

高强度活塞烧蚀失效研究

秦朝举^{1,2}, 张卫正¹, 宋立业¹, 原彦鹏¹

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 华北水利水电大学 机械学院, 郑州 450011)

摘 要: 运用软件 AVL FIRE 对某型柴油机进行了有近壁燃烧工况时的燃烧特性的数值模拟,同时确定了该型柴油机在近壁燃烧工况时活塞有限元计算的热边界条件,运用软件 ANSYS 进行了活塞的烧蚀过程有限元分析,得到了近壁燃烧对活塞烧蚀的影响规律,进行了活塞烧蚀的实机试验,模拟计算结果与试验结果基本吻合。结果表明:所建立的烧蚀计算方法可以很好地模拟活塞的烧蚀过程;柴油机喷油器喷孔磨损变大将导致活塞喉口附近燃气温度和壁面传热系数在较大的曲轴转角内都保持较大的数值,从而使活塞发生烧蚀失效;烧蚀量随着喷油器孔径的增大先增大后减小,在孔径增大 15% 时达到峰值;烧蚀量随着烧蚀时间的增大而增大,但烧蚀的速度在缓慢减小。

关 键 词: 柴油机; 活塞; 喷油器; 近壁燃烧; 烧蚀

中图分类号: V215.4

文献标志码: A

Investigations on ablation failure of high-power pistons

QIN Zhao-ju^{1,2}, ZHANG Wei-zheng¹, SONG Li-ye¹, YUAN Yan-peng¹

(1. School of Mechanical Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Mechanical Engineering,

North China University of Water Resources and Electric Power,

Zhengzhou 450011, China)

Abstract: Numerical simulation of combustion characteristics at wall burning condition in a diesel engine was conducted using software AVL FIRE, and the thermal boundary conditions of finite element calculation for piston at wall burning condition were obtained. Moreover, the finite element analysis of piston during ablation process was carried out using software ANSYS, and the rules of influence of wall burning on piston ablation were achieved. Meanwhile, a corresponding experiment of piston ablation was made on the diesel engine, and the calculated results accorded with the experimental results. The results show that the resolving method established can be used to simulate the ablation process of piston. The abrasion of injection nozzle, which leads to bigger gas temperature and wall heat transfer coefficient of gas on piston throat in a wide crank angle range, may cause ablation failure of piston. Meanwhile, the ablation amount firstly increases and then decreases with the increase of diameter of injection nozzle, and peaks when the diameter increases by 15%. The ablation amount increases with the ablation time, but the speed of ablation reduces slowly.

Key words: diesel engine; piston; injection; wall burning; ablation

随着社会需求的提高和柴油机技术的发展,柴油机正向高速和高功率密度的方向发展^[1-2],但是柴油机大幅度的强化导致柴油机缸内最高温度达到 $1800\sim 2600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[3],导致和燃气直接接触的活塞热负荷迅速增加。到目前为止,活塞的最高温度已经超过 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$,甚至超过铝合金活塞材料的熔点,造成活塞烧蚀等失效破坏的发生,严重影响柴油机的正常工作。

国内外对各种材料的烧蚀进行了许多研究,但从总体上看,对烧蚀的研究主要是集中在非金属材料方面,对金属材料的烧蚀研究公开报道的文献较少,并且主要是集中在激光烧蚀金属方面,对火焰烧蚀金属的研究则更少^[4-14]。目前,对柴油机活塞烧蚀的研究主要集中在对烧蚀原因的简单分析及预防措施方面,对活塞烧蚀的机理研究、数值模拟以及试验研究方面则几乎为空白。因此有必要对活塞的烧蚀进行深入研究,掌握活塞烧蚀的规律,为活塞热负荷的改善提供解决途径和方法。

针对某型高强度柴油机在运行中出现的活塞喉口处烧蚀现象进行了综合分析。利用软件 AVL FIRE 对该型柴油机进行燃烧特性的数值模拟,进而确定该型柴油机在活塞烧蚀工况下活塞表面的热边界条件;运用软件 ANSYS 对活塞烧蚀进行有限元分析,从而得出活塞的烧蚀规律。

