

第二十届全国大功率柴油机会论文专栏

活塞环铬陶瓷复合镀层参数匹配优化研究

娜 仁¹, 胡军强¹, 殷 筱¹, 王志伟²

(1. 七一一研究所, 上海 201108; 2. 戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏 常州 213011)

摘 要: 针对某型柴油机运行中发生的拉缸故障的分析显示: 国产活塞环工作面铬陶瓷复合镀层中陶瓷颗粒大小、含量及表面粗糙度等参数不合理是造成拉缸故障的主要原因。对上述镀层参数开展了优化匹配研究, 并进行平台试验及柴油机试验验证。平台试验结果显示: 优化后的活塞环其抗拉缸性能显著提高; 柴油机运行 200 h 试验结果显示: 活塞环无明显磨损, 气缸套珩磨网纹清晰、完整。表明: 优化后的活塞环镀层参数匹配合理, 优化后的活塞环可满足该型柴油机的使用要求。

关键词: 活塞环; 拉缸; 铬陶瓷复合镀层; 试验

中图分类号: TK423.3⁺3; TK426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)02-0020-05

Parameters Matching Research of the Chromium Ceramics Composite Coating of Piston Rings

Na Ren¹, Hu Junqiang¹, Yin Xiao¹, Wang Zhiwei²

(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108;

2. CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Jiangsu Changzhou 213011)

Abstract: A type of diesel engine met with scuffing during operation. To deal with this problem, research was carried out which showed that the main reasons of this failure was unreasonable parameters such as the size, content of the ceramic particles and its surface roughness of the chromium ceramic composite coating on the working surface of the home-made piston ring. Thus optimal matching, as well as bench test and engine test were carried out to study the coating parameters. Bench test showed that the anti-scuffing capability of the optimized piston ring had been remarkably improved. The 200 h engine test showed that there was no obvious wearing on the piston ring and the honing reticular structure was clear and complete. It is verified that after optimization, the parameter matching of the piston ring coating is reasonable and the piston ring could satisfy the application requirements of this type of diesel engine.

Key words: piston ring; scuffing; chromium ceramics composite coating; test

0 引 言

活塞环-气缸套是柴油机的核心零部件, 受周期性交变热负荷和机械负荷作用, 常在高温、高载、高速和润滑不良的情况下工作, 是整机摩擦损失的主要来源, 也是较容易发生事故的零部件。其设计、制造水平直接关系到整机的功率密度、可靠性和经济性等主要指标, 因此一直是柴油机设计、

制造和试验研究关注的重点。

为提高活塞环的可靠性和使用寿命, 对其工作面做强化处理。传统镀铬处理因其镀层脆性大, 在热和机械循环负荷作用下容易开裂脱落, 加剧缸套磨损; 而铬陶瓷复合镀层初期磨合时间短^[1], 耐磨性、耐腐蚀性和高温承载性能优良, 从而使匹配的可靠性及使用寿命大为提高, 已逐渐取代镀铬成为活塞环表面处理的新趋势。

收稿日期: 2017-10-22

作者简介: 娜仁(1991-), 女, 助理工程师, 主要研究方向为柴油机气缸单元零部件结构设计, naren@csic711.com。

铬陶瓷复合镀层将硬质陶瓷微粒嵌入并固化在硬铬层微裂纹中, 随着基质铬的磨损, 以陶瓷微粒为骨架的凹槽起到储油作用, 对承受高热负荷、高机械负荷, 并常处于边界润滑状态下的活塞环-气缸套摩擦副的工作可靠性有重大影响。因此, 铬陶瓷复合镀层特性参数如何匹配, 直接影响活塞环-气缸套摩擦副的使用性能, 尤其是在柴油机应用中最关注的抗拉缸性能, 也是决定活塞环是否满足柴油机总体性能指标要求的重要因素。

