

铝合金气缸盖低周疲劳蠕变耦合寿命预测的仿真与试验研究

曹子聪¹, 张卫正¹, 佟其沛^{1, 2}

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 蓝箭航天空间科技股份有限公司, 北京 100176)

Predicting Low-Cycle-Fatigue-Creep Life of Aluminum Alloy Cylinder Head under Elevated Temperatures: A Combined Simulation and Experimental Study

Zicong Cao¹, Weizheng Zhang¹, Tongqi Pei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. LandSpace Space Technology Co., Ltd, Beijing 100176, China)

Abstract: The experimental and simulation studies aimed at the increasingly severe low cycle fatigue creep problem of aluminum alloy cylinder heads in diesel engines were carried out. A whole-engine experiment was performed to determine the temperature field of the aluminum alloy cylinder head under various working conditions. Additionally, an electromagnetic induction heating equipment was employed to perform an accelerated thermal fatigue test on the aluminum alloy cylinder head. Furthermore, a part-level life model for fatigue-creep was developed using an energy-based approach. The model's validity was verified by finite element simulation, which identified the failure location and number of failure cycles. These results provide an effective method for investigating the low-cycle fatigue-creep reliability of aluminum cylinder heads and can aid in reducing failure rates in diesel engines.

摘要: 针对柴油发动机铝合金气缸盖日益严重的低周疲劳-蠕变问题进行了仿真和实验研究。通过发动机整机试验确定了铝合金气缸盖在各种工况下的温度场。并通过采用电磁感应加热设备对气缸盖进行了加速热疲劳试验。此外, 还采用基于能量法建立的低周疲劳-蠕变部件级寿命模型。该模型的有效性通过有限元模拟进行了验证, 并确定了失效位置和失效循环次数。

关键词: 铝合金气缸盖; 低周疲劳-蠕变; 整机与零部件试验; 有限元仿真

Key words: aluminum cylinder head; low-cycle-fatigue-creep life; whole engine and component experiments; finite element simulation

中图分类号: TK43

文献标识码: A

0 概述

柴油发动机因其高功率密度和广泛的功率范围而被广泛用于汽车和船舶领域^[1, 2]。气缸盖是内燃机中最复杂的结构和承载负荷最大的组件之一。近年来, 随着内燃机不断强化和轻量化设计要求变得更加严格, 铝合金气缸盖的疲劳-蠕变问题已成为重要的研究焦点^[3-5]。在发动机运行过程中, 气缸盖承受着巨大的热载荷和气体爆发压力。除了在发动机启动和关闭过程中承受低周疲劳载荷外, 气缸盖还在发动机运行过程中承受蠕变载荷^[6]。因此,

对铝合金气缸盖进行试验与仿真疲劳性能评估研究显得尤为重要^[7, 8]。

目前, 对气缸盖低周疲劳-蠕变寿命评估的研究主要集中在两个方面: 整机或部件级热冲击试验和有限元模拟计算。在试验中, 通过使用整机或模拟加热设备不断加热和冷却气缸盖来模拟气缸盖的疲劳失效过程^[9, 10]。这种方法可以准确评估气缸盖的疲劳失效情况与失效寿命。然而, 它也存在着如测试周期较长、成本较高的问题^[11, 12]。

由于气缸盖疲劳测试的复杂性, 当前对其疲劳问题的研究通常采用有限元模拟结合寿命模型来预

测气缸盖的疲劳寿命。同时,因为有限元法可以很好地模拟气缸盖的不同工作条件,从而被广泛应用于气缸盖疲劳问题的研究中。例如, Yang 等人^[13]应用 Sehitoglu 理论创建了一种气缸盖热机械疲劳变工况模拟方法,并成功预测了失效位置。Sharifi 等人^[14]通过有限元模拟方法模拟了气缸盖的热机械疲劳过程,并基于临界面理论计算了气缸盖的疲劳寿命。此外,一些研究还表明,气缸盖低周疲劳寿命还受到其他因素的影响,如材料的力学性能、气缸盖的铸造情况和装配载荷等^[15-17]。

