

凸轮轴异常磨损分析及工艺优化

牛恩来¹, 赵俊平¹, 余金科¹, 胡大鹏²

1. 东风商用车技术中心 湖北十堰 442001

2. 东风龙擎动力有限公司 湖北十堰 442001

摘要: 失效分析得出, 凸轮轴感应淬火质量及凸轮轴精磨工艺引起的磨削烧伤是凸轮轴异常磨损的主要原因。通过砂轮修型、优化磨削工艺参数即采取更优磨削烧伤检测手段, 增大磨削烧伤检测频次等措施彻底消除磨削烧伤。优化感应器尺寸、感应淬火参数及完善感应淬火后的检测方法, 使感应淬火质量得到显著提升。同时工艺优化措施已经固化应用于实际生产中, 凸轮轴短里程的异常磨损问题已基本解决。

关键词: 凸轮轴; 异常磨损; 磨削烧伤; 感应淬火; 工艺优化

Abnormal wear analysis and process optimization of camshaft

NIU Enlai¹, ZHAO Junping¹, YU Jinke¹, HU Dapeng²

1. Dongfeng Commercial Vehicle Technology Center, Shiyan 442001, Hubei, China

2. Dongfeng Loong-Gine Power Co., Ltd., Shiyan 442001, Hubei, China

Abstract: Failure analysis proved that the camshaft induction quenching mass defect and the grinding burn caused by the camshaft fine grinding process were the main causes of the abnormal camshaft wear. The grinding burns was completely eliminated through repairing the grinding wheel, optimizing the grinding process parameters, adopting a better grinding burn detection method, and increasing the frequency of grinding burn detection. The induction quenching quality was significantly improved by optimizing the size of induction heater, induction quenching parameters and improving the detection method after induction quenching. Finally, the process optimization measures was cured and applied in the actual production, and the abnormal wear problem of camshaft short mileage had been basically solved.

Keywords: camshaft; abnormal wear; grinding burn; induction hardening; process optimization

1 序言

发动机凸轮轴是发动机配气系统的重要组成部分, 其质量的优劣直接影响着发动机的使用性能。某型号发动机凸轮轴存在短里程异常磨损现象, 通过对市场返回的失效件进行初步分析发现, 凸轮轴的进排气凸轮尤其是排气凸轮存在异常磨损情况,

主要体现在凸轮表面的划伤、点蚀、黏着及剥落等失效形式, 如图1所示。磨损位置均集中在进排气凸轮桃尖处以及进排气凸轮的升降程位置, 这些失效形式及失效部位与凸轮轴实际工作中的服役条件一致, 但磨损程度异常, 需进一步深入分析检测。

第一作者: 牛恩来, 高级工程师, 主要从事汽车零部件热处理工艺试验开发与研究工作, E-mail: niuel@dfcv.com.cn。

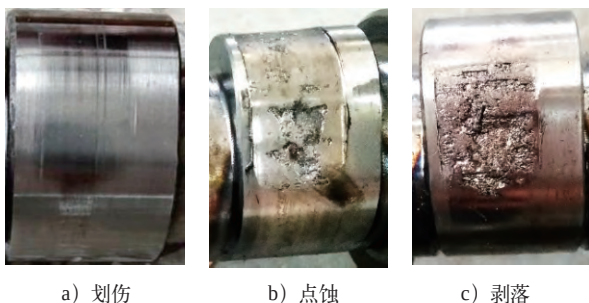


图1 凸轮失效形式

2 凸轮轴异常磨损原因分析

2.1 凸轮轴基本情况介绍

凸轮轴的加工流程：毛坯检测→铣端面钻中心孔及套车小轴→粗车主轴颈、台肩及齿轮轴径→粗车主轴颈及倒角、车清根槽→铣键槽→铣凸轮及倒角→打标→去毛刺→所有主轴颈及凸轮感应淬火→回火→校直→精磨全部主轴颈、台肩及齿轮轴径→检测全部主轴颈及齿轮轴径→精磨全部凸轮→荧光磁粉检测及退磁→抛光全部凸轮、主轴颈→清洗→齿轮加热→齿轮压装→防锈包装→终检。

