

# 软连接对螺纹紧固接头质量影响的研究

李永波,李曙生

(泰州职业技术学院 机电技术学院,江苏 泰州 225316)

**摘要:**从螺纹连接原理的角度分析螺纹连接中预紧力和力矩的关系,介绍软连接的定义。分析三类常见的、典型的软连接问题产生机理,列举相应的问题案例,提出通过优化零件、连接结构、拧紧工艺等方式解决软连接问题的方案,达到提高连接质量的目的。

**关键词:**螺纹;紧固;软连接;连接质量

**中图分类号:**TH131.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)02-0064-04

## Research on Influence of Soft Connection Quality of Thread Fastening Joint

LI Yongbo, LI Shusheng

(School of Electromechanical Technology, Taizhou Polytechnic College, Taizhou 225316, China)

**Abstract:** From the perspective of thread connection principle, the relationship between preload force and torque is analyzed, and the definition of soft connection is introduced. The mechanism of three types of common and typical soft connection problems are analyzed, and corresponding cases are listed. By optimizing parts, connection structure and tightening process, solutions to solving the soft connection problems are put forward for the improvement of the connection quality.

**Keywords:** thread; fastening; soft connection; connection quality

### 0 引言

螺纹连接是机械连接中最为常见的连接方式。螺纹连接通常需要达到紧密连接两个或两个以上被连接件的目的。紧固连接时,被连接件被压缩,螺栓被拉长,被连接件受到的压力和螺栓受到的拉力大小相同,方向相反。被连接件和螺栓变形量与力的关系如图1所示。

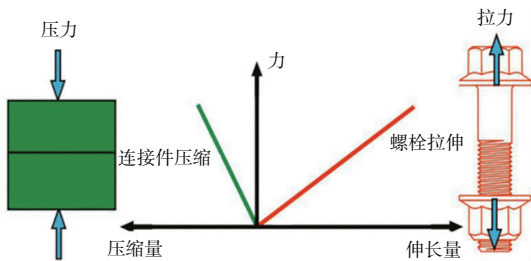


图1 变形量与力的关系图

紧固时对于预紧力的测量较为困难,所以常常采用测量转矩的方式来间接地获得预紧力的信息。紧固连接时,预紧力矩将作用到3个部分,分别为:螺旋副斜面力矩 $T_1$ (该力矩将产生紧固件拉伸)、螺旋副中摩擦力矩 $T_2$ 、支撑面摩擦力矩 $T_3$ <sup>[1]</sup>。对于常用的三角形螺纹,预紧力矩 $T$ 为

$$T = T_1 + T_2 + T_3 = F \left( \frac{p}{2\pi} + \frac{\mu d_2}{2\cos\beta} + \mu_n r_n \right) \quad (1)$$

式中: $F$ 为预紧力; $p$ 为螺距; $d_2$ 为螺纹中径; $r_n$ 为支撑面当量摩擦半径; $\mu$ 为螺旋副的摩擦因数; $\mu_n$ 为支承面的摩擦因数; $\beta$ 为螺纹升角。

将常用标准紧固件参数代入上式可以得出:螺旋副斜面力矩 $T_1$ ,约占10%~15%;螺旋副中摩擦力矩 $T_2$ ,约占40%左右;支撑面摩擦力矩 $T_3$ ,约占45%~50%。即拧紧过程中只有很少比例的预紧力矩最终转化为预紧力<sup>[2]</sup>。为便于日常应用以及对预紧力矩进行估算,工程上通常将预紧力矩式(1)简化为如下形式:

$$T = KF d_2 \quad (2)$$

式中: $K$ 为拧紧力矩系数。该系数受摩擦因数、扭转变形、弯曲变形、螺纹牙的塑性变形等众多因素影响,通常采用试验的方法获得。为简化分析,本文将各类影响因素设为定值,即 $K$ 不变,预紧力矩 $T$ 和预紧力 $F$ 呈线性关系。

### 1 软连接的定义

在螺纹连接中为了达到更好的连接效果需要尽可能提高紧固轴向力。连接结构的“软硬”程度会对轴向力的大小产生影响,进而影响紧固效果。标准ISO5393对螺纹连接中的“软连接”和“硬连接”进行了定义。当转矩从目标转矩的10%~100%时所对应角度小于30°时为“硬连接”。当转矩从目标转矩的10%~100%时所对应角度大于720°时为“软连接”,如图2所示。