大多数有限元模拟缺乏来自实验的必要数据进行验证,导致了模拟边界条件不准确、分析结果不可靠的问题。并且通常忽视了气缸盖在实际工作过程中承受的蠕变载荷影响。因此,为了建立一种可靠的气缸盖低周疲劳-蠕变损伤评估方法,本文提出了一种基于整机和部件级测试的加速热疲劳实验模型。然后将寿命模型与有限元模拟相结合,计算气缸盖测试的寿命,并验证有限元模拟的准确性。

1 试验材料及方法

1.1 材料与试样

本文中所研究的气缸盖采用了 Al-Si-Cu 铸造铝合金材料制成,铝合金材料由于其密度低、铸造性能良好、高比强度和良好的导热性能等特性,被广泛用于气缸盖中^[18-20]。该铝合金的具体化学成分如表 1 所示。

表 1 铸造 Al-Si-Cu 合金的化学成分表 (%)

元素	Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Mn	Ti	Na	Al
含量	8.8	2.4	0.8	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	Bal
	6	6	5	1	8	6	7	05	

在气缸盖中,与燃气直接接触的表面被称为火力面,它周期性地受到气体高温和高压的作用,使其成为最容易发生故障的区域之一。由于进气门进入的一般为低温气体,而排气门排出的为高温燃气,因此火力面中最容易发生故障的区域是排气门鼻梁区。用于整机测试和部件加速热疲劳测试的气缸盖分别是六缸整体气缸盖和单缸气缸盖,气缸盖的火力面如图 1 所示。



图 1 (a) 六缸整体盖火力面 (b) 单缸气缸盖火力面

1.2 试验与仿真方法

在整机测试中,由于气缸盖的安装和拆卸过程较为复杂,无法准确地获取气缸盖的失效寿命。因此,整机测试的主要目的是使用热电偶进行温度测量,以测量不同工况下气缸盖关键区域的温度情况,并为后续的加速热疲劳测试和仿真分析提供数据基础。热电偶布于火力面关键区域,并从冷却水腔中导出。其在火力面的分布如图 2 所示。

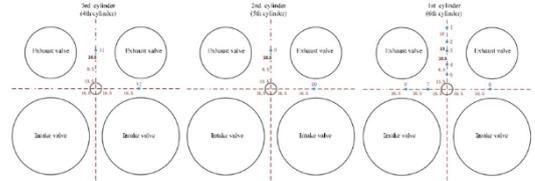


图 2 热电偶分布示意图

图 3 显示了加速热疲劳试验台的主体结构,其主要包括电磁加热装置、冷却装置和控制系统。该装置利用金属材料的铁磁性,在气缸盖的火力面上感应涡流,从而产生焦耳热对气缸盖表面进行快速加热。通过设置特定参数,控制系统可以调节加热功率和冷却时间,周期性地对气缸盖表面进行加热-保温-冷却,从而模拟气缸盖在低周热疲劳载荷下的启动-运行-停止工况。加速热疲劳试验期间气缸盖温度变化示意图和加热冷却装置的局部放大图如图 4 所示。在加热阶段,电磁感应线圈通过高频高压电流供电从而加热水缸盖。在保持阶段,功率减小以保持恒定温度。最后,在冷却阶段,停止电磁感应线圈供电,并且通过喷射高速恒温空气冷却气缸盖。

