

某柴油发动机主轴承盖螺栓拧紧规范研究

徐 辉

(武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 针对某柴油发动机主轴承盖螺栓采用现有拧紧规范拧紧后产生的预紧力不能满足设计要求的问题, 通过改进涂油方式和拧紧方式对现有拧紧规范进行了优化。现场测量和数据分析表明: 采用这一优化的拧紧规范, 该螺栓达到了预紧力设计要求, 从而在很大程度上提高了缸体和曲轴乃至发动机整机的可靠性。

关键词: 主轴承盖螺栓; 预紧力; 拧紧; 规范

中图分类号: TK423.3⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2014)02-0019-04

Research on Tightening Specification for Certain Diesel Engine's Main Bearing Cap-screws

Xu Hui

(School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Hubei Wuhan 430072)

Abstract: It was found that the preload of the main bearing cap-screws using the existing tightening specification did not satisfy the design requirements. To solve this problem, the existing tightening specification was optimized from the aspects of lubricating and tightening method. Field measurement and data analysis show that with the employment of this optimized tightening specification, the cap-screw has reached the design requirements for tightening, thus could substantially improve the reliability of cylinder block and crankshaft, and the engine as a whole.

Keywords: main bearing cap-screw; preload; tightening; specification

1 问题提出

某公司开发的 13 L 电控重型柴油发动机的最高燃烧压力高于其机械式柴油机。最高燃烧压力的增大势必对发动机的关键零部件, 例如缸体总成和曲轴等的强度提出更高的要求, 其中影响缸体总成强度的一个重要零件就是主轴承盖螺栓。主轴承盖螺栓是发动机的关键紧固件之一, 是保证缸体可靠性的一个重要因素, 它的失效直接影响到缸体和曲轴的安全, 进一步影响发动机整机的可靠性。因此, 有必要对主轴承盖螺栓进行研究, 在保证主轴承盖螺栓疲劳强度的前提下, 保证其装配预紧力满足设计要求。

根据该发动机连杆和活塞的惯性力、曲轴自重、主轴瓦装配夹紧力和最高燃烧压力等施加给曲轴的弯曲载荷和轴向载荷等数据, 确定发动机主轴承盖螺栓预紧力设计要求为 200 ± 20 kN, 且工艺过程能力值 C_{pk} 必须不小于 1.67; 同时根据积累的设计开发经验和工厂进行的现场验证确定了现有拧紧规范(见表 1)。考虑到环境、拧紧设备、缸体、主轴承盖及螺栓的差异性影响, 这一拧紧规范在某公司的装配线上能否顺利获得设计要求的装配预紧力还是一个未知数, 所以须要对该发动机主轴承盖螺栓进行拧紧规范研究, 验证现有的拧紧规范是否合理; 如果不够合理, 需要对现有拧紧规范进行调整、优化, 重新开发出更加合理的拧紧规范。

收稿日期: 2013-05-27; 修回日期: 2013-08-19

作者简介: 徐辉(1981-), 男, 硕士研究生; 主要研究方向为内燃机设计开发, E-mail: 278228621@qq.com。

表 1 现有拧紧规范

第 1 步	在主轴承盖螺栓的螺纹部分和螺栓的结合面涂 15W40 机油
第 2 步	用拧紧机拧紧 14 根螺栓到 170 (N·m)
第 3 步	用拧紧机拧紧 14 根螺栓到 373 (N·m)
第 4 步	用拧紧机拧紧 14 根螺栓到 90° (拧紧机在加 90° 之前自动复检 373 (N·m))

2 现有拧紧规范验证

2.1 主轴承盖螺栓预紧力确定

由于在发动机上无法直接测量主轴承盖螺栓装配后的预紧力, 因此采用超声波法先在试验室对主轴承盖螺栓进行螺栓预紧力—伸长量标定, 再在装配现场测量主轴承盖螺栓伸长量, 对照标定曲线间接计算得到主轴承盖螺栓预紧力。具体步骤为:

(1) 在试验室对同一批主轴承盖螺栓拧紧过程中的预紧力—伸长量关系进行标定;

(2) 对拟装配主轴承盖螺栓测量螺栓的原始长度;

