

磨削烧伤、化瓦对残余应力及可靠性影响的分析与研究

代利强^{1,2*}, 孙万军^{1,2}, 刘 莉^{1,2}, 刘 宁^{1,2}, 郎凯旋^{1,2}

¹潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊

²国家内燃机产业计量测试中心, 山东 潍坊

收稿日期: 2025年8月28日; 录用日期: 2025年9月21日; 发布日期: 2025年9月28日

摘 要

残余应力、微观组织及形貌等表面完整性是影响柴油机关键轴类零件服役性能的核心因素。本文针对柴油机轴类零件制造或服役过程中的表面完整性问题, 运用宏观观测、残余应力检测、硬度测试、扫描电镜等手段, 系统探究了残余应力形成机制及其对零件失效行为的影响, 结果表明磨削烧伤和化瓦缺陷会引起表面残余应力值显著降低, 进而促使疲劳裂纹在应力集中区域优先萌生, 通过X射线残余应力测试及扫描电子显微镜(SEM)断口分析揭示了残余应力分布与柴油机轴类零件裂纹萌生的关联性, 可为柴油机重要轴类件生产制造及可靠性分析研究提供检测借鉴和参考。

关键词

残余应力, 磨削烧伤, 失效机理, 扫描电镜

Analysis and Study on the Effects of Grinding Burns and Tiles on Residual Stress and Reliability

Liqiang Dai^{1,2*}, Wanjun Sun^{1,2}, Li Liu^{1,2}, Ning Liu^{1,2}, Kaixuan Lang^{1,2}

¹Weichai Power Co., Ltd., Weifang Shandong

²National Internal Combustion Engine Industry Measurement and Testing Center, Weifang Shandong

Received: August 28, 2025; accepted: September 21, 2025; published: September 28, 2025

Abstract

The surface integrity of residual stress, microstructure, and morphology are the core factors affect-

*通讯作者。

文章引用: 代利强, 孙万军, 刘莉, 刘宁, 郎凯旋. 磨削烧伤、化瓦对残余应力及可靠性影响的分析与研究[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(5): 535-543. DOI: 10.12677/met.2025.145053

ing the service performance of key shaft components in diesel engines. This article focuses on the surface integrity issues in the manufacturing or service process of diesel engine shaft parts. By using macroscopic observation, residual stress detection, hardness testing, scanning electron microscopy and other methods, the mechanism of residual stress formation and its influence on the failure behavior of the parts are systematically explored. The results showed that grinding burns and tile defects can significantly reduce the surface residual stress values, thereby promoting the preferential initiation of fatigue cracks in stress concentration areas. The correlation between residual stress distribution and crack initiation in diesel engine shaft parts was revealed through X-ray residual stress testing and scanning electron microscopy fracture analysis, which can provide detection reference and guidance for the production and reliability analysis of important shaft parts in diesel engines.

Keywords

Residual Stress, Grinding Burn, Failure Mechanism, Scanning Electron Microscope

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

凸轮轴、曲轴为柴油机关键运动零部件，在服役过程中一旦失效往往导致重大的经济损失甚至恶性安全事故[1]-[3]。研究表明，轴类零件失效多源于表面完整性缺陷，其中残余应力作为确保材料可靠性、安全性的关键因素不容忽视[4][5]。轴类磨削烧伤、化瓦是引发机械故障的重要诱因，断轴、捣缸等事故对零件抗疲劳性能产生恶劣影响，往往零件裂纹是始于表面应力集中区域，循环载荷作用下不断扩展导致疲劳失效[6]。近年来，尽管国内外研究人员早已意识到残余应力对零件疲劳失效的显著影响，但对其定量影响机制存在争议，残余应力可以通过抵消外部应力提高疲劳性能[7]-[9]，但过大的应力梯度反而会促进裂纹萌生导致早期失效，因此基于有限元方法模拟热-力耦合过程重现残余应力的形成，并结合试件疲劳寿命预测零件的使用性能具有一定的应用意义。

