

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.10.009

变海拔条件下柴油机缸盖热状态变化规律研究

张博文,刘震涛*,张宇,陈思南,俞小莉

(浙江大学动力机械及车辆工程研究所,浙江杭州310027)

摘要:针对实际高原场景下,部分柴油机出现了缸盖局部烧蚀的问题,对不同海拔条件下柴油机缸内传热过程及其对发动机缸盖热状态的影响进行了研究,通过仿真手段计算得到了不同海拔条件下缸盖火力面的温度场分布情况。结合高原实机试验的具体数据,在确定缸盖热侧的边界条件时考虑了两种情况,分别是仅考虑对流换热以及同时考虑了对流和辐射换热的情况。通过对比两种边界条件下的仿真结果,分析研究了缸盖温度场随海拔高度的变化规律及其成因。研究表明,缸内对流传热量随海拔的上升逐渐下降,4 500 m海拔缸盖最高温度点温度较平原下降6.2%;缸内辐射和对流的传热总量随海拔高度的上升而上升,4 500 m海拔缸盖最高温度点温度较平原上升15.6%,说明了缸内辐射对换热产生的影响。

关键词:变海拔;缸盖;仿真;辐射;热状态

中图分类号:U464.231;TH165

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)10-1203-05

Changing regularity of diesel cylinder head's thermal state under variable altitude condition

ZHANG Bo-wen, LIU Zhen-tao, ZHANG Yu, CHEN Si-nan, YU Xiao-li

(Power Machinery and Vehicular Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at some diesel engine cylinder head partial ablation in plateau, the heat transfer process in cylinder of diesel engine and cylinder head thermal state under variable altitude condition was investigated, and temperature fields of the cylinder head under different altitudes were gotten by simulation. Boundary conditions of the bottom side of cylinder head were gotten by numerical calculation in condition of only considered the effect of convection and considered the effect of both convection and radiation according to real machine experiment. The regularity of cylinder head temperature field changing with altitude under two kinds of boundary conditions was compared. The results indicate that the convective heat transfer would reduce when altitude increases. If only considers the effect of convection, the highest temperature in cylinder head at an altitude of 4 500 meters would fall by 6.2% when comparing with the plain. The amount of heat transfer would go up when altitude increases and the highest temperature in cylinder head at an altitude of 4 500 meters would rise by 15.6% when comparing with the plain. And it also show the effects of radiation on the heat generates in the cylinder.

Key words: variable altitude; cylinder head; simulation; radiation; thermal state

0 引言

我国地域辽阔,高原、山地分布广阔,3 000 m海拔以上的高原约占全国总面积的26%^[1]。根据目前国内外学者的研究结果^[2-4],柴油机运行在高原地区时所表现的性能下降主要有:功率下降、油耗上升、碳烟排放恶化、后燃现象严重、热负荷增大等。

此外,在实际的高原场景下,部分柴油机出现了缸盖烧蚀的情况。因此,本研究通过对变海拔条件下对应机型的缸盖的热状态分析,摸清缸盖局部温度过高的规律和原因,为进一步研究高原条件下的柴油机缸内传热机制提供指导。

从发动机发展初期到现在,对发动机传热问题的研究很多是以实验为基础的,即测量出有关参数后,代

收稿日期:2016-03-03

作者简介:张博文(1992-),男,辽宁沈阳人,硕士研究生,主要从事车辆及发动机热管理方面的研究。E-mail:zbw892292164@163.com

通信联系人:刘震涛,男,副教授,硕士生导师。E-mail:liuzt@zju.edu.cn

入相关公式进行计算^[5-7]。随着计算机技术的飞速发展,对发动机传热仿真模拟计算的研究越来越多。早在 1985 年,浙江大学俞小莉等^[8]就对缸套内表面稳态传热的边界条件进行了理论研究,并得到缸套边界计算的经验公式;2011 年,北京理工大学的向长虎、张卫正等^[9]通过对一台直喷式柴油机的多维仿真,验证了一个基于瑞利散射理论分析柴油机缸内炭烟辐射传热的理论模型;2013 年,大连理工大学周祺^[10]采用 Fluent 软件对三维的十六缸整体冷却水模型和单缸的缸盖—缸套—冷却水耦合传热模型进行仿真计算为大型柴油机冷却水流动和传热模拟提供了一个高效精确的方法;2015 年,吉林大学高鹏^[11]对柴油机主要受热零部件缸套-活塞进行传热仿真,以活塞-缸套之间相互耦合的子系统作为传热模型为设计优化和结构改进提供理论支持;2016 年,王银等^[12-13]利用简单管道强制对流过冷沸腾试验数据对 3 种沸腾传热模型进行了标定,并对模型的计算结果进行了比较。