1 传热烧蚀机理

本文针对活塞常用的铝合金材料进行烧蚀分析。发生在铝合金活塞表面的烧蚀主要包括两部分:一是热烧蚀,如材料的熔化、蒸发(升华)等;二是机械剥蚀,包括缸内高速气流对材料表面冲刷和侵蚀引起的质量损失。本文只考虑材料的热烧蚀,忽略机械剥蚀。将烧蚀过程分为2个阶段来处理:第1阶段为预热阶段,过程开始以常热流密度对活塞加热,将活塞表面温度提升到熔解温度。第2阶段为烧蚀阶段,在该阶段中,假设被烧蚀掉的材料快速离开活塞表面,烧蚀的活塞表面时刻暴露在加热环境下。伴随着烧蚀过程,其热量一部分由活塞的熔解潜热吸收带走,一部分向活塞内部导热传递,烧蚀界面的温度为材料的熔解温度且保持不变^[15-16]。

柴油机工作时,若燃油的喷射直对活塞顶部,不易挥发的油滴在顶部表面持续燃烧从而将造成活塞顶部烧蚀。针对该型柴油机(主要性能参数如表1所示)活塞喉口处出现的烧蚀现象进行分析研究,发现发生烧蚀的活塞对应的气缸所用喷油

器喷孔变大,分析原因是喷油器使用时间过长后造成喷孔磨损、直径被扩大,导致射程增加,使油束直接喷到了活塞的喉口处,在油滴被射到喉口以后,这些成分一边吸热,一边附着在喉口缓慢燃烧,从而形成活塞喉口处的近壁燃烧,若活塞喉口温度超过金属材料的熔点,便会导致烧蚀。

表1 某型柴油机的主要性能参数

Table 1 Main performance parameters for a type of diesel engine

参数	数值
转速/(r/min)	2500
单缸功率/kW	100
升功率/(kW/L)	50
最高燃烧压力/MPa	18
压缩比	15

2 柴油机性能计算及活塞传热边界条件的确定

利用软件 AVL FIRE 进行柴油机性能计算,对活塞热负荷计算中的传热边界采用第3类边界条件,即要已知边界的传热系数与环境温度。

2.1 性能仿真模型的建立和验证

利用软件 AVL FIRE,建立该型柴油机燃烧性能仿真模型;依据原机活塞发生近壁燃烧工况的台架试验测得的主要性能数据,选择合适的性能仿真模型并进行参数校核设置(喷油器喷孔参数调整到与原机喷油器喷孔磨损变大后的参数相同),为了保证性能计算结果的准确性,将计算结果与所采集的实际缸内压力进行比较,对性能仿真模型参数进行调整。图1为某一工况时计算结

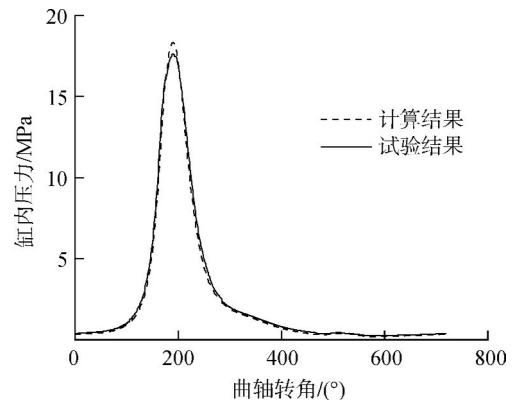


图1 计算结果与试验结果比较

Fig. 1 Comparison of calculated results and experimental results

果与试验结果的比较,从中可以看出,计算结果与试验结果在曲线形状上基本相同,表明所建立的模型是合理的,能够比较真实地模拟柴油机的实际工作情况;以此模型为基础模拟分析柴油机缸内喷雾与燃烧等过程,得到缸内温度等随曲轴转角的变化曲线,为柴油机活塞烧蚀计算提供边界条件。

2.2 性能计算和活塞表面传热边界条件

图 2 为由软件 AVL FIRE 计算出的在活塞压缩上止点后曲轴转角为 18° ,无近壁燃烧(喷油器喷孔参数调整到与原机正常喷油器喷孔参数相同)和有近壁燃烧两种工况燃烧室质量分数场、温度场及传热系数场分布,图 3 为无近壁燃烧和有近壁燃烧两种工况活塞喉口附近燃气瞬时温度和瞬时壁面传热系数随曲轴转角的变化曲线。由图 2、图 3 可知,在有近壁燃烧工况,燃油以高压雾状形式撞击喉口位置,在喉口位置堆积了大量高质量分数的雾状燃油,随后在缸内高温气流的加热下迅速燃烧并放出大量的热,由于热量是瞬间放出,来不及平衡,使得喉口附近燃气瞬时温度和瞬