第一作者简介:李永波(1990—),男,安徽宣城人,工程师,硕士,研究方向为机械设计及制造工艺。

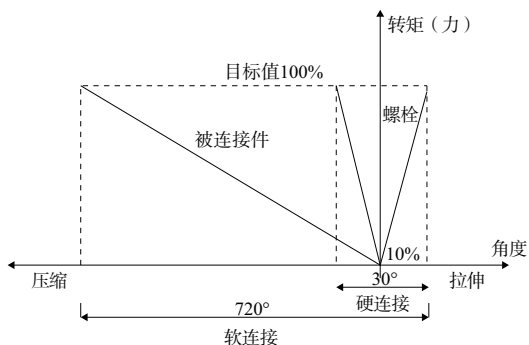


图2 软连接、硬连接

N·m, 远超 6 N·m 的工艺目标值, 满足使用要求。



图4 安全带导向塑料件压溃

## 2 软连接导致拧紧达不到目标值

### 2.1 机理分析

在被连接件刚性不足的情况下,当预紧力达到一定值后,被连接件发生溃缩,预紧力不再继续提升。随着拧紧的继续,被连接件持续变形直至破坏。此状态下被连接件和螺栓变形量与力的关系如图3所示。其中在被连接件发生溃缩之前为有效紧固阶段,发生溃缩后为无效紧固。

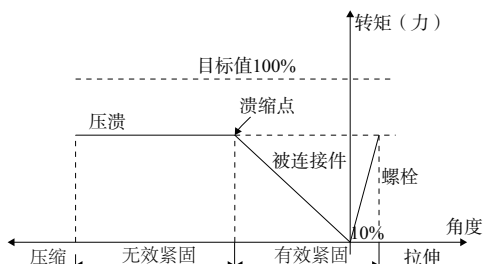


图3 拧紧达不到目标值机理图

### 2.2 实例及优化措施

在汽车制造中,塑料零件的应用非常广泛,起到装饰或者功能件的作用。当塑料件作为功能件时,为保证正常功能,通常采用安全系数更高的螺纹紧固连接方式。但由于塑料的刚度和强度相对较弱,所以在紧固时经常出现塑料件变形甚至压溃的情况。

某车型后排安全带导向件是由聚甲醛材料制成。采用的拧紧工艺为目标转矩法,目标值为 6 N·m。在产线装配过程中发生批量压溃现象如图4所示。查看不合格的拧紧曲线均表现为相似特征,截取其中一条如图5所示。曲线中,当转矩值达到 5.4 N·m 后,便不继续随角度增加而增加。即该连接接头的溃缩点转矩为 5.4 N·m。受制于聚甲醛材料自身特性和零件结构特征,导向件刚度很难提升。为解决该问题,采用增大接触面积,减少局部压强的方式进行优化。更换使用法兰面更大的螺栓进行试验验证。两种螺栓对比如图6所示。试验中,持续将新螺栓拧紧至安全带导向件溃缩变形并获取拧紧曲线如图7所示。从曲线可以看出,安全带导向件最大压溃转矩提高到了 14.85 N·m,转矩线性上升阶段持续至 9.5

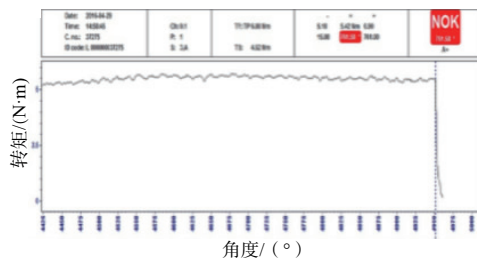


图5 不合格曲线



图6 螺栓法兰面状态对比

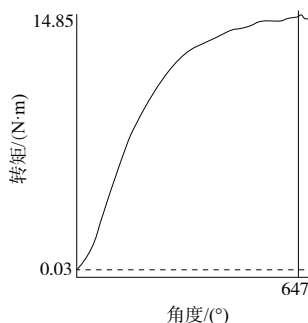


图7 试验曲线

## 3 软连接导致螺栓不过屈服

### 3.1 机理分析

在很多螺纹连接应用中,为了最大限度地发挥螺栓紧固效能,经常采用螺栓过屈服工艺。汽车行业中,一般采用转矩+转角的方法来使螺栓达到屈服状态<sup>[3-5]</sup>。在实际紧固过程中常常出现由于接头结构偏“软”而导致螺栓达不到屈服状态的情况。此状态下被连接件和螺栓变形量与力的关系如图8所示。被连接件刚度足够时,当转矩达到目标转矩后,继续拧紧对应的工艺角度。被连接件将继续压缩标识为“②”角度所对应的长度,螺栓继续伸长标识为“③+④”角度所对应的长度,此时螺栓正常达到屈

服。被连接件刚度不足时,当转矩达到目标转矩后,继续拧紧对应的工艺角度。被连接件将发生塑性变形,继续压缩标识为“①+②”角度所对应的长度,螺栓继续伸长标识为“③”角度所对应的长度,此时螺栓达不到屈服。其中,“①+②+③”=“②+③+④”=目标工艺角度。