残余应力对零件服役性具有决定性影响，特别是当拉应力值与外部载荷叠加时，非优化的残余应力分布会对零件寿命造成严重影响，表面热损伤诱发的残余应力变化是零件运动过程中失效的共性因素。研究表明磨削后凸轮表面残余应力主要由热塑性变形、相变产生的应力引起，通过正交试验和单因素试验方法验证影响凸轮表面最终的应力分布的主要因素是磨削加工[10][11]。此类磨削烧伤早期掉块的失效模式通常接触疲劳裂纹的演化产生，主要分为萌生、扩展和断裂三个阶段，而磨削过程热-力耦合会在零件表面产生残余应力分布，裂纹优先从接触面最大交变应力处产生[12]。此外类似的热损伤例如曲轴化瓦烧熔，在曲轴系统中轴瓦润滑失效导致的曲轴过热、变形或出现裂纹[2]，使原有压应力逆转为拉应力，这种应力分布往往会导致其表面压应力层应力裂纹面临失效风险。本文通过以柴油机高碳铬凸轮轴磨削烧伤早期磨损掉块、曲轴化瓦断裂的失效案例为例，揭示轴类零件磨削烧伤、化瓦对表面残余应力和失效原因的影响。

2. 残余应力与寿命预测理论

2.1. 残余应力形成理论

2.1.1. 磨削过程热-力耦合机理

凸轮轴型面加工产生大量的热，在磨削区域积聚，根据物理学定律，处于瞬态温度变化场中的场变

量 $T(x, y, z)$ 满足以下热平衡微分方程:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho_w C_w \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: T 为温度($^{\circ}\text{C}$); k_x 、 k_y 、 k_z 为材料 X 、 Y 、 Z 三个方向的导热率($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{k}$); ρ_w 为工件材料的密度(kg/m^3); C_w 为工件材料的比热容($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{k}$); t 为时间(s)。

在分析凸轮轴摆动磨削温度场时, 建立椭圆形热源模型, 热源长度为砂轮与工件之间的接触长度, 椭圆形热源模型图如图 1 所示[13], 进入工件的热流分布公式为:

$$q(x) = \frac{2Q}{\pi a} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (2)$$

式中: Q 为总热量(W/m)

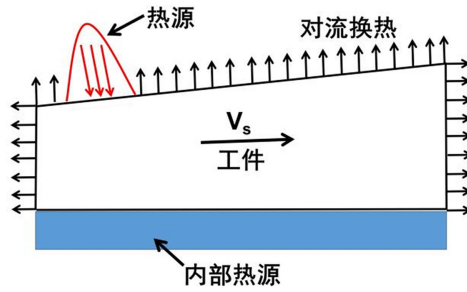


Figure 1. Schematic diagram of the elliptical heat source model
图 1. 椭圆形热源模型示意图

加工时磨削热量传入工件的比例不同, 磨削区热量分配模型对应的方程为:

$$q_t = \frac{F_t \cdot V_s}{S} = \frac{F_t \cdot V_s}{b \sqrt{a_p} \cdot D} = q_w + q_{ch} + q_f + q_s \quad (3)$$

式中: q_t 为磨削区产生的总热流密度; S 为工件与砂轮的接触面积; b 为砂轮宽度; a_p 为磨削深度; D 为砂轮直径; q_w 为流入工件的热流密度; q_{ch} 为流向磨屑的热流密度; q_f 为进入磨削液的热流密度; q_s 为流向砂轮的热流密度。

2.1.2. 应力场有限元模型

磨削力计算与砂轮、凸轮轴材料等因素有关, 温度场的分析结果与外加力载荷耦合计算, 外加力载荷由经验公式进行计算:

$$\begin{cases} F_n = F_{ncut} + F_{npow} + F_{nrub} \\ F_t = F_{tcut} + F_{tpow} + F_{trub} \end{cases} \quad (4)$$

F_n 为法向磨削力; F_t 为切向磨削力; F_{ncut} 为法向切削形成力, F_{tcut} 为切向切削形成力, F_{nrub} 为法向摩擦力; F_{trub} 为切向摩擦力; F_{npow} 为法向滑动力; F_{tpow} 为切向滑动力。