时壁面传热系数大幅度提高。同时由于堆积的燃油较多,后燃量增加,其燃烧要持续一段时间,致使柴油机功率下降,热损失增加,经济性下降,排气温度增高;同时使喉口附近燃气瞬时温度和瞬时壁面传热系数在较大的曲轴转角内都保持较大的数值,比无近壁燃烧工况喉口附近燃气温度和壁面传热系数高出许多。

随着喷油器孔径的增大,活塞喉口附近壁面油膜的数量将进一步增多,经前面的分析可知,油膜数量的增多将造成喉口附近燃气温度和壁面传热系数的增大。但油膜的数量过多时,会造成喉口附近燃油的质量分数过大,燃油不能可靠地燃烧,同时由于过多的燃油参与蒸发吸热,将造成喉口附近燃气温度及壁面传热系数开始减小。图 4 所示为喷油器孔径变大后,在压缩上止点后曲轴转角为 18° 活塞喉口附近燃气温度和壁面传热系数的变化情况,从图中可以看出,当喷油器孔径增大 15% 左右时,喉口附近燃气温度和壁面传热系数达到最大,随着孔径的继续加大,燃气温度和壁面

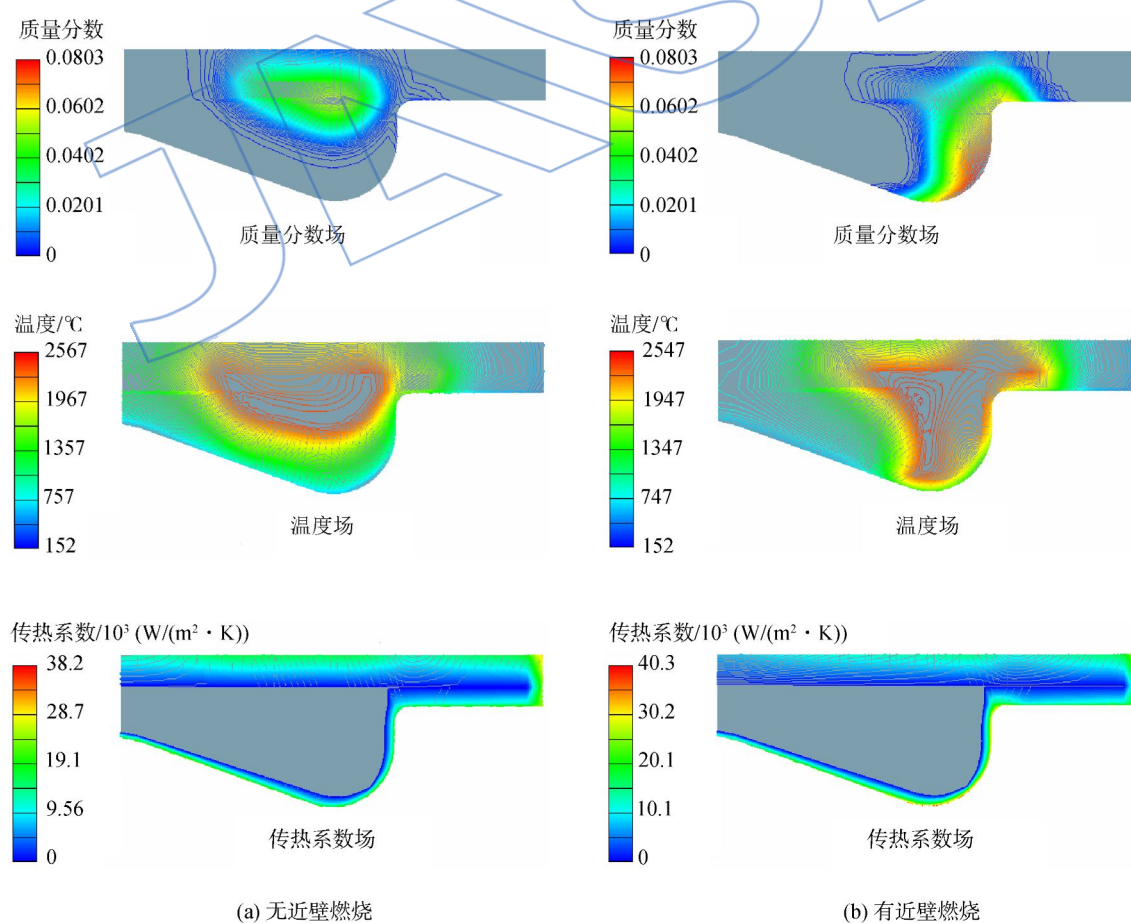


图 2 压缩上止点后曲轴转角为 18° 燃烧室质量分数场、温度场及传热系数场分布