凸轮轴感应淬火技术条件：表面硬度 $\geq 60\text{HRC}$ ，淬硬层深 $1.5\sim 7\text{mm}$ 。

根据凸轮轴的加工流程，判断失效原因主要集中在毛坯原材料、感应淬火及精磨加工环节，下面进行详细检测。

2.2 化学成分检测

该机型凸轮轴毛坯原材料为80B钢，在失效凸轮轴上截取一段进行光谱直读，以判断锻件毛坯的化学成分是否合格。化学成分检测结果见表1。

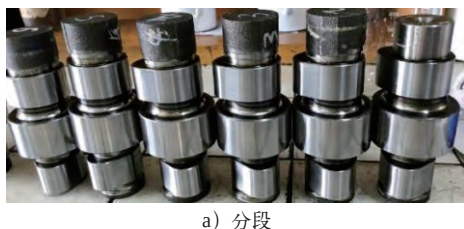
表1 80B钢凸轮轴化学成分检测结果（质量分数）（%）

元素	C	Si	S	P	Mn	Cr	Ni	Cu
检测值	0.79	0.22	0.006	0.014	0.77	0.10	0.03	0.02
标准值	0.75~0.85	0.17~0.37	≤ 0.035	≤ 0.035	0.50~0.80	≤ 0.25	≤ 0.30	≤ 0.25

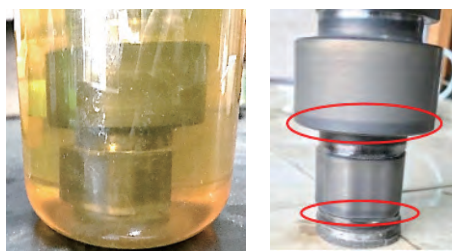
由表1可知，化学成分检测结果符合GB/T 699—2015《优质碳素结构钢》关于80B的相关技术要求。

2.3 磨削烧伤检测

将整根凸轮轴切割成多段，然后浸泡在混合酸液体中进行腐蚀，以检测凸轮轴感应淬火后其表面的磨削情况，如图2所示。



a) 分段



b) 浸泡腐蚀

c) “分层”现象

图2 凸轮轴磨削烧伤检测

抽取现生产成品凸轮轴及市场返回失效件进行磨削烧伤检测，结果发现主轴颈及凸轮均出现表面“分层”现象（见图2c红圈标注处），且失效件及成品件均有磨削烧伤现象存在。金属零件在磨削加工过程中产生的高温极易使零件表面出现磨削烧伤，降低零件耐磨性、耐蚀性和疲劳强度等，严重影响零件的服役寿命和使用性能，因此后续改进优化磨削加工工艺是潜在方向之一。

2.4 感应淬火质量检测

(1) 淬硬层深检测 对现生产成品凸轮轴及市场返回失效件进行轴向纵剖并抛光腐蚀，低倍观察其宏观淬火形貌，如图3所示。从图3可看出，其淬火形貌为“弧线”形状，甚至仅存在凸轮中间区域淬火强化，两边缘没有淬火强化，淬火区域存在着严重轴向不均匀现象，不符合凸轮轴感应淬火技术要求，与其接触的挺柱如果出现偏装可能会发生凸轮轴异常磨损，因此可以判断凸轮轴异常磨损与感应淬火质量不合格有强相关性。



图3 凸轮轴轴向纵剖面淬火区域宏观形貌

对现生产成品凸轮轴及市场返回失效件进行横向解剖并抛光腐蚀，低倍观察凸轮端面及剖切面宏观淬火形貌，如图4所示。从图4可看出，端面存在一部分淬火强化，另一部分没有淬火强化。剖切面是全部淬火强化，淬硬层深度虽然满足凸轮轴的感应淬火技术要求，但是淬硬层深差距较大，这种现象和凸轮轴的纵向解剖检测结果是一致的。