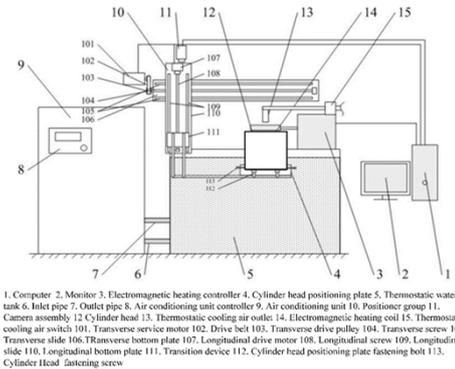


图 3 加速热疲劳试验台结构示意图

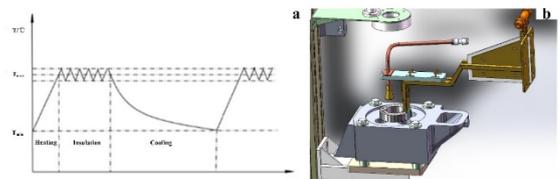


图 4 (a) 加速热疲劳温度变化示意图 (b) 加热冷却装置局部放大图

图 5 为使用 HyperMesh 进行网格化并导入 Abaqus 的气缸盖有限元模型。为确保精确计算,该实体模型并没有过度简化,而是尽可能地保留气缸盖的真实结构。该模型选择的网格类型为 DC3D10,在进行网格无关性测试后,总单元数为 513855。

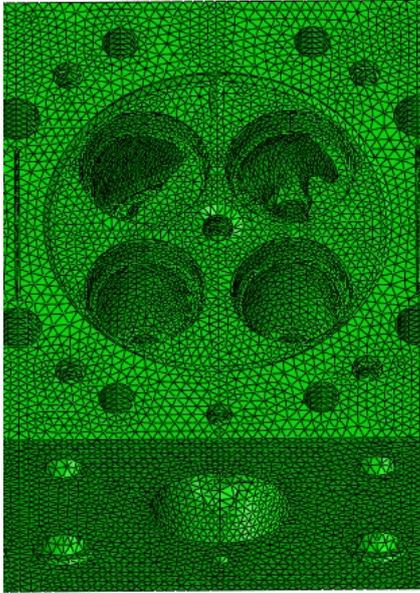


图 5 气缸盖有限元模型示意图

2 结果与分析

2.1 整机试验

在整机测试中,采用 K 型热电偶作为传感器,其布置如图 2 所示。温度检测器的采样频率为 5 Hz,在测试过程中观察了总共 12 个稳态工况,其中部分关键工况发动机性能参数和气缸盖温度如表 2 和表 3 所示。

表 2 不同工况下的发动机性能参数

工况	爆发压力 (MPa)	进气温度 (°C)	排气温度 (°C)
2200 rpm 100% load	13	29	509
1900 rpm 100% load	13.2	29	508
1500 rpm 100% load	13.3	29	589
1000 rpm 100% load	10	29	619

2200 rpm 70% load	10.8	29	458
2200 rpm 50% load	9.4	29	427
1000 rpm 50% load	6.7	29	408

表 3 不同工况下的部分测点温度

测点温度 (°C)	测点温度 (°C)					
	3	8	9	10	11	12
工况						
2200 rpm 100% load	222.7	183.6	225.1	192.8	258.9	195.3
1900 rpm 100% load	215.6	172.4	218.7	188.4	245.9	191.7
1500 rpm 100% load	225.2	156.2	225.1	198.1	257.5	208.3
1000 rpm 100% load	181.7	137.8	185.2	167.5	207.6	177.1
2200 rpm 70% load	195.6	157.5	197.7	170.3	220.5	168.3
2200 rpm 50% load	177.7	151.5	180.5	156.8	198.6	155.7
1000 rpm 50% load	151.3	124.6	159.0	147.1	175.3	152.8

2.2 加速热疲劳试验

如图 3 和图 4 所示,在加速热疲劳试验通过控制气缸盖的温度模拟加热-保温-冷却这一过程。然而,将热电偶打孔放置在排气门鼻梁区这一高危区域,因为打孔处理会导致很难准确地获取气缸盖的加速热低周疲劳寿命。因此,加速热疲劳试验台上的温度场校准测试非常重要。通过建立其他区域与排气门鼻梁区危险点之间的温度场关系映射,将这些区域设定为控制点,从而可以在试验过程中有效地控制危险点的温度。