Fig. 2 Distribution of mass concentration field, temperature field and heat transfer coefficient field of combustion chamber after top dead center and crank angle of 18°

传热系数开始急剧减小。

为保证活塞烧蚀计算的精度,需要根据其边界条件的不同,对其进行区域划分,图5表示活塞表面区域划分情况。参照上述活塞喉口附近热边界条件的确定方法对活塞表面其他区域燃气温度

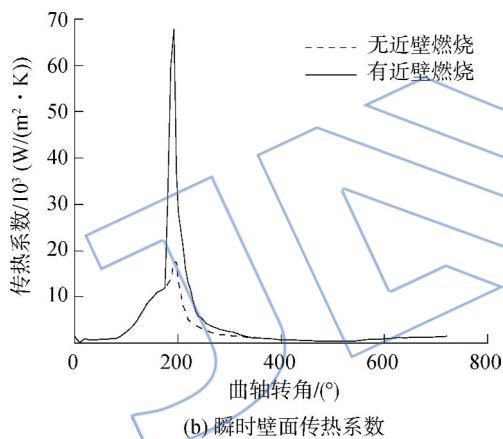
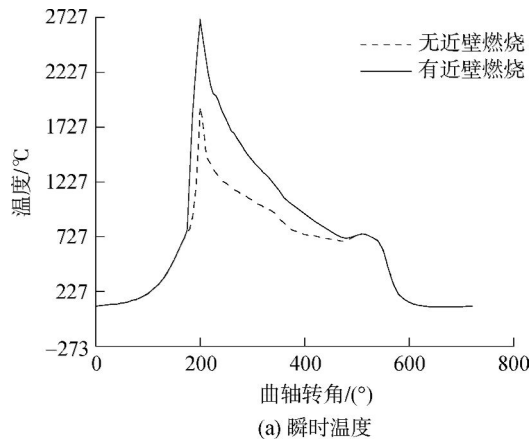


图3 活塞喉口附近燃气瞬时温度和瞬时壁面传热系数变化曲线

Fig. 3 Varying curve of transient temperature and transient wall heat transfer coefficient of gas on piston throat

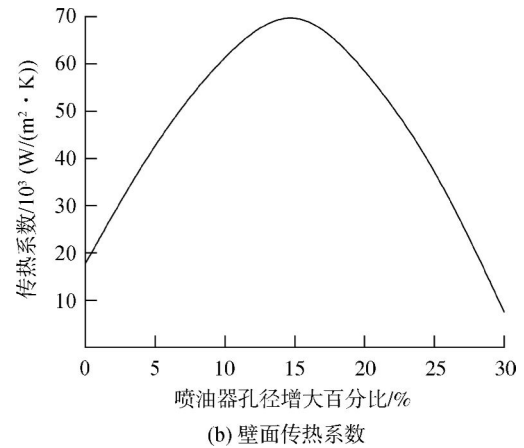
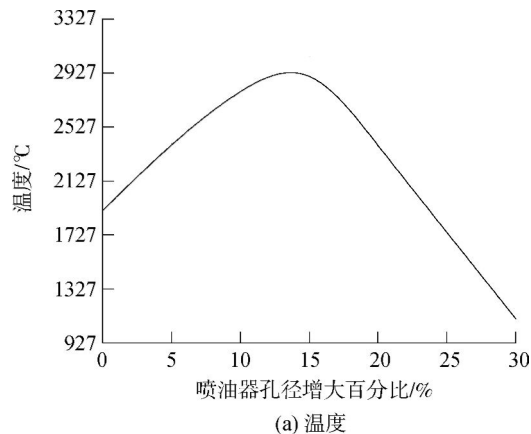


