

文章编号:1671-6833(2018)04-0025-05

氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体 对氢发动机散热影响研究

罗亚萍, 邱兆文

(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘要:采用高导热性材料氧化石墨烯与水和乙二醇基液配比成纳米流体,研究该纳米流体对氢内燃机散热的影响规律.对比分析纳米流体的热物性随氧化石墨烯体积分数的变化规律,并利用 AVL FIRE 软件对氢内燃机冷却水套进行网格划分和三维数值模拟计算,得到整机冷却水套在冷却液为氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体(乙二醇体积分数为 10%,氧化石墨烯体积分分数分别为 0%、1%、2%、5%)时的速度分布、热流量变化以及压力损失等信息.结果表明,随着氧化石墨烯体积分数的增大,纳米流体的换热能力不断增强,冷却水腔总热流量逐渐增大;然而以氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体作为冷却介质会引起水套进出口总压降增大,导致冷却系统水泵功率的增加.

关键词:氧化石墨烯;纳米流体;氢内燃机;数值模拟;散热性能

中图分类号: U464 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.04.004

0 引言

与传统燃料内燃机相比,氢内燃机以其清洁、高效等优势备受关注^[1],仅有的排放污染物 NO_x 也通过多种手段予以降低^[2],然而目前也面临许多技术性问题,如早燃、爆燃、回火等异常燃烧的现象^[3].研制高导热率、换热性能好的冷却介质对提高氢内燃机的工作性能具有十分重要的意义.

近年来,纳米流体这种新型传热工质由于其较好的物理性能(较低的表面张力、比基液略高的黏度、显著增加的热导率等)、流变性能以及较强的对流换热能力,受到众多科学家的关注^[4]. Maïga 等^[5]将 Al₂O₃ 水纳米流体应用到热管中.李强等^[6]将 Cu-水纳米流体应用到航天器热控系统中.基于纳米流体的高导热系数,Choi 等^[7]提出将纳米流体作为车辆热管理的新一代冷却介质. Leong 等^[8]将 Cu-乙二醇纳米流体作为发动机的冷却液,增强散热器的传热. 邬胜伟等^[9]测定了水基-碳纳米管纳米流体冷却特性曲线,发现随碳纳米管含量的增加,纳米流体最大冷却速度逐渐增大.然而自从石墨烯这一新型材料被发现以来,由于其优秀的导热性,导热系数高达

5 300 W/(m·K),优于 Cu、CuO、Al₂O₃、ZnO、SiC、金刚石以及碳纳米管等其他常见纳米粒子^[10-12],使得国内外大量学者开始探究石墨烯纳米流体. Ghosatloo 等^[13]制备了质量分数为 0.01% ~ 0.05% 的石墨烯-水纳米流体.

石墨烯纳米颗粒的添加大幅提升了基液的导热性能,石墨烯为层片状结构,具有更大的比表面积,对过冷度抑制作用更强^[14],所以笔者尝试将氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体作为氢内燃机冷却系统中的传热工质,并通过数值模拟方法研究该纳米流体对内燃机散热性能的影响,从而提供一种能够满足更高热负荷内燃机冷却要求的新型换热介质.

1 纳米流体热物性模型的建立

1.1 纳米流体导热系数理论模型

与纯液体相比,纳米流体的导热性能得到大幅提升,原因可能为:一是纳米颗粒的添加改变了液体的固有性质,使液-液变成液-固两相悬浮液,改变了纳米流体内部的能量传递方式,强化了能量的传递效率;二是在固液界面上,液体分子的排列比在液体中的排列更加规则,通过和晶体的热行为类比,规则结构可以增加导热

收稿日期:2017-06-10;修订日期:2017-12-21

基金项目:陕西省自然科学基金研究计划(2017JM7007);中央高校基本科研业务费专项资金资助(310822173702)

通信作者:邱兆文(1975—),男,江苏徐州人,长安大学副教授,博士,主要从事汽车排放控制研究,E-mail: qzw@

率;三是从微观尺度来看,纳米流体中的颗粒受到液体分子的作用力而作无规则运动,形成并促进了纳米流体内部的扰动,加速了纳米流体内部能量的传输。

针对添加纳米粒子改变基液结构这一观点,Maxwell 提出了适用于体积份额非常小的粒子悬浮液的均质理论模型,在此模型中忽略了粒子与粒子、粒子与液体分子之间的相互作用。

$$\frac{k_n}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \varphi(k_f - k_p)}, \quad (1)$$