2.2. 缺口试件寿命预测模型

SWT 模型通过考虑最大应力和应变幅值对疲劳损伤的影响, 预测材料在应变疲劳条件下寿命的经典模型, 其表达式为:

$$\sigma_{n,\max} \varepsilon_{n,a} = \frac{\sigma_f'^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \varepsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (5)$$

式中： $\sigma_{n,\max}$ 为最大正应变平面上的最大正应力； $\varepsilon_{n,a}$ 为最大正应变幅值； σ_f' 为疲劳强度系数； N_f 为疲劳寿命； b 为疲劳强度指数； ε_f' 为疲劳延性系数； c 为疲劳延性指数。

3. 表面完整性表征方法

3.1. 残余应力检测

残余应力的检测方法包括无损的物理检测方法和有损的应力释放法，其中，X 射线残余应力检测方法是常用的无损法，盲孔法应力检测是有损法。X 射线残余应力检测是无损法宏观残余应力检测常用的检测方法，它是一种间接检测应力的方式，通过检测衍射角 2θ 相对于晶面方位角 γ 角变化率来检测表层微小区域的应力，X 射线方法检测的是工件的弹性应力应变，并不是塑性应力应变，塑性变形不会改变晶格间距，不会发生衍射角度的变化，X 射线检测应力的原理如图 2 所示。

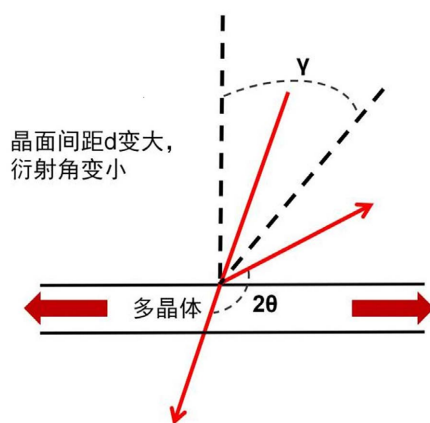


Figure 2. Principle of X-ray stress detection

图 2. X 射线检测应力原理

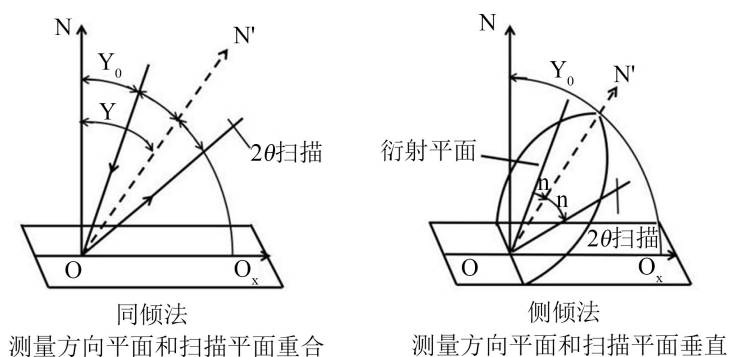


Figure 3. Diffraction geometry for stress determination

图 3. 应力测定的衍射几何方式

在理想多晶体多个晶粒中，同族晶面的面间距 d 是相等的，无论 X 射线从什么角度入射，无论晶面方位角 γ 角为何值，衍射角 2θ 都是不变的。在拉应力状态，晶面方位角 γ 越大，晶面间距也越大，相应的衍射角 2θ 越小。同理，在压应力状态，晶面方位角 γ 越大，晶面间距变小，衍射角 2θ 越大；衍射角 2θ 随方位角的变化快慢程度，直接反应出应力值的大小。

在衍射仪上进行常规对称衍射，入射线与计数管轴线对称分布在试样表面法线两侧，此时晶面方位角 γ 角为零；从晶面方位角 γ 角 = 0 的位置，另试样轴转过一个角度，对选定的衍射峰进行定峰和扫描，一般晶面方位角 γ 角取值 3~4 个，应力测定的衍射几何方式如图 3 所示。

3.2. 微观组织检测

对失效的零部件进行理化检测，采用扫描电镜(SEM)观察断裂后的零件表面形貌，将凸轮轴磨削烧伤掉块及曲轴化瓦区域断口经线切割取样，超声波清洗后放入电镜中观察和分析。化瓦曲轴断口处截取块状试样进行打磨，使用直读光谱仪进行材质成分测试，另取一块样件进行打磨、抛光，使用金相显微镜进行观察。