本文对某柴油机拉缸故障进行分析, 并就故障主要原因: 活塞环工作面铬陶瓷镀层中陶瓷颗粒大小、含量及表面粗糙度等参数匹配不合理, 进行了优化匹配研究以及试验验证。

1 某单缸机拉缸故障分析

1.1 故障过程及现象

某柴油机安装进口活塞环, 完成了全工况(怠速~110%负荷)的磨合试验, 期间该柴油机运行稳定、正常。之后将进口活塞环换为国产件, 开展后续试验。在国产件磨合试验刚刚达到110%负荷时, 缸套温度异常升高, 发生了拉缸故障。

拆检发现: 缸套、活塞环、活塞裙均有拉伤(图1、图2), 其中气缸套拉缸区域内全周均有明显、均匀的纵向拉痕, 该区域内珩磨网纹已不存在; 第一道气环外圆整体拉伤、变黑, 磨损较为严重, 在环槽内运动有卡滞现象; 第二道气环外圆间断拉伤, 变黑处磨损较大。

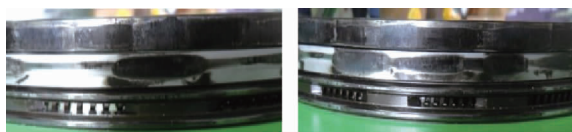


图1 活塞环故障件照片

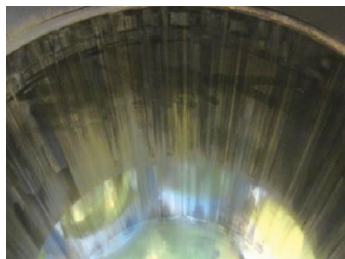


图2 气缸套拉缸故障照片

1.2 故障原因分析

通过检查拉缸故障相关零部件的验收记录、装配检验记录, 并对故障件进行精密测量, 排除了相关零部件制造和装配质量问题。初步认为故障可能由以下原因造成:

(1) 活塞顶温度过高, 热膨胀超过预期值, 导致活塞顶-气缸套/抗磨环实际间隙过小或者活塞环-环槽间隙过小, 从而引起拉缸。

(2) 国产活塞环设计或制造工艺不合理, 如桶面形状、表面粗糙度、镀层表面微观形貌等因素造成国产活塞环抗拉缸性能较差。

针对原因(1)采用设计确认、模拟故障计算、温度场测试等方法进行分析。确认活塞顶与活塞环、活塞与气缸套之间的冷态间隙、热态间隙均在合理范围内; 活塞顶未发现异常磨损和变形, 说明活塞顶实际并未与气缸套/抗磨环发生异常摩擦, 原因(1)可排除。

针对原因(2), 对活塞环工作面镀层特征进行了显微检测, 发现国产和进口活塞环存在一定的差异。经以下理论分析结合平台试验验证, 确定该差异即为造成本次故障的主要原因。

1.2.1 镀层显微检测

采用光学显微镜对国产/进口活塞环镀层陶瓷颗粒尺寸及面积百分比进行测量和分析, 如图3所示。两种活塞环表面均分布着不均匀网状裂纹, 裂纹里镶嵌着陶瓷颗粒, 但两种活塞环镀层的陶瓷颗粒尺寸及面积百分比差异较大。国产环的陶瓷颗粒尺寸约为 $0.7 \sim 1.2 \mu\text{m}$, 进口环的陶瓷颗粒尺寸约为 $1.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$; 进口环网纹密度明显大于国产环; 国产环陶瓷颗粒面积百分比约为2.77%, 进口环陶瓷颗粒面积百分比约为7.12%。

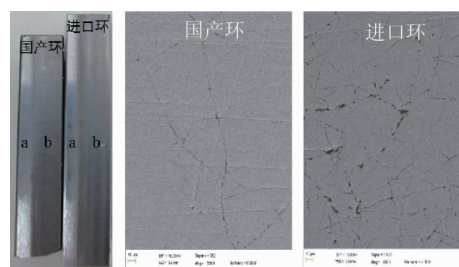


图3 第一道气环工作面表面形貌

铬陶瓷复合镀层将硬质陶瓷微粒嵌入并固化在硬铬层微裂纹中, 基质铬因为硬度相对较低而首先磨损, 随后以陶瓷颗粒为骨架形成承载结构。进口环较大的陶瓷颗粒密度及尺寸可以更有效地承载, 提高了耐磨性; 铬基质磨损后, 进口环形成更多以陶瓷颗粒为骨架的凹槽, 存储润滑油, 提高了其抗拉缸性能。

