

# 高强度螺栓的监控扭矩研究

刘超, 王旭, 金喆, 吴彩丽, 陈然

(大连道依茨一汽(大连)柴油机有限公司, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 通过对螺栓紧固机理的分析和常见失效模式的分析, 阐述了监控扭矩的重要性。利用 JMP 软件的数据统计分析功能, 确定了新设计螺栓产品的监控扭矩范围。该方法也为螺栓装配稳定性的判断和分析提供了有效的手段。

**关键词:** 高强度螺栓; 监控扭矩; 轴向力

**中图分类号:** TK423.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4357(2014)02-0023-04

## Research on Monitoring Torque of High-strength Bolts

Liu Chao, Wang Xu, Jin Zhe, Wu Caili, Chen Ran

(DEUTZ (Dalian) Engine Co., Ltd., Liaoning Dalian 116023)

**Abstract:** The importance of monitoring torque is expounded by the analysis on bolts fastening mechanism and common failure modes. Using the data statistical analysis function of JMP software, the range of monitoring torque for new-designed bolts was determined. This method also provides an effective means for the judgment and analysis of the bolt assembly stability.

**Keywords:** high-strength bolt; monitoring torque; axial force

## 0 引言

螺栓紧固是发动机零部件之间的主要连接方式。随着发动机技术的快速发展, 功率不断提升, 发动机的最高燃烧压力也越来越高, 对相关零部件造成的机械负荷也越来越大, 由此对螺栓的可靠性、一致性和拧紧技术提出了更高的要求。

初始扭矩预紧+转角法是目前发动机高强度螺栓的主要拧紧方式。原理上, 可通过控制螺栓的旋转角度, 控制螺栓的伸长量, 从而达到所需要的螺栓轴向力。但是在实际生产过程中发现, 如果只是监控转角, 不能发现异常的拧紧失效形式, 必须再对扭矩进行监控。

本文结合实际生产经验, 说明监控扭矩的必要性。通过某 4DX 发动机缸盖螺栓的装机过程, 设计出合理的扭矩监控范围, 来有效避免拧紧失效问题的发生。

## 1 螺栓的拧紧方法

初始扭矩+转角法与扭矩法是发动机行业主要的两种螺栓拧紧方法。扭矩法是设定螺栓的最终扭矩, 要求装配时通过扭矩扳手或风枪等工具, 拧紧到设定扭矩, 装配较为便捷。而初始扭矩+转角法是先给定一个初始扭矩进行预紧, 目的是消除螺纹之间的间隙; 再增加一个或多个转角, 达到设定的螺栓伸长量, 以便精确地获得所需要的轴向夹紧力。初始扭矩+转角法的控制精度较单扭矩法高很多; 同时转角法拧紧的螺栓利用率也更高, 在相同位置处, 用转角法可以采用公称直径更小的螺栓。扭矩法只适用于紧固位置要求较松的一般类装配。对于关键位置的螺栓装配, 应采用转角法来控制。在道依茨、丰田、大众等公司, 更是通过不同的装配等级来严格区分。

收稿日期: 2013-05-06; 修回日期: 2013-11-28

作者简介: 刘超(1985-), 男, 工程师, 主要研究方向为柴油机零部件设计及可靠性分析, lc\_hit@qq.com。

## 2 监控扭矩的必要性

在目前生产过程中，对螺栓是否安装到位，准确地说应该是螺栓产生的轴向夹紧力是否达到要求进行监控是非常难的，需要复杂的工装和高昂的设备，也减慢了生产节拍。根据轴向力( $F$ )与拧紧扭矩( $T$ )之间的基本关系  $T = KDF$  ( $D$  为螺纹公称直径， $K$  为扭矩系数)可知：在  $K$  值一定或变化很小时，可以利用扭矩来反应轴向力的情况。无论螺栓处于弹性范围还是已经进入塑性区，扭矩都能反应出轴向力的情况。

初始扭矩+转角法虽然能控制螺栓的伸长量，但是当摩擦系数、螺纹表面质量、硬度等发生变化时，其轴向力是不符合期望值的，此时如果只监控转角，是不能发现异常的拧紧失效形式的。如柴油发动机的缸体、缸盖大多为灰铸铁，在设计时为了获得更好的机体韧性，甚至采用硬度相对更低的蠕墨铸铁。在拧紧螺栓时会发生合把端面被“拉毛”等情况，螺纹连接也会发生失效，虽然达到了要求的转角，但是却没有达到需要的夹紧轴力；或由于螺栓某批次材料的原因，其屈服强度低，导致在达到规定的角度后，轴向力也没有达到设计要求。