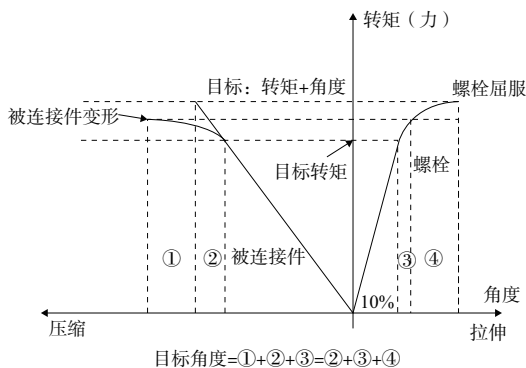


图8 螺栓不过屈服机理图

### 3.2 实例及优化措施

某车型发动机支撑与固定支架连接接头采用转矩+转角法工艺,工艺值为  $40\text{ N}\cdot\text{m}+90^\circ$ ,要求螺栓过屈服。通过检查批量拧紧曲线发现,有31%接头位置的螺栓出现了未过屈服情况,拧紧曲线如图9所示。检查连接接头结构,发动机支撑是通过两颗螺栓连接到固定支架上的,固定支架如图10所示。支架上的内螺纹由焊接在其上的螺母板提供。经观察,螺母板与支架之间存在间隙。测量,统计多组支架的间隙,处于  $0.25\sim 0.5\text{ mm}$  之间。使用不同间隙状态支架进行模拟装配试验,装配曲线如图11所示。当螺母板与支架的间隙小于  $0.3\text{ mm}$  时,螺栓能过屈服。当间隙超过该值时,便会导致被连接件刚度下降,产生拧紧过程中的支架钣金变形,导致螺栓轴向力下降,螺栓不过屈服。对焊接螺母板和支架钣金的间隙提出控制要求,要求控制在  $0.3\text{ mm}$  以内,以满足拧紧工艺要求。

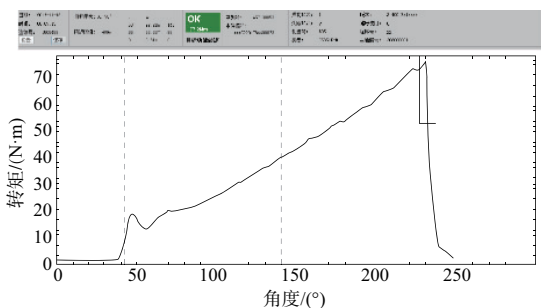


图9 不合格曲线



图10 固定支架

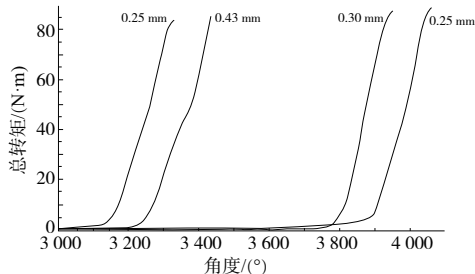


图11 模拟拧紧曲线

## 4 软连接导致转矩衰减

### 4.1 机理分析

螺栓连接中的预紧力是以应力的形式存在于螺纹连接接头中的。应力有随时间延长而降低的现象,该类现象称之为应力释放。应力释放归根到底是由于能量的释放产生的。在螺纹连接中当被连接件强度、刚度比螺栓螺母强度、刚度弱时,应力释放更容易发生<sup>[6]</sup>。此状态下被连接件和螺栓变形量与力的关系如图12所示。

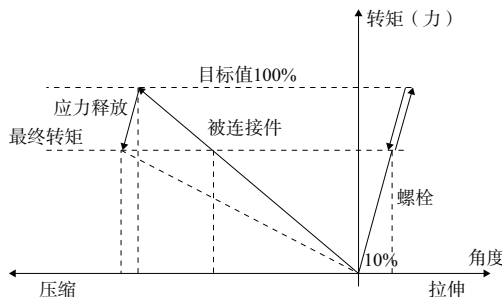


图12 转矩衰减机理图

### 4.2 实例及优化措施

汽车制造行业中,通常采用测量残余转矩的方法来检测转矩是否存在衰减。残余转矩是指螺栓按工艺要求拧紧至目标值后的一段时间内,在其拧紧方向上继续旋转的瞬间所需要的转矩。不同拧紧工艺都有其对应的残余转矩要求。该数值能反映拧紧点的紧固状态。残余转矩越大,意味着转矩衰减越少,连接越稳定,可靠性越高。