4. 表面完整性主导的失效机制

4.1. 制造过程诱导失效

4.1.1. 凸轮轴磨削烧伤导致早期开裂掉块宏观表征

某凸轮轴磨削烧伤后存在明显开裂并局部掉块，取下裂口后观察两处起始裂纹源分别位于凸轮轴工作面两侧，呈现粗糙不平的弧线，局部可见明显纹理扩展，裂口宏观形貌如图 4 所示。

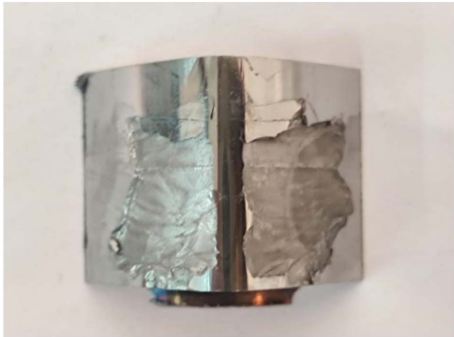


Figure 4. Macro-morphology of the crack
图 4. 裂口宏观形貌

4.1.2. 残余应力场特征

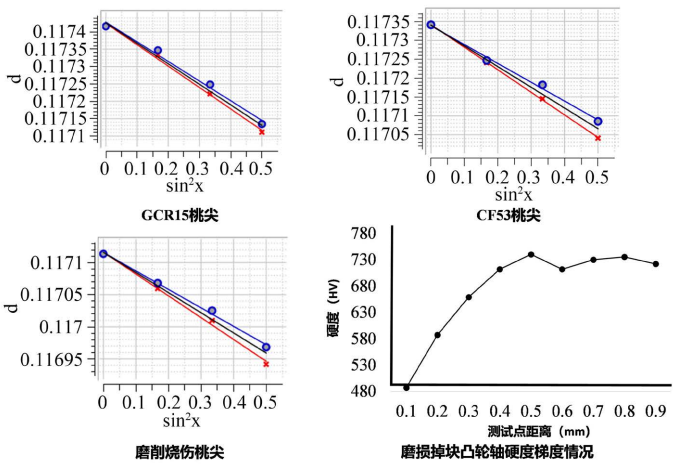


Figure 5. Comparison of residual stress and hardness gradient between the peach tip area of the camshaft and the wear-lost block area
图 5. 凸轮轴桃尖区与磨损掉块区残余应力、硬度梯度对比图

正常凸轮轴残余应力因材质(GCr15、CF53)、生产厂家、桃尖、轴承等位置及方向不同略有差异,残余应力水平一般在(-600~900)MPa 水平,对于存在磨削烧伤凸轮轴的残余应力,表层约 0.3 mm 硬度梯度明显降低,残余应力压应力有明显降低,残余应力分布 GCR15 桃尖、CF53 桃尖、磨削烧伤桃尖、磨损掉块凸轮轴硬度梯度情况如图 5 所示。

4.1.3. 微观形貌表征

某凸轮轴开裂掉块,开裂掉块处桃尖两边裂口均为双源接触疲劳开裂,SEM 测得掉块处微观形貌如图 6 所示,结果表明,凸轮轴开裂掉块应为磨削烧伤引起表面残余应力压应力显著降低,严重降低表面抗接触疲劳性能,而造成的接触疲劳开裂掉块。