本研究用仿真手段获得不同海拔条件下受热样品的温度场情况。火力面的边界条件由仅考虑对流换热以及考虑对流和辐射换热的缸内数值计算分别得到。笔者通过观察结果,了解变海拔条件下缸盖的温度场分布情况,分析缸盖温度场随海拔变化规律的情况及成因,并通过对比方式分析辐射对传热情况的影响。

1 整机共轭传热模型分析

1.1 整机共轭传热模型

由于柴油机结构复杂、工况范围较广,整机共轭传热数值计算模型十分庞大,输入参数和影响因素众多。考虑到时间成本和计算精度的双重要求,需要对数学模型进行合理的简化。对于缸盖部分,针对每个稳定工况,假设冷却液入口的压力和流速均保持为恒定值。

柴油机整机共轭传热模型,其主要控制方程组包括:缸内湍流燃烧方程组、缸内瞬态传热模型、固体导热模型以及冷却液侧流动传热控制方程组等。下面仅将重要的方程作简单梳理。

(1) 固体导热模型

燃烧室组件固体区域的导热均可由如下方程描述:

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x_i}\right] + \Phi_v \quad (1)$$

式中: λ —导热系数; ρ —固体密度; C_p —固体比热容; Φ_v —单位体积的发热功率。

材料物性均考虑了其随温度变化的非线性效应。

(2) 流固交界面共轭传热模型

在柴油机整机共轭传热模型中,流固交界面上的热流和温度均相等,即:

$$T_w|_{\text{solid}} = T_w|_{\text{fluid}}, \quad q_w|_{\text{solid}} = q_w|_{\text{fluid}}, \\ -\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)|_{\text{solid}} = h(T_w - T_f)|_{\text{fluid}} \quad (2)$$

式中: q_w —交界面的热流密度; n —壁面外法线; h —对流换热系数; T_w, T_f —交界面和主流区域流体的温度。

(3) 湍流壁面函数

近壁面的对流换热系数可按照下式计算(具体参数说明略):

$$h = \frac{q_w}{T_p - T_w} = \frac{\rho C_p c_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{Pr_t \left[\frac{1}{k} \ln(E y_{p,\eta}^p c_\mu^{1/4} k_p^{1/2}) + P \right]} \quad (3)$$

(4) 湍流经验公式

燃烧室壁面、水套壁面以及活塞内冷油腔等位置的换热系数还可按照如下经验公式施加(对缸内传热而言其展开式即为 Woschni 公式等):

$$Nu = cRe^n Pr^m \quad (4)$$

零维模型的数值计算在 GT-Power 软件中完成,根据试验机型的结构参数在 GT-Power 软件中建立的图形化模型如图 1 所示。

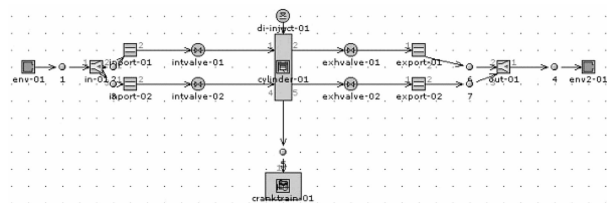


图 1 单缸柴油机的 GT-Power 模型

模型由两个进气门、一个活塞缸套组、一个转速控制模块、两个排气门组成。本研究将整机高原试验获得的转速、负荷、进气压力、进气温度、喷油提前角等基本参数作为边界条件输入 GT-Power 软件中进行计算。计算收敛后可以从结果文件中得到不同工况下缸内燃气的瞬时压力 p 和温度 T 。考虑辐射换热增加的情况,本研究选取了不同的经验公式在零维模型中计算了换热系数 h 随曲轴转角的变化曲线,并求取了平均换热系数 h_g 。