某车型制动踏板与真空助力泵连接采用目标转矩法,目标值为  $25\text{ N}\cdot\text{m}$ 。在完成装配后测量发现存在批量转矩衰减,且有较高比例的点位转矩衰减超过20%的控制限。检查该处连接结构和零件状态。发现在制动踏板与真空助力泵之间有一层海绵胶垫如图13中白色部分所示。制动踏板上螺栓连接处的金属衬套镶嵌深度存在差异,有凸起和凹陷两种状态如图14所示。

通过正交试验,对两种可能产生衰减的原因进行分析。设计3组模拟装配实验,A组:金属衬套凸起,有胶垫;B组:金属衬套凹陷,有胶垫;C组:金属衬套凹陷,无胶垫。残余转矩测量曲线分别如图15、图16、图17所示。整理残余转矩值如表1所示。



图 13 助力泵海绵胶垫图



图 14 金属衬套镶嵌状态图

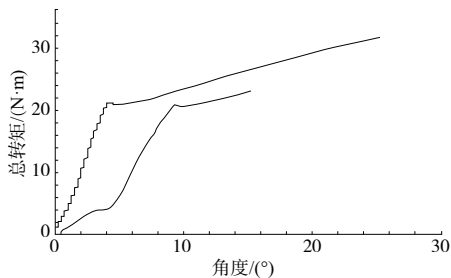


图 15 A 组残余转矩测量曲线图

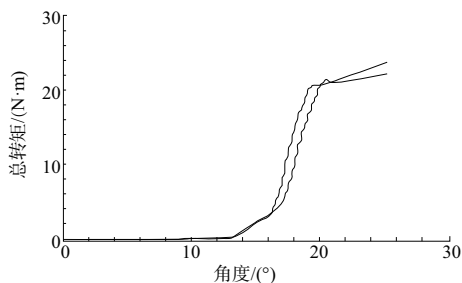


图 16 B 组残余转矩测量曲线图

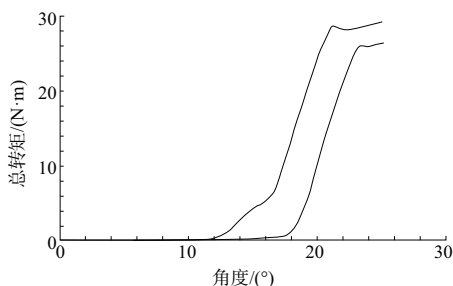


图 17 C 组残余转矩测量曲线图

表 1 三组残余转矩数据表 单位: N·m

组别	残余转矩
A 组:金属衬套凸起,有胶垫	20.2、20.8
B 组:金属衬套凹陷,有胶垫	21.5、20.6
C 组:金属衬套凹陷,无胶垫	26.0、28.7

从表 1 残余转矩数据可以看出:金属衬套对残余转矩无影响,胶垫是导致转矩衰减的主要因素<sup>[7]</sup>。检查不同批次真空助力泵上的胶垫状态,有 1.5 mm 和 1.8 mm 两种厚度。厚度为 1.5 mm 时,转矩衰减符合要求。厚度 1.8 mm 时,有一定比例转矩衰减超出 20% 控制限。优化调整该位置的拧紧程序,通过增加反转将胶垫压实后再拧紧的方式解决该问题<sup>[8]</sup>。

## 5 结语

螺纹连接是汽车制造中应用非常广泛的连接技术。各类紧固缺陷纷繁复杂,其中软连接就是一种常见的缺陷,在大部分情况下会产生不良影响。本文通过理论分析,并结合实际案例,分析、介绍了软连接的影响机理和解决方法。总而言之,在螺纹连接结构的设计上要避免出现“软”结构,在工艺设计上要考虑“软”结构的影响,在生产制造过程中要注意控制“软”结构的产生,进而减少软连接问题的发生,提高螺纹连接的质量。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 闵昌万,谭志勇,龙丽平. C/C 复合材料螺栓在拧紧力矩条件下的力学性能研究[J]. 强度与环境,2012,39(3):1-6.
- [3] 汤春球,张继伟,莫易敏,等. 扭矩转角法工艺与检测方法[J]. 机械设计与研究,2018,34(6):103-108.
- [4] 张亮亮,王玉林. 扭矩法与扭矩/转角法预紧力的计算及对比研究[J]. 内燃机与配件,2016(1):7-8.
- [5] 于成杰. 扭矩法与扭矩转角法比较与分析[J]. 山东工业技术,2014(14):156.
- [6] 殷明霞,史淑娟,江海峰. 螺纹结构力矩及其衰退机理分析[J]. 强度与环境,2013,40(4):31-35.
- [7] 王晓斌,刘艳兵. 螺纹连接失效模式及其控制方法[J]. 汽车工艺与材料,2018(12):48-51.
- [8] 王静. 生产过程中扭矩衰减的控制方法[J]. 大众科技,2011,13(10):145-147.

收稿日期:2021-11-03