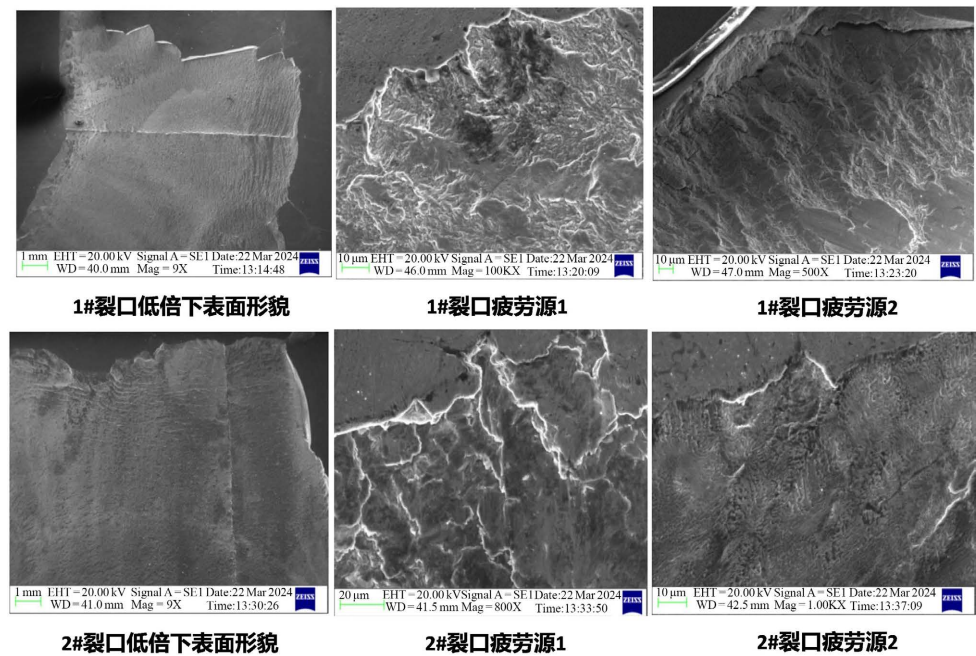


Figure 6. Microscopic morphology of the camshaft dropping
图 6. 凸轮轴掉块处微观形貌

4.2. 服役载荷导致失效

4.2.1. 曲轴严重化瓦导致疲劳断裂宏观表征



Figure 7. Macro-morphology of convex shaft fracture
图 7. 凸轴断口宏观形貌

某曲轴断裂起始于表面，呈现多源弯曲 + 扭转疲劳断裂特征，断口宏观形貌如图 7 所示。

4.2.2. 成分与微观组织表征

材质成分测试、金相分析结果如表 1、表 2 所示。通过分析可知，元素含量符合标准。断口附近表面原淬硬层深约 4.1 mm，表面约 0.32 mm 为再次淬火层。

Table 1. Material composition test results
表 1. 材质成分测试结果

元素 Wt%	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo
技术要求	0.38~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.030	≤0.030	0.90~1.20	0.15~0.25
实测值	0.43	0.30	0.71	0.020	0.008	1.13	0.22
检测结论	合格	合格	合格	合格	合格	合格	合格

Table 2. Metallographic analysis
表 2. 金相分析

检测项目	断口附近表面淬硬层组织
技术要求	/
实测值	断口附近原淬硬层深约 4.1 mm，表面约 0.32 mm 为再次淬火层。
检测结论	/

4.2.3. 残余应力场特征

正常曲轴残余应力一般在-600 MPa 左右，严重划瓦曲轴残余应力压应力显著降低，甚至变为拉应力，曲轴残余应力对比检测如图 8 所示。

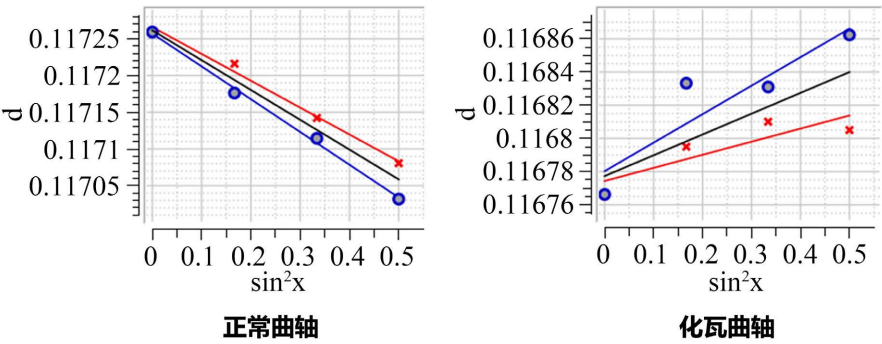


Figure 8. Comparison of residual stress of normal camshaft and tile crankshaft
图 8. 正常凸轮轴与化瓦曲轴残余应力对比图

