

温度对螺栓夹紧力测量（超声波测量）的影响研究

王莉梅 徐波 冯雪桥

（吉利汽车研究院（宁波）有限公司 浙江 宁波 315336）

摘要：超声波测量夹紧力在汽车行业内已有一定的应用，但其影响因素各个主机厂还在摸索中。本文从理论和试验两方面研究温度对超声波测量螺栓紧固夹紧力的影响，同时通过相关性分析确定温度与夹紧力的关系，对测试分析人员有一定的指导意义。

关键词：铝接头；温度；夹紧力；超声波声速；测量

0 引言

目前，在汽车制造业中，紧固件连接仍是装配中最重要的可拆卸式连接方式之一，其预紧力

则直接关系到整车的可靠性。由于影响夹紧力的因素较多，仅仅监控扭矩已无法满足现有的工况要求，这样就需要一种更为方便准确的测试方法。随着超声波测量方法的发展和推广，在行业内已都做了一些试验研究工作，但这种测试方法在现场运用过程中仍有一些问题需进一步的研究分析。其中温度对超声波测量螺栓夹紧力的影响，对耐久车的测试意义很大。当测试耐久车紧固件夹紧力环境温度与装配时的环境温度不一致时，温度对测量结果的影响很大。为保证测试数据的准确性，本文针对某车型底盘使用的高强度螺栓，进行温度对超声波测量夹紧力影响的验证分析。

1 理论分析

超声波测量夹紧力的原理：将螺栓两端面加工成平面度为 0.1mm，粗糙度为 Ra1.6 样品状态，再将超声波探头放在螺栓的端面，通过发射并接受沿螺栓轴向传播的超声波声时差，从而得到夹紧力（在进行测试前，需根据接头特征进行标定，建立声时差与夹紧力的关系）。

根据声弹性理论，温度的变化会引起超声波在螺栓中的传播速度和螺栓长度的变化；根据文献 [1]，温度对声速的影响为：

$$V(T) = V_0 (1 - k \Delta T) \quad (1)$$

式中： V_0 —螺栓原始状态超声波传播速度；

$V(T)$ —温度为 t 时超声波的波速；

k —超声波随温度变化的声速系数；

ΔT —温度差。

假设螺栓各位部位的温度是均匀的，当螺栓同时受到应力和温度变化的影响，那么超声波在螺栓中的传播速度可由两部分来表示，一部分是旋合受应力影响部分，

一部分是未夹持部分：

$$V_1(T, \sigma) = V_0 [1 - A(T) \sigma] [1 - k \Delta T] \quad (2)$$

$$V_2(T) = V_0 [1 - k \Delta T] \quad (3)$$

对于螺栓长度的变化同受应力变化一致，分为两个部分，一部分是受温度和应力的影响，另一部分只受温度变化的影响，其表达式如下：

$$l_1(T, \sigma) = l_0 [1 + \alpha \Delta T + \sigma / E] \quad (4)$$

$$l_2(T) = (l_0 - l_0) [1 + \alpha \Delta T] \quad (5)$$

式中： V_0 —螺栓原始状态超声波传播速度；

$A(T)$ —温度函数；

σ —应力；

ΔT —加载前后的温度差；

E —螺栓材料的杨氏模量；

α —材料的膨胀系数；

l_0 —未加载时有效受力长度；

L_0 —未加载时的螺栓长度；

t —声时。

根据当应力不变时，材料的线膨胀系数公式和温度不变时，螺栓的弹性模量公式可以推导出温度对超声波速度的影响系数 k 的计算公式：

$$k = \frac{L_0}{t(T)} \frac{t(T) - L(T)}{L_0 (T - T_0)} \quad (6)$$

2 实验研究

2.1 实验准备

实验使用的螺栓材料是 SCM435，规格是 M12 × 70 的六角法兰螺栓，连接副是铝 + 螺栓 + 铝，连接副的夹持长度为 38mm，实验装置（图 1）。通过所有样件存放和拧紧均是在有温度控制的实验室进行，其初始拧紧后的夹紧力（动态）见图 2。