尤其在新产品开发初期，由于受产量及价格的影响，螺栓等相关配合零件的一致性必然达不到正式量产阶段的水平，如果安装后螺栓所产生的轴向力及一致性达不到设计要求，会给以后的安全、可靠性带来隐患。为此，针对采用扭矩+转角法拧紧的高强度螺栓，有必要对螺栓的拧紧扭矩进行重点监控，以确保所装配的螺栓都能达到设计轴向力的要求。

螺栓轴向力一致性的影响因素有以下几方面：

### (1) 零部件强度、刚度

螺栓强度和刚度；被连接件强度和刚度。

### (2) 摩擦

表面粗糙度；螺栓涂层；合适的材质匹配；螺纹加工质量。

### (3) 拧紧技术

合适的拧紧工具；合适的拧紧转速；正确的安装方法。

### (4) 温度

环境温度，导致膨胀系数的变化。

## 3 监控扭矩的使用

根据以往的生产经验，转角法拧紧螺栓时，通过监控扭矩值来判断安装过程有以下三种常见形式。

(1) 监控扭矩值偏高：受诸多因素影响，如螺栓材质的强度偏高、连接工件刚度大、摩擦系数大等。合把面被“拉毛”是产生扭矩值高的常见原因之一，当松开扭矩扳手后，再次拧紧会发现扭矩值较之前降低。这是由于当合把面被“拉毛”后，接触面贴合率低，工作中在轴向力的作用下，贴合面被压实，螺栓伸长量缩短，轴向力降低；同时导致后期的拆解维修困难，更严重时，零部件报废无法维修，带来极大的经济损失。“拉毛”多数与螺栓端面质量或配合面硬度有关。

(2) 监控扭矩值偏低：螺栓强度偏低(弹性模量小)，俗称螺栓“软”；被连接件强度低或刚度低；螺栓或被连接件摩擦系数偏低。

(3) 监控扭矩一致性差：受诸多因素影响，如螺纹精度、粗糙度等散差。如果是螺栓的一致性差，会导致轴向力的一致性差，这在某些关键位置是不允许的，如缸盖螺栓，其理想状态是每个缸盖螺栓产生的轴向力散差为零，这样可以保证缸桶变形最小，与整机的机油耗、漏气量等指标直接相关。螺栓的摩擦系数是螺栓一致性差的主要原因(如螺栓的表面处理形式，磷化、氧化或达克罗等)，必须加以严格控制。摩擦系数过小会导致在预紧阶段产生较大的轴向力；而且摩擦系数过小还会增加螺栓生产工艺的难度。摩擦系数大时，一致性散差必然增大，而且对监控不利，会掩盖螺栓强度低的问题。行业内常用的摩擦系数设计值为 0.08 ~ 0.14。

## 4 监控扭矩值如何确定

监控扭矩值的确定往往是从大量装车数据中获得的。下面通过某 4DX 发动机新产品开发初期阶段，缸盖螺栓监控扭矩的设计过程来说明，并评判其生产状态是否稳定。具体思路如图 1 所示。

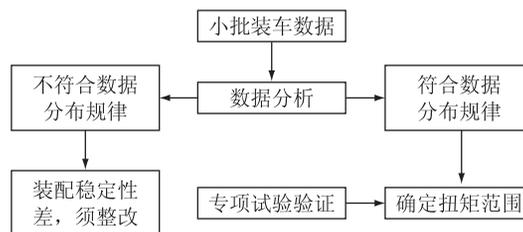


图 1 缸盖螺栓监控扭矩设计过程

### 4.1 数据统计

某新型 4DX 发动机小批次 16 台份装机，其中每台发动机装配 10 支缸盖螺栓，总计缸盖螺栓 160 支，记录每根螺栓的最终扭矩。由于是新开发

的机型，螺栓厂家未开正式的冷镦模具，采用热锻工艺进行生产，针对这种情况，须要根据本次的小批装机情况，制定出缸盖螺栓的监控扭矩，并分析螺栓的一致性情况，以便后续装车进行用户试验。