式中: k 表示导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; φ 是纳米颗粒体积分数; n 、 p 、 f 分别表示纳米流体、纳米颗粒和基液。

而 Chu 给出了适用于石墨烯纳米流体导热系数的计算模型(Chu Model)^[15],该模型考虑了石墨烯纳米颗粒的长度、厚度、平面度和界面热阻对纳米流体导热系数的影响,其表达式为:

$$\frac{k_n}{k_f} = \frac{3 + 2\eta^{2\varphi} \left[k_f \left(\frac{2R_k}{L} + 13.4\sqrt{t} \right) \right]}{3 - \eta\varphi}, \quad (2)$$

式中: η 为石墨烯纳米颗粒平面度; R_k 为界面热阻; L 为粒子长度; t 为粒子厚度。

1.2 纳米流体比热容、密度、黏度理论模型

针对纳米流体密度的理论模型选择下式作为氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体密度的计算模型:

$$\rho_n = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p. \quad (3)$$

纳米流体的比热容的模型同密度模型原理相同:

$$C_n = \frac{(1 - \varphi)\rho_f C_f + \varphi\rho_p C_p}{\rho_n}. \quad (4)$$

关于黏度模型,当粒子份额浓度超过 0.02 时,Einstein 公式可能会低估纳米流体的黏度,在粒子的体积分数不太高时(小于 0.05),Brinkman^[16]将 Einstein 公式扩展,得到下列计算公式:

$$\mu_n = \mu_f \frac{1}{(1 - \varphi)^{2.5}}. \quad (5)$$

笔者运用上述物性公式(1)~(5)进行计算,得出不同浓度的氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体(乙二醇体积分数为 10%)在温度为 363.15 K 时所对应的热物性值,如表 1 所示.随氧化石墨烯体积分数的增加,纳米流体的密度逐渐增加,比热容不断减小,黏度逐渐增大,热系数逐渐增大,与未添加氧化石墨烯纳米粒子相比,氧

化石墨烯体积分数为 5% 的纳米流体导热系数增加 22.5%,具体变化趋势见图 1。

表 1 氧化石墨烯纳米流体热物性

Tab.1 Thermal properties of graphene oxide nanofluids

$\varphi/\%$	$k_n/$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot$ K^{-1})	$\rho_n/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$C_n/$ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot$ K^{-1})	$\mu_n/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot$ s^{-1})
0	0.623	972.9	4.208	3.523×10^{-4}
1	0.642	985.6	4.132	3.611×10^{-4}
2	0.661	998.2	4.058	3.699×10^{-4}
5	0.721	1 036.2	3.847	3.963×10^{-4}
7	0.763	1 061.6	3.715	4.139×10^{-4}

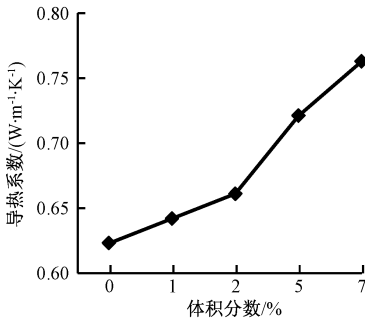


图 1 纳米流体导热系数随氧化石墨烯体积分数变化图

Fig.1 The change for nanofluids' thermal properties with the volume fraction of GO

2 内燃机冷却水套的三维数值模拟

笔者选用单缸 59 kW 柴油机改造的氢发动机进行研究,运用 SolidWorks 和 AVL FIRE 软件对冷却系统进行网格划分和三维数值模拟,分别采用乙二醇体积分数为 10%、氧化石墨烯体积分数为 0、1%、2%、5% 的纳米流体作为传热介质进行仿真计算,分析比较不同浓度的传热介质的流动、传热情况以及对氢内燃机散热性能的影响。

2.1 实体模型的建立

建立如图 2 所示的氢内燃机冷却系统的三维几何模型,其中冷却水腔与气缸盖的几何模型不仅结构尺寸、形位关系准确完整,而且可实现二者的完全耦合.将缸盖划分为 7 个火力面区,如图 2(a)所示,对应水腔内侧表面的 11 个 selections 均取均匀的壁面厚度,厚度值均列在表 2 中。