2.2 实验实施及分析对比

按工艺拧紧完成时（静态衰减后）超声波传播时间 t 为 274.7ns (2.747×10^{-7} s)，其声速为 2.13×10^6 mm/s。

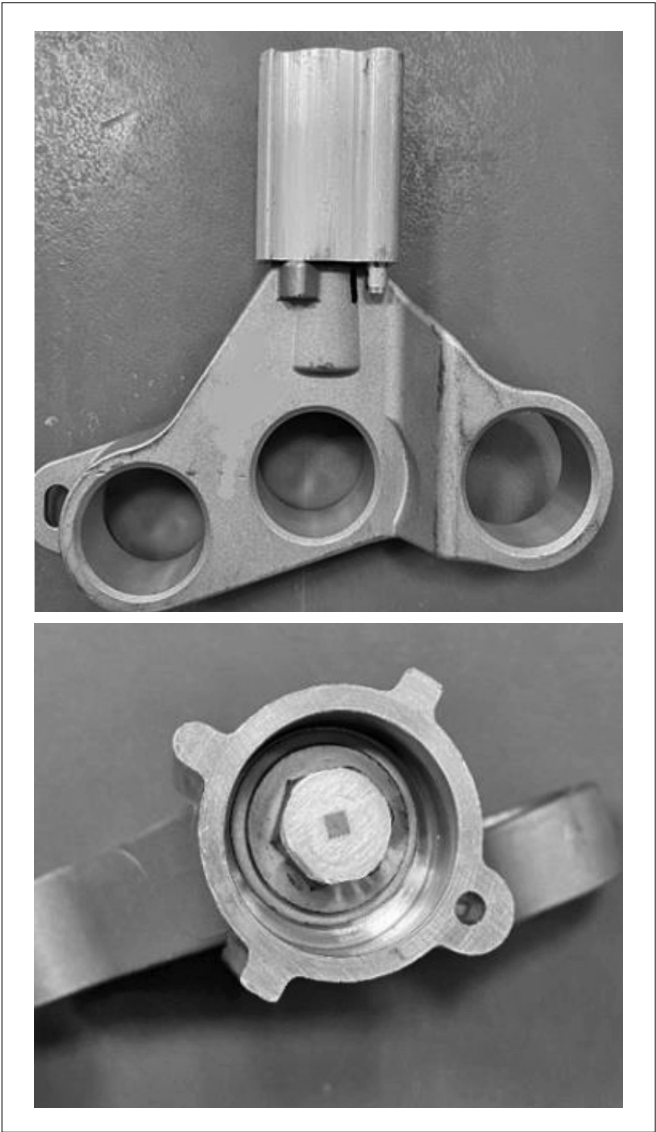


图 1 连接副装配图

将上述连接副拧紧后放置于高低温箱（未进行湿度控制）进行试验，其温度控制精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，其试验结果相关参数见图 3 ~ 图 5。