(3) 当主轴承盖螺栓在发动机上按照拧紧规范装配后, 再测量主轴承盖螺栓的伸长量;

(4) 根据在试验室标定的螺栓预紧力—伸长量关系确定螺栓的当量预紧力。

2.1.1 预紧力—伸长量试验室标定

发动机主轴承盖螺栓选用 12.9 级高强度螺栓。

依据 GB/T 16823.3-1997《螺纹紧固件拧紧试验方法》, 采用装配线上主轴承盖螺栓和用主轴承盖材料和缸体材料制造的陪试垫片和螺母, 采用德国 SCHATZ-Analyse 5413-2777 螺纹紧固件试验分析系统和美国 Raymand 公司 PDX-1034 螺栓伸长仪进行标定, 螺栓的夹持高度和旋合长度保持与装配线一致, 试验螺栓、陪试垫片、螺母均只使用一次^[1]。根据得到的主轴承盖螺栓预紧力—伸长量标定数据绘制出主轴承盖螺栓预紧力—伸长量平均值曲线(见图 1)。

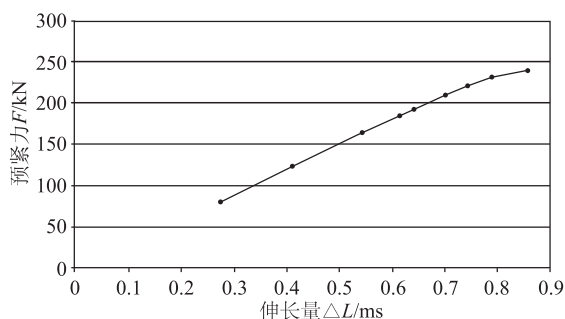


图 1 主轴承盖螺栓预紧力—伸长量平均值曲线

由图 1 可以看出主轴承盖螺栓的装配预紧力在

220 kN 以下处于线性阶段, 根据其预紧力设计要求上限值为 220 kN, 选取 220 kN 以下的数据建立主轴承盖螺栓预紧力—伸长量回归曲线:

$$F = 300.15 \times \Delta L - 0.6288 \quad (\Delta L \leq 0.7413 \text{ mm})$$

2.1.2 预紧力—伸长量现场测量

2.1.2.1 螺栓装配条件

主轴承盖螺栓拧紧采用双头拧紧机, 其扭矩控制精度为 $\pm 3\%$, 角度控制精度为 $\pm 2^\circ$ 。

将每台发动机使用的主轴承盖螺栓由 1 到 14 编号, 不同号码的螺栓装配在发动机上的不同位置(图 2), 拧紧螺栓时按照从中间到两边的交叉拧紧方式拧紧。

螺栓编号							后端面
(1)	(3)	(5)	(7)	(9)	(11)	(13)	
(2)	(4)	(6)	(8)	(10)	(12)	(14)	
排气侧							

图 2 主轴承盖螺栓在发动机上位置及编号

本次共对七台发动机进行了主轴承盖螺栓现场预紧力测量, 采用不同的拧紧规范加转角的方法进行拧紧。

2.1.2.2 七台发动机现场预紧力—伸长量测量数据

在该发动机装配线对七台发动机主轴承盖螺栓的原长、装配后的伸长量、拧紧力矩、松开后的残余伸长量进行测量, 采用不同的拧紧规范, 得到七组测量数据(见表 2~表 4)。

2.2 现有拧紧规范验证

第 1、2、3 台发动机采用了现有拧紧规范进行装配, 所以先对前 3 台发动机现场测量数据进行分析。虽然装配伸长量在现场测量中非常不顺利, 有可能导致数据的失真, 但是从得到的预紧力平均值分别为 254.03 kN、227.18 kN、257.09 kN 来看, 这些值都远远超过了预紧力设计目标值 200 kN, 所以须要调整装配拧紧规范。

3 拧紧规范优化

3.1 拧紧规范优化原理

整个装配拧紧规范优化过程依据的原理是: 当摩擦系数一定时, 预紧力和最终检测力矩之间存在线性关系。这一原理在 GB/T 16823.3-1997《螺纹紧固件拧紧试验方法》第 7.1 节有所体现^[1]。

