

冷却油腔应用纳米流体强化活塞传热的数值模拟

刘浩¹, 白敏丽¹, 王鹏¹, 王玉艳^{1,2}

(1. 大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连交通大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘 要: 活塞内冷却油腔采用高效换热性能的传热工质可以有效提高活塞的冷却效果, 因此, 将 50 nm 的 Cu 和金刚石颗粒添加到传统润滑油中, 制成纳米润滑油并应用于活塞内冷却油腔. 通过活塞组-气缸套三维耦合数值模拟研究内冷却油腔使用纳米流体对活塞组传热效果的影响. 结果表明: 与使用传统润滑油相比, 活塞内冷却油腔应用体积分数为 1%、2%、3% 的纳米 Cu 润滑油和纳米金刚石润滑油作为冷却介质, 可以有效地降低活塞温度. 纳米金刚石润滑油对活塞组的冷却效果优于纳米 Cu 润滑油.

关 键 词: 纳米流体; 活塞; 冷却油腔; 纳米金刚石; 纳米铜

中图分类号: TK 414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)02-0227-05

Numerical Simulation of Piston Heat Transfer Enhanced with Nanofluids in Gallery

LIU Hao¹, BAI Min-li¹, WANG Peng¹, WANG Yu-yan^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Traffic & Transportation School, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China. Corresponding author: LIU Hao, E-mail: liuyuhao1985@vip.qq.com)

Abstract: Using high efficient heat transfer fluids can effectively improve the cooling performance of the piston in gallery. So diamond and Cu nanoparticles (50 nm) were added into the engine oil to prepare the cooling nanofluids used as the cooling medium for piston cooling gallery. Based on the liquid-solid coupled thermodynamic method, the numerical simulation was carried out to investigate the influence of the cooling nanofluids on the heat transfer. The result shows that the temperature of piston can be reduced by using nanofluids with the volume fractions of 1%, 2% and 3%. The cooling performance of diamond nanofluids is revealed better than that of the Cu ones.

Key words: nanofluids; piston; cooling gallery; nano-diamond; nano-Cu

为了使活塞温度维持在允许的范围内, 以保证活塞工作的可靠性, 对活塞进行适度冷却十分必要. 活塞的适度冷却就是以最小的热损失使活塞的危险部位获得必要的温度降. 实践证明, 活塞冷却的效果主要取决于以下各因素的良好配合: 良好的冷却方式和流道布置, 合适的制冷剂及流量, 最佳的活塞环结构形状和尺寸参数. 其中, 改善发动机冷却结构设计, 使用更高效的传热工质, 将直接影响发动机的燃油经济性; 但是相比之下, 通过使用传热性能更高效的传热工质来提高内燃机燃油

经济性的成本要远低于研制新型内燃机的成本.

1995 年, 美国 Argonne 国家实验室的 Choi 等^[1]提出了一个崭新的概念“纳米流体”, 即以一定的比例和方式在基液中添加纳米级的金属或氧化物粒子, 形成一类新型的传热冷却介质. 由于纳米粒子具有界面与表面效应、量子尺寸效应、小尺寸效应、宏观量子隧道效应, 以及低熔点等特性, 赋予了其自身许多奇特的物理和化学性质. 纳米制备技术、纳米表征技术和纳米表面修饰技术的兴起和发展, 促进了纳米粒子在传热领域及润滑

收稿日期: 2014-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51276031, 51006015); 辽宁省教育厅科学研究项目(L2012164).

作者简介: 刘浩(1985-), 男, 河北保定人, 大连理工大学博士研究生; 白敏丽(1962-), 女, 辽宁鞍山人, 大连理工大学教授, 博士生导师.

摩擦领域的基础应用研究,特别是纳米粒子在苛刻的工况条件下展示出优异的传热性能^[2-3]和润滑摩擦性能^[4-5].为实现纳米流体在工程领域内的实际应用,需要根据工程实际情况给出合理的数值模拟方法,并建立能够准确描述纳米流体流动和传热的数理模型,为此,很多学者进行了纳米流体的 CFD 数值模拟研究.宣益民等^[6]提出了预测纳米流体对流换热系数的两种方法,并认为纳米流体的流动行为更趋近于单相流体,而并非简单固-液混合物,同时考虑了纳米流体的微运动和热扩散等因素.Wang 等^[7]通过 VOF/Lever-Set 方法,对活塞内冷却油腔换热问题进行了数值模拟,得到了不同体积分数的纳米 Cu 润滑油和纳米金刚石润滑油的对流换热系数.