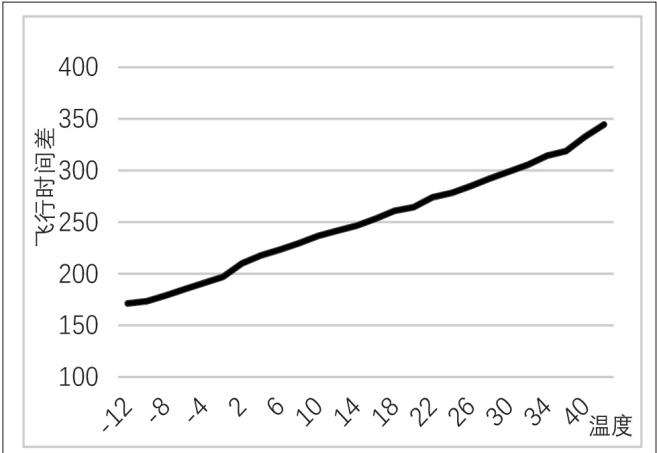


图 3 飞行时间差与温度的关系

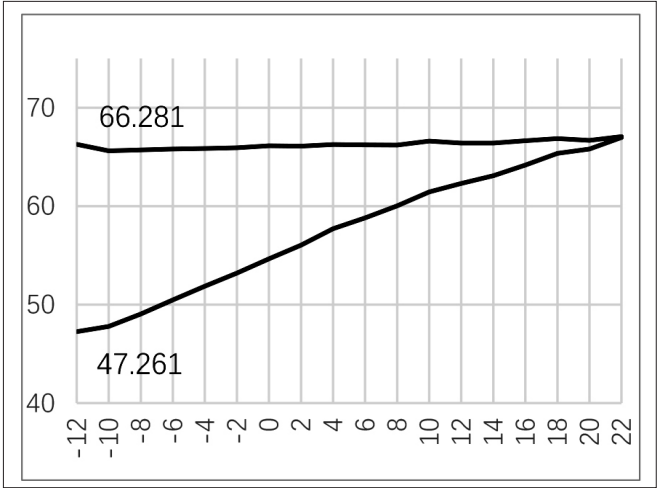


图 4 温度补偿与未补偿的夹紧力对比^{注 2}

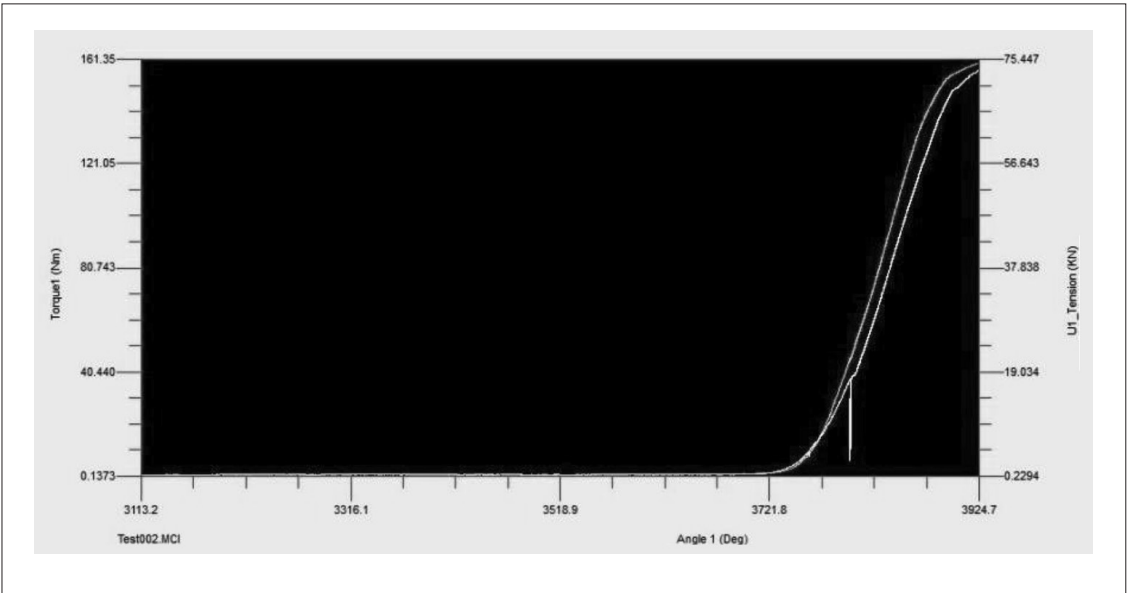


图 2 动态拧紧曲线

根据上述根据公式 (6) 可以计算出温度对超声波的影响系数： $k=0.20/^{\circ}\text{C}$ 。

从图 5 夹紧力数据可以计算出，温度每升高 1°C 对夹紧力的影响系数为 0.21，和根据公式计算的 $0.20/^{\circ}\text{C}$ ，基本一致。