图4 活塞喉口附近燃气温度和壁面传热系数随喷油器孔径的变化曲线

Fig. 4 Varying curves of temperature and wall transfer coefficient of gas on piston throat with injection nozzle diameter

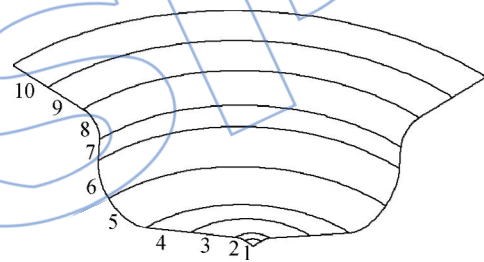


图5 活塞表面区域划分

Fig. 5 Region partition of piston surface

和壁面传热系数进行同样的求解。随后对各区域进行加权处理,得到一个循环周期活塞表面不同区域加权的平均传热系数和平均温度,如表2所示。

表2 活塞表面的传热边界

Table 2 Heat transfer boundary of piston surface

区域划分	平均传热系数/ (W/(m²·K))	平均温度/°C
1	590	720
2	630	750
3	775	790
4	990	830
5	1 650	980
6	2 690	1 100
7	3 050	1 150
8	3 650	1 160
9	1 720	920
10	410	660

2.3 活塞冷却侧传热边界条件

1) 活塞与冷却油腔之间的换热边界条件可采用公式^[17]

$$Nu_{f,r} = 2.02 Re^{0.46} Pr^{1/3} (D_e/H)^{1/3} \left(\frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (1)$$

式中 D_e 为冷却油腔的当量直径; H 为冷却油腔截面的平均高度; μ_l 为流动动力黏度; μ_w 为壁面动力黏度; Nu 为努塞尔数; Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数.

2) 活塞和冷却水之间的传热边界条件可采用 Dittus-Boelter 公式^[17]

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (2)$$

3) 该柴油机活塞内腔采用机油飞溅冷却, 活塞内腔与油雾的传热系数公式^[18]

$$h_{in} = 22260 g t_m^{0.445} \quad (3)$$

式中 g 为喷向活塞顶背侧的机油质量; t_m 为冷却侧活塞表面的平均温度.

3 活塞烧蚀有限元分析

3.1 有限元模型建立

为了便于后期进行烧蚀计算, 同时为减小有限元计算量, 将活塞近似地简化为轴对称形式的结构, 仅取二维实体元来进行计算与分析. 在保证计算精度情况下, 忽略对温度场计算影响不大的部位, 如小圆角、倒角等. 在软件 CATIA 中进行活塞二维模型建立, 导入软件 ANSYS 中采用 4 节点四边形单元 PLANE55 进行网格划分, 同时因烧蚀主要发生在活塞顶部, 所以对活塞顶部网格进行了细化.

3.2 有限元计算

基于上述计算得到的该型柴油机烧蚀工况时活塞热边界条件, 运用 ANSYS 软件对该活塞进行有限元分析, 得到活塞温度场云图. 因活塞喉口附近的燃气温度和壁面传热系数最大, 从而造成活塞喉口的温度最高, 最容易发生烧蚀失效现象. 根据活塞温度场计算结果, 运用 ANSYS 的“生死单元”功能对活塞表面单元的“生死”状态进行判断. 若表面单元达到了烧蚀或剥蚀的程度, 则调用“生死单元”的命令, 将表面单元“杀死”, 在剩余的网格单元中进行传热计算, 若没有达到烧蚀或剥蚀的程度, 则继续使用原先的网格单元进行传热计算.

从开始加热到活塞喉口表面温度达到熔点 (560°C) 发生烧蚀用了 33 s. 随着时间的推移, 活

塞喉口处逐渐发生烧蚀, 但活塞喉口表面温度始终保持不变, 活塞内部的温度变化由活塞表面向活塞底部扩散, 活塞底部温度逐渐升高, 其烧蚀过程如图 6 所示 (约定烧蚀开始时时间为 0 s).

