柴油机气缸孔压板珩磨工艺改进

□ 东风康明斯发动机有限公司/林勇　郑国世

为了解决因气缸孔形状误差导致活塞漏气量大和烧机油的问题，气缸孔压板珩磨技术已经被广泛地应用。本文分析了压板珩磨工艺的有效性因素，改进了工艺流程。

柴油机气缸体气缸孔的加工方式有两种。一种是气缸孔设计在气缸套中，气缸孔加工完成后，将气缸套压入气缸体中；另一种是气缸孔设计在气缸体中，气缸孔在气缸体毛坯中金属加工形成。本文研究的气缸孔压板珩磨有效性属于第二种。

为了解决因气缸孔形状误差导致活塞漏气量大和烧机油的问题，气缸孔压板珩磨技术已经被广泛地应用。其目的是通过在气缸孔精加工环节，增加装配工艺压板来模拟发动机装配时气缸孔的受力状态，以确保发动机装配后，气缸孔能有一个金属加工质量水平相当好的形状。

气缸孔加工属于薄壁件加工，壁厚只有6～8mm，气缸盖螺栓拧紧后，会对气缸孔形状产生较大影响。测量数据表明，装压板与不装压板，气缸孔会产生20～35μm的弹性变形。

在气缸体精加工环节装配压板，是模拟装配的过程，模拟的效果需要数据验证。而且，工艺压板与气缸盖、工艺螺栓14.9级与发动机气缸盖螺栓12.9级、工艺缸垫与发动机缸垫、加工与装配的拧紧设备及拧紧程序等方面存在不可忽略的差异。因此，压板珩磨工艺有效性研究具有重要价值。

压板珩磨过程

目前采用的压板珩磨工艺（见图1），大多数在气缸孔精镗前装配压板，在珩磨后拆除压板。工艺流程为：装压板→精镗气缸孔→粗珩气缸孔→精珩气缸孔→平顶珩气缸孔→拆压板。

以某6L柴油机气缸体为例，对压板珩磨工艺有效性进行验证。以气缸孔圆柱度作为验证气缸孔形状变化的主要质量参数，圆柱度的测量须在拧紧状态下测量。圆柱度技术要求：首次装压板0.015mm，再次装压板0.025mm。

工艺压板长×宽×高：750mm×254mm×50.5mm，材质为工具钢，调质处理。

工艺缸垫采用石棉工艺缸垫。工艺螺栓采用14.9级高强度螺栓，自带法兰，无垫圈，直接作用在工艺压板表面。

拧紧设备：26轴拧紧机，拧紧力矩+转角法（60N·m+90°）。

珩磨有效性验证

气缸孔测量设备采用蔡司三坐标扫描（见图2），测量精度

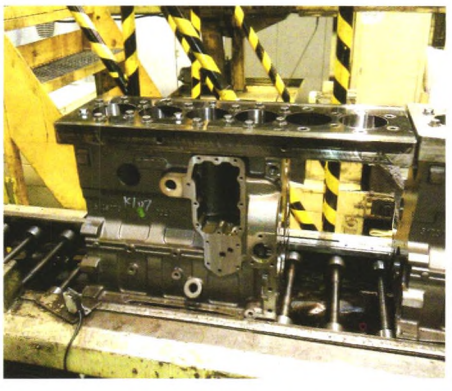

图1 压板珩磨示意图

图 2

0.002mm。测量条件为：测量时，气缸体油底壳面朝上，自顶平面开始，每20mm扫描一截面，共9个截面（缸孔总长200mm）。气缸孔测量结果如表1所示。

由此可知，拆下压板后气缸孔有约15μm变形量，装配气缸盖后气缸孔有约38μm变形量。按产品图样要求，装气缸盖后气缸孔圆柱度≤25μm，即要求装拆气缸盖后变形量≤10μm。按此标准评价气缸孔压板珩磨有效性，显然当前的压板珩磨工艺有效性不满足技术要求。

压板珩磨工艺有效性因素分析

1.有效性数据分析

气缸孔三维扫描如图3所示。

从图3中分析可知，装气缸盖后，气缸孔变形最大处位置距顶平面约125mm，而且变形并不均匀。不带压板与带压板相比，气缸孔虽然也发生了变形，最大变形位置也位于距顶平面约125mm处，变形后气缸孔呈鼓形，变形较均匀。