具体建模过程中,在保证对数值计算结果不产生影响的前提下,可以对结构进行适度简化,但重要位置(如缸盖冷却腔“鼻梁”区)不作任何处理。

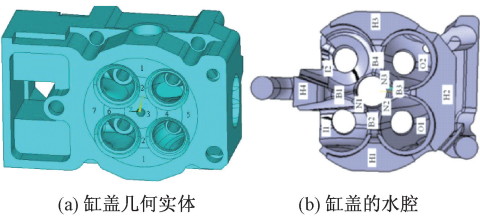


图2 冷却系统三维实体模型

Fig.2 The 3D solid model of cooling system

表2 边界厚度表

Tab.2 Boundary thickness table

区域	厚度/mm	区域	厚度/mm
H1	9.0	N1	26.0
H2	9.0	N2	26.0
H3	9.0	N3	26.0
H4	11.0	O1,O2	4.5
B1	18.0	I1	4.5
B2	16.0	I2	7.5
B3	18.0	外表面	6.0
B4	18.0	气缸缸套	7.0

2.2 计算网格的划分

冷却水套的网格模型采用结构化的六面体网格,且对局部区域(喷油器座、火力面和鼻梁区)进行加密,以提高计算精度.将冷却水腔头部内侧体网格共划分了26个 selections,由于缸盖区域温度较高且结构复杂,以及考虑到求解器设置时边界条件的设置需要,在缸盖内表面建立了对应于各个火力面的 selections,共16个,见图3.

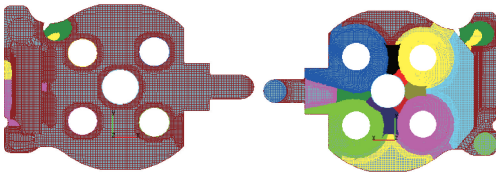


图3 氢内燃机水套网格模型

Fig.3 Water jacket mesh model of hydrogen internal combustion engine

2.3 求解方法与边界条件

均相流模型广泛应用于纳米流体的模拟中且与实验结果对比具有较高的精度^[17],故笔者采用均相流进行数值模拟.在模拟过程中,认为纳米流体在水套内的流动状态是三维不可压缩黏性的湍流运动,在高 Re 数流动区域即湍流充分发展区域,也即冷却水套模型的中心区域,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,而在低 Re 数的贴近壁面的薄层中甚至呈现层流状态,由于黏性作用大于湍流脉动的影响,所以运用标准壁面函数和复合壁面函数来计算,并在求解过程中将壁面与湍流核心区的相应变

量联系起来.压力与速度的耦合求解利用 SIMPLE 算法处理;设置空间离散化时,压力选用标准方程 (stander),其余选用二阶逆风方程进行求解.

以 2 000 r/min 的转速为计算工况点,计算过程中设定速度(由进口流量 1.02 kg/s 换算)为入口边界条件,入口温度为 363.15 K,出口采用 1.12 MPa 的压力边界.以缸盖火力面各分区的表面对流传热系数和温度作为第三类热边界条件^[18],见表3.

表3 火力面不同分区的第三类边界条件

Tab.3 Third boundary conditions for different zones of fire surface

缸盖火力面 分区	单缸 59 kW 柴油机改造的氢发动机	
	换热系数/ ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	燃气温度/ $^{\circ}C$
1	1 549.5	731
2	1 239.6	731
3	1 033.0	731
4	929.7	731
5	826.4	731
6	774.8	731
7	723.1	731

3 CFD 模拟计算及结果分析

3.1 纳米流体速度场分析

图4显示了气缸盖的壁面速度场分布,由于缸盖的形状比较复杂,因此局部位置出现流速过低的情况,气缸盖的顶部靠近进水口的区域流速较高,同时缸盖内侧比外侧流速高.对比分析纳米流体和纯水,水套速度场的整体分布基本不变.

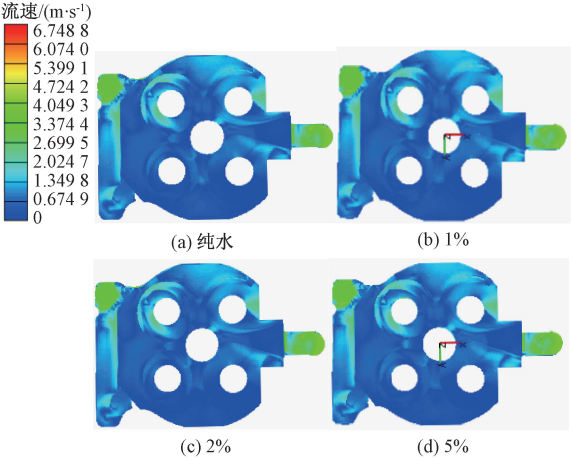


图4 纯水与氧化石墨烯纳米流体气缸盖速度场

Fig.4 Velocity field of cylinder head of water and graphene oxide nanofluids

3.2 纳米流体换热量分析

根据下式求解水腔整体热流量,以此探究纳米流体的导热性能:

$$Q = C_n A \rho_n v \Delta T,$$
 (6)

式中: A 为进口面积, m^2 ; v 为进口流速, m/s ; ΔT 为进出口平均温差.