1.2 火力面边界条件计算结果

应用上述模型,本研究选取从海平面到 4 500 m 不同海拔高度,根据实验情况设定边界条件,通过 GT-Power 软件对该机型的缸内情况进行仿真,即可得到火力面的相关参数。并选取 3 700 m 和 4 500 m 海拔的减油工况,通过减油增大空燃比,观察减油工况下的热状态分布。仅考虑对流传热的缸盖火力面参数如表 1 所示。

表 1 火力面参数(仅考虑对流传热)

海拔/m	$h/(W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ K)$	T/K
4 500	323	1 055
4 500(减油)	305	1 051
3 700	368	1 071
3 700(减油)	355	1 068
3 000	400	1 079
2 000	435	1 090
1 000	468	1 099
0	502	1 110

考虑辐射传热的缸内传热情况较为复杂,本研究中通过 Fluent 缸内三维仿真模拟得出不同海拔下缸内燃烧情况,计算出缸内生成的碳烟质量分数如图 2 所示。

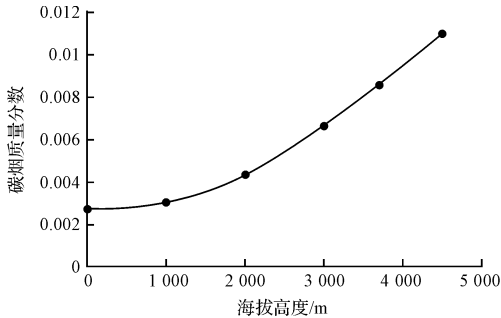


图 2 不同海拔下的碳烟质量分数

同时笔者通过 Siegel 经典模型的伽马函数关系计算辐射热流:

$$\Phi = \left[1 - \frac{15}{\pi^4} \Gamma \left(3, 1 + \frac{k}{c_2} \varphi_v LT \right) \right] A_w \sigma T^4 \tag{5}$$

辐射热流计算结果如图 3 所示。

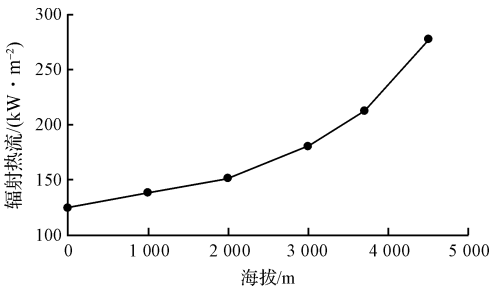


图 3 不同海拔下的碳烟辐射热流

本研究将辐射热流叠加到原对流换热量上,通过牛顿冷却公式换算,先得到总热流密度,最后得到最终的传热系数及温度。考虑对流以及辐射传热的缸盖火力面参数如表 2 所示。

表 2 火力面参数设置

海拔	$h/(W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ K)$	T/K
4 500	819	1 474
4 500(减油)	779	1 465
3 700	725	1 429
3 700(减油)	682	1 409
3 000	652	1 395
2 000	563	1 352
1 000	514	1 329
0	502	1 323