采用表面轮廓仪检测国产/进口活塞环的工作面粗糙度, 测量得到国产环窄面(a)粗糙度 $0.15 \mu\text{m}$, 宽面(b)粗糙度 $0.40 \mu\text{m}$; 进口环窄面粗糙度 $0.12 \mu\text{m}$, 宽面粗糙度 $0.20 \mu\text{m}$, 即国产环的粗

糙度整体大于进口环。粗糙度偏大意味着国产环工作面微突起的数量及高度等均大于进口环,工作中更易导致原本就较薄(微米级)的油膜被破坏,这也是导致其抗拉缸性能较差的原因之一。

1.2.2 平台试验验证

为验证上述分析结果,在对置往复式摩擦磨损试验机^[2](图4)上,对国产/进口活塞环开展了平台抗拉缸性能试验。分别从国产/进口活塞环和气缸套上切取试样,依据贫油试验方法,在载荷、速度、温度均相同的情况下,先供给润滑油进行磨合,再断油继续试验,以断油到拉缸时间的长短作为活塞环抗拉缸性能的判据。各阶段的试验参数如表1所示,每组试验至少重复3次。

平台试验结果见表2。可见:在其他边界条件均相同的情况下,国产活塞环的抗拉缸性能低于进口环,约为进口环的2/3,从而证实了上述分析结果。

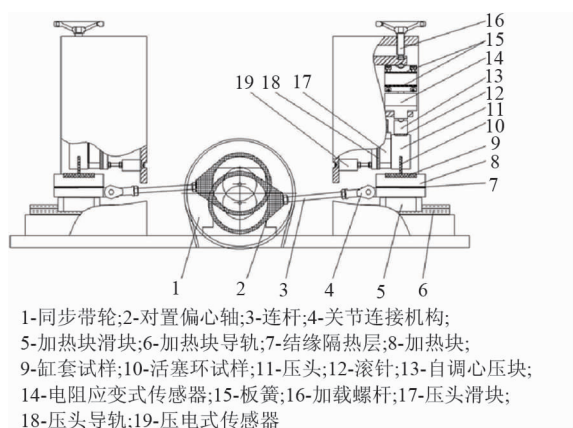


图4 对置往复式摩擦磨损试验机

表1 气缸套-活塞环贫油试验组配方案

试验阶段	试验参数
低载磨合阶段	转速: 200 ($r \cdot \min^{-1}$); 温度: 120 $^{\circ}\text{C}$; 载荷: 10 MPa; 时间: 10 min
高载磨合阶段	转速: 200 ($r \cdot \min^{-1}$); 温度: 190 $^{\circ}\text{C}$; 载荷: 44 MPa; 时间: 150 min
断油摩擦阶段	转速、温度、载荷保持不变, 停止供油磨至拉缸

综上,通过理论分析、精密测量和试验验证,确定了国产活塞环铬陶瓷复合镀层陶瓷颗粒大小、含量以及镀层表面粗糙度不合理是导致本次故障的主要原因。后续针对上述原因开展专项优化研究。

2 活塞环铬陶瓷复合镀层参数匹配优化研究

铬陶瓷电镀采用专用设备,通过电脑程序控制

电镀工序参数,形成多层镀层结构。该工序通过镀上层铬→裂纹网形成→镶嵌陶瓷颗粒→封闭裂纹网→镀下层铬,周而复始,直至达到所需厚度^[3]。为优化国产活塞环铬陶瓷复合镀层参数、表面粗糙度,使其更接近进口环的水平,针对镀层工艺过程参数优化开展了一系列试验研究,重点对以下参数进行单变量小样试验,分析变量对镀层金相的影响。

表2 国产/进口活塞环拉缸时间对比

活塞环种类	国产活塞环	进口活塞环
第一组拉缸时间	2 h 22 min	3 h 58 min
第二组拉缸时间	2 h 16 min	2 h 58 min
第三组拉缸时间	2 h 21 min	3 h 13 min
第四组拉缸时间	2 h 09 min	3 h 34 min
平均拉缸时间	2 h 17 min	3 h 25 min