气缸孔截面形状扫描显示，装气缸盖后气缸孔的变形状况为，从距顶平面约40mm截面形状开始变差，到约120mm截面形状变大，到140mm截面以后形状逐渐变好。

气缸孔加工过程装压板的主要目的是模拟发动机装配时气缸孔的受力状态，以确保发动机装配后，气缸孔能有一个与金属加工质量水平相当的良好形状。因此，将研究气缸孔装气缸盖后变形的问题重点放在如何使装压板过程更接近发动机装配线装气缸盖过程。此过程主要涉及气缸盖螺栓拧紧程序、气缸盖螺栓、气缸垫、压板与气缸盖，最终体现在两个过程中作用于气缸孔上的夹紧力要相当。

气缸盖装配和压板装配参数见表2。

表1 气缸孔测量结果 （单位：μm）

零件号	气缸孔状态	气缸孔号						
		1	2	3	4	5	6	平均值
1	带压板	12.2	9.3	7.9	7	10.2	9.9	9.4
	不带压板	21.1	23	25.8	26.9	30.8	24.9	25.4
	带气缸盖	32.2	51.4	52.9	47.8	47.5	48.7	46.8
	压板带与不带差值	8.9	13.7	17.9	19.9	20.6	15	16
	带气缸盖与压板差值	20	42.1	45	40.8	37.3	38.8	37.4
2	带压板	13.1	7.9	6.7	6.6	15.5	10.7	10.1
	不带压板	20.8	25.9	26	22.1	27.8	22.6	24.2
	带气缸盖	43.6	55.3	49.6	49.5	49.4	46.2	48.9
	压板带与不带差值	7.7	18	19.3	15.5	12.3	11.9	14.1
	带气缸盖与压板差值	30.5	47.4	42.9	42.9	33.9	35.5	38.8

2.螺栓夹紧力测量

气缸盖和工艺螺栓夹紧力测量结果见表3。由此可知，压板螺栓新旧夹紧力差异不大，平均值约4.5kN，但与气缸盖螺栓夹紧力差异较大，平均值约20kN。

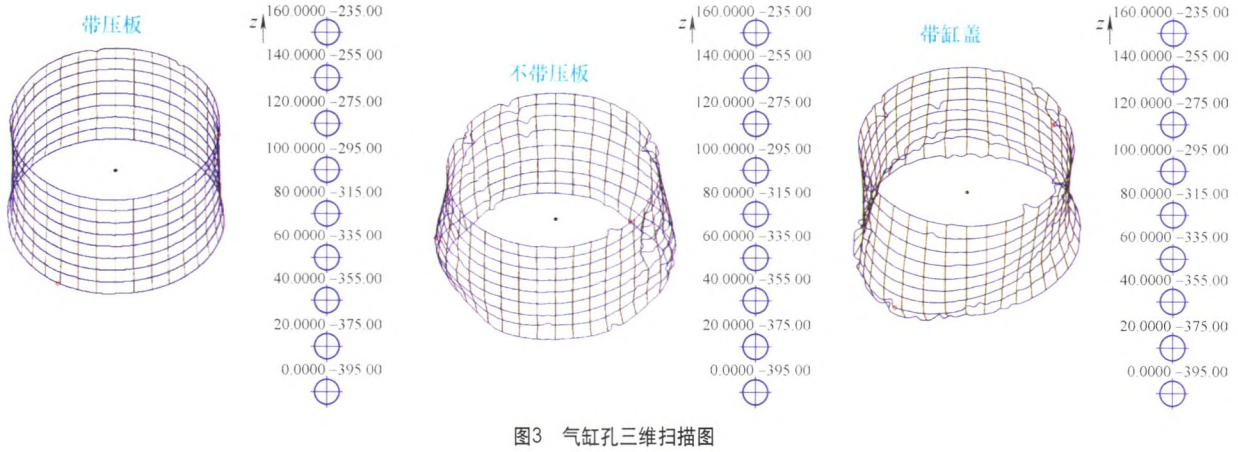

图3 气缸孔三维扫描图

表2 气缸盖装配和压板装配参数

螺栓位置		预紧力设计值/kN	夹持厚度/mm	拧紧工艺
排气侧	气缸盖螺栓	82±12	42.52	90N·m+60°
	压板螺栓		58.16	60N·m+60°
中间两排	气缸盖螺栓	75.6±11.3	102.52	90N·m+90°
	压板螺栓		58.16	60N·m+60°
进气侧	气缸盖螺栓	80±12	162.77	120N·m+90°
	压板螺栓		58.16	60N·m+60°