比较分析氧化石墨烯体积分数为 1%、2%、5% 的纳米流体以及纯水的整体换热总量,从图 5 可以看出,随着氧化石墨烯粒子含量的增加,纳米流体的换热性能随之增强. 与传统介质纯水相比,以缸盖为例,体积分数达到 5% 的氧化石墨烯纳米流体的整体热流量为 9.917 kJ/s,较纯水提高了 12.6%.

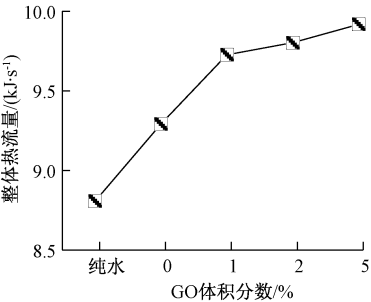


图 5 氧化石墨烯体积分数不同的纳米流体整体热流量比较

Fig.5 Comparison of overall heat flux of graphene oxide nanofluids with different volume fractions

3.3 纳米流体压力场分析

根据图 6 结果显示,从进口到出口,压力逐渐降低. 由于加入了氧化石墨烯纳米粒子,纳米流体的黏度和密度增大. 一方面黏度的增加导致流动时的摩擦阻力变大,引起冷却腔进出口间总压降增大;另一方面在进口流量不变的情况下,随着石墨烯纳米流体密度的增大,进口流

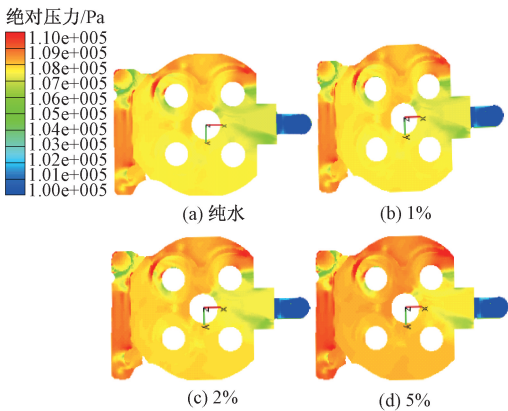


图 6 不同体积分数氧化石墨烯纳米流体压力场分布

Fig.6 Pressure field distributions of graphene oxide nanofluids with different volume fractions

速不断降低,进出口总压降减小. 在综合作用下,压降随着纳米粒子体积分数的增大而增大,结果如图 7 所示.

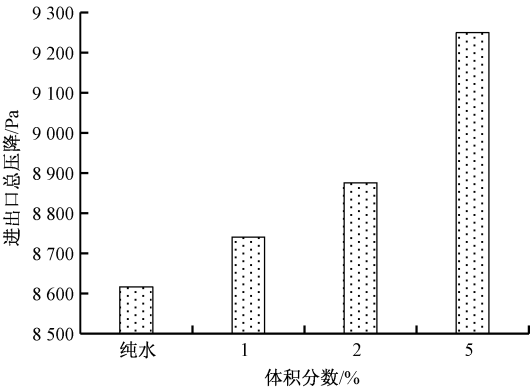


图 7 冷却腔进出口总压降随氧化石墨烯体积分数的变化

Fig.7 The change of total pressure drop of the cooling chamber with the volume fractions of graphene oxide

传热工质为纯水时,水套进出口的总压降为 8 616 Pa;而以体积分数为 5% 的氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体作为冷却液时,总压降为 9 250 Pa,较纯水增加了 7.4%.

4 结论

- (1) 通过对氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体热物性变化规律的分析,氧化石墨烯的添加可使纳米流体热导率得到大幅提高.
- (2) 当介质为水和纳米流体时,水套速度场的整体分布基本不变.
- (3) 在进口流速和温度固定的情况下,随着氧化石墨烯体积分数的增大,内燃机的散热性能不断增强,冷却水腔总热流量逐渐增大.
- (4) 以氧化石墨烯-水和乙二醇混合基纳米流体作为冷却介质引起水套进出口总压降增大,导致冷却系统水泵功率和负载的增加.

