

发动机气缸盖开裂失效分析

气缸盖不仅承受着燃气的爆发压力和气缸盖螺栓的预紧力，而且由于燃烧室内的燃气和冷却水的作用，气缸盖各部分温度分布很不均匀，产生很大的热应力，故气缸盖承受着很大的机械应力和热应力。同时，气缸盖所受的高温会降低材料的强度，使得气缸盖开裂风险增大。

在内燃机开发试验过程中，经常见到连续破坏性的或者灾难性的失效，要找到失效的根本原因很难，往往我们看到表象破坏很严重的零件，其实失效的起因并不是该零件本身。比较规范的做法是保护好现场，通过逻辑推理、比较法、断口形貌分析和理论指导等手段进行分析。

本文介绍了一种基于失效机理的分析方法，这种方法要求负责人具有丰富的失效分析理论知识和经验，与传统头脑风暴、故障树、鱼刺图等方法相比，本方法避免了把所有零件都检查一遍，减少了人力和物力成本。

定义失效模式

本文研究的是某款四冲程直列六缸四气门重型大功率柴油发动机，标定功率为440kW，标定转速为2200r/min，排量为13L。

在公司内台架试验和客户处共发现六台发动机缸盖泄漏，拆机检查发现进气道、E-E之间的水套、排气道和气阀鼻梁区有裂纹（见图1），裂纹分布在气缸盖的进气道、排气道和排气门座鼻梁区，失效模式为开裂和泄漏，即燃烧室区裂纹，致使气缸盖漏水失效。

对六台失效机的信息进行了汇总，包含问题描述、应用工况、运行时间/里程、失效地点、首次失效时间、发动机装机号、缸盖机加流水号以及缸盖毛坯生产号等。观察缸盖的生产日期发现出现裂纹的缸盖毛坯集中在一段时间（2010年3月后，见图2）内生产的，此时铸造工艺由立浇改为平浇，同时开始执行新的铸件强度标准（强度由最小270MPa提高到最小300MPa）。

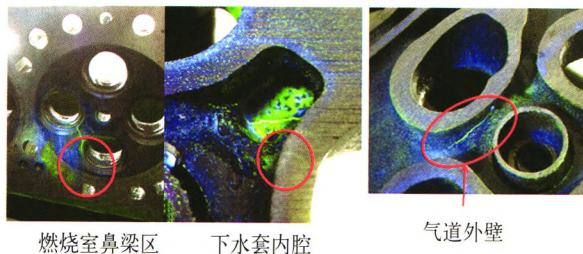


图1 失效部位

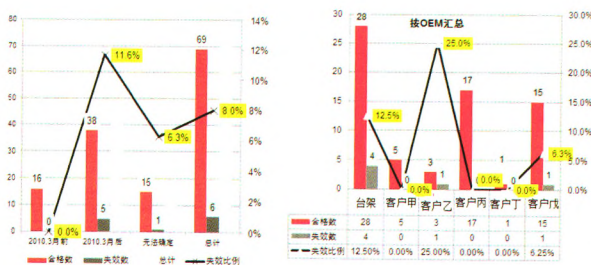


图2 失效时间分布

失效经验

气缸盖生产过程出现过三起失效，从统计情况来看，80%以上的失效模式是燃烧室区裂纹，导致气缸盖漏水失效。第一次失效发生在开发初期，热循环试

验1034h时出现鼻梁区域开裂。气缸盖鼻梁区域是对温度最敏感的薄弱部位,通过在热负荷较大的部位加工出的扇贝形的卸荷槽,分散热应力,解决了早期裂纹的问题;第二次失效在冷热冲击循环试验110h时鼻梁区开裂和泄漏,通过改进毛坯水套粘砂和把强度从270MPa提高到300MPa而解决问题;第三次出现进气道贯穿裂纹产生泄漏的失效,经检测失效部位抗拉强度偏低,通过去掉在砂芯上加质密涂料和增加抗拉强度解决。

