

螺纹紧固件摩擦系数测试的影响因素研究

朱伟 王莉梅 徐波

(吉利汽车研究院(宁波)有限公司 浙江 宁波 315336)

摘要: 螺纹连接在汽车行业中的应用非常广泛,其连接质量直接关系到整车的安全性、可靠性和耐久性。对于螺纹连接副来说,通过施加装配转矩可以获得一定的预紧力,而紧固件的摩擦系数直接影响获得夹紧力的大小。在进行摩擦系数测试时,有诸多因素可能影响测试结果的准确性,本文主要从试验垫板的表面粗糙度、试验螺母的镀层厚度两个方面,基于试验验证和统计学方法来分析和研究其对摩擦系数测试结果的影响。

关键词: 螺纹连接;摩擦系数;影响因素;试验垫板;试验螺母

1 测试原理

对于螺纹连接紧固件来说,通过施加装配转矩,可以获得相应的夹紧力,夹紧力可以确保被连接件无论在静止状态还是承受长周期交变载荷时,都能牢固地连接在一起,发挥部件应有的作用。装配过程中,大约有 10% 的装配转矩转化为夹紧力,其转化率主要受整个连接副的摩擦系数影响,日常开展的螺栓(螺母)摩擦系数测试项目包括:总摩擦系数、螺纹摩擦系数和端面摩擦系数。

螺纹紧固件在拧紧过程中,其转矩和夹紧力的关系基于 Kellermann 和 Klein 公式^[1],公式表达如下:

$$T = F \times \left[\frac{1}{2} \times \frac{P + 1.154 \times \pi \times \mu_{th} \times d_2}{\pi - 1.154 \times \mu_{th} \times \frac{P}{d_2}} + \mu_b \times \frac{D_0 + d_h}{4} \right]$$

式中: T — 转矩;

F — 夹紧力;

P — 螺距;

μ_{th} — 螺纹摩擦系数;

μ_b — 端面摩擦系数;

D_0 — 支承面外径;

d_h — 试验夹具的孔径;

d_2 — 螺纹中径。

螺纹摩擦系数 μ_{th} 和支承面摩擦系数 μ_b 用下列近似公式计算确定:

$$\mu_{th} = \frac{\frac{T_{th}}{F} - \frac{P}{2\pi}}{0.577d_2} \quad \mu_b = \frac{T_b}{0.5 \times D_b F}$$

通过传感器可以测得总转矩、螺纹转矩和夹紧力,结合螺栓或螺母的物理尺寸和摩擦直径,可计算得到螺纹和端面的摩擦系数。

2 测试设备

ISO 16047 中规定:摩擦系数试验设备的转矩和夹紧力测量相对误差在 2% 范围以内,角度测量允许误差为 2° 或测量值的 2% (取两者中的较大值)^[1]。因此,本次进行试验验证的设备选择德国 Schatz 多功能螺栓紧固分析仪,其中转矩/角度传感器模块型号为 5413-1200/200S,精度等级为 0.5 级,轴向夹紧力/螺纹摩擦转矩传感器型号为 5413-1961A/150,精度等级为 2 级。

3 螺纹紧固件摩擦系数测试的影响因素

从摩擦系数理论公式可以看出,摩擦系数测试结果一方面与螺栓或螺母的固有物理尺寸(如螺距、中径、摩擦直径)有关,另一方面与拧紧过程中传感器测得的各种转矩和轴向夹紧力有关。在测试过程中,影响转矩和夹紧力的因素可能有很多,如螺栓的公差等级、样件表面的清洁情况、标准螺母或螺栓的镀层厚度、拧紧速率、对手件状态(如垫板硬度、内螺纹垫片的使用)等,本文主要从试验垫板的表面粗糙度、试验螺母的镀层厚度两个方面,研究其对摩擦系数测试结果的影响。

3.1 试验垫板表面粗糙度对摩擦系数影响

ISO 16047 中对试验垫板的表面粗糙度有明确的要求,如 HH 型垫板,要求表面粗糙度为 $R_a 0.2 \sim 0.8$ 。

由于试验垫板一般通过多次磨削实现循环利用，常用的磨削加工方式有普通磨床加工、砂带机磨削和手工推磨，每种磨削方式各有其特点，具体情况见表 1。

表 1 不同磨削加工方式的特点

磨削加工方式	成本投入	加工效率	加工后平面度	多次加工一致性
磨床加工	高	快	高	高
砂带机打磨	中	中	中	中
手工推磨	低	慢	低	低

本次验证分别采用 60 目砂带机、180 目砂带机、普通平面磨床、120 目砂纸手工磨削和 1200 目砂纸手工磨削加工出 HH 型试验垫板，使用 Olympus DSX510 3D 显微镜和对比法粗略测试出试验垫板的表面粗糙度。本次验证采用同一批次螺栓和试验螺母，使用不同垫板检测螺栓的端面摩擦系数，分析不同粗糙度垫板对端面摩擦系数测试结果的影响，试验结果见表 2。