### 4.2 螺栓装配稳定性分析

面对杂乱无章的数据，选择QC七工具里的直方图来观察数据的分布情况，利用SAS公司的JMP软件进行操作。将数据导入软件后，选择直方图分布进行如图2操作。

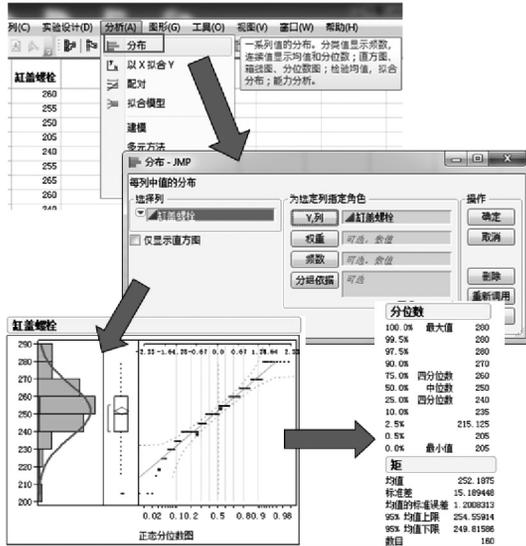


图2 JMP 软件操作过程

从JMP软件的数据分析结果中，可以看出此数据图形近似服从正态分布。考虑到由于这批次缸盖螺栓未用正式模具生产，缸体、缸盖也是非专线加工的试验样件，零件的散差和装配的一致性不可能完全拟合标准正态分布，因此这种状态的图形数据分析还是符合实际过程的，其结果有效。由于螺栓的扭矩值服从正态分布，可以判断缸盖螺栓的装配生产过程稳定。

### 4.3 扭矩值验证

在车间的试装数据中，最大扭矩为280(N·m)，最小扭矩为205(N·m)，须要验证这两个扭矩对应的轴力是否达到了设计值，以便确定此范围的扭矩是否有失效的情况。最理想的方法是在发动机的安装位置直接测量螺栓的轴力，但是由于设备手段的限制，只能通过模拟试验来近似比对。试验所用的安装垫片和安装螺母选用和实际装机件一样的材料和硬度，螺栓旋入长度也符合实际安装情况。试验所需的螺栓要尽量在最大摩擦系数和最小摩擦系数的两批次的产品中选取，数量大于30支。

通过安装在轴向力智能测量仪中的夹紧力传感器来获得螺栓轴向力。这是一种精确的轴向力试验

方法。试验机能自动或者通过手动旋转螺母或螺栓(钉)头施加紧固扭矩，测量上述项目，除非另有规定，测量相对误差应在2%范围内；角度测量允许误差为2°或测量值的2%（取两者中较大值）。图3为德国SCHATZ高强度螺栓轴向力智能检测仪。

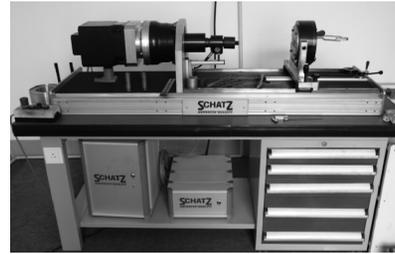


图3 德国SCHATZ高强度螺栓轴向力智能检测仪

试验数据如表1所示。

表1 试验数据

Nr	最大扭矩 $T_q/(N\cdot m)$	最大轴向力 $T_s/N$	K系数	摩擦系数 $\mu_{tot}$
1	302.99	124 086.96	0.18	0.14
2	263.34	116 320.21	0.17	0.13
3	276.42	123 675.34	0.16	0.14
4	256.06	118 891.02	0.17	0.13
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
20	192.04	117 321.23	0.15	0.11
21	221.16	116 801.01	0.16	0.12
22	209.63	114 132.63	0.15	0.12
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

测试数据显示，螺栓的轴向力在114~124 kN范围之内，轴向力-转角图(图4)显示螺栓达到屈服点，符合设计要求。试验扭矩范围192.04~302.99(N·m)有效，从而车间试装数据中，最大扭矩为280(N·m)，最小扭矩为205(N·m)，满足设计要求。

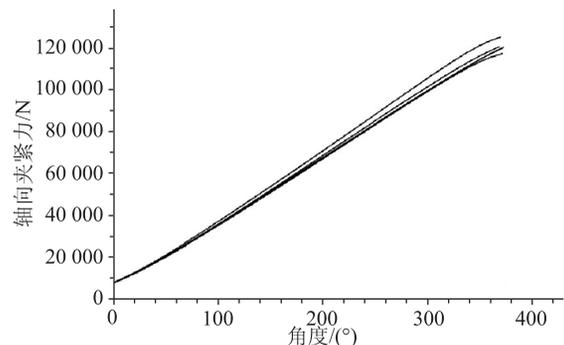


图4 轴向力-转角

### 4.4 确定扭矩范围

根据已知的扭矩范围205~280(N·m)，结合工厂关键工序的过程能力指标，来确定监控扭矩范围。理论上，当过程输出质量特性的分布中心与目

标值相符，无偏移时， $3\sigma=99.73\%$ 。

实际上，过程输出质量特性的分布中心与目标值完全重合的可能性非常小，在实际计算长期运行中出现缺陷的比率时，一般将正态分布的中心向左或向右移动  $1.5\sigma$ ，记做  $Z=93.32\%$ 。