同时根据

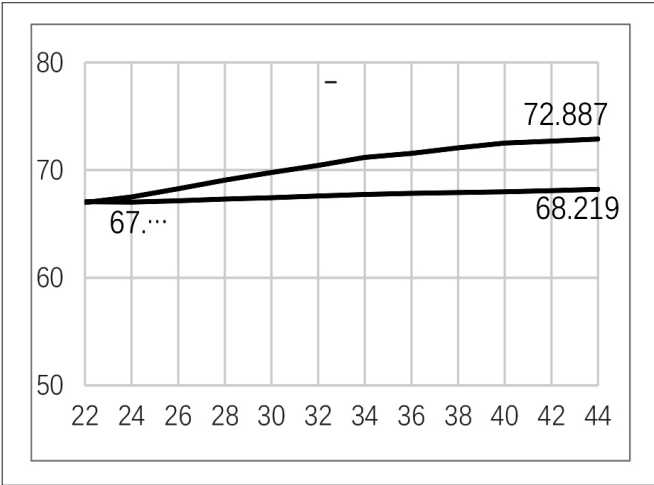


图 5 温度补偿与未进行补偿的夹紧力对比 注 3

注 2、注 3：拧紧时温度为 22℃，图 4 是从 -12℃ 开始到 22℃，图 5 是从 22℃ 到 44℃ 进行验证试验。

螺栓拧紧时的伸长量公式 $f = \frac{l_k \times F}{E \times A}$ ，可以计算出加载时螺栓的伸长量，其关系见图 6。

从图 6 温度补偿和未进行温度补偿的伸长量数据看，

表 具体参数

项目	数值	项目	数值
LXY	3906.562	r	0.984
LXX	8120	b(回归系数)	0.481
LYY	1940.207	a(常数)	54.856

伸长量与温度也是呈线性关系。

根据上述试验数据，结合统计学样本相关系数：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{L_{xy}}{\sqrt{L_{xx}L_{yy}}}$$