表 2 不同表面粗糙度试验垫板测得的端面摩擦系数结果

项目	端面摩擦系数 μ_b				
	砂带机 (60 目)	砂带机 (180 目)	普通平 面磨床	手工推磨 (120 目)	手工推磨 (1200 目)
表面粗糙度 R_a	0.95	0.59	0.59	0.24	0.16
样件 1	0.183	0.170	0.169	0.151	0.137
样件 2	0.178	0.165	0.166	0.149	0.136
样件 3	0.169	0.169	0.165	0.153	0.134
样件 4	0.185	0.175	0.172	0.155	0.139
样件 5	0.186	0.176	0.171	0.161	0.136
样件 6	0.172	0.177	0.169	0.159	0.141
均值	0.179	0.172	0.169	0.155	0.137

从表 2 数据可以看出，砂带机（180 目）、手工推磨（120 目）和普通平面磨床加工出的试验垫板其表面粗糙度符合 ISO 16047 的要求；随着垫板表面粗糙度的降低，测得的端面摩擦系数均值呈下降趋势。使用普通平面磨床和 180 目砂带机加工的试验垫板具有相同的表面粗糙度，测试得到的摩擦系数均值也较为接近，为判定两组数据是否存在显著性差异，采用单因素方差分析法，分析结果见表 3。

从表 3 数据可以看出： $F=2.23 < F_{0.05}=4.96$ ，即砂带机（180 目）和平面磨床加工出的试验垫板，表面粗糙度满足 ISO 16047 的要求，且测试出的端面摩

表 3 砂带机（180 目）和普通平面磨床测试的端面摩擦系数方差分析

差异源	SS	df	MS	F	P-value	F0.05
组间	3.33E-05	1	3.33E-05	2.23	0.17	4.96
组内	0.00015	10	1.49E-05	—	—	—

擦系数结果在 95% 置信区间内不存在显著性差异。

3.2 螺母镀层对摩擦系数测试的影响

进行螺纹摩擦系数测试时，ISO 16047 允许使用两种表面状态的螺母：表面无涂敷并去油脂的本色螺母，以及按 A1J（GB/T 5267.1 电镀锌、1 μ m、光亮无色）并去油脂的螺母^[1]。本次验证采用的螺母规格为 M12-6H，表面状态有三种：无镀层本色螺母、电镀锌（7 μ m）螺母、电镀锌（7 μ m）退镀后螺母。其中退镀螺母是将 7 μ m 厚镀锌螺母，浸入 20% 的盐酸水溶液中，待反应完全，将螺母置于超声波清洗机中清洗 20min，去除残留盐酸溶液。对于上述螺母，首先使用 6H 通止规对螺母进行公差测试，确认公差符合要求。然后对螺母的镀层情况进一步测试，两项测试皆符合要求后，开展摩擦系数测试。镀层厚度测试采用金相法，将螺母沿六角面中间剖开，使用蔡司 Axio M2m 金相显微镜测量六角面镀层厚度，镀层情况见图 1 和图 2，图 1 中镀层的平均厚度为 6.7 μ m，图 2 中未发现有明显镀层存在。