图4 凸轮轴横向解剖端面及剖切面淬火区域宏观形貌

(2) 表面硬度检测 对解剖的凸轮表面进行硬度检测，随机抽取凸轮对其两端面及中间进行维氏硬度检测，结果如图5所示。

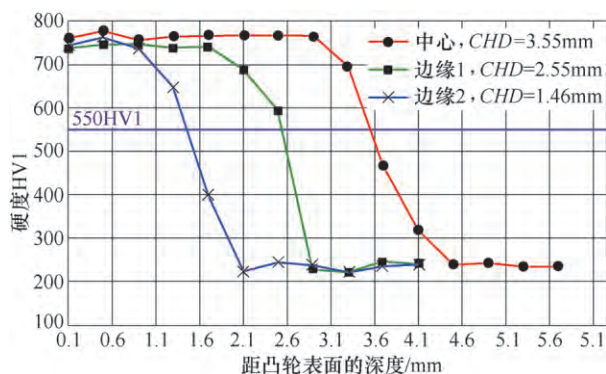


图5 凸轮表面硬度检测结果

凸轮表面硬度检测结果显示，虽然表面硬度基本上能够满足技术要求，但是存在凸轮中间表面硬度高，两端表面硬度相对低的现象，同时淬硬层深度趋于技术要求下限，凸轮中间淬硬层深和端面边缘的淬硬层深差别较大，这个表面硬度检测 results 和淬硬层深度检测中淬火形貌的宏观检测是一致的，即淬火形貌的“弧线”形状。

(3) 金相组织检测 对失效凸轮轴解剖取样进行金相显微组织检测，如图6所示。

从图6可看出，金相组织为针状马氏体+少量残留奥氏体，依据QC/T 502—1999《汽车感应淬火零件金相检验》对回火马氏体组织进行评级，结果为5级，淬硬层金相组织无异常，但其表层存在磨削烧伤现象，这与之前的磨削烧伤检测结果相互印证，可能是凸轮轴表面异常磨损的主要原因。



图6 凸轮淬硬层金相组织

通过以上分析可得出，凸轮轴异常磨损的主要原因可分为两类：凸轮轴感应淬火质量不满足技术要求；凸轮轴精磨工艺不良导致的磨削烧伤。下面对感应淬火工艺及精磨工艺进行优化，以解决淬火质量及磨削烧伤问题。

3 改善措施

3.1 磨削工艺优化

磨削烧伤的主要因素是磨削热的产生和磨削热的传出，影响磨削热产生的主要因素是砂轮和磨削参数，而影响磨削热传出的主要因素是磨削液^[1]，因此需优化与此相关的磨削工艺参数。

(1) 砂轮 凸轮轴磨削工艺中一直使用的是立方氮化硼砂轮，未出现任何异常，磨削修型的频次为40根/次，为改善砂轮的磨削能力，提高修型频次至25根/次。

(2) 磨削参数 凸轮轴精磨工序使用的是进口兰蒂斯磨床，整个磨削过程均为自动控制，通过调整磨削进给速度，适当降低生产节拍，减少单位时间内磨削热量的产生，实际节拍由5.5min降低至7.5min。

(3) 磨削液 为提高磨削液的冷却能力所采取的措施是适当提高磨削液压力报警阈值，增大磨削液的喷射压力，改善冷却效果，同时将磨削液的浓

度按下限控制（实际浓度为3%~4%），使冷却效果最大化，以彻底解决磨削烧伤问题。

（4）磨削烧伤检测手段优化 之前在凸轮轴生产过程中，磨削烧伤检测采用的是定期随机抽检的酸洗法，在凸轮轴异常磨损问题出现之后对磨削烧伤问题更加重视，采购Camscan200凸轮轴磨削烧伤检测仪，采用更为先进的磁弹法^[2]进行磨削烧伤检测，如图7所示，在工艺调整优化阶段做到100%检测。

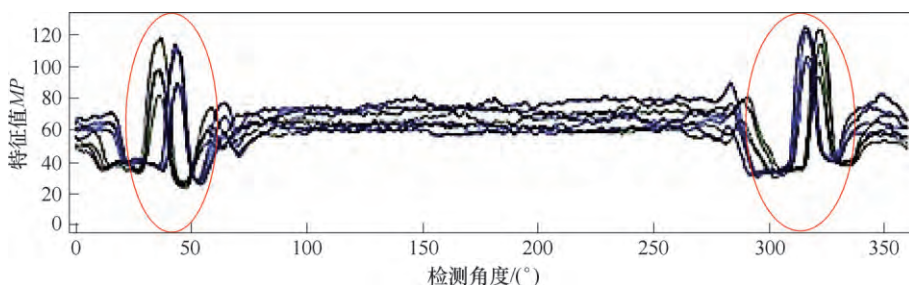
通过以上参数优化及措施的实施，减小磨削进给量，改善磨削过程的冷却效果，加大磨削烧伤的检测频次等，最终彻底解决了凸轮轴的磨削烧伤问题。