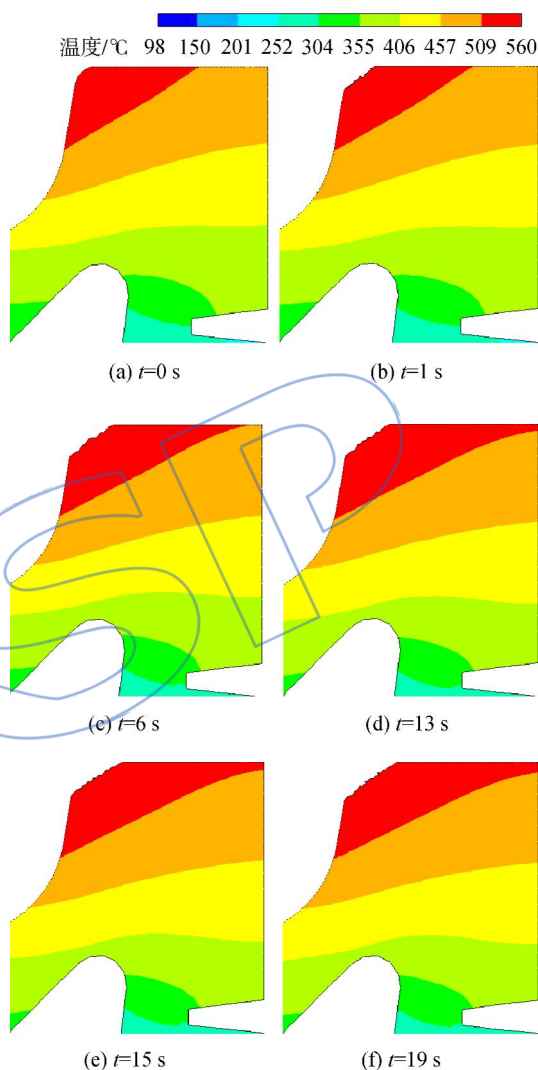


图 6 活塞喉口烧蚀过程

Fig. 6 Ablation process of piston throat

图 7 为计算得出的有近壁燃烧工况活塞喉口烧蚀量 (用面积表示) 随着烧蚀时间的变化关系, 由图 7 可知, 烧蚀量随着烧蚀时间的增大而增大, 但是烧蚀的速度在缓慢减小. 这主要有两方面的原因: ①随着活塞喉口的逐渐烧蚀, 活塞喉口处的面积逐渐减小, 其吸收的总热量逐渐减小, 导致烧蚀速度下降; ②活塞喉口处的逐渐烧蚀造成活塞喉口与冷却油腔的距离逐渐减小, 从而使活塞喉口向冷却油腔传递的热流量逐渐增大, 造成活塞喉口处的温度上升缓慢, 导致烧蚀速度下降. 当活塞的吸热量与散热量达到整体平衡时, 活塞各区域温度将保持不变, 活塞将不再发生烧蚀现象.

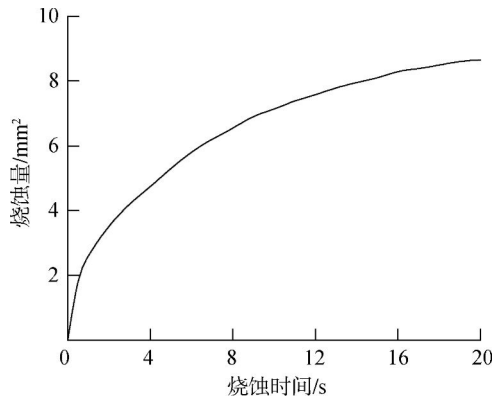


图7 烧蚀量随烧蚀时间的变化

Fig. 7 Change of ablation amount with ablation time

图7所示烧蚀量与烧蚀时间的关系只是在某一有近壁燃烧工况下得出的.图8为活塞冷却侧热边界条件保持不变、烧蚀时间均为2s、不同活塞喉口燃气温度时,烧蚀量与壁面传热系数的关系(燃气温度和壁面传热系数均以图5中活塞表面区域8为标准,其他区域也做相应的调整).从图8可以看出随着活塞喉口处燃气温度的提高,烧蚀量增幅变大,烧蚀速度加快;随着活塞喉口处壁面传热系数的增加,烧蚀速度也明显加快.综上所述可知,活塞喉口处燃气温度和壁面传热系数随着喷油器孔径的增大先增大后减小,而烧蚀量随着燃气温度和壁面传热系数的增大而增大,由此可得出活塞喉口的烧蚀量随着喷油器孔径的增大先增大后减小,在喷油器孔径增大15%时达到峰值.