为了在加速热疲劳实验中获得更精确的气缸盖温度场分布情况,采用了图 2 中的第一缸热电偶分布进行温度场校准测试。根据表 3 中位于排气门鼻梁区的最高温度测试点 11 的数据设置温度。由于气缸盖的温度在实际发动机运行过程中会有 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 的波动,排气门鼻梁区的最高温度设定为 280°C ,最低温度设定为 160°C 。加热时间为 30 秒,保持时间为 60 秒,冷却时间为 40 秒。图 6 显示了一个

循环内每个测试点的温度变化情况。通过加速热疲劳测试获得的温度分布与实际气缸盖温度场非常接近。当位于排气门鼻梁区中心的测试点 3 的温度达到 280℃时，其他测点的温度低于测试点 3，这与整机测试条件一致。然而，由于电磁感应加热与实际火焰燃烧传热过程存在一定差异，对应进排气门鼻梁区的测试点 6 和 8 的温度略高于整机试验数据，但是对于危险区域排气门鼻梁区的寿命基本没有影响。

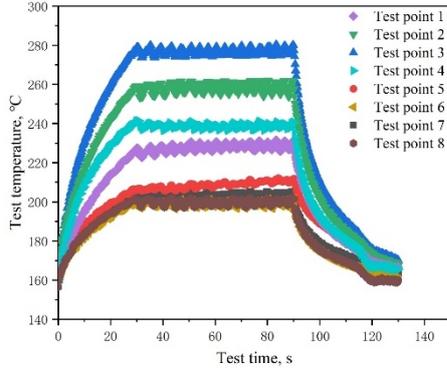


图 6 加速热疲劳各测点温度图

在加速热疲劳试验中，通过对气缸盖进行反复的加热-保温-冷却来模拟气缸盖承受的低周疲劳与蠕变载荷，一个完整的加热-保温-冷却过程即为一个循环。当通过对气缸盖进行一定循环后发现气缸盖排气门鼻梁区产生较为明显的裂纹时，即可认为气缸盖失效并得到其低周疲劳-蠕变寿命，该载荷下的气缸盖低周疲劳寿命为 5456 循环，其失效图如图 7 所示。

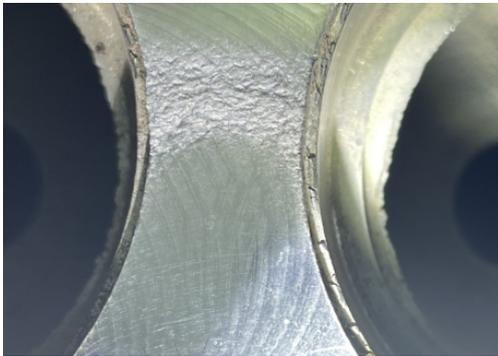


图 7 气缸盖鼻梁区失效示意图

2.3 有限元仿真

气缸盖的主要作用是密封气缸，并与活塞顶部形成气体燃烧的空间。在这种工况下，气缸盖主要承受热载荷、爆破压力载荷和螺栓预紧力载荷，通过现有研究可以发现，在大多数工况下，火力面区域的大部分应力都是由热载荷引起的^[21]。

热力学边界条件主要考虑与燃烧气体接触的火力面传热边界、流固耦合段传热边界和自由表面传

热边界。当已知一个工作循环中燃烧气体在气缸内的瞬态温度和瞬态传热系数时，可通过以下公式得到一个循环中燃烧气体的等效平均温度和等效平均传热系数，作为火力面的边界条件：

$$h_m = \frac{1}{720} \int_0^{720} h_g d\varphi \quad (1)$$

$$T_m = \frac{1}{h_m} \int_0^{720} h_g T_g d\varphi \quad (2)$$

式中， h_g 为缸内瞬时换热系数； φ 为曲轴转角； h_m 为缸内平均换热系数； T_g 为缸内瞬时温度； T_m 为缸内平均温度，其中瞬时换热系数和瞬时温度可以由相应仿真软件得出。