本文选用体积分数分别为 1%, 2%, 3% 的纳米 Cu 润滑油和纳米金刚石润滑油(粒径 50 nm)作为冷却油腔内的传热工质,不考虑活塞底部自由喷射冷却和润滑油膜摩擦热的影响,通过活塞组-气缸套三维耦合数值模拟,研究冷却油腔使用纳米流体作为传热工质时对活塞组传热效果的影响.

1 几何模型

本文以大柴 BF6M1013 型柴油机单个气缸作为实机模型,对活塞组-气缸套耦合系统进行循环瞬态传热模拟,采用六面体单元对活塞组-气缸套耦合系统进行结构化网格划分.几何模型和网格如图 1 所示.柴油机的主要技术参数为:六缸直列,四冲程,增压中冷,行程 130 mm,缸径 108 mm,压缩比 18:1,额定转速 2 300 r/min,额定功率 220 kW,活塞行程 125 mm,连杆长度 195 mm,曲柄半径 62.5 mm.

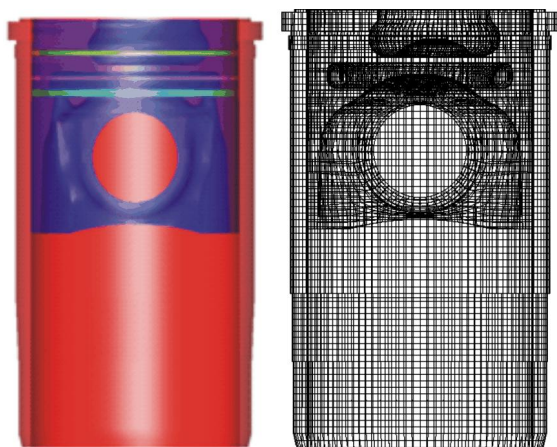


图 1 活塞组和气缸套的几何模型及网格划分
Fig. 1 Geometry model and structured meshes of the piston set and cylinder liner

2 活塞组-气缸套耦合传热模型

2.1 活塞组与气缸套的导热方程

活塞的导热方程:

$$\frac{\partial t_p}{\partial \tau} = \alpha_p \left(\frac{\partial^2 t_p}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{y} \frac{\partial t_p}{\partial y} + \frac{\partial^2 t_p}{\partial x^2}, \quad (1)$$

气缸套的导热方程:

$$\frac{\partial t_L}{\partial \tau} = \alpha_L \left(\frac{\partial^2 t_L}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{y} \frac{\partial t_L}{\partial y} + \frac{\partial^2 t_L}{\partial x^2}. \quad (2)$$

式中: α_p 和 α_L 分别为活塞与气缸套的热扩散率.

内燃机运动接触部件活塞组与气缸套间的传热关系是通过活塞组与气缸套间相对运动的边界单元来进行判定和表示的,其边界条件采用它们之间的耦合传热关系通过迭代计算而确定.将润滑油膜的传热关系简化成一维导热热阻^[8],以此来实现活塞组与气缸套之间的传热联系.根据此假设,活塞组与气缸套的传热关系为

$$q_{p-L} = \frac{\lambda_{oil}}{\delta_{oil}} (T_p - T_L). \quad (3)$$

式中: δ_{oil} 和 λ_{oil} 分别为活塞组与气缸套间润滑油膜的厚度和导热系数; T_p 和 T_L 分别表示活塞组和气缸套相对运动边界的温度.

2.2 润滑油膜的能量方程

讨论流体润滑问题,可以忽略流体流动时的动能和势能变化,流体的能量变化仅是温度的函数;假定流体处于层流稳定状态,所有的变量不随时间变化,忽略沿活塞环周向的流动和热惯性.根据假设,润滑油膜的传热微分方程^[9]可以写成

$$\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}. \quad (4)$$

式中: ρ 为润滑油密度; κ 为润滑油的导热系数; u 为活塞组与气缸套的相对速度; c_p 为润滑油的定压比热容.

对式(4)沿 z 方向在 $(0, h)$ 区间积分得

$$\rho c_p \int_0^h u \frac{\partial T}{\partial x} dz = \int_0^h \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dz + Q_2. \quad (5)$$

边界条件为 $T|_{z=0} = T_1, T|_{z=h} = T_2$.

