上油的表面处理，螺母、垫圈则一般采用磷皂化，目的是进一步保证扭矩系数的稳定性（标准偏差）。扭矩系数通常为0.110~0.150，标准偏差≤0.010。

在≥M30风电六角头高强度螺栓连接副上，为减少酸洗和电镀等过程中产生氢脆的危险性，而采用喷丸+非电解达克罗涂覆，有较好自钝化作用、机械遮罩作用，以及牺牲阳极电化学保护良好的表面防腐作用。由于表面采用了达克罗

涂层，扭矩系数要靠安装时涂M₀S₂来保证，按照目前中国使用M₀S₂的情况，如果螺栓表面及垫圈的作用面上都均匀地涂上M₀S₂，扭矩系数一般在0.100~0.130，标准偏差≤0.010，而如果只在螺纹上涂上M₀S₂，扭矩系数值则会相应地略有提高，螺栓直径越大，提高越明显。

对于钢结构大六角螺栓连接副扭矩系数保证期为自出厂之日起6个月。在出厂6个月以后，螺栓表面状况基本可以达到要求，而螺母和垫圈的表面磷皂化处理却容易变质，从而会对扭矩系数及标准偏差造成影响。测得两组M24120钢结构大六角螺栓连接副的扭矩系数，检测资料见表4。

以上可知，在保证期内的螺栓连接副扭矩系数稳定，偏差较小，而超过保证期的螺栓扭矩系数偏大，偏差也较大。磷皂化膜会在空气中风化，导致润滑性下降，轴向摩擦力增大而失效，最终无法保证扭矩系数。

螺栓预紧力对扭矩系数的影响

在GB/T1231-2006标准中，对≤M30螺栓的预紧力有明确规定，但对>M30的螺栓无相应规定，目前中国一般采用屈服强度的67%作为预紧力，预紧力过高或过低都会对扭矩系数产生影响。表5是10.9级高强度螺栓预紧力的最小范围。

表5 10.9级高强度螺栓预紧力的最小范围

螺栓规格	预紧力 Pmin/KN
M30	353
M33	437
M36	515
M39	615
M42	705
M48	926