火力面的传热系数沿半径方向逐渐减小，并且由于进、排气侧的传热条件差异较大，可将火力面划分为如图 7 所示的区域，通过下式和经验可求得火力面各区域的平均传热系数：

$$\sum_{i=1}^n A_i h_i = A h_m \quad (3)$$

式中： A_i 、 h_i 为各区的换热面积和换热系数， A 、 h_m 为燃烧室火力面的总表面积和燃气的平均传热系数。

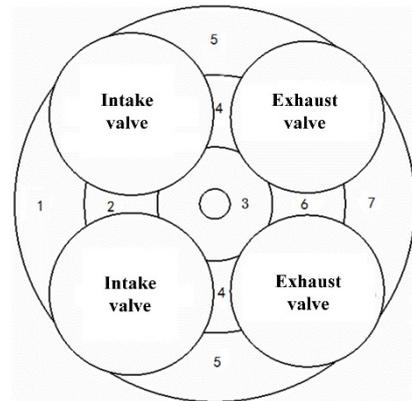


图 8 火力面区域划分示意图

进排气道热负荷对流换热系数通常采用经验公式计算：

$$h_i = 0.027(1-0.765l_i / d_i) d_{mi}^{(-1.675)} T_i^{0.362} m_i^{0.675} \quad (4)$$

$$h_g = 3.27(1-0.797l_g / d_g) d_{mg}^{(-1.5)} T_g^{0.517} m_g^{0.5} \quad (5)$$

式中, l 为阀门的升程; d 为阀门的内径; d_m 为气道的平均直径; T 为气道壁温度; m 为质量流量; 下标 i 代表进气道; 下标 g 代表排气道;

冷却水与缸盖水套壁面的换热系数与循环水的流动情况以及气缸套表面的特性有关。由宗湜肯公式计算:

$$h_w = 300 + 1800 \sqrt{W_m} \quad (6)$$

式中, h_w 为冷却水套壁面换热系数, W_m 为冷却水的流速。

对于加速热疲劳试验的有限元仿真, 仅需考虑火力面传热问题, 并根据加速热疲劳试验温度场与整机实际温度场的差别对换热系数做出相应调整。通过 Abaqus 仿真, 即可得到相应的温度场及应力场情况, 如图 9 和图 10 所示。