式中: ρ 为润滑油密度; κ 为润滑油的导热系数; u 为活塞组与气缸套的相对速度; c_p 为润滑油的定压比热容; Q_2 为单位时间内单位面积产生的摩擦热中润滑油膜所占的部分热量; T_1 为活塞环的温度; T_2 为气缸套表面的温度.

2.3 边界条件

通过活塞组-气缸套耦合模拟方法确定传热边界条件,活塞顶面的表面换热系数和温度是随

曲轴转角变化的瞬时平均表面换热系数和燃气温度,由 GT – Power 软件计算得到;活塞内冷却油腔的表面换热系数采用 Wang 等^[7]的数值模拟数据,如表 1 所示.本文旨在单独考察内冷却油腔应用纳米润滑油对活塞组传热的影响,不考虑活塞顶底内侧喷射冷却的表面换热系数.关于活塞组和气缸套的相对运动边界,将润滑油膜的传热简化成一维导热热阻,采用耦合传热关系完成活塞组与气缸套的热关联,通过迭代算法确定其边界条件.气缸套外壁循环冷却水的温度和换热系数由 Star – CD 软件计算得出.

表 1 纳米润滑油的对流换热系数

Table 1 Heat transfer coefficients of nanofluids

冷却机油	上壁面换热系数	下壁面换热系数
	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ (增长率/%)	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ (增长率/%)
基础油	2 140	1 858
1% Cu	2 318(8.32)	1 990(7.10)
2% Cu	2 487(16.21)	2 196(18.19)
3% Cu	2 824(31.96)	2 326(25.19)
1% 金刚石	2 458(14.86)	2 039(9.74)
2% 金刚石	2 810(31.31)	2 351(26.53)
3% 金刚石	3 175(48.36)	2 598(39.83)

3 纳米流体物性参数预测模型

3.1 导热系数模型^[10]

$$\frac{\kappa_{nf}}{\kappa_f} = \frac{\kappa_p + 2\kappa_f + 2\varphi(\kappa_p - \kappa_f)}{\kappa_p + 2\kappa_f - \varphi(\kappa_p - \kappa_f)} + \frac{18\varphi H A k_B T}{\pi^2 \rho_p d_p^6} \tau. \quad (6)$$

式中: κ_{nf} 、 κ_p 和 κ_f 分别表示纳米流体、纳米颗粒和基础液的导热系数; φ 为纳米颗粒的体积分数; ρ_p 为纳米颗粒的密度; d_p 为纳米颗粒的直径; H 为总传热系数; A 为换热表面积; k_B 为玻尔兹曼常数; T 为温度; τ 为松弛时间常数.

3.2 黏度模型^[11]

$$\mu_{nf} = \mu_f \left[1 + 2.5\varphi \left(1 + \frac{8.868}{r} \right) \right]. \quad (7)$$

式中: μ_{nf} 为纳米流体的黏度; μ_f 为基础油的黏度; φ 为纳米颗粒的体积分数; r 为纳米颗粒的半径.

3.3 密度模型和比热容模型^[12-13]

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p, \quad (8)$$

$$c_{nf} = (1 - \varphi)c_p + \varphi c_p. \quad (9)$$

式中: φ 为纳米颗粒的体积分数; ρ_{nf} 为纳米流体的密度; ρ_p 为纳米颗粒的密度; ρ_f 为基础液的密度;

c_{nf} 为纳米流体的比热容; c_p 为纳米颗粒的比热容; c_f 为基础油的比热容.

根据上述纳米流体物性参数预测模型,得到不同体积分数的纳米 Cu 和纳米金刚石的物性参数如表 2 所示.

表 2 不同体积分数的纳米流体的物性参数(373 K)

Table 2 Properties of nanofluids with different volume fractions(373 K)

纳米粒子	体积分数/%	导热系数 $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	黏度 $kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$	密度 $kg \cdot m^{-3}$	比热容 $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$
Cu	1	0.161 6	0.002 47	812	1 901
Cu	2	0.174 3	0.002 54	895	1 747
Cu	3	0.187 1	0.002 61	977	1 619
金刚石	1	0.193 5	0.002 47	758	2 016
金刚石	2	0.238 1	0.002 54	786	1 948
金刚石	3	0.282 8	0.002 61	814	1 884
基础油		0.149 0	0.002 40	730	2 090

