

■ 一汽解放汽车有限公司无锡柴油机厂/马静芬 张显军

柴油机凸轮轴 磨损分析及对策

凸轮轴作为柴油机配气机构中重要驱动部件，需承受周期性冲击载荷，因此，凸轮轴轴颈和凸轮工作面除应有较高的尺寸精度、较小表面粗糙度值和足够刚度外，还应有较高的耐磨性。锡柴某型新柴油机投放市场期后，相继出现发动机冒白烟或黑烟，并部分伴随异响、动力不足等现象，拆检后发现凸轮轴、摇臂衬套均有磨损。根据不完全统计，故障里程发生在2万~10万km，用户使用地区无明显对应关系，市场故障率远高于其他机型几倍。为此，我们着重对产品结构、摩擦副材质匹配等方面进行分析，寻求解决对策，并为新品开发提供凸轮轴摩擦副匹配的依据。

失效件技术要求

该型号柴油机采取顶置凸轮轴，凸轮轴相关件工作状态如图1所示。凸轮轴材质为45钢，表面硬度55~63HRC，有效淬硬深度1.5~5mm；滚轮材质GCr15，硬度58~64HRC；衬套材料CuNi9Sn6，合金层硬度85~130HBW，厚度0.2~0.5mm。

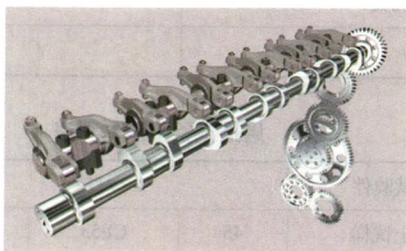


图1 凸轮轴相关件工作状态

失效件分析

首先对返回失效件进行检测，摇臂轴、滚轮无磨损，凸轮轴排气凸轮最大磨损量达到了0.064mm，进

气凸轮最大磨损量达到了0.074mm；摇臂衬套孔径呈椭圆，Y方向与X方向差值0.33~0.47mm（见图2、图3）。失效相关件解剖分析，化学成分全部符合国家标准，热处理质量全部符合图样要求。



图2 凸轮轴磨损宏观照片



图3 摇臂衬套磨损宏观照片

从理论上分析，凸轮轴排气凸轮和摇臂衬套磨损都会导致排气门的迟开早关，使得气门重叠角变小，引起发动机排气不够畅通，导致残余废气较多，影响下一循环缸内燃烧效果，从而出现上述问题。

从凸轮轴摩擦副匹配对比来看，凸轮轴与滚轮表面硬度上限设计理论上匹配，但45钢材料性质决定其实际热处理后正常硬度上限为58~59HRC，而对应摩擦件滚轮GCr15，其表面硬度轻而易举就能达到60~63HRC，即实际凸轮轴表面硬度低于滚轮硬度，同时

该机型缸内爆发压力比其他机型更高，凸轮表面要承受更大的作用力。因此，凸轮轴相对与滚轮来说更容易磨损。

国内外发动机凸轮轴发展趋势

国内外生产的凸轮轴从制造方式上，常使用的铸造方法有20世纪40年代的勃郎宁法壳体铸造、铁型覆砂、消失模铸造等，热处理有清华大学李双寿等人研究的球铁凸轮轴激光处理，钢凸轮轴的表面淬火，球铁的等温淬火，铸铁的冷激铸造等；从装配方式上看，日本日野自动车工业株式会社开发的热套和焊接组合式凸轮轴，日本精工株式会社研制的扩管法生产凸轮轴，日本柱塞环株式会社先后开发了烧结连接式凸轮轴、刮削连接式凸轮轴。美国Federal-Mogul公司、通用汽车公司、福特汽车公司，德国大众、奔

驰、Thyssen Krupp公司，英国T&N Technology公司，意大利GKN Bound Brock公司等都先后研制了装配式凸轮轴工艺与设备，并投入应用。国内柴油机凸轮轴目前的制造方式还是以整体式为主。

国内外生产凸轮轴的材料很多，有低碳钢渗碳（8620H）、中碳钢调质加表面感应淬火（45、50Mn、CF53、80B）、球墨铸铁等温淬火和激冷铸铁凸轮轴等。常见的发动机使用凸轮轴的材料与热处理工艺对比见表1。

随着发动机功率的不断提高，钢凸轮轴表面含碳量也有不断上升的趋势，其目的都是为了提高凸轮轴表面的硬度、增加耐磨性。从摩擦副易损件的设计考虑，应遵循“换小不换大”的原则，凸轮轴摩擦副易损件应设计为滚轮。Cummins、Steyr钢凸轮轴当今都选择了碳量高于45钢的材料。

表1 国内外发动机凸轮轴材质与热处理技术要求对比

厂家	材料		技术参数	
	凸轮轴	挺柱	凸轮轴	挺柱
cummins	冷激灰铁	冷激灰铁	桃尖硬度>45HRC	白口层深度2~3mm， 硬度55~56HRC
	AISI1078	冷激灰铁	调质：223~255HBW，凸轮/轴颈感应淬火；凸轮重载部分：59~63HRC，2.5~4mm，基圆≥0.64mm，轴颈：55~63HRC	
	8620H	冷激灰铁	正火/渗碳/淬火	
			最大接触应力1172MPa	
Deutz	CF45	冷激灰铁	正火/感应淬火，硬度55~56HRC	59~61HRC
Benz	激冷铸铁	液压直筒	桃尖50±2HRC，深度10mm	-
			基圆深度5mm	
Isuzu	冷激灰铁	冷激灰铁	桃尖硬度：50~53HRC	57-58HRC
Steyr	CF53	冷激灰铁	正火/感应淬火，桃尖：56~63HRC	/
Iwc	AISI1045	冷激灰铁	/	/