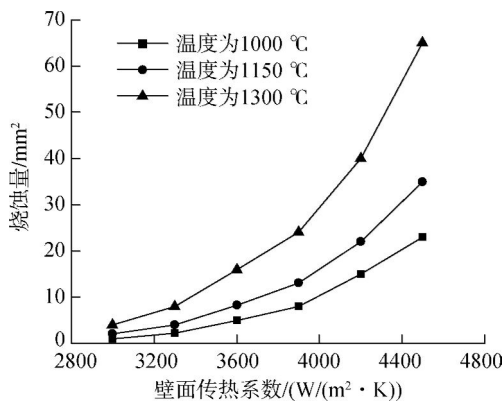


图8 烧蚀量随燃气温度和壁面传热系数的变化

Fig. 8 Change of ablation amount with temperature of gas and wall heat transfer coefficient

3.3 计算结果与试验结果对比

经计算可得,当烧蚀进行到55s后,活塞喉口处温度将保持恒定,活塞烧蚀量不再变化,活塞喉

口处的形状如图9(a)所示.同时观察该型柴油机活塞烧蚀后的外观形貌,然后让该型柴油机继续工作一段时间,再次观察活塞的外观形貌,发现活塞的外观形貌没有变化,说明活塞工作趋于稳定,不再发生烧蚀现象,图9(b)为该型柴油机活塞烧蚀后喉口处的切片图.分别对两者的烧蚀量进行测量和计算,得到烧蚀量分别为8.9 mm²与9.3 mm²,误差为4.3%,说明该计算方法可以很好地模拟活塞的烧蚀.

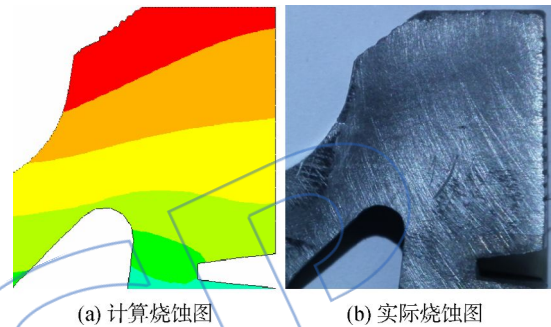


图9 活塞喉口烧蚀计算结果与实物图的对比

Fig. 9 Comparison between calculated result and physical picture of piston throat ablation

4 结论

1) 将软件 AVL FIRE 的柴油机性能仿真计算和软件 ANSYS 的有限元热分析相结合进行活塞烧蚀模拟计算,模拟计算结果与试验结果吻合良好,说明该方法的合理性,可以很好地预估柴油机活塞出现的烧蚀问题,为活塞的结构强度设计提供依据.

2) 柴油机喷油器喷孔磨损变大将导致活塞喉口处发生近壁燃烧,造成柴油机性能下降,同时使得活塞喉口处燃气温度和壁面传热系数在较大的曲轴转角内都保持较大的数值,从而使活塞发生烧蚀失效.

3) 烧蚀量随着烧蚀时间的增大而增大,但是烧蚀的速度在缓慢减小.当活塞的吸热量与散热量达到整体平衡时,活塞各区域温度将保持不变,活塞将不再发生烧蚀现象.

4) 活塞喉口的烧蚀量随着喷油器孔径的增大先增大后减小,在喷油器孔径增大15%时达到峰值.

参考文献:

- [1] 刘震涛,王斌,伍茜,等. USB摄像头在活塞热疲劳试验台中的应用[J]. 车用发动机, 2006(5): 55-57.