3.2 感应淬火工艺优化

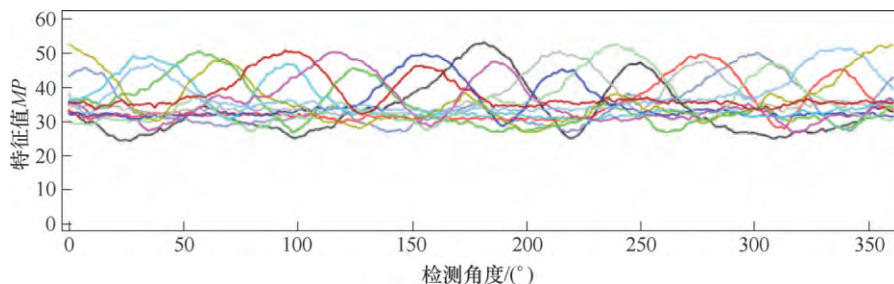
（1）感应淬火工艺现状 凸轮轴结构及基本尺寸如图8所示。凸轮轴现感应淬火工艺如下：所有圆轴颈及凸轮因整体尺寸相差不大而共用一个整体式感应器，所采用的加热方法为自下而上的单个凸轮

同时加热淬火法，所用感应器（见图9）有效圈内径为67mm，高度为26mm，有效圈外侧插满“Π”形硅钢片，因强大的趋肤效应能够有效提高感应加热效率的同时还可起到屏蔽作用^[3]，对邻近凸轮边缘屏蔽保护，避免了感应回火；感应淬火工艺参数为电压400V，电流200A，功率80kW，频率7500Hz，加热时间3.5s，冷却时间4s，淬火冷却介质为10%PAG淬火液，凸轮轴的旋转速度为100r/min。回火采用步进式网带炉，温度180℃，保温2h。

（2）感应器的优化 由于采用自下而上的贯穿式加热方式，有效圈内径为67mm，其与圆轴颈及凸轮之间的最小间隙为3.5mm，这个间隙值是合理的。间隙是感应器设计中的一个重要参数，间隙越小，感应器的加热效率越高，但是也不能过小，间隙过小会导致感应器有效圈磨损，影响感应器的寿命；致使零件和感应器之间打火放电，将造成零件或感应器打坏或烧熔。同时间隙过小，在淬火过程中还会增加淬裂倾向。



a) 异常（存在磨削烧伤）



b) 正常（无磨削烧伤）

图7 磁弹法检测凸轮磨削烧伤

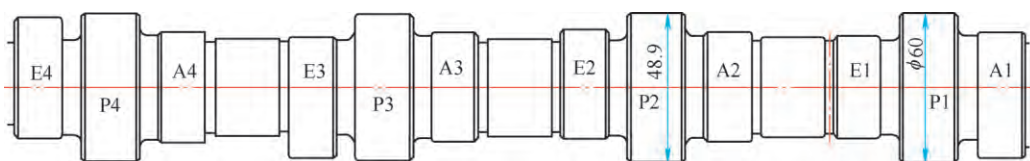
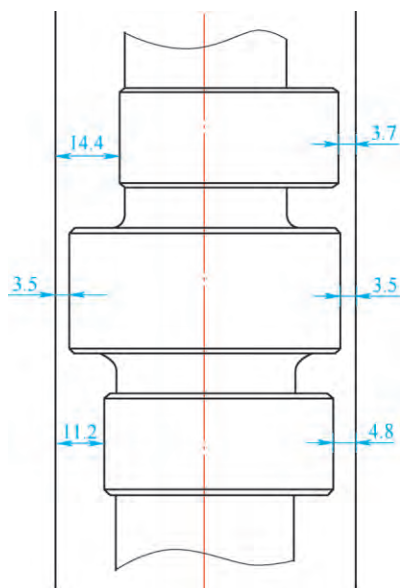