(1) 陶瓷粒径 分别制备不同陶瓷粒径(W1.5、W2.5、W3.5)的铬陶瓷镀层,试制活塞环电镀样品并对比颗粒镶嵌情况及陶瓷含量结果。经比较:W1.5陶瓷颗粒镶嵌不紧密,裂纹中陶瓷含量较少;W2.5陶瓷颗粒镶嵌较好,但相应的裂纹密度较小;W3.5陶瓷颗粒镶嵌情况较好,但是裂纹密度过大。故优选W2.5粒径的陶瓷粉电镀工艺。

(2) 镀液中陶瓷含量 溶液中陶瓷含量并非越多越好,陶瓷含量过多,会对镀层中镶嵌的陶瓷颗粒造成一定的冲击,反而使镀层中的陶瓷含量减少;同时,陶瓷颗粒过多,会导致颗粒周围产生应力集中,导致镀层裂纹增加,容易变脆,镀层性能下降。采用三种不同陶瓷含量的镀液(陶瓷格数为5、9、10)进行试验,比较陶瓷裂纹面积百分比及综合经济性,优选陶瓷格数9格。

(3) 刻蚀强度 活塞环电镀是通过周向交换电流反向刻蚀扩充镀铬表面裂纹的,随着刻蚀强度的增加,镶嵌在裂纹中的陶瓷含量提升;但是刻蚀强度过大,铬基网纹过大,会减弱镀层强度。采用不同刻蚀强度(25~50)比较陶瓷裂纹面积百分比,当刻蚀强度为44时可得到7.2%陶瓷含量的小样,满足设计要求。

(4) 单层电镀时间 一般来说,电镀时间与镀层厚度成正比。电镀时间过长,基层铬层过厚,相应陶瓷颗粒层减少,陶瓷含量降低;电镀时间过短,镀层强度降低,陶瓷颗粒得不到牢固镶嵌,镀层强度达不到要求。经反复试验,调整电镀时间(25~45 min),并比较镀层中的陶瓷含量,得到较优电镀时间为25 min。

(5) 研磨沙粒度 改进活塞环加工工艺,提高研磨沙粒度,采用更细腻的磨粒进行研磨;采

用光整技术，降低表面粗糙度。

通过采用以上优选镀层工艺参数方案并结合调整阴极电流密度、搅拌方式与搅拌强度优化加工活塞环。采用光学显微镜比较优化前、后及进口活塞环表面形貌、镀层截面情况，结果见表 3。可见：优化后环陶瓷颗粒尺寸增大，基本达到进口环水平；陶瓷含量和工作面粗糙度均优于进口环。经检测，镀层与基体结合良好，镀层硬度、陶瓷含量均满足要求。进一步进行了工艺稳定性试验，固化工艺参数，保证了生产质量的稳定性。

表 3 各活塞环的常规检测结果

检测内容	优化前	优化后	进口环
陶瓷颗粒尺寸/ μm	0.7 ~ 1.2	2.1 ~ 2.8	1.5 ~ 3.0
陶瓷颗粒面积百分比	2.77%	5.14%	4.38%
工作面粗糙度/ μm	0.15 ~ 0.40	0.11 ~ 0.13	0.12 ~ 0.16

3 试验验证

3.1 平台试验验证

对优化前、后活塞环及进口活塞环开展了平台摩擦磨损试验和抗拉缸试验。优化后的国产活塞环验证结果良好，已基本达到或接近进口环水平。

采用贫油方法进行抗拉缸性能试验，各阶段的试验参数同表 1 所示。试验后缸套、活塞环试样如图 5 所示；拉缸时间有效数据统计如表 4 所示。由于优化后的活塞环与优化前相比：陶瓷颗粒更大，密度更高，活塞环表面的储油效果更明显，停止供油后，储存的润滑油消耗时间比优化前活塞环的更长，抗拉缸性能较优化前有了较大改善，已基本达到进口环水平。