表3 气缸盖和工艺螺栓夹紧力测量结果 （单位：kN）

螺栓位置			夹紧力平均值	标准差
排气侧	气缸盖螺栓		83.2	2.33
	压板螺栓	新	73.93	5.62
		旧	76.38	4.58
中间两排	气缸盖螺栓		76.6	1.6
	压板螺栓	新	53.4	5
		旧	56.9	10.4
进气侧	气缸盖螺栓		84.5	1.4
	压板螺栓	新	56.42	6.56
		旧	64.07	11.95

压板珩磨有效性改进

缩小压板螺栓与气缸盖螺栓夹紧力的差距是提高压板珩磨有效性的方向。下面针影响螺栓夹紧力的主要因素逐一进行分析，以确定改进有效性。

工艺压板需要长时间重复使用，需要具备较高的强度、表面硬度，同时结构简单，以减少使用维护成本。因此，不可能实现对气缸盖结构的完全模拟。参考柴油机行业的压板结构设计，当前压板满足使用要求，没有大的改进空间。

1.夹紧力规范

装配气缸盖的夹紧力规范如下：

长螺栓70～94kN，中螺栓64.3～86.9kN，短螺栓68～92kN。三种螺栓夹紧力公差重叠部分为70～86.9kN。

由于该机型有长、中、短3种规格的气缸盖螺栓，3种拧紧规范，3种夹紧力规范，对于金属加工模拟过程来说，很难实现。因此，取3种夹紧力公差的重叠部分作为压板螺栓的目标夹紧力规范。

2.拧紧程序研究

（1）确定工艺螺栓拧紧程序的原则。工艺螺栓必须拧紧，并获得与装配气缸盖时一致的夹紧力。只有经过适当的试验验证，确定气缸孔变形影响时，小于装配夹紧力才能被接受。

（2）拧紧参数确定。拧紧程序确定的两个关键参数：螺栓拧紧力矩和拧紧转角。

在开始确定拧紧程序计算前，需要检索发动机制造标准，以找到发动机装配时气缸盖螺栓的拧紧程序和夹紧力要求。最终夹紧力是拧紧力矩夹紧力和转角夹紧力之和，同时满足规定的夹紧力，拧紧力矩夹紧力是通过螺栓达到预定力矩而实现的夹紧力，转角夹紧力是通过螺栓旋转预定角度达到的夹紧力。对于不同的垫圈、螺栓直径、螺栓长度、润滑油类型等，需要使用公式1对拧紧程序进行调整。计算转角夹紧力时，可以使用45°、60°或90°试算。计算结果略去。

（3）拧紧程序步骤。用设备自动拧紧工艺螺栓时，拧紧程序要点：

1）预拧紧到最终力矩的75%。

2）完全松开螺栓，至少反向旋转360°。

3）拧紧到上述计算力矩值。

4）螺栓转角到上述计算值。

5）监控各步骤拧紧力矩和转角值。

在生产条件发生变化时，为了保证足够的夹紧力，经过试验验证后，拧紧程序应该被更改。

手工拧紧无法实现同时拧紧，需要从气缸体中间开始，交替拧紧到气缸体两端结束，拧紧过程与自动拧紧设备相同，气缸盖螺栓数量越多，手动拧紧过程越复杂，批量生产不推荐使用。

(4) 拧紧程序及监控力矩确定。按上述步骤拧紧工艺80N·m+60°，监控力矩130～230N·m。

通过测量螺栓夹紧力（见表4）可知，螺栓夹紧力都在设定范围内。

3.工艺气缸垫选择

在相同的条件下，分别测试装工艺气缸垫和发动机气缸垫的压板螺栓的夹紧力，发现两者存在明显的差异。其中，中间螺栓和进气侧螺栓的差值超过了10kN，即超过了15%～20%的变化率，不能接受。