图8 凸轮轴结构及基本尺寸



a) 感应器与工件的位置



b) 感应器加热

图9 感应器位置及加热方式

依据前述感应淬火质量检测结果，轴向淬火区域宽度不够或者层深较浅，主要还是感应器有效段高度不够或是加热功率过小所致。凸轮轴感应器有效圈的高度需要兼顾凸轮及圆轴颈，查阅相关资料，圆柱轴类零件有效淬火区域长度为 L ，而感应器有效圈高度 H 要大于淬火区域长度 L ，即 $H = (1.1 \sim 1.3)L$ ，但是对于凸轮轴 $H > L + (3 \sim 4) \text{ mm}$ ^[3]就认为感应器的有效圈高度过高，将造成凸轮桃尖部位淬硬层过深，存在凸轮桃尖淬裂甚至剥落的风险。

本文中凸轮轴采用加热方式的特殊性，凸轮与有效圈的间隙（见图10）最小为3.7mm，最大为14.4mm，因此根据前文分析进一步优化感应器有效

圈的高度，使其高度由26mm提高至30mm，其他尺寸保持不变。

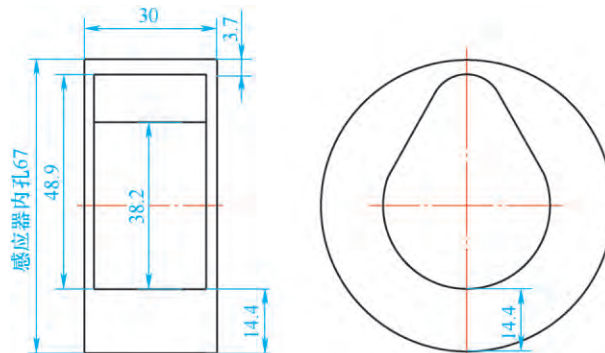


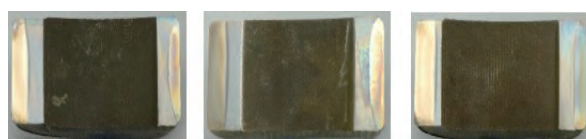
图10 凸轮与感应器有效圈位置关系示意

(3) 感应淬火工艺参数优化 感应器有效圈高度提高，电源功率增大，淬火区域可得到显著提高。本次工艺参数优化仅改变功率（电流、电压）及转速。受工艺节拍的限制，加热及冷却时间统一，加热时间为4s，冷却时间为4.5s，凸轮轴转速下调至50r/min，因为转速过快时容易在凸轮的背水面出现软点。工艺参数及检测结果见表2。凸轮淬硬层宏观形貌如图11所示，采用工艺1时凸轮基圆侧淬硬层深如图12所示，金相显微组织如图13所示。

由表2及图11～图13可知，3组工艺均满足技术要求，综合考虑选择工艺2中的参数作为最终工艺参数，即电压431V，电流238A，功率103kW，加热时间4s，冷却时间4.5s，凸轮轴转速50r/min。

表2 工艺参数调整及对应的检测结果

工艺	电压/V	电流/A	功率/kW	淬硬层深/mm		淬硬层组织及评级
				基圆侧	桃尖侧	
1	410	220	90	2.36	3.40	针状马氏体+少量残留奥氏体，5级
2	431	238	103	2.81	4.57	针状马氏体+少量残留奥氏体，5级
3	454	244	110	3.44	4.97	针状马氏体+少量残留奥氏体，4级