使用上述三种不同表面状态的螺母，分别测试同一批次螺栓，测得的螺纹部分摩擦系数数据见表 4。

格鲁布斯（Grubbs）校验常用来分析样本中是否存在异常值，这些异常值可能来自于抽样误差、人为误差和偶然误差等，通过校验以剔除异常值可以使得

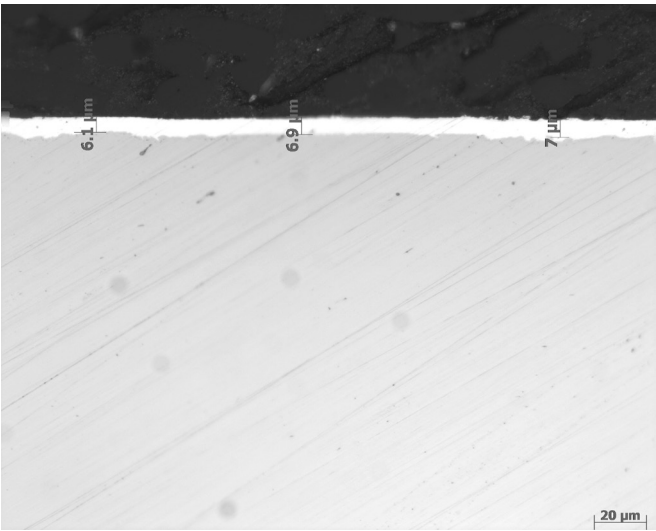


图 1 电镀锌（7 μ m）螺母镀层金相照片



图 2 电镀锌（7μm）退镀螺母镀层金相照片

表 4 三种不同表面状态螺母测试出的螺栓螺纹摩擦系数

表面状态	螺纹摩擦系数实测值									
	值 1	值 2	值 3	值 4	值 5	值 6	值 7	值 8	值 9	值 10
无镀层本色螺母	0.133	0.131	0.135	0.126	0.13	0.126	0.134	0.136	0.133	0.123
电镀锌（7μm）螺母	0.117	0.116	0.123	0.124	0.107	0.110	0.113	0.100	0.092	0.101
电镀锌（7μm）退镀螺母	0.120	0.125	0.125	0.123	0.121	0.124	0.124	0.120	0.127	0.121

统计分析结果更加准确^[2]。本文基于表 4 数据，进行格鲁布斯（Grubbs）校验，其中 $G_{0.05\ 10}=2.176^{[3]}$ ，得出所有校验值均小于 $G_{0.05\ 10}$ ，故本次测试出的螺栓螺纹摩擦系数在 95% 的置信区间内不存在异常值。

从测试的螺纹摩擦系数均值上看，电镀锌（7μm）螺母测试的螺栓螺纹摩擦系数均值 0.110，无镀层

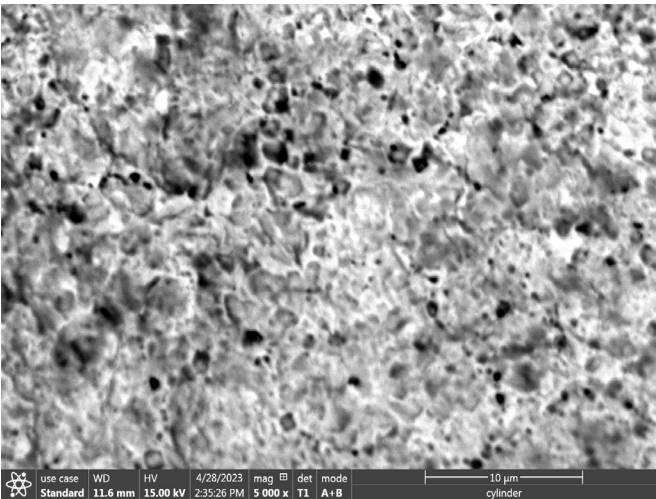


图 3 无镀层本色螺母牙纹表面 SEM 图像

本色螺母测得的均值 0.131，电镀锌（7μm）退镀螺母测得均值居于两者之间。镀锌层试验螺母在摩擦系数测试中，镀锌层起到润滑作用，会降低测得的螺纹摩擦系数值。使用单因素方差分析法对本色螺母和退镀螺母的螺纹摩擦系数进行分析，得到 $F=23.8 > F_{0.05}=4.4$ ，即镀层即使经过酸液的退镀，其测试的摩擦系数与本色螺母相比，仍存在显著性差异。

使用 Teneo 型 FEI 场发射扫描电子显微镜和 X-MAX 150 型 OXFORD 能谱仪分别对本色螺母和退镀螺母牙纹位置进行微观形貌观察和微区成分分析，结果见图 3 ~ 图 6。从结果可以看出，镀锌螺母退镀后，表面无 Zn 元素，但 O 含量增加，即表面存在未知成分的物质，同时退镀后样件表面的微观形貌也发生了变化，这些成分和形貌上的变化一定程度上影响最终测得的螺纹摩擦系数值。

4 结语

摩擦系数测试过程中的不确定因素较多，为了保证试验数据的再现性和准确性，需要对各种不确定性因素进行严格控制。

（1）试验垫板的表面粗糙度对摩擦系数测试结果影响较大，使用普通磨床加工或 180 目砂带机可以使试验垫板获得理想的表面粗糙度，且两种垫板测试的结果数据再现性比较好。