3.2 拧紧规范优化方法

可以考虑从以下几个方面来对拧紧规范进行优化: 更改涂油方式; 更改拧紧角度; 更改拧紧力矩。

同时可以考虑从以下几个方面来降低散差: 在

拧紧机拧紧前进行预拧紧；降低拧紧机拧紧转速；采用拧紧-松开-拧紧的方式达到规定扭矩。

表 2 主轴承盖螺栓现场验证第 1、2、3 组数据

主轴承盖螺栓	第 1 组数据		第 2 组数据		第 3 组数据	
	装配拉伸长度/ mm	最终检测力矩/ (N·m)	装配拉伸长度/ mm	最终检测力矩/ (N·m)	装配拉伸长度/ mm	最终检测力矩/ (N·m)
平均值	0.848 4	553.042 1	0.759 0	567.170 7	0.858 6	572.335 7
标准差	0.087 4	15.966 4	0.097 6	9.916 2	0.056 1	17.866 6
最大值	0.957 6	586.390 0	0.903 2	585.390 0	0.910 6	593.420 0
最小值	0.711 7	531.170 0	0.634 3	547.230 0	0.674 5	539.200 0
平均当量预紧力/kN	254.03		227.18		257.09	
最大当量预紧力/kN	286.79		270.47		272.69	
最小当量预紧力/kN	212.99		189.76		201.82	
K 值(平均)	0.121		0.139		0.124	

备注：第 1、2、3 台发动机在现场测量中发现残余伸长量不为零，由此判断螺栓可能已经进入塑性区域。如仍参照标定曲线来计算预紧力，有可能导致预紧力数据失真，但仍有参考意义。

表 3 主轴承盖螺栓现场验证第 4、5、6 组数据

主轴承盖螺栓	第 4 组数据		第 5 组数据		第 6 组数据	
	装配拉伸长度/ mm	最终检测力矩/ (N·m)	装配拉伸长度/ mm	最终检测力矩/ (N·m)	装配拉伸长度/ mm	最终检测力矩/ (N·m)
平均值	0.632 4	529.744 2	0.715 7	576.351 4	0.711 9	577.355 0
标准差	0.018 3	11.201 6	0.017 3	12.990 6	0.016 5	8.735 5
最大值	0.668 3	546.230 0	0.740 1	589.400 0	0.747 8	587.400 0
最小值	0.591 5	510.080 0	0.677 4	547.230 0	0.695 4	556.270 0
平均当量预紧力/kN	189.18		214.19		213.05	
最大当量预紧力/kN	199.96		221.51		223.82	
最小当量预紧力/kN	176.91		202.69		208.10	
K 值(平均)	0.156		0.149		0.151	

表 4 主轴承盖螺栓现场验证第 7 组数据

主轴承盖螺栓编号	装配拉伸长度/mm	残余拉伸长度/mm	最终检测力矩/(N·m)
平均值	0.669 1		551.823 6
标准差	0.016 5		9.985 4
最大值	0.690 2		568.320 0
最小值	0.643 3		532.170 0
平均当量预紧力/kN		200.19	
最大当量预紧力/kN		206.53	
最小当量预紧力/kN		192.46	
K 值(平均)		0.153	

3.3 拧紧规范优化过程

根据以上拧紧规范优化原理和优化方法，对装配拧紧规范进行了如下优化。

(1) 第 4 台发动机初步尝试将装配拧紧规范从 373 (N·m)+90°调整为 310 (N·m)+90°；采用新的涂油方式和拧紧方式。得到的预紧力平均值是 189.18 kN，最终检测力矩平均值是 530 (N·m)。这一预紧力平均值低于预紧力设计目标值 200 kN，根据上述原理，可以计算出达到预紧力平均值 200 kN所需增加的最终检测力矩值为：
 $(200-189.18) \times 530 / 189.18 = 30.31 \text{ (N·m)}$

所以考虑将装配拧紧规范从 310 (N·m)+90°调整为 340 (N·m)+90°。

(2) 第 5 台发动机和第 6 台发动机分别采用了 375 (N·m)+90°和 373 (N·m)+90°的装配拧紧规范，采用新的涂油方式。得到的预紧力平均值分别为 214.19 kN、213.05 kN，最终检测力矩平均值分别为 576、577 (N·m)，同样根据上述原理，计算出达到预紧力平均值 200 kN 所需减少的最终检测力矩值：
 $(214.19-200) \times 576 / 214.19 = 38.16 \text{ (N·m)}$
 $(213.05-200) \times 577 / 213.05 = 35.34 \text{ (N·m)}$