4.2.4. 微观形貌表征

送检曲轴断裂，断口为从曲轴表面开始的多源弯曲+扭转疲劳断裂，断口疲劳扩展区疲劳辉纹明显，曲轴化瓦处微观形貌分别见图 9 所示，曲轴成分符合技术要求，断口附近表面存在约 0.32 mm 再次淬火层，断口为从曲轴表面开始的多源弯曲 + 扭转疲劳断裂，应为严重化瓦引起表面残余应力降低，二次淬火等原因从轴颈表面疲劳开裂，并扩展而造成的弯曲 + 扭转疲劳断裂，应排查化瓦原因、相关件质量及受力等情况。

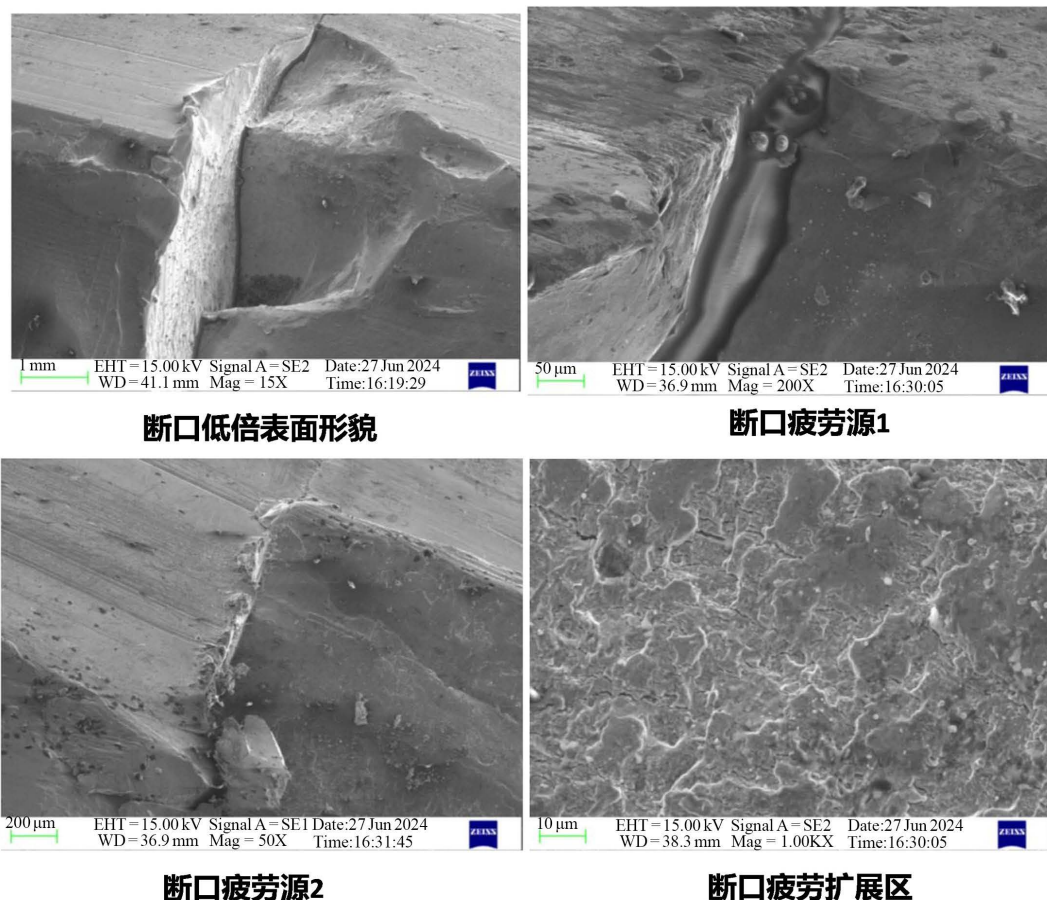


Figure 9. Micro-morphology of crankshaft
图 9. 曲轴化瓦处微观形貌

4.3. 分析与结论

表面完整性是零件表面物理、化学、力学状态的重要指标，其中残余应力作为关键因素，协调零件本征强度与外界载荷的平衡关系。凸轮轴早期掉块、曲轴化瓦均是在热-力耦合效应主导下，存在异常高温致使零件表面压应力丧失转化为拉应力，且裂纹萌生位置均起源于应力突变峰值区，两种失效模式本质都以“热损伤-应力状态突变-早期断裂”为核心。除此之外，两者热源特征、应力演变及失效速度有差异，两者相比，凸轮轴磨削烧伤致使界面裂纹接触疲劳剥落，而曲轴化瓦摩擦热有持续高温特点，导致轴颈表面二次淬火，压应力为渐进式衰减并引发多源疲劳失效。