参考文献:

[1] 孙柏刚,田华宇,张冬生. 氢内燃机汽车与传统内燃机汽车的经济性比较研究[J]. 汽车工程学报, 2014,4(1): 21-27.

[2] SUBRAMANIAN V, MALLIKARJUNA J M, RAMESH A. Effect of water injection and spark timing on the nitric oxide emission and combustion parameters of a hydrogen fuelled spark ignition engine[J]. International journal of hydrogen energy, 2007, 32 (9): 1159-1173.

[3] 杨敏敏. 氢内燃机燃烧早燃回火问题[J]. 汽车实用技术, 2017(6): 150-151.

- [4] 崔文政,白敏丽,吕继组,等. 纳米流体应用于内燃机冷却水腔强化传热的导热机理分析[J]. 内燃机学报, 2013, 31(6): 557–563.
- [5] MAÏGA S, CONG T, GALANIS N. Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube[J]. Superlattices and microstructures, 2004, 35(3): 543–557.
- [6] 李强,宣益民. 航天用纳米流体流动与传热特性的实验研究[J]. 宇航学报, 2005, 26(4): 391–394.
- [7] CHOI C, YOO H S, OH J M. Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants[J]. Current applied physics, 2008, 8(6): 710–712.
- [8] LEONG K Y, SAIDUR R, KAZI S N. 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): 2685–2692.
- [9] 邬胜伟,曾效舒,黄民富,等. 水基-碳纳米管纳米流体冷却特性的影响因素[J]. 热加工工艺, 2014, 43(12): 219–222.
- [10] 叶宗标,郑伟健,太惠玲. 石墨烯-氧化钛复合敏感材料的制备与特性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(4): 49–52.
- [11] YARMAND H, GHAREHKHANI S, SHIRAZI S F S, et al. Nanofluid based on activated hybrid of biomass carbon/graphene oxide: synthesis, thermo-physical and electrical properties[J]. International communications in heat & mass transfer, 2016, 72: 10–15.
- [12] LI X, ZOU C, LEI X, et al. Stability and enhanced thermal conductivity of ethylene glycol-based SiC nanofluids[J]. International journal of heat & mass transfer, 2015, 89: 613–619.
- [13] GHOZATLOO A, SHARIATY-NIASAR M, RASHIDI A M. Preparation of nanofluids from functionalized graphene by new alkaline method and study on the thermal conductivity and stability [J]. International communication in heat and mass transfer, 2013, 42(3): 89–94.
- [14] IJAM A, SAIDUR R, GANESAN P, et al. Stability, thermo-physical properties, and electrical conductivity of graphene oxide-deionized water/ethylene glycol based nanofluid [J]. International journal of heat & mass transfer, 2015, 87: 92–103.
- [15] CHU K, LI W S, TANG F L. Flatness-dependent thermal conductivity of graphene-based composites [J]. Physics letters A, 2013, 377(12): 910–914.
- [16] BRINKMAN H C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions[J]. Journal of chemical physics, 1952, 20(4): 571–571.
- [17] BIANCO V, CHIACCHIO F, MANCA O, et al. Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes [J]. Applied thermal engineering, 2009, 29(17): 3632–3642.
- [18] 郭良平,张卫正,王长园,等. 柴油机气缸盖传热规律研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(3): 277–282.

Study on the Influence of Graphene Oxide-Water and Glycol Nanofluids on Heat Transfer of Hydrogen Engine

LUO Yaping, QIU Zhaowen

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The graphene oxide (GO) has high thermal conductivity was mixed with water and glycol to form and the influence of the nanofluids on the heat dissipation of hydrogen internal combustion engine was studied. By comparative analysis of the change regularity for nanofluids' thermal properties with the volume fraction of GO, while mesh generation and 3D numerical simulation for the cooling water jacket of hydrogen engine based on AVL Fire software, the information of velocity distribution, heat flux change and pressure loss could be obtained when coolant was GO-water and glycol nanofluids which the volume fraction of ethylene glycol was 10%, the volume fraction of graphene oxide were 0, 1%, 2% and 5%. The results showed that the heat flux gradually increases and heat transfer capability evidently enhanced while the concentration of nanoparticles increased, however it was caused total pressure increased between inlet and outlet in the cooling jacket and power loss of water pump also increased.

Key words: graphene oxide; nanofluid; hydrogen engine; numerical simulation; heat dissipating capability