4 计算结果及分析

利用该耦合数理模型计算得到冷却油腔使用不同浓度的纳米润滑油的循环瞬态温度场,如图 2 所示.结果表明,活塞的最高温度点位于活塞燃烧室喉口边缘处,在曲轴转角(CA)为 432°左右时达到最大值.使用基础润滑油为冷却工质时,采用内冷却油腔的振荡冷却方式可以使活塞的最高温度从 666.62 K 降低到 640.3 K;使用纳米润滑油作为冷却工质时,随着纳米流体的体积分数的增加,活塞的温度得到进一步降低,当使用体积分数为 3% 的纳米 Cu 润滑油和 3% 的纳米金刚石润滑油时,活塞的最高温度分别为 635.82 K, 633.77 K.说明冷却油腔使用纳米润滑油可以有效改善活塞的热状况.由于活塞的最高温度位于活塞顶面燃烧室喉口边缘,与高温高压燃气直接接触并与冷却油腔距离较远,冷却油腔应用纳米流体对活塞最高温度的冷却效果有限.从图 2 中无法清晰看出纳米流体强化传热的效果,故从活塞中部向下截取,采用固定温标来观察纳米流体强化传热的效果,如图 3 和图 4 所示.从图中可以较为清晰地看出,随着纳米流体体积分数的增加,靠近冷却油腔附近的部位热负荷有明显的降低.

体积分数为 3% 的纳米润滑油强化传热的效果最明显,为进一步考察两种纳米流体对活塞传热的影响,从活塞喉口边缘、顶面中心和第一道活

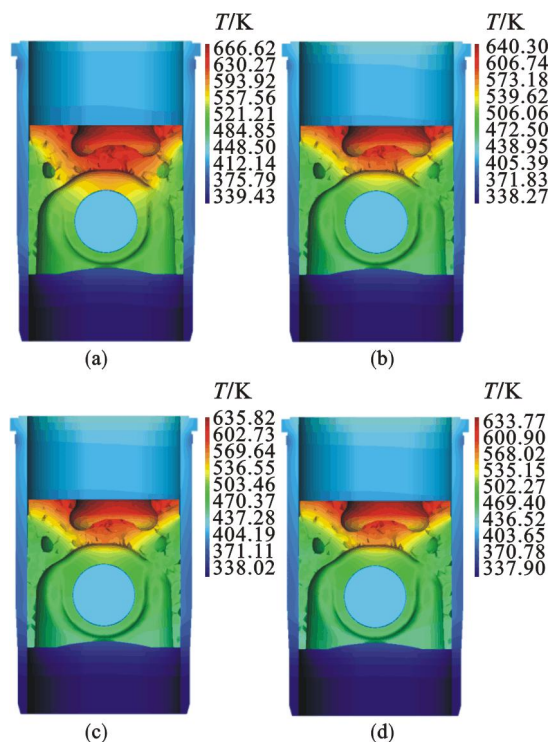


图 2 冷却工质对耦合系统温度场的影响
(432°C 自由温标)

Fig. 2 Effect of nanofluids on temperature fields of the coupled system (432°C)

(a)—无冷却油; (b)—基础油;
(c)—3% Cu; (d)—3% 金刚石.

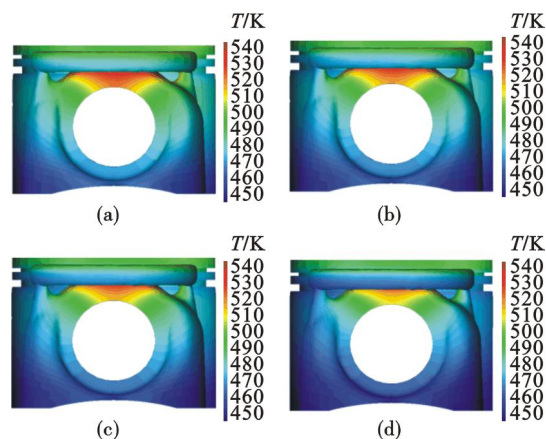


图 3 纳米 Cu 润滑油对活塞温度场的影响
(432°C 固定温标)

Fig. 3 Effect of nano-copper lubricants on temperature fields of the coupled system (432°C)

(a)—基础油; (b)—1% Cu;
(c)—2% Cu; (d)—3% Cu.