2 缸盖有限元模型的建立

2.1 缸盖模型的建立

本研究使用 Pro/E 软件对原机型的缸盖及水套几何模型建模,几何模型如图 4 所示。

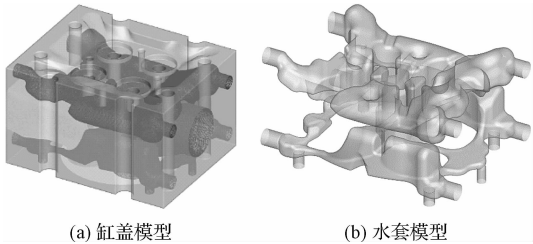


图 4 原机型缸盖的几何模型

2.2 缸盖模型网格划分

本研究对参数化模型采用四面体网格划分。将模型采用基本尺寸为 1 mm~2 mm 进行网格划分。缸盖模型网格如图 5 所示。

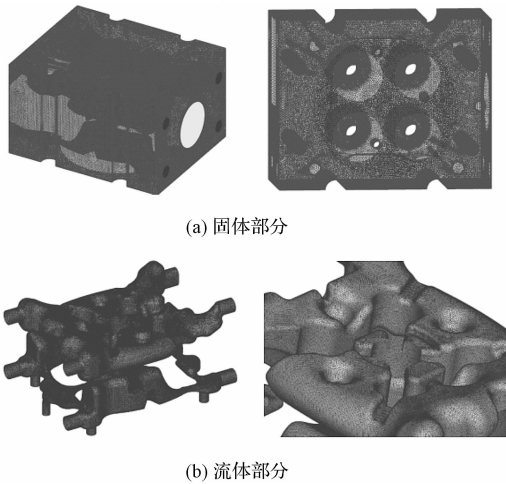


图 5 缸盖模型网格

3 仅考虑对流传热的仿真

3.1 边界条件的确定

该仿真只考虑转速 2 200 r/min 下的不同海拔的情况。由于在高原上出现烧蚀的缸盖为铝制缸盖,固体材料均选用铝。根据高原模拟台架实验的实际参数及部分经验值,部分边界参数统一设定如下:

流体材料选用水。进气道壁面温度 300 K;进气道壁面传热系数 $300 W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ K$;排气道壁面温度 300 K;排气道壁面传热系数 $700 W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ K$;进水口流速 2 m/s;湍流强度 5%;水力直径 0.01 m;温度 360 K;排水口回流湍流强度 4%;回流水力直径 0.02 m;温度 370 K。

不同海拔高度下的火力面参数由 GT-power 仿真获得,如表 1 所示。

3.2 缸盖的温度场仿真结果

采用 Fluent 进行仿真计算,缸盖模型的温度场计算结果如图 6 所示。

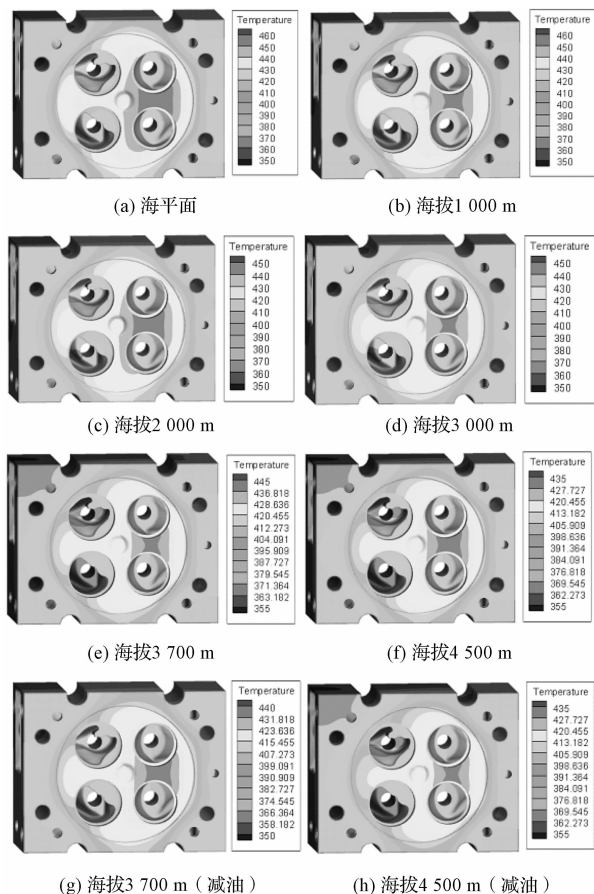


图 6 2 200 r/min 转速下各海拔高度温度场分布情况

从图 6 中可看出,缸内最高温度点出现在火力面排气道侧鼻梁区,且缸盖最高温度点温度随着海拔增加逐渐下降,从平原条件下的 470.29 K,到 4 500 m 海拔时下降至 441.28 K。减油工况的温度稍低。

4 考虑对流及辐射传热的仿真

4.1 边界条件的确定

该仿真只考虑 2 200 r/min 转速下的不同海拔的情况。固体材料均选用铝,流体材料选用水。部分边界参数统一设定如下:进气道壁面温度 300 K;进气道壁面传热系数 $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}$;排气道壁面温度 300 K;排气道壁面传热系数 $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}$;进水口流速 2 m/s;湍流强度 5%;水力直径 0.01 m;温度 360 K;排水口回流湍流强度 4%;回流水力直径 0.02 m;温度 370 K。不同海拔高度下的火力面参数,由缸内三维仿真以及 GT-power 仿真获得,如表 2 所示。