再次验证了将装配拧紧规范调整为 $340 \text{ (N} \cdot \text{m)} + 90^\circ$ 是正确的。

3.4 拧紧规范优化结果

通过对该发动机主轴承盖螺栓拧紧规范研究,验证了现有的拧紧规范不够合理,调整、优化后得到了更加合理的拧紧规范,如表 5 所示。

表 5 优化后的拧紧规范

第 1 步	在主轴承盖螺栓的螺纹部分涂 15W40 机油,在螺栓的结合面涂齿轮油,注意齿轮油不要沾到螺纹部分
第 2 步	用电枪预拧紧 14 根螺栓到 $30 \text{ (N} \cdot \text{m)}$
第 3 步	用拧紧机拧紧每 2 根螺栓到 $310 \text{ (N} \cdot \text{m)}$, 松开,再拧紧到 $340 \text{ (N} \cdot \text{m)}$
第 4 步	用拧紧机拧紧 14 根螺栓到 90° (拧紧机在加 90° 之前自动复检 $340 \text{ (N} \cdot \text{m)}$)

4 优化的新拧紧规范验证

第 7 台发动机采用优化的新拧紧规范进行装配。

4.1 新拧紧规范装配数据分析

4.1.1 主轴承盖螺栓数据是否正态分布

对第 7 台主轴承盖螺栓数据进行最终检测力矩和预紧力正态性分析(见图 3),从图中可知,第 7 台发动机的力矩和预紧力均服从正态分布。

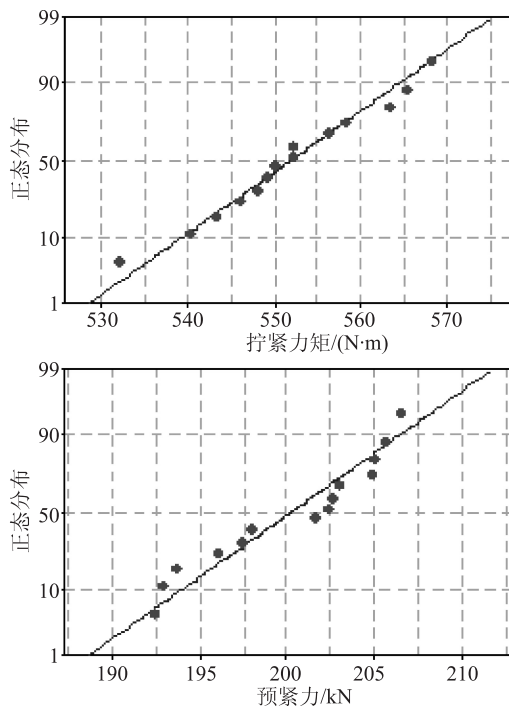


图 3 第 7 台发动机主轴承盖螺栓拧紧力矩、预紧力正态分布性

4.1.2 主轴承盖螺栓数据过程能力

对第 7 台主轴承盖螺栓数据进行预紧力过程能力分析(图 4),从图中可知,第 7 台发动机的预紧力平均值为 200.187 kN ; C_{pk} 值为 1.40。