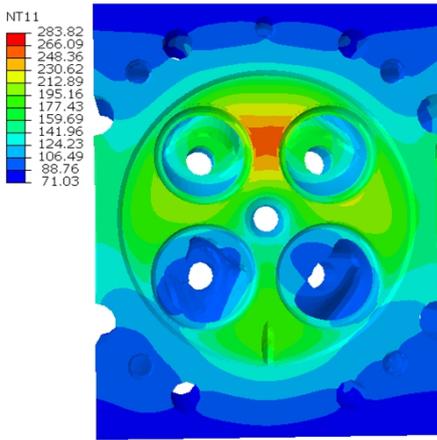


图 9 气缸盖温度场仿真云图

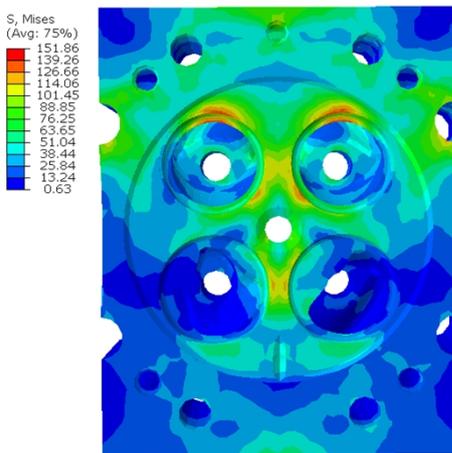


图 9 气缸盖应力场仿真云图

2.4 寿命预测

在得到气缸盖温度场及应力场情况后, 需建立有效的铝合金气缸盖低周疲劳-蠕变寿命预测模型, 以减少试验耗时的问题。对于气缸盖疲劳蠕变

相互影响的情况, 传统的 Manson-Coffine 公式及线性损伤累计法并不能达到很好的寿命预测目标, 故建立了应变能耗散模型。

与上述两种模型不同^[22, 23], 应变能耗散模型以循环应变能为参数, 将疲劳损伤和蠕变损伤作为一个统一的部分加以考虑。该模型利用外部载荷输入材料的损伤能量来预测材料的寿命, 具有明显的物理意义^[24]。

金属材料的疲劳破坏过程可以看作是能量存储和耗散的准静态过程。使用能量模型预测材料寿命的基本概念是将每个载荷循环产生的塑性应变能 (以滞环面积表示) 作为量化疲劳破坏程度的参数。其物理含义是, 材料吸收了外部载荷的能量, 但这些能量并没有完全可逆地耗散, 从而导致一些内部损伤。当损伤累积到临界值时, 材料将最终失效。在低周疲劳过程中, 输入材料的主要能量形式是塑性应变能。以往的研究表明, 当施加的载荷相对稳定, 且每个循环中产生的塑性应变能大致保持恒定时, 塑性应变能与疲劳寿命之间的关系可描述如下:

$$\Delta W_p = kN_f^a + d \quad (7)$$

式中, W_p 为循环应变能, N_f 为循环数, k 、 a 、 d 为材料参数。

材料的循环塑性应变能可通过下式计算得出:

$$\Delta W_p = \frac{1-n'}{1+n'} (\Delta\sigma - \delta_\sigma) \Delta\varepsilon_p + \delta_\sigma \Delta\varepsilon_p \quad (8)$$

(8)

$$\delta_\sigma = \Delta\sigma - 2E (\Delta\varepsilon_p / 2)^{n'} \quad (9)$$

(9)

式中, n' 为循环硬化指数, $\Delta\sigma$ 为循环应力范围, $\Delta\varepsilon_p$ 为循环应变范围, E 为材料的弹性模量。

对于气缸盖的低周疲劳-蠕变问题, 需要考虑蠕变应变对应变能的影响, 因为蠕变耦合的存在会导致蠕变应变。蠕变对应变能的影响可通过滞后环获得。因此, 式 (7) 应变能耗散模型可修改如下:

$$\Delta W_p + \Delta W_{\text{creep}} = kN_f^a + d \quad (10)$$

(10)

式中 ΔW_{creep} 为蠕变应变能, 是唯一未知参数, 其余参数均可以通过材料的低周疲劳试验得

到。以往的研究表明，蠕变应变能与循环的最大应力和平均应力有关^[25,26,27]。当低周疲劳蠕变试验中拉伸蠕变阶段结束后的应力超过平均应力的绝对值时，蠕变应变能可计算为图 10 中的阴影区域，可表示如下：

$$\Delta W_{creep} = (2\sigma_{max}\sigma_r + 2\sigma_m\sigma_r - \sigma_r^2) / 2E \quad (11)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (12)$$