4.2 缸盖的温度场仿真结果

本研究采用 Fluent 进行仿真计算,缸盖模型的温度场计算结果如图 7 所示。

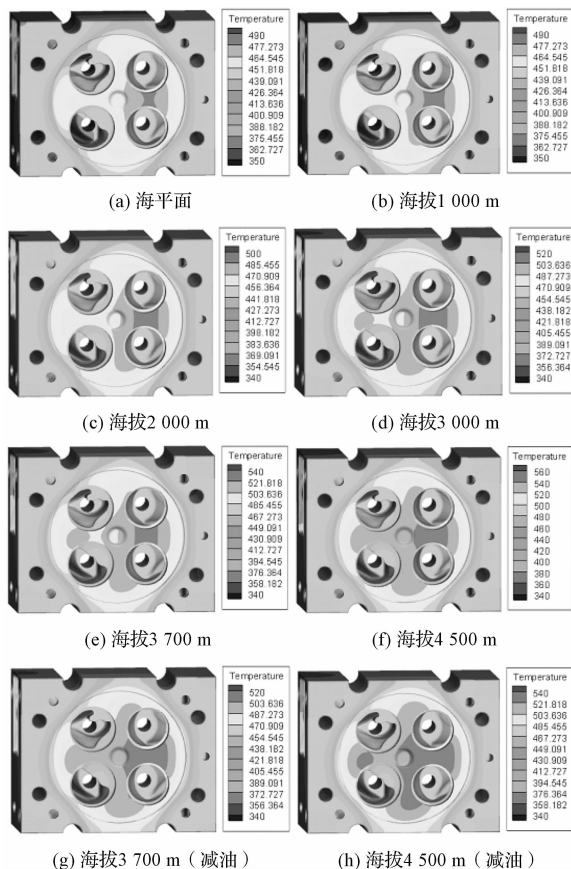


图 7 2 200 r/min 转速下各海拔高度温度分布情况

从图 7 中可看出,缸内最高温度点出现在火力面排气道侧鼻梁区,且最高温度点温度逐渐上升,从平原条件下的 492.62 K,到 4 500 m 海拔时上升至 569.3 K。减油工况的温度稍低,整体趋势与实际缸盖情况相符。

5 对比分析

5.1 辐射对传热结果影响对比

本研究选取以上各海拔高度下的非减油工况的缸盖最高温度点进行对比,结果如图 8 所示。

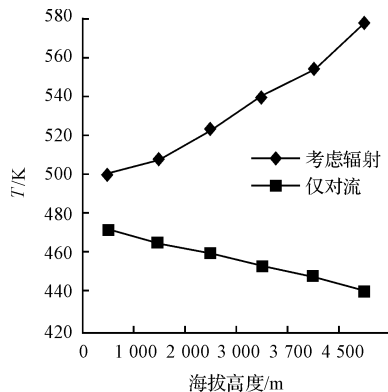


图 8 各海拔高度下的最高温度点对比

由图 8 中可看出,仅考虑缸内对流传热的情况,缸盖最高温度点温度随着海拔增加逐渐下降,从平原条件下的 470.29 K,到 4 500 m 海拔时下降至 441.28 K。但从实际情况看,最高温度点的温度是随着海拔高度的上升而增加的。仿真结果不实的主要原因是由于没有考虑辐射对缸内传热的影响。随着海拔高度的上升,导致空燃比下降,燃烧愈加不充分,因而对流传热逐渐减少,缸盖温度下降。

而考虑辐射的缸内传热情况随着海拔增加,最高温度点温度逐渐上升,从平原条件下的 492.62 K,到 4 500 m 海拔时上升至 569.3 K,整体趋势与实际情况相吻合。其原因即是由于碳烟的大量增加导致了辐射量的巨大增幅,致使总的传热量大大增加。

5.2 减油与非减油工况

本研究选取考虑辐射的减油工况的缸盖最高温度点进行对比,结果如图 9 所示。

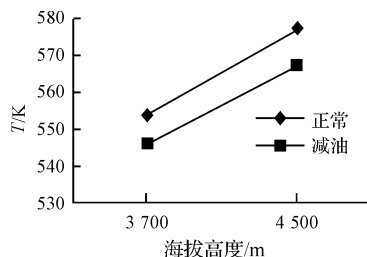


图 9 减油工况与非减油工况最高温度点对比

本研究选取减油工况的原因在于海拔过高的条件下空燃比过高,柴油不完全燃烧的比例较大,因此减少油量调节空燃比。仿真结果如图 9 所示。

6 结束语

本研究对变海拔条件下的柴油机缸盖的热状态进行了仿真,把仅考虑对流换热以及考虑对流和辐射换热的仿真计算结果作为边界条件。结果表明:

(1)变海拔条件下,缸内对流传热量随海拔的上升逐渐下降,缸盖最高温度点温度逐渐下降。从本仿真来看,从平原条件下的 470.29 K,到 4 500 m 海拔时下降至 441.28 K,下降 6.2%。其原因是空燃比下降引起的燃烧不充分所致;

(2)变海拔条件下,考虑辐射和对流的缸内传热总量随海拔的上升逐渐上升,缸盖最高温度点温度逐渐上升。从本仿真来看,从平原条件下的 492.62 K,

到 4 500 m 海拔时上升至 569.3 K,上升了 15.6%。其原因是由于碳烟的大量增加导致了辐射量的巨大增幅,因此致使总的传热量大大增加。

本研究通过仿真手段得到了不同海拔高度下缸盖表面的热状态分布,结果反映了随着海拔升高缸盖温度上升的规律及原因,为进一步探明变海拔条件下柴油机缸内辐射对机体热状态的影响以及高原条件下的柴油机缸内传热机制提供了依据,对于缸内传热模型的改进和分析具有指导意义。

但仍存在一些不足之处,如缸内的对流与辐射的耦合模型仍有改进的空间,考虑更多转速下的情况以及瞬态工况等。以上所提问题,在接下来的研究阶段还会作进一步的完善。

参考文献 (References):

- [1] 张海雷. 柴油机变海拔涡轮增压技术研究[D]. 北京:清华大学机械工程学院,2008.
- [2] 刘瑞林,刘宏威,秦 德. 涡轮增压柴油机高海拔(低气压)性能试验研究[J]. 内燃机学报,2003,21(3):213-216.
- [3] 孙 崎,张云飞. 工程机械用柴油机高原运行性能的研究[J]. 内燃机工程,2001,22(2):34-39.
- [4] 陈贵升,沈颖刚,兰 阳,等. 不同大气压下直喷式柴油机的性能研究[J]. 拖拉机与农用运输车,2009,36(1):82-84.
- [5] 姚 波,潘克煜,石科峰,等. 柴油与碳酸二甲酯混合燃料的燃烧与排放特性研究[J]. 内燃机学报,2004,21(2):101-105.
- [6] YÜKSEL F, CEVİZ M A. Thermal balance of a four stroke SI engine operating on hydrogen as a supplementary fuel[J]. *Energy*,2003,28(11):1069 - 1080.
- [7] 李晓勇,何静华,张 虎. 热平衡测试过程中现场条件的制约因素及其克服措施[J]. 轻金属,2001(7):17-19.
- [8] 俞小莉. 高速风冷柴油机气缸体内表面稳态传热边界条件的研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,1986.
- [9] 向长虎,张卫正,原彦鹏,等. 柴油机缸内炭烟辐射传热的理论模型[J]. 北京理工大学学报,2011,31(2):136-139.
- [10] 周 祺. 柴油机冷却液流动及流固耦合传热的仿真研究[D]. 大连:大连理工大学能源与动力学院,2013.
- [11] 高 鹏. 柴油机缸套—活塞瞬态传热仿真分析[D]. 太原:太原理工大学机械工程学院,2015.
- [12] 王 昊,方贤德,王 润,等. R717 管内流动沸腾传热关系式评价分析[J]. 流体机械,2015,43(4):80-87,69.
- [13] 王 银,欧阳光耀,张 萍,等. 基于沸腾传热的柴油机耦合传热研究[J]. 舰船电子工程,2016,36(4):154-158.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

张博文,刘震涛,张 宇,等. 变海拔条件下柴油机缸盖热状态变化规律研究[J]. 机电工程,2016,33(10):1203-1207.

ZHANG Bo-wen, LIU Zhen-tao, ZHANG Yu, et al. Changing regularity of diesel cylinder head's thermal state under variable altitude condition[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(10):1203-1207.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>