3.2 柴油机试验验证

平台试验后，研制活塞环-气缸套试验件，在原柴油机上开展磨合试验、配机试验。该柴油机活塞平均速度最高可达 $12.1 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ ，最高燃烧压力达 22 MPa，试验累计运行约 200 h。试验后经拆检测量：各活塞环无明显磨损，气缸套内壁网纹清晰、完整，未见明显异常，试验验证通过。

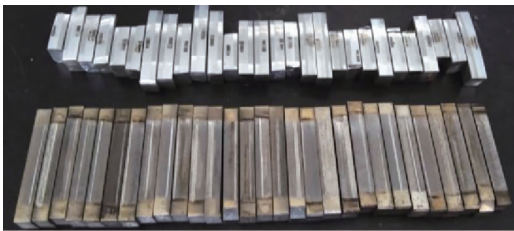


图 5 拉缸后缸套、活塞环试样表面形貌

表 4 活塞环拉缸试验结果

活塞环种类	优化前	优化后	进口环
第一组拉缸时间	2 h 22 min	3 h	2 h 20 min
第二组拉缸时间	2 h 16 min	3 h 02 min	4 h 18 min
第三组拉缸时间	2 h 21 min	3 h 42 min	3 h
第四组拉缸时间	2 h 09 min	-	-
平均拉缸时间	2 h 17 min	3 h 15 min	3 h 13 min

(1) 活塞环拆检情况

各活塞环在环槽中运动均灵活无卡滞。第一道气环工作面磨亮带连续、均匀，顶面局部有轻微积炭，环内圈轻微积炭；第二道气环工作面磨亮带连续、均匀，顶面颜色发黄，无明显积炭。油环无明显积炭和磨损痕迹。拆检情况如图 6、图 7 所示。

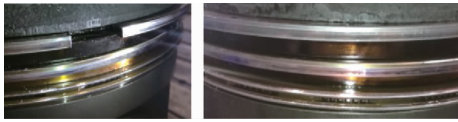


图 6 试验后活塞环工作面情况

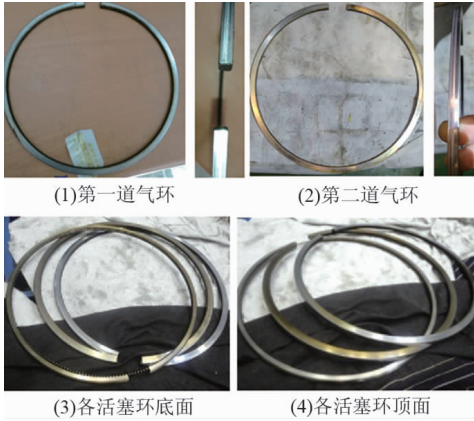


图 7 试验后各活塞环外观

(2) 气缸套拆检情况

气缸套内壁面网纹清晰、完整，无明显拉伤，有个别轻微纵向划痕，无手感；缸套下端有一条黑色擦痕，与活塞环行程范围不重合，宽约 10 mm，无明显手感，经确认为活塞裙局部加工超差所致，如图 8 所示。

(3) 主要零部件试验后尺寸测量情况

活塞环、气缸套拆检测量数据与装机数据如表 5 所示。考虑到测量环境、工具造成的测量误差，以及活塞环槽表面及开口处残留积炭，个别间隙值较装机时有所减小，实际各零件均无明显磨损。

4 结 论

(1) 铬陶瓷复合镀层中陶瓷颗粒大小、含量以及表面粗糙度等参数匹配直接影响活塞环-气缸

套摩擦副使用性能,尤其是在高指标柴油机应用中最关注的抗拉缸性能,也是决定活塞环是否满足柴油机总体性能指标要求的重要因素。

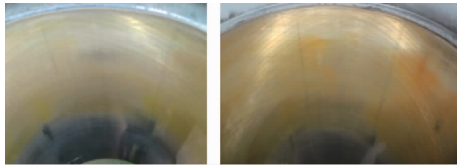


图 8 气缸套内表面

表 5 试验后拆检测量数据

单位: mm

测量项目		初始装机	本次拆检	磨损量（变化量）
气缸套内径		270.030	270.017	无明显磨损
气环一	环高	5.985	5.975	0.010
	环槽高	6.151	6.145	无明显磨损
	闭口间隙	0.950	0.990	无明显磨损
气环二	环高	5.985	5.980	0.005
	环槽高	6.125	6.125	0.000
	闭口间隙	1.700	1.720	无明显磨损
油环	环高	7.985	7.980	0.005
	环槽高	8.071	8.065	无明显磨损
	闭口间隙	0.950	1.000	0.050