凸轮轴摩擦副摩擦磨损试验

基于上述分析，除了设计人员从结构上分析改进外，选择匹配的凸轮轴摩擦副材料也是降低这类故障的途径之一。为此，对常用的三种钢凸轮轴摩擦副进行摩擦磨损对比试验。本试验分别选用三种钢凸轮轴材料对比，采用CETR多功能磨损试验机，对凸轮轴试样和滚轮试样进行往复式摩擦磨损试验，磨损试验配副材料见表2。

表2 磨损试验配副材料表

试验件	材料		
上试样	45	CF53	80B
下试样	GCr15		

试验根据设备参数条件，结合该型号柴油机工况条件，凸轮轴-滚轮磨损试验温度为100℃，润滑油为重型车雄风牌CH-4 15W/40，载荷30kg；往复冲程6mm；转速900r/min。加油方式为跑合前用滴管在凸轮

轴与滚轮接触表面间一次性加油0.15mL。为确保结果的可靠性，相同条件下的摩擦磨损试验按同一规范重复三次。试验结果见表3和表4。

表3 配副在磨损过程中的平均摩擦系数

摩擦副	检验项目	检验结果				检验方法
		第一组	第二组	第三组	第四组	
45-GCr15	摩擦系数	0.152 1	0.152 1	0.147 9	0.150 7	★GB/T 12444-2006
CF53-GCr15		0.148 7	0.145 3	0.147 7	0.147 2	
80B-GCr15		0.135 3	0.138 0	0.143 2	0.138 8	

表4 配副（凸轮轴/滚轮）的磨损系数及机理

摩擦副		检验项目	平均磨损系数 (10 ⁻⁵ mm ³ /min)	机理	检验方法
45-GCr15	45	摩擦率 磨损机理	0.2562	磨粒磨损+抛光磨损	★GB/T 19067.1-2003 ★GB/T 17359-2012
	GCr15		1.1		
CF53-GCr15	CF53		0.2037	磨粒磨损	
	GCr15		2.139		
80B-GCr15	80B		0.1349	磨粒磨损+抛光磨损	
	GCr15		0.7303		

由表3、表4可知：从摩擦系数值分析，80B对偶件的磨损系数最小，其次是CF53，最大的是45钢；从磨损率分析：钢凸轮轴中80B的匹配性较好，80B磨损率为45钢的52.6%，其对偶件GCr15磨损率是45钢的66.4%；CF53磨损率为45钢的79.5%，但CF53对偶件GCr15磨损率是45钢的1.75倍；从机理分析 80B和45均为磨粒磨损加抛光磨损，只有CF53为单磨粒磨损。

耐久试验

根据摩擦磨损试验结果，我们选取了CF53、80B凸轮轴分别装机进行某机型台架试验，两种凸轮轴均通过了1000h耐久试验。拆机后用Taylor Hobson轮廓仪检测，CF53材料的凸轮轴，其凸轮磨痕最明显处（见图4）直线度不超过0.004mm；80B材料的凸轮磨痕最明显处直线度不超过0.003mm，全部符合凸轮轴出厂图样要求。

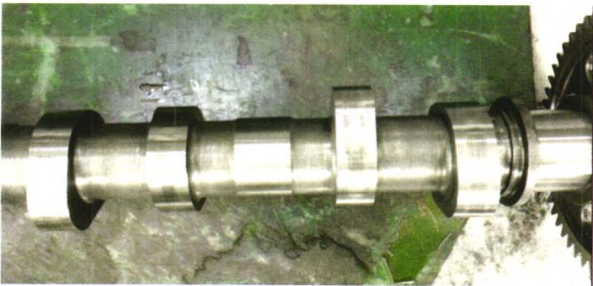


图4 直线度检测区域

成本分析

CF53、80B、45钢三种材料加工的凸轮轴的成本比较见表5。

表5 三种钢凸轮轴材质与加工成本比较 （单位：元）

材料 成本	45钢	CF53	80B
材料成本	216	264	384
加工成本	196	206	391
小计	412	470	775

仅从材料与加工成本分析，CF53凸轮轴比45钢每支价格约高58元，虽然CF53与激冷铸铁匹配（重汽、潍柴）市场表现优于45钢与GCr15匹配；但CF53与GCr15的匹配和45钢与GCr15的匹配相比，理论分析并无大的优势；80B凸轮轴相对来说成本较高，每支价格约比45钢高363元，但抗磨损性能较好。

解决对策

- 1) 设计进一步改进制动器和摇臂结构。如能明显降低市场故障率，则可沿用45钢凸轮轴。
- 2) 工况环境比较恶劣的高功率柴油机，应采用80B凸轮轴与GCr15滚轮匹配。
- 3) 加速组合凸轮轴的开发应用，实现材料分体优化，满足发动机配气机构对凸轮轴各个部位不同性能的要求。

关键词：

柴油机 凸轮轴 磨损 耐久验证

(收稿日期20140111)