$$\sigma_r = (A \log \Delta \varepsilon_p + B) \cdot \log(1+t) \quad (13)$$

式中 σ_m 和 σ_r 分别为平均应力和松弛应力，松弛应力与塑性应变复制和松弛时间有关，其中 A 和 B 为两个材料参数。以上参数均可通过相应材料试验得到。

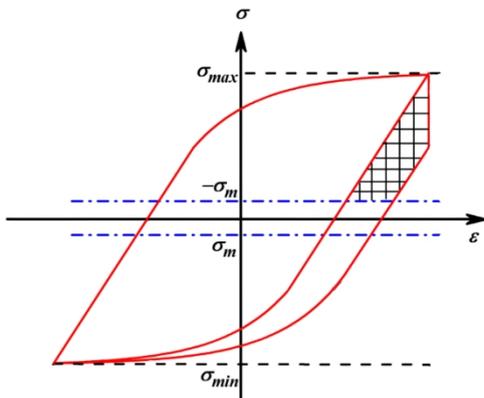


图 10 蠕变应变能示意图

将 Abaqus 仿真结果及上述寿命模型导入寿命分析软件 Fe-Safe 中，即可得到缸盖的寿命预测结果。从图 11 中可以看出缸盖火力面主要危险区域集中在排气门鼻梁区区域，且寿命为 $10^{3.74}$ 循环，这与试验结果基本相符，证明了该预测模型的准确性。

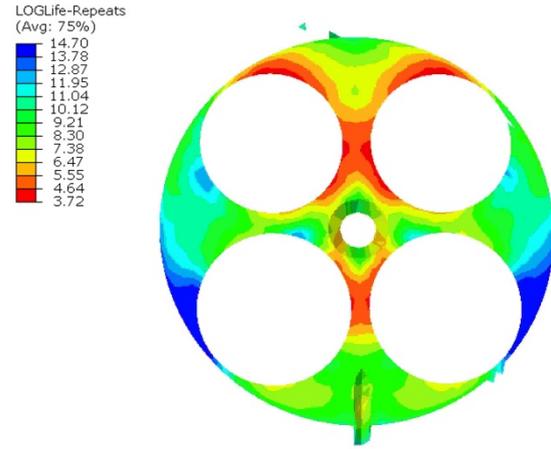


图 10 蠕变应变能示意图

3 结论

(1) 建立了针对铝合金气缸盖的加速热疲劳方案，并通过加速热疲劳试验确定气缸盖的低周疲劳-蠕变的失效位置与失效寿命。

(2) 基于能量法建立了适用于铝合金气缸盖的低周疲劳-蠕变寿命模型。

(3) 应用能量耗散模型及 Fe-Safe 仿真软件，开展了气缸盖低周疲劳-蠕变的失效模拟方法，并成功预测了失效位置与失效寿命。

参考文献：

- [1] Thomas J J, Verger L, Bignonnet A, Charkaluk E. Thermomechanical design in the automotive industry[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2004, 27(10), 887-895.
- [2] Bignonnet A, Charkaluk E. Thermomechanical fatigue in the automotive industry[J]. *European Structural Integrity Society*, 2002, 29, 319-330.
- [3] Franke M, Bhide S, Liang J, Neitz M, Hamm T. Development trends for commercial and industrial engines[J]. *SAE technical paper*, 2014, 7, 1629-1636.
- [4] Takahashi T, Sasaki K. Low cycle thermal fatigue of aluminum alloy cylinder head in consideration of changing metrology microstructure[J]. *Proceedings of Engineering*, 2010, 2, 767-776.
- [5] Azadi M, Samiee M, Esfarjani S M. Estimation of Low-Cycle Fatigue Lifetime in Aluminum-Silicon-Magnesium Alloy of Cylinder Heads based on Striation Marks as Failure Features of Fracture Surfaces and Paris Crack Growth Law[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2021, 21, 1466-1475.