塞环处分别选取一点,绘制一个周期内瞬时温度历程曲线,如图 5~图 7 所示. 使用不同冷却工质时各关键点的温度随曲轴转角变化趋势呈现一致趋势,但纳米流体的加入明显强化了各点的传热效果. 选取一个瞬态循环内活塞部分关键点(喉口边缘、活塞顶面中心、活塞顶底中心、第一道活

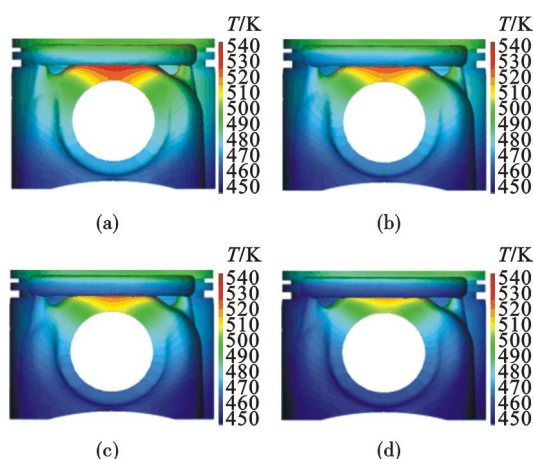


图 4 纳米金刚石润滑油对活塞温度场的影响
(432°C 固定温标)

Fig. 4 Effect of nano-diamond lubricants on temperature fields of the coupled system (432°C)

(a)—基础油; (b)—1% 金刚石;
(c)—2% 金刚石; (d)—3% 金刚石.

塞环、冷却油腔上壁面和下壁面)的温度计算平均温度,如图 8 所示. 结果表明,相比于无冷却油而言,内冷却油腔使用基础油作为传热工质时,各关键点温度分别降低了 26.8, 40.65, 42.95, 15.91, 41.13 和 51.98 K,说明具有内冷却油腔的强制冷却方式可以明显改善活塞的热负荷,对活塞顶部和冷却油腔效果尤为明显. 使用体积分数为 3% 的纳米 Cu 润滑油为传热工质时,可以使各关键点的温度进一步降低,分别为 5.85, 8.81, 9.31, 3.47, 9.06 和 11.14 K;而使用体积分数为 3% 的纳米金刚石润滑油则可使各关键点的温度分别降低为 8.52, 12.83, 13.55, 5.05, 13.20 和 16.19 K. 说明纳米金刚石润滑油的传热效果要优于纳米 Cu 润滑油的传热效果. 冷却油腔使用纳米润滑油可以有效降低活塞的热负荷,提高其工作可靠性.