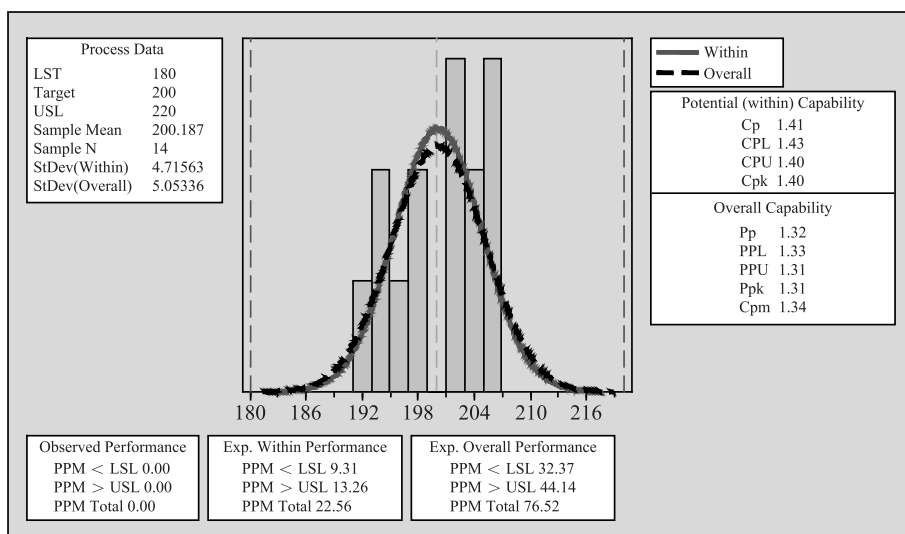


图 4 第 7 台发动机主轴承盖螺栓预紧力过程能力分析

4.1.3 主轴承盖螺栓预紧力统计性分析

对第 7 台发动机主轴承盖螺栓预紧力做统计性分析。分析结果表明:主轴承盖螺栓的预紧力在 $192.46 \sim 206.53 \text{ kN}$ 之间波动,平均值为 200.19 kN ,满足主轴承盖螺栓设计预紧力目标值为 200 kN ,并在 $180 \sim 220 \text{ kN}$ 之间的规定。

4.1.4 主轴承盖螺栓最终检测拧紧力矩分析

(1) 统计性分析 对第 7 台发动机主轴承盖螺栓拧紧力矩作出统计性分析。分析结果表明:第 7 台发动机主轴承盖螺栓的拧紧力矩在 $532.17 \sim 568.32 \text{ (N} \cdot \text{m)}$ 之间波动,平均值为 $551.82 \text{ (N} \cdot \text{m)}$ 。
(下转第 26 页)

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 1.5σ , 记做 $Z=93.32\%$ 。

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

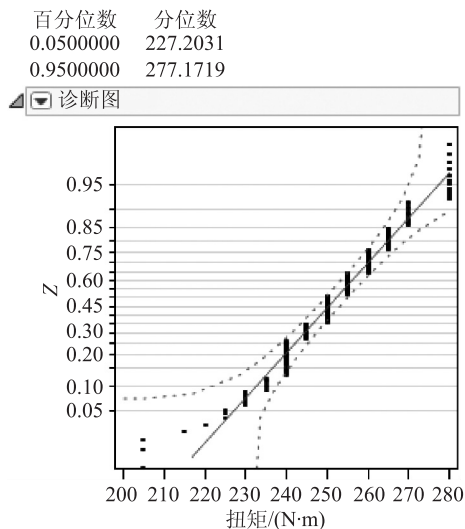


图 5 缸盖螺栓扭矩范围

(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。

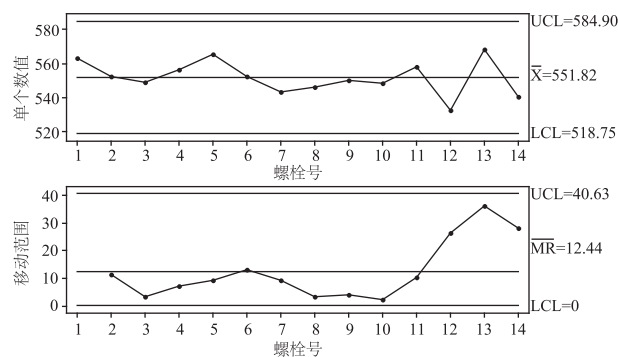


图 5 主轴承盖螺栓拧紧力矩控制图表

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 $192.46 \sim 206.53 \text{ kN}$ 之间波动, 满足了主轴承盖螺栓预紧力设计要求 $200 \pm 20 \text{ kN}$; 其预紧力 C_{pk} 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 $551.82 (\text{N}\cdot\text{m})$,

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: $225 \sim 275 (\text{N}\cdot\text{m})$ 。

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. Basrsness. 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 $532.17 \sim 568.32 (\text{N}\cdot\text{m})$ 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 C_{pk} 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 $340 (\text{N}\cdot\text{m}) + 90^\circ$ 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].