- [6] Sharifi S M H, Googarchin H S, Forouzesh F. Three-dimensional analysis of low cycle fatigue failure in engine part subjected to multi-axial variable amplitude thermo-mechanical load[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 62, 128-141.
- [7] Zhang H B, Cui Y, Liang G, Li L T, Zhang G Y, Qiao X Q. Fatigue life prediction analysis of high-intensity marine diesel engine cylinder head based on fast thermal fluid solid coupling method[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, 43, 1-15.
- [8] Hong J, Li B, Chen Y, Peng H. Study on the optimal design of engine cylinder head by parametric structure characterization with weight distribution criterion[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25, 2607-2614.
- [9] Guo B, Zhang W, Li S, Wang X. High-temperature low cycle fatigue and creep-fatigue behavior of a casting Al-9Si-CuMg alloy used for cylinder heads[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 700, 397-405.
- [10] Wang X S, Zhang W Z. Oxidation and thermal cracking behavior of compacted graphite iron under high temperature and thermal shock[J]. *Oxidation of Metals*, 2017, 87(1-2), 179-188.
- [11] Blondet H, Barthoux K. Fatigue software improvement for calculating by FEA a complete map of the damage due to a duty cycle, regarding thermo-mechanical failure mode.: Application to a truck cylinder head lifetime assessment[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2022, 38, 526-537.
- [12] Jing G, Lyu Z, Liu Y, Xiao S, Zhou H, Li S. Reliability study for diesel engine cylinder head through fatigue failure analysis and structural optimization[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 142, 106768.
- [13] Yang W, Pang J, Wang L, Kang X, Zhou S, Zou C, Li S, Zhang Z. Thermo-mechanical fatigue life prediction based on the simulated component of cylinder head[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 135, 106105.
- [14] Sharifi S M H, Googarchin H S, Forouzesh F. Three-dimensional analysis of low cycle fatigue failure in engine part subjected to multi-axial variable amplitude thermo-mechanical load[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2016, 62, 128-141.
- [15] Ashouri H. Finite element analysis of thermo-mechanical stresses in diesel engines cylinder heads using a two-layer viscoelasticity model[J]. *International Journal of Automotive Engineering*, 2015, 5, 1026-1038.
- [16] Zhang Q, Zuo X Z, Liu J X. Failure analysis of a diesel engine cylinder head based on finite element method[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 34, 51-58.
- [17] Azadi M, Mafi A, Roozban M, Moghaddam F. Failure analysis of a cracked gasoline engine cylinder head[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2012, 12, 286-294.
- [18] Wu Y, Liu C, Liao H, Jiang J, Ma A. Joint effect of micro-sized Si particles and nano-sized dispersoids on the flow behavior and dynamic recrystallization of near-eutectic Al-Si based alloys during hot compression[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 856, 158072.
- [19] Wu Y, Liao H, Tang Y. Enhanced high-cycle fatigue strength of Al-12Si-4Cu-1.2Mn-T6 cast aluminum alloy at room temperature and 350 C[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 835, 141917.
- [20] Cao Z, Zhang W. Softening response of cast Al-Si-Cu samples tested under low-cycle-fatigue and fatigue-creep regime and elevated temperature: Experimental and Analysis[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2023, 46, 199-211.
- [21] Yang W, Pang J, Wang L, Kang X, Zhou S, Zou C, Li S, Zhang Z. Thermo-mechanical fatigue life prediction based on the simulated component of cylinder head[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2022, 135, 106105.
- [22] Huo J Z, Sun D B, Wu H Y, Wang W Z, Xue L. Multi-axis low-cycle creep/fatigue life prediction of high-pressure turbine blades based on a new critical plane damage parameter[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 106, 104159.
- [23] Wen J B, Zhou C Y, Li X, Pan X M, Chang L, et al. Effect of temperature range on thermal-mechanical fatigue properties of P92 steel and fatigue life prediction with a new cyclic softening model[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 129, 105226.
- [24] Jeong C Y, Bae J C, Kang C S, Cho J I, Son H T. Normalized creep-fatigue life prediction model based on the energy dissipation during hold time[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 460-461, 195-203.
- [25] Wang R Z, Zhang X C, Tu S T, Zhu S P, Zhang C C. A modified strain energy density exhaustion model for creep-fatigue life prediction[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 90, 12-22.
- [26] Brinkman C R. High-temperature time-

dependent fatigue behaviour of several engineering structural alloys[J]. International Metallurgical Reviews, 1985, 30, 235-258.

[27] Ostergren W J. A damage function and associated failure equations for predicting hold time and frequency effects in elevated temperature, low cycle fatigue[J]. ASTM Journal of Testing and Evaluation, 1976, 4, 327-339.