从本次失效发生时间的分布看,初步判断失效应该与工艺过程变化相关。

推测失效机理

气缸盖集合了进排气系统、冷却系统、燃油系统及润滑油道系统,工作过程中需承受高爆发压力、高螺栓预紧力、高温燃烧及冷热循环冲击,燃烧室区产生裂纹是很普遍的故障模式。

1.失效机理假设

强度理论是判断材料在复杂应力状态下是否破坏的理论。气缸盖为铸铁,是脆性材料,选用第一强度理论,即最大拉应力理论:材料的破坏条件 $\sigma_1=\sigma_b$ (极限强度),考虑安全系数以后的强度条件是 $\sigma_1\leq[\sigma]$ 。那么耦合应力必须不大于材料的强度才能保证零件不失效。

假设导致气缸盖开裂是某一特定因素引起,假设如下: 条件一:假设耦合应力较高,即 $\sigma_{\max}>\sigma_b=270\text{MPa}$;条件二:假设强度较低,通过对失效件强度检测已初步排除。下面按照假设条件一进行耦合应力分析,影响应力的因子由热负荷产生的热应力、铸件的残余应力、由燃烧爆压和螺栓预紧力产生的机械负荷耦合而成。

2.耦合应力计算

设耦合后的应力为 ΣX ,由热负荷产生的主应力为 X_1 ,残余应力为 X_2 ,由燃烧爆压和缸盖螺栓装配预紧后的机械负荷为 X_3 。下面重点介绍残余应力的计算和热负荷产生的主应力。

(1) 热应力 X_1 根据FEA分析的结果来看,缸盖的温度梯度最大为 $13.5^\circ\text{C}/\text{mm}$,那么距离燃烧室面6mm位置的温度最大不能超过 $419-6\times 13.5=338^\circ\text{C}$ 。

结合温度场和FEA分析的结果做线性相关性回归

分析得出,燃烧室表面温度和应力有很强的线性相关性,所以通过开裂部位的温度推算出应力水平为132MPa,即 $X_1=132\text{MPa}$ 。另一种方法是结合铸铁热膨胀系数和温度对照表,把温度和机械负荷进行耦合后运用FEA模拟分析失效部位的应力。

(2) 残余应力 X_2 经过测量,与失效件同批次缸盖的残余应变最大为800个微应变(μe),已知灰铸铁的弹性模量为 $E=150\times 10^9\text{Pa}$,产品规范要求的残余应变 $\varepsilon_1=\pm 400\mu\text{e}$,对应的残余应力为 $\sigma_1=E\varepsilon_1=60\text{MPa}$;失效件残余应变为 $\varepsilon_2=800\mu\text{e}$,对应的残余应力为 $\sigma_2=E\varepsilon_2=120\text{MPa}$,所以改进前残余应变换算成应力为 $X_2=120\text{MPa}$ 。

(3) 机械应力 X_3 机械应力 $X_3=22\text{MPa}$ (燃烧爆压)+19.8MPa (螺栓装配应力)=41.8MPa。

综上,综合应力为 $\sigma_{\max}=\Sigma X=X_1+X_2+X_3=293.8\text{MPa}>\sigma_b=270\text{MPa}$ 。

3.根本原因假设

通过上面的载荷计算,残余应力和由热负荷产生的应力占据主导因素,所以改进主要集中在改善铸件残余应力和提高缸盖的热疲劳性能上。

残余应力高是导致气缸盖失效的主因,热负荷是诱因,如果缸盖最初没有由于排气过热开裂,那么缸盖还能持续很长的寿命,通过控制好铸造工艺,即控制好抗拉强度和抗高温热疲劳元素Mo含量,把残余应力降低到合理水平能避免失效再次发生。

改进及验证

如表1所示,把改进后的三块缸盖,放在同一台发动机上完成 $3\times 200\text{h}$ 的加速热疲劳试验(简称TCT见图2),即完成第一个200h试验(TCT-1)后拆下缸盖1#进行泄漏试验和探伤分析,然后马上更换一台改进后的新的缸盖开始第二个200h试验(TCT-2),第三块改进后的缸盖完成第三个200h试验(TCT-3),试验结果见表2。

设计的加速热疲劳试验工况($3\times 200\text{TCT}$)比一般运行发动机和失效的发动机缸盖燃烧室温度高很多,其燃烧爆压在设计爆压上增加六个西格玛,高达232MPa的缸内压力,燃油供油量比正常增加20%,加速疲劳的最大功率为423kW。试验的目的是通过短时间的加速或者超载试验能够暴露出发动机潜在的失