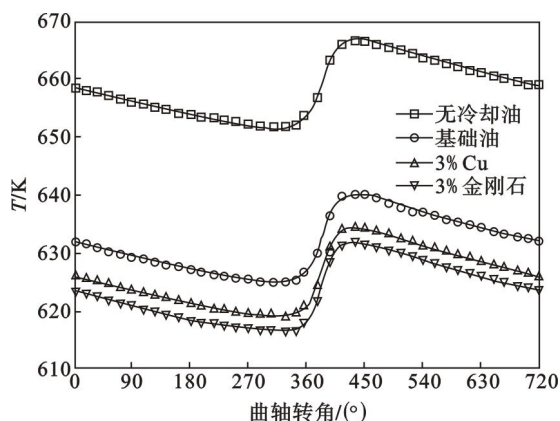


图 5 活塞喉口边缘点瞬时温度曲线

Fig. 5 Transient temperature curves at the throat of piston combustion chamber

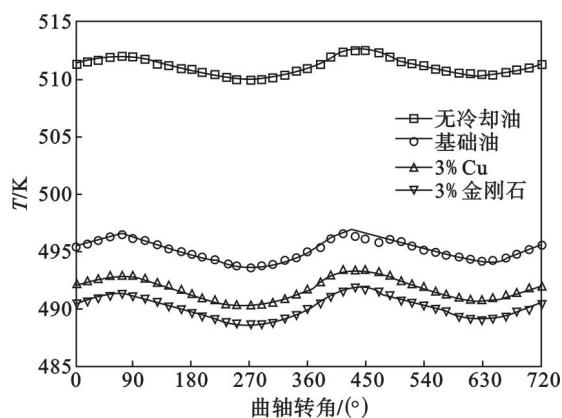


图6 第一道活塞环瞬时温度曲线
Fig. 6 Transient temperature curves on the first piston ring

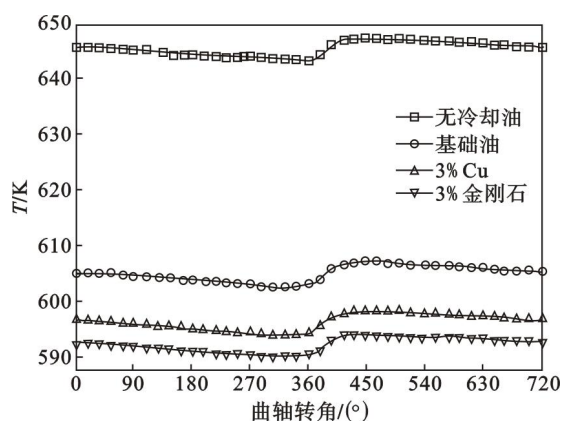


图7 活塞顶面中心瞬时温度曲线
Fig. 7 Transient temperature curves at piston top center

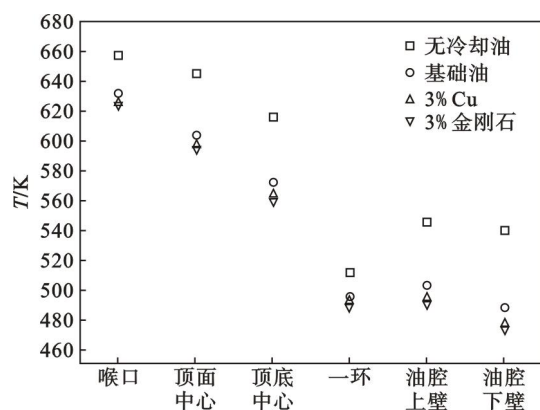


图8 活塞关键点一个周期内瞬态平均温度
Fig. 8 Average temperatures of key points of piston within a transient cycle

5 结 论

具有内冷却油腔的强制冷却方式可以明显降低活塞的热负荷,而将纳米 Cu 润滑油和纳米金刚石润滑油作为冷却油腔内的传热工质,可以进一步提高活塞的传热性能,且其传热能力随着粒

子体积分数的增加而增大. 纳米金刚石润滑油的传热效果要优于纳米 Cu 润滑油.

参考文献:

- [1] Eastman J A, Choi U S, Li S, et al. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids [C]// MRS Proceedings. Pittsburgh, 1997, 457: 3-11.
- [2] Leong K Y, Saidur R, Kazi S N, et al. Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator) [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30 (17/18): 2685-2692.
- [3] Pan T S, Zhang Y, Huang J, et al. Particle size effect on thermal conductivity of AlN films with embedded diamond particles [J]. *Applied Physics: A*, 2014, 114 (3): 973-978.
- [4] Chou C, Lee S. Tribological behavior of nanodiamond dispersed lubricants on carbon steels and aluminum alloy [J]. *Wear*, 2010, 269 (11/12): 757-762.
- [5] Peng D, Kang Y, Chen S, et al. Dispersion and tribological properties of liquid paraffin with added aluminum nanoparticles [J]. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2010, 62 (6): 341-348.
- [6] 宣益民, 李强. 纳米流体能量传递理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 132-140.
(Xuan Yi-min, Li Qiang. Energy transfer of nanofluids: theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2010: 132-140.)
- [7] Wang P, Li J Z, Bai M L, et al. Numerical simulation on the flow and heat transfer process of nanofluids inside a piston cooling gallery [J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2014, 65 (4): 378-400.
- [8] 白敏丽, 沈胜强, 陈家骅, 等. 燃烧室部件耦合系统循环瞬态传热模型的研究 [J]. *内燃机学报*, 2000, 18 (1): 100-103.
(Bai Min-li, Shen Sheng-qiang, Chen Jia-hua, et al. Cyclic transient heat transfer model of coupled systems in combustion chamber [J]. *Transactions of Csice*, 2000, 18 (1): 100-103.)
- [9] Nakai H, Ino N, Hashimoto H. Effects of film temperature on piston-ring lubrication for refrigeration compressors considering surface roughness [J]. *Journal of Tribology*, 1998, 120 (2): 252-258.
- [10] Xuan Y, Li Q, Zhang X, et al. Stochastic thermal transport of nanoparticle suspensions [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100 (4): 043507-6.
- [11] Peng X. Performance in high temperature condition based on vehicular cooler [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [12] Jang S P, Choi S U S. Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26 (17/18): 2457-2463.
- [13] Lee J, Mudawar I. Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50 (3/4): 452-463.