结合以往经验，选择  $Z=95\%$ ，扭矩范围落在  $227.2 \sim 277.17 (N\cdot m)$  之间。具体见图 5。

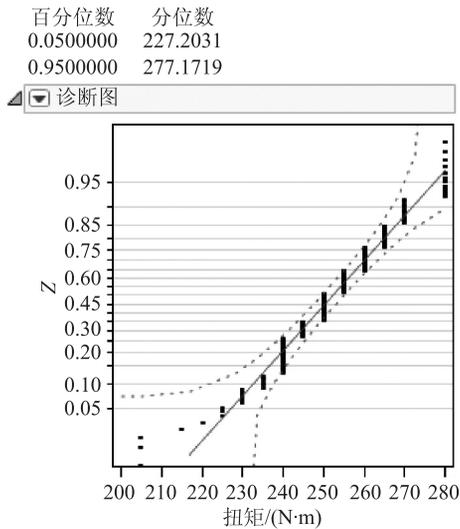


图 5 缸盖螺栓扭矩范围

(上接第 22 页)

(2) 控制图表 对第 7 台发动机主轴承盖螺栓拧紧力矩做控制图表分析(图 5)。分析结果表明：第 7 台发动机主轴承盖螺栓的拧紧力矩稳定可控。

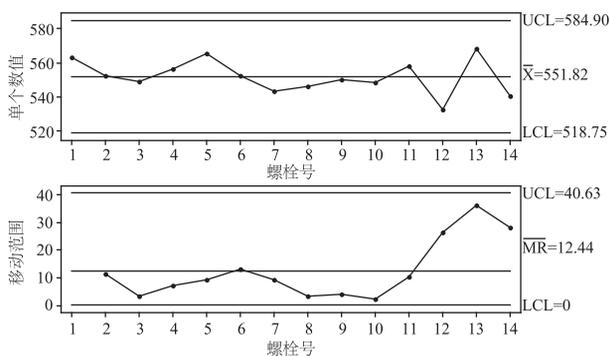


图 5 主轴承盖螺栓拧紧力矩控制图表

#### 4.2 优化的新拧紧规范装配数据分析结论

采用优化后的新拧紧规范装配，其预紧力平均值是  $200.19 kN$ ，在  $192.46 \sim 206.53 kN$  之间波动，满足了主轴承盖螺栓预紧力设计要求  $200 \pm 20 kN$ ；其预紧力  $Cpk$  值为  $1.40$ ，虽不满足装配规范要求的不小于  $1.67$ ，但是已经大于  $1.33$ ；并且主轴承盖螺栓的最终检测力矩平均值为  $551.82 (N\cdot m)$ ，

通过专项试验的测试结果、数据统计和车间的控制精度，最终确定试生产阶段 4DX 发动机缸盖螺栓的监控扭矩范围为： $225 \sim 275 (N\cdot m)$ 。

## 5 结论

(1) 通过对转角法螺栓装配过程中的常见失效模式进行分析研究，阐述了生产过程中扭矩监控的重要性。监控螺栓的最终扭矩是保证螺栓安装可靠性的重要手段。

(2) 采用数据统计的方法，判断螺栓装配过程的稳定性。结合扭矩-轴向力试验结果，可确定螺栓的轴向力是否达到要求。

### 参考文献

- [1] ISO\_16047\_2005, Fasteners-Torque/clamp force testing [S].
- [2] J. H. Bickford. Bolt torque; getting it right [J]. Machine Design, 1990, (7)21.
- [3] D. A. Basrness. Unlocking secrets of thread-locking [J]. Assembly Engineering, 1990, 33 (1).
- [4] 许镇宇. 机械零件(修订版) [M]. 北京: 人民教育出版社, 1981.

在  $532.17 \sim 568.32 (N\cdot m)$  之间波动，稳定可控。

## 5 结论

通过对该发动机主轴承盖螺栓拧紧规范的研究，优化得到了更加合理的新拧紧规范，并通过了验证。目前优化的新拧紧规范已经写入该发动机装调规范中，在发动机装配线上得到成功应用。

对于验证主轴承盖螺栓采用优化后的新拧紧规范装配的预紧力  $Cpk$  值和平均值，仅分析第 7 台发动机上的 14 根螺栓，样本数据显然是不够的，但是本次验证试验是基于前 6 台发动机的数据推导出  $340 (N\cdot m) + 90^\circ$  的拧紧规范，并且通过对第 7 台发动机的验证证实了这一推导，所以认为该试验结果可以接受。

后续还将进行更多样本的验证，来证明优化后的新拧紧规范的合理性，或是调整出更加合理的拧紧规范，并且给出更加贴合实际情况的最终参考力矩及合理的公差范围。

### 参考文献

- [1] GB/T 16823.3-1997, 螺纹紧固件拧紧试验方法[S].