表1
 主要改进措施和结果

改进项目	改进措施	效果	备注
退火工艺和残余应力	试验型内保温24h去应力工艺	残余应力最大值200 μ e (改进前800 μ e, 产品规范要求400 μ e), 通过了3×200TCT台架验证。	主要措施
加工尺寸	下水套连接斜孔加工深度尺寸和圆角尺寸改进	直径由φ10mm改为11mm, 深度加深4mm, 钻孔末端R2.0mm圆角, 改善了开裂区域附近的水套流量	巩固措施
强度	控制化学成份特别是Mo的含量和熔炼过程, 保证铸件高温疲劳性能和强度	Mo含量按中线控制在0.35%~0.45%, 抗拉强度大于300MPa, 符合要求	以往改进措施的巩固

效, 这种试验的风险是结果会产生一些在常规试验工况下运转的发动机中不会出现失效模式。气缸盖上、下水套磁粉探伤结果分别如图3和图4 所示。

表2
 验证试验结果

改进缸盖毛坯批次号	交叉的加速疲劳试验设计	试验结果	泄漏试验结果	切割探伤结果
	规范	无失效	12ML/min	无裂纹
2G18	TCT-1	无失效	气道泄漏率: 4.63 水道泄漏率: 2.61	无裂纹
2H23	TCT-2	无失效	气道泄漏率: 13.75 水道泄漏率: 3.37	无裂纹
2H23	TCT-3	无失效	气道泄漏率: 4.47 水道泄漏率: 1.81	无裂纹

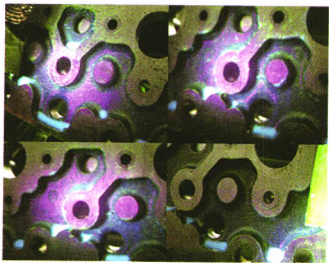


图3
 气缸盖下水套磁粉探伤结果

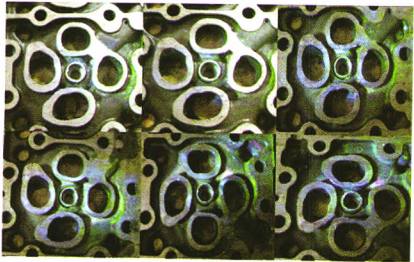


图4
 气缸盖下水套磁粉探伤结果

由于加速热疲劳比正常使用温度高出很多, 通过对气缸盖材质改进后进行加速热疲劳对比试验的成功说明通过提高材质性能, 缸盖的热疲劳性能大幅提高, 改进是成功的。

应用条件控制

从解决失效讲, 设计是基础, 制造是保证, 使用是条件。对最终用户从以下几个方面做好服务。

- 1) 用户使用中影响失效的因素有冷却液加注不当, 空气不滤清或滤清效果差, 不按规定使用、保养, 不正确的安装、维修和调整。
- 2) 气门间隙的保持和及时调整非常重要, 气门间隙的保证可能会使很多失效得以避免。
- 3) 相关件问题的及时发现及处理可避免相应的关联失效。如冷却系统布置不合理, 导致在水泵进水口出现负压, 出现水封干摩擦而导致失效, 最终导致冷却液泄漏。
- 4) 有一台发动机运行约半小时后, 发现进排气道进水, 发动机淹缸。切割后发现三缸进气道开裂。经现场勘查发现冷却部分冷却系统存在着冷却液加注问题, 水箱需要2h才能加注满。该缸盖的开裂可能与冷却系统有关, 水未加满, 无法除尽发动机内部的空气, 导致发动机内部局部过热。
- 5) 缸盖对冷热冲击最敏感, 需要考虑极端天气下采用厂家服务手册上规定的防冻剂。
- 6) 排温高对发动机影响很大, 需要从标定上加以限制, 如开启水温过高限扭/限速的功能, 同时要重视故障代码。

结语

解决失效, 首先要做好失效分析, 找到原因, 对症下药, 才能药到病除。以上所述是基于某柴油发动机的缸盖开裂失效分析所得, 是基于某种理论假设的失效分析方法就是理论联系实际的结果。

关键词:

气缸盖 泄漏 耦合应力 失效机理

(收稿日期20130225)