5. 结束语

通过柴油机凸轮轴磨削烧伤对表面残余应力变化的影响及引起早期磨损掉块的失效机理综合分析，曲轴化瓦对表面残余应力变化的影响及断裂的失效机理综合分析，揭示轴类零件磨削烧伤、化瓦对表面残余应力和失效主要原因的影响，以利后续质量改进。

参考文献

- [1] 姜锡山, 赵晗, 等. 钢铁显微断口速查手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [2] 张治国, 赵世来. 浅谈发动机轴瓦的失效模式[J]. 汽车实用技术, 2019(9): 188-191.

- [3] 李国琳, 孙永华. 大功率发动机轴瓦失效分析及预防措施[J]. 内燃机与配件, 2024(5): 68-70.
- [4] 邱颖博, 孔维瑜, 何湘潭, 白倩. 表面硬度与表面残余应力对 FGH99 微动磨损特性的影响[J/OL]. 航空学报: 1-14. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.v.20250720.0733.008.html>, 2025-08-13.
- [5] 李全新, 王守财, 康杰, 马海坤, 张子阔, 黄浩, 王敏涓, 吴大勇, 黎旺, 苏孺. SiC_T/Ti₃Al 复合材料单轴拉伸残余应力及界面失效数值模拟[J/OL]. 河北科技大学学报: 1-11. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1225.ts.20250624.0852.002.html>, 2025-08-13.
- [6] Liu, Y., Chen, C., Li, G. and Li, J. (2010) Fatigue Life Prediction of Semi-Elliptical Surface Crack in 14MnNbq Bridge Steel. *Engineering Failure Analysis*, **17**, 1413-1423. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.05.001>
- [7] Chu, G.C., Hu, F.Z., Jin, X.J., Zhang, Y., Wang, Q., Hou, J.P., *et al.* (2022) Fatigue Properties Improvement of Low-Carbon Alloy Axle Steel by Induction Hardening and Shot Peening: A Prospective Comparison. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, **35**, 1343-1356. <https://doi.org/10.1007/s40195-021-01366-3>
- [8] Yang, Q., Cheng, J., Guan, H., Tan, W. and Zhang, Y. (2022) Investigation of Wet Shot Peening on Microstructural Evolution and Tensile-Tensile Fatigue Properties of Ti-6Al-4V Alloy. *Materials Chemistry and Physics*, **291**, Article ID: 126635. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126635>
- [9] Kikuchi, S., Nambu, K., Nakamura, Y. and Akebono, H. (2020) Effect of Soft-Fine Particle Peening on Rotating Bending Fatigue Properties of Gas Carburized SCM420H Steel. *Tetsu-to-Hagane*, **106**, 765-776. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.tetsu-2020-013>
- [10] Salonitis, K. and Kolios, A. (2015) Experimental and Numerical Study of Grind-Hardening-Induced Residual Stresses on AISI 1045 Steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **79**, 1443-1452. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6912-x>
- [11] Li, G., Xu, H., Zhou, H., Jing, X. and Sun, Y. (2018) Experimental Study of Residual Stresses of Cam Produced by Heat Treatment and Grinding Processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **100**, 1355-1362. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2756-5>
- [12] 李兴林. 摩托车发动机轴承早期失效模式分析及对策[J]. 摩托车技术, 2001(9): 6-10.
- [13] Hong, Y., Xiu, S., Sun, C., Zhao, Y. and Zhang, X. (2022) Metallographic Method for Temperature Measurement: Reconstruction of Grinding Temperature Field Based on Critical Austenitizing Depth and Cyclic Feedback Algorithm. *Journal of Materials Processing Technology*, **310**, Article ID: 117770. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117770>