因此，工艺气缸垫推荐使用发动机气缸垫，并通过试验确定最佳的更换频次。螺栓通过气缸盖、气缸垫作用在气缸体顶平面的负荷分布状态与气缸垫结构紧密相关，将压板和工艺螺栓对气缸体的作用都简化为作用力，由于气缸体对压板的作用力与全部工艺螺栓所受拉力是平衡的，所以，气缸体顶面上受力的大小为全部工艺螺栓所受拉力之和。研究表明，其中气缸孔周边护圈部分承受的载荷占40%，其余60%作为均布力作用在气缸体顶面上。

4.工艺螺栓选择

工艺螺栓应选择高质量高等级的螺栓，大于12.9级，表面磷化膜厚度适中，以保证经济的使用寿命。螺纹旋合长度应与发动机气缸盖螺栓相当，最好能够保持一致。考虑到压板的使用寿命，每个螺栓都应配以高强度平垫圈使用，通过更换垫圈，来减少对压板表面的磨损，以增加压板的使用寿命。

5.有效性改进验证

使用发动机气缸垫，并通过夹紧力试验重新设计压板螺栓的拧紧程序后，再次验证气缸孔压板珩磨的有效性。验证结果表明：装压板与装气缸盖的气缸孔变形量平均值5.7μm，改进明显，圆柱度满足了二次装配后小于25μm的要求（见图4）。

表4 螺栓夹紧力测量值

螺栓位置	设定值/kN	拧紧工艺	夹紧力测量值/kN
排气侧螺栓	70～86.9	80N·m+60°	81.07
			81.58
进气侧螺栓	70～86.9	80N·m+60°	76.68

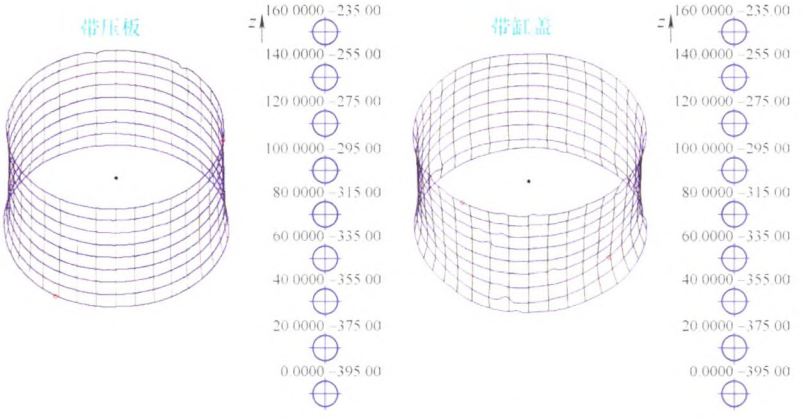

图4 改进后气缸孔三维扫描图

压板珩磨有效性收益

解决了气缸孔压板珩磨有效性问题后，使用改进后的气缸体分别装配成发动机总成，然后在发动机试验台架上进行发动机机油消耗对比试验，试验结果表明：装配改进后气缸体的发动机机油消耗明显降低，降低幅度超过了60%。由此可见，压板珩磨气缸孔对发动机的机油消耗影响很大。

好的气缸孔形状意义不仅仅在于降低售后赔偿，更重要的是为发动机质量提升后带来的潜在收益，例如，提升了客户对发动机可靠性的信任度。

压板珩磨有效性是为了保证气缸孔圆柱度，而气缸孔圆柱度的提升可以给发动机的贡献如下：

（1）减少发动机漏气量，降低曲轴通风箱的机油滴漏。

（2）降低发动机燃烧室内燃烧的机油消耗，也就是降低发动机冒蓝烟的可能性。

（3）使发动机活塞环的顺应性更好，从而降低发动机摩擦功率损失，间接地改善发动机燃油经济性。

结语

气缸孔压板珩磨有效性的关键在于气缸孔金属加工与发动机装配一致的夹紧力，以及气缸体顶平面负荷分布一致性。

影响夹紧力的主要因素需要关注，特别是拧紧程序，在最初设计时，要按照规范的过程做夹紧力试验来确定最终程序。

气缸体顶平面负荷分布一致性，与气缸垫的结构直接相关。由于工艺气缸垫结构与发动机气缸垫不能做到完全相同，推荐使用发动机气缸垫。AME