可以算出 $r=0.984$ ，由此可以看出夹紧力与温度是正相关的，具体分析参数及相关图见表和图 7。

从图 7 及相关系数 r 值可以看出，温度对夹紧力的影响是线性强正相关。

3 结语

通过上述理论计算和试验结果（铝接头）可以得出以下结论：

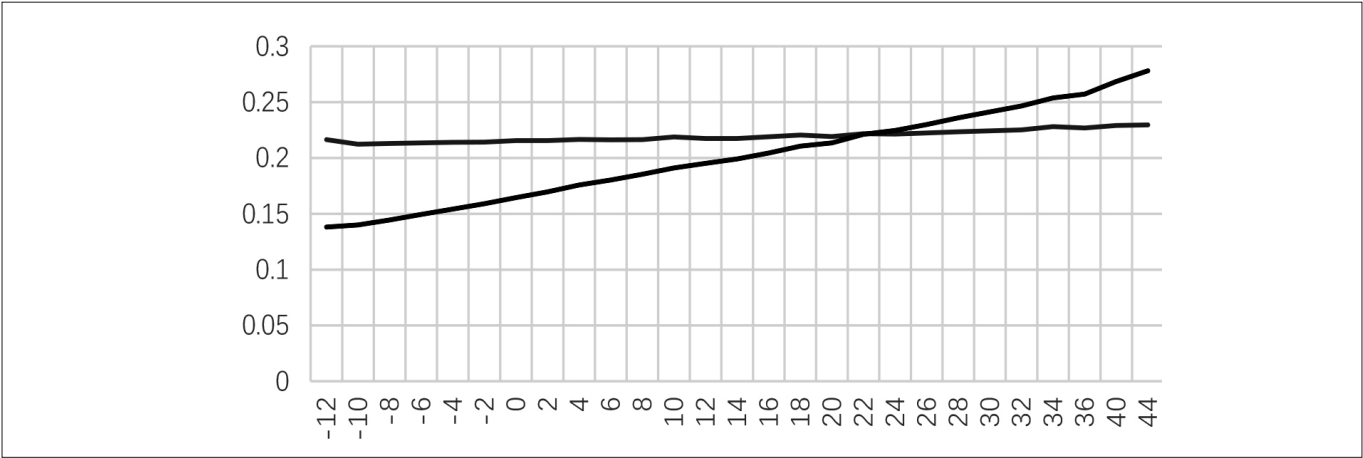


图 6 温度补偿与未温度补偿的伸长量

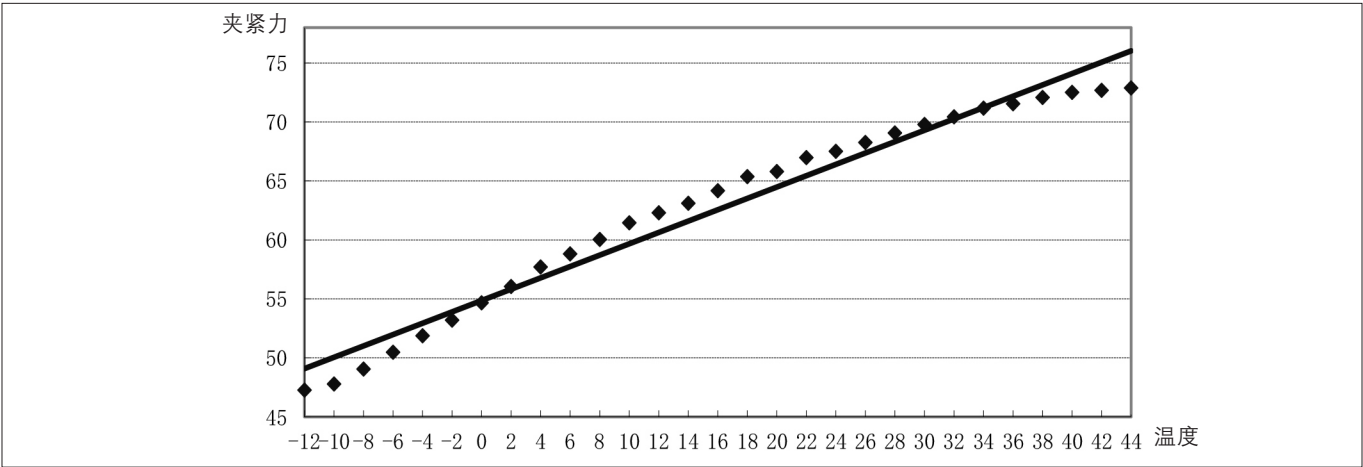


图 7 温度与夹紧力的相关性分析图

(1) 为保证夹紧力测试的精度和准确性,在测试过程中增加温度补偿是有必要的。

(2) 温度对螺纹连接副的夹紧力影响比较明显并且呈线性强正相关。

(3) 通过理论计算和试验可以得出,在标定温度以下 ($-12 \sim 22^{\circ}\text{C}$),温度对夹紧力的影响为 $0.56\text{kN}/^{\circ}\text{C}$,在标定温度以上 ($22 \sim 44^{\circ}\text{C}$),其影响度为 $0.21\text{kN}/^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献:

[1] 钱祖文. 非线性声学 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 234-360.

[2] 闻邦椿. 机械设计手册 (第 6 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

[3] 酒井智次. 螺纹紧固件联接工程 [M]. 柴之龙, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016.

[4] 何桢主. 六西格玛管理 (第三版) [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2014.

作者简介: 王莉梅 (1985-), 女, 汉族, 四川泸州人, 本科, 工程师, 研究方向: 整车紧固件模拟装配; 徐波 (1989-), 男, 汉族, 浙江宁波人, 本科, 工程师, 研究方向: 整车紧固件模拟装配。

(上接第 30 页)

优化后的内检测器,在 170mm 直管内径、1.5D 弯头半径通过性试验中,全程压力运行平稳,取球后检查设备结构完整,试验取得成功。

7 结语

优化后的漏磁检测器磁路系统,可以通过直管段的最小内径为 170mm,可以通过弯头最小弯曲半径为 1.5D。优化效果超出预期指标要求,实现了漏磁内检测器在通过性的水平上的技术提升,使混输及天然气介质条件下内检测器通过性能进一步提升,降低内检测作业风险,避免因部分管道变形无法进行常规内检测。对该类型管道进行完整性管理,可进一步提升高风险管道完

整性管理水平,降低管道溢油风险。

参考文献:

[1] 武万辉,郭勇,王同德,等. 管道漏磁检测技术及应用 [J]. 管道技术与设备, 2009(2): 33-34.

[2] 陈正阁,王长龙,梁四洋. 基于 ANSYS 软件的管道漏磁场分析 [J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(12): 26-29.

[3] 张喜艳,谭跃刚. 管道缺陷漏磁检测信号的仿真 [J]. 测量与检测技术学, 2008, 35(08): 58-61.

作者简介: 雷海 (1973.05-), 男, 汉族, 河南灵宝人, 本科, 研究方向: 机械设备。