- LIU Zhentao, WANG Bin, WU Qian, et al. Application of USB camera in the piston thermal fatigue test[J]. *Vehicle Engine*, 2006(5):55-57. (in Chinese)
- [2] 希特凯. 内燃机的传热和热负荷[M]. 马重芳, 宋家林, 马庆芳, 等译. 北京: 中国农业出版社, 1981.
- [3] 刘畅. 铝合金活塞疲劳寿命预测与强化设计技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2011.
- LIU Chang. Research on fatigue life prediction and enhanced design technology of aluminum alloy piston[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [4] 吕德生, 宋桂明, 周玉, 等. 航天飞行器防热部件烧蚀行为的数值模拟[J]. *固体火箭技术*, 2002, 25(2): 67-69.
- LÜ Desheng, SONG Guiming, ZHOU Yu, et al. Numerical simulation of ablation behavior of spacecraft thermo-resistance components[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2002, 25(2): 67-69. (in Chinese)
- [5] 杨飒, 何国强, 李江, 等. 碳化层疏松/致密结构的三元乙丙烧蚀模型[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(5): 1172-1178.
- YANG Sa, HE Guoqiang, LI Jiang, et al. EPDM ablation model considering of porous/compact structure of charring layer[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(5): 1172-1178. (in Chinese)
- [6] Phipps C R, Turner T P, Harrison R F, et al. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO₂ single-pulse lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 1988, 64(3): 1083-1096.
- [7] Nolte S, Momma C, Jacobs H, et al. Ablation of metals by ultrashort laser pulses[J]. *Journal of the Optical Society of America: B*, 1997, 14(10): 2716-2722.
- [8] 张晓光, 刘宇, 王长辉. 双脉冲固体发动机喷管传热烧蚀特性[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(6): 1391-1397.
- ZHANG Xiaoguang, LIU Yu, WANG Changhui. Characterization of nozzle thermal and ablation response in dual-pulse solid rocket motors[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(6): 1391-1397. (in Chinese)
- [9] Carmicino C, Sorge A R. Role of injection in hybrid rockets regression rate behavior[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2005, 21(4): 606-612.
- [10] 吴兆春. 金属表面烧蚀速率与表面加热功率关系的探讨[J]. *兵工学报*, 2005, 26(4): 505-509.
- WU Zhaochun. Relation between ablating rate and surface heating power[J]. *Acta Armamentarii*, 2005, 26(4): 505-509. (in Chinese)
- [11] 王晓东. 短脉冲及超短脉冲激光对金属的烧蚀及微加工研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- WANG Xiaodong. Ablation and micromachining of metals with short and ultra-short laser pulses[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [12] Scholz T, Dickmann K, Uphoff H, et al. Influence of the interaction between nanoparticles and high brilliant laser radiation during μ s-pulses on the ablation process of metals[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(5): 717-726.
- [13] Castelo A, Nieto D, Bao C, et al. Laser backwriting process on glass via ablation of metal targets[J]. *Optics Communications*, 2007, 273(1): 193-199.
- [14] Pekker L, Gimelshein N, Gimelshein S. Analytical and kinetic modeling of ablation process[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2009, 23(3): 473-478.
- [15] 梁华. 冲压发动机补燃室内绝热层传热烧蚀特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- LIANG Hua. Research on characteristic of heat transfer and ablation of insulation in the solid rocket ramjet chamber[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- [16] 吴兆春, 刘英学, 苑安民. 恒热流加热条件下烧蚀过程的解[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(2): 76-80.
- WU Zhaochun, LIU Yingxue, YUAN Anmin. Approximate theoretic solution for ablation process heated on condition of constant heat flux[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(2): 76-80. (in Chinese)
- [17] 谭建松, 俞小莉. 高强度发动机活塞冷却方式仿真[J]. *兵工学报*, 2006, 27(1): 97-100.
- TAN Jiansong, YU Xiaoli. The simulation for cooling method of piston in high-duty engine[J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(1): 97-100. (in Chinese)
- [18] 白敏丽, 丁铁新, 吕继组. 活塞组-气缸套耦合传热模拟[J]. *内燃机学报*, 2005, 23(2): 168-175.
- BAI Minli, DING Tiexin, LÜ Jizu. Simulation study on coupled heat transfer for piston set-cylinder liner[J]. *Transactions of CSICE*, 2005, 23(2): 168-175. (in Chinese)