（2）7μm 镀锌层螺母和本色螺母测得的螺纹摩擦

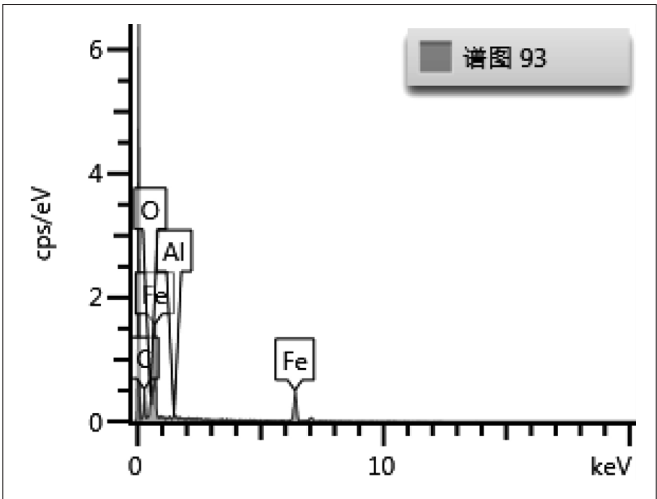


图 4 无镀层本色螺母牙纹微区成分分析

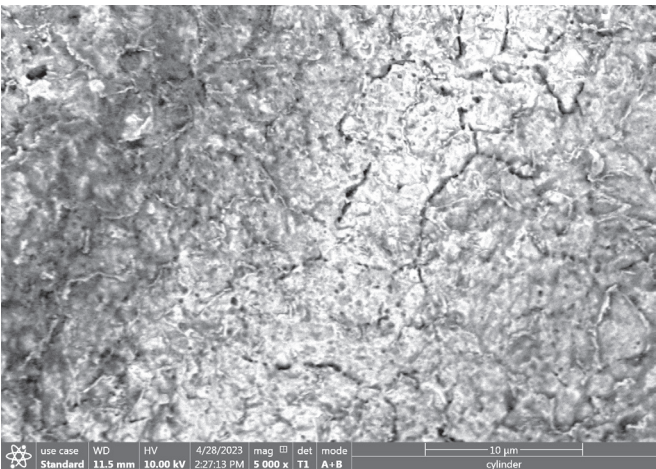


图 5 电镀锌（7μm）退镀螺母牙纹表面 SEM 图像

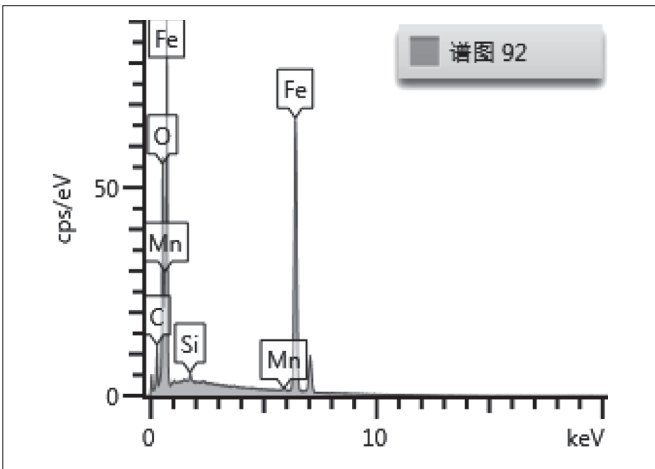


图 6 电镀锌（7μm）退镀螺母牙纹微区成分分析

系数存在显著性差异，为了测试结果的准确性和再现性，需严格控制镀层厚度或采用本色螺母。

(3) 镀锌螺母经过退镀后，即使表面无锌层，但仍存在未知物质，且表面形态发生变化，进行摩擦系数测试，与本色螺母测试结果存在显著性差异。

参考文献：

[1] 国际组织－欧洲标准化委员会．紧固件 扭矩 / 夹紧力试验 :EN ISO 16047-2005/A1-2012[S]. 2012-09-15.

[2] 刘金娣，李莉莉，高静，等．异常值检验方法的比较分析[J]．青岛大学学报（自然科学版），2017，30（02）：106-109.

[3] 周尊英，刘心同．实验室质量管理统计技术[M]．北京：中国质检出版社，2014：352.

作者简介：朱伟（1983.09-），男，汉族，河南信阳人，硕士研究生，工程师，研究方向：整车紧固件拧紧工艺试验及开发；王莉梅（1985.01-），女，汉族，四川泸州人，本科，工程师，研究方向：整车紧固件拧紧工艺试验及开发；徐波（1989.10-），男，汉族，浙江宁波人，本科，工程师，研究方向：整车紧固件拧紧工艺试验及开发。