(上接第 16 页)

3.3 改进后平台试验结果

为验证优化后的缸盖结构的可靠性,采用相同的液压平台和试验方法进行缸盖疲劳试验,最终 4 个缸盖均通过了无限疲劳测试,经检查无裂纹出现,见图 9。表明缸盖结构改进效果较好。

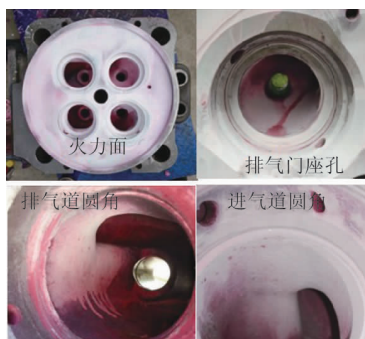


图 9 改进缸盖通过性疲劳试验结果

4 结 论

通过建立缸盖液压平台试验模型,考虑实际载荷,开展了缸盖疲劳强度评估,结合改进方案和试验结果,得出以下结论:

(1) 缸盖内部结构薄弱且圆角尺寸较小,进排气道圆角处成为主要传力区域,出现应力集中且

(2) 通过上述参数优化匹配,经柴油机试验验证,优化后的活塞环-气缸套摩擦副可满足最高燃烧压力 22 MPa、活塞平均速度 $11 \sim 12 \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1})$ 的柴油机使用要求。

(3) 采用“磨损形式-条件统一”的模拟准则,模拟活塞环在上止点附近的磨损形式进行平台试验,可以简化试验方案,缩短试验时间,灵活控制试验参数,是评价活塞环-缸套摩擦副匹配性能的有效方法,可作为今后此类研究的重要手段。

参考文献

- [1] 漆世泽,鹿云,韩志勇,等. 柴油机活塞环镀层摩擦学特性研究 [J]. 汽车技术, 2005 (9): 28-32.
- [2] 沈岩,徐久军,金梅,等. CKS 活塞环与合金铸铁缸套的抗拉缸性能分析 [J]. 润滑与密封, 2014 (4): 40-43.
- [3] 郝放. 活塞环铬基陶瓷复合镀 [J]. 内燃机与配件, 2010 (5): 22-25.

承受较大拉应力,在交变载荷作用下出现疲劳破坏。

(2) 改进方案改变缸盖水腔结构,加大进排气道圆角尺寸,缸盖安全系数明显提高,并通过了疲劳验证试验。

(3) 形成了缸盖疲劳仿真预测方法,为后续工作提供支撑。

参考文献

- [1] 杨怀刚,詹樟松,郑建军,等. 内燃机缸盖开发的 CAE 系统工程与应用 [J]. 内燃机工程, 2015 (3): 140-146.
- [2] 王彦伟,罗继伟,叶军,等. 基于有限元的疲劳分析方法及实践 [J]. 机械设计与制造, 2008 (1): 22-24.
- [3] 任巨宏,朱荣基. DF7 型机车柴油机气缸盖裂纹原因及预防 [J]. 铁道机车车辆, 2004 (6): 51-52.
- [4] 胡定云,陈泽忠,温世杰,等. 某柴油机气缸盖疲劳的可靠性预测 [J]. 车用发动机, 2008 (b06): 38-40.
- [5] 文洋,景国玺,李鹏,等. 某高强度柴油机气缸盖高周疲劳分析评估 [J]. 内燃机, 2017 (1): 24-26.
- [6] 王军,郭珍,徐宏,等. 某先进高速柴油机气缸盖结构评估 [J]. 车用发动机, 2015 (5): 8-12.