a) 工艺1

b) 工艺2

c) 工艺3

图11 凸轮淬硬层宏观形貌

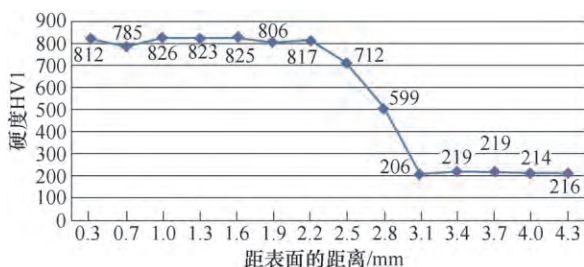


图12 工艺2凸轮基圆侧淬硬层深

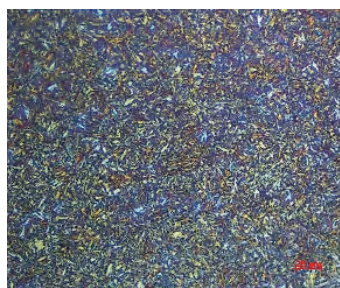


图13 金相显微组织

为提高凸轮的耐磨性能，需进一步降低回火温度，以提高凸轮表面的硬度，最终达到耐磨的目的。凸轮轴生产现场的回火工艺为 $180^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ ，检测其回火后的硬度为60~61HRC，经过回火工艺温度优化，回火温度为 160°C ，回火后的硬度为62~63HRC；最终回火工艺为 $160^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$ ，虽降低了回火温度，但是增加了回火时间，凸轮轴充分回火使残余应力得以平衡或降低，改善凸轮表面应力的分布状况，最终可以降低磨削烧伤甚至开裂的概率。

(4) 检测方法完善优化

1) 生产现场检测：以前生产现场仅抽检凸轮桃尖的硬度，达到技术要求即放行，而现在要求凸轮桃尖、基圆以及凸轮升降程面均需硬度检测合格才能放行。凸轮各检测位置如图14所示。

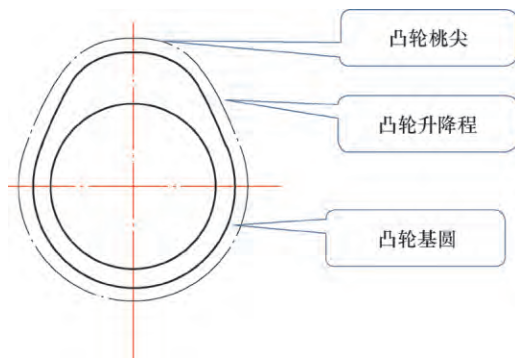


图14 凸轮各检测位置

2) 剖切送检：对于切样送检的样品需要沿凸轮轴线纵剖，检测凸轮宏观的淬火形貌，使用硬度法

检测淬硬层深，距凸轮两端面1mm位置及中线位置（见图15）均需检测，对于淬火形貌存在“弧形”淬硬层情况的需检测最小和最大淬硬层深。

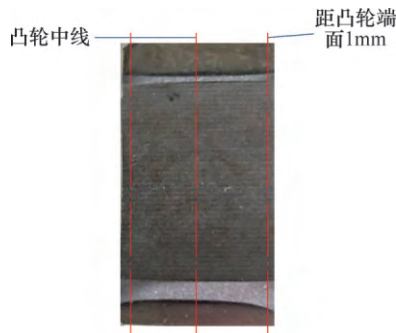


图15 凸轮剖切样检测位置

凸轮轴磨削工艺及感应淬火工艺优化后，进行小批量生产验证，检测结果显示感应淬火相关质量能够满足图样技术要求，同时经过批量监测，磨削烧伤缺陷已彻底消除，目前该工艺已经固化应用于实际生产中。

4 结束语

1) 失效分析得出凸轮轴感应淬火质量及凸轮轴精磨工艺引起的磨削烧伤是凸轮轴异常磨损的主要原因。

2) 通过对砂轮修型、优化磨削工艺参数、采取更优磨削烧伤检测手段，以及增大磨削烧伤检测频次等措施彻底消除磨削烧伤。

3) 优化感应器尺寸、感应淬火参数及完善感应淬火后的检测方法，使感应淬火质量得到显著提升。

4) 工艺优化措施已经固化应用于实际生产中，经过近3年的售后跟踪，凸轮轴短里程异常磨损问题已基本得到解决。

参考文献：

- [1] 吴杰明. 凸轮磨削表面烧伤产生原因及消除方法探析[J]. 上海电力大学学报, 2004 (3): 45-47.
- [2] 邵新芳, 刘建, 王光明, 等. 磁弹法检测凸轮轴磨削烧伤—检测临界值的确定方法：“2012年山东省科协学术年会”论文集[C]. 济南：山东省科学技术协会, 2012.
- [3] 林信智. 淬火感应器的选用、设计与制造[M]. 北京：机械工业出版社, 1991.