

内燃机冷却系统中应用纳米流体强化传热研究综述

崔文政, 杨建国

(哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院, 威海 264209)

Review of Research on the Application of Nanofluids-Enhanced Heat Transfer in Cooling System of Internal Combustion Engine

CUI Wenzheng, YANG Jianguo

(School of Automotive Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: Internal combustion engine relies on its cooling system to take away the excess heat and control the normal operating temperatures of the core components of the combustion chamber and the lubricating oil film, wherein the heat transfer performance of the conventional cooling mediums is generally low. Nanofluids, as the new generation of enhanced heat transfer working medium, has good heat transfer performance, which is ideal for the cooling system of internal combustion engine to use it to enhance heat dissipation and improve thermal management performance. Moreover, because the heat transfer performance of the nanofluids is affected by factors such as the type, size, concentration and shape of the nanoparticles, the heat transfer amount of the cooling water chamber of the internal combustion engine can be controlled by changing these factors. This paper reviews the experimental, theoretical and computer simulation studies conducted by researchers on the thermal conductivity and convective heat transfer performance of nanofluids, as well as the application of nanofluids in enhancing heat transfer of internal combustion engine. Finally, it points out the shortcomings of the current research work, and the future work directions.

摘要: 内燃机工作时依赖冷却系统将多余热量及时带走以保证燃烧室核心部件及润滑油膜的正常工作温度。常规内燃机冷却介质导热系数偏低,而新一代强化传热工质纳米流体具有明显提升的传热性能,应用于内燃机冷却系统有利于强化内燃机传热及提高热管理性能。且由于纳米流体的传热性能受纳米粒子的种类、大小、浓度、形状等因素影响,可以通过改变这些因素控制内燃机冷却水腔的传热量。综述了国内外研究者针对纳米流体导热系数与对流换热性能开展的试验测试、理论分析和计算机模拟研究工作,以及纳米流体应用于内燃机冷却系统中强化传热的进展,最后指出当前研究工作的不足及未来工作方向。

关键词: 内燃机; 纳米流体; 强化传热; 冷却液; 冷却系统

Key words: internal combustion engine; nanofluids; enhanced heat transfer; cooling medium; cooling system

DOI: 10.13949/j.cnki.nrjgc.2020.02.011

中图分类号: TK40

收稿日期: 2019-07-29

修回日期: 2019-09-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51506038)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China(51506038)

作者简介: 崔文政(1985—),男,副教授,博士,主要研究方向为内燃机强化传热, E-mail: cuiwenzheng@hit.edu.cn;

杨建国(通信作者), E-mail: yangjianguo@hitwh.edu.cn。

0 概述

内燃机工作时,缸内燃气温度可高达 2 500 K,传给燃烧室壁面的热流可高达 10 MW/m^2 以上^[1]。为保证内燃机的可靠性,需要依靠冷却水腔内冷却介质的强迫对流换热对燃烧室部件进行强制冷却。被冷却水腔内冷却介质带走的热量约占燃料燃烧发出总热量的 10%~25%。冷却水腔的传热效果直接影响内燃机的动力性、经济性和可靠性,合理控制内燃机冷却水腔的传热过程是内燃机设计的关键问题之一。当前发动机中广泛使用乙二醇型冷却介质,其导热系数偏低,制约内燃机冷却水腔传热性能的进一步提升。采用高导热系数、传热性能好的新型传热工质代替传统冷却介质,对内燃机散热性能的提高具有重要意义。

1995 年美国 Argonne 实验室率先提出纳米流体(nanofluids, NFs)的概念,即以一定的方式和比例在常规工质中添加高导热系数的固体纳米颗粒而形成的新型传热工质^[2]。国内外学者大量的研究已经证实^[3]:相对于常规单相流体工质,纳米流体具有明显提高的导热系数,其对流换热性能有较大提升,而阻力增加并不明显;纳米流体具有良好的悬浮稳定性,不易产生磨损或堵塞管道的不良结果,适于实际应用。将纳米流体用于强化内燃机冷却系统的传热,可在不增加泵功的情况下使传热性能得到明显提升,且不会造成冷却通道的堵塞。此外,可利用纳米流体强化传热特性的可调整性,根据内燃机对传热量的需求合理地控制冷却水腔的传热量,使其满足内燃机热强度和润滑摩擦的要求^[4-5]。由此可见,以纳米流体为内燃机冷却介质进行强化传热不仅在思路与现有强化技术有很大不同,而且在传热强化的同时,阻力(泵功)更低,更有利于节能和工程应用,具有广阔的应用前景。

纳米流体强化传热的原理包括两个方面:一是其明显提高的导热系数,二是流动时由于纳米颗粒微运动等作用机制引起的进一步强化传热^[6]。由于纳米颗粒的小尺寸效应、表面效应和量子尺度效应,无论是导热还是对流换热,纳米流体表现出的传热特性均不同于常规的微米或毫米级颗粒两相流,也不符合常规两相流理论的预测。目前,无论是纳米流体的导热还是对流换热均未形成公认的完整理论。这一方面是由于纳米颗粒对强化传热的微观作用机制不易获得,另一方面是由于纳米流体强化传热的宏观物理本质不清楚。机理的不完善限制了纳米流体在内燃机强化传热中的应用进程。

目前有关纳米流体在内燃机冷却系统中应用强化传热的综述性文章还很缺乏。为此本文中从纳米流体的导热强化、对流换热强化及纳米流体在内燃机强化传热中的应用三方面进行总结,分析下一步工作开展方向,对推动纳米流体在内燃机冷却系统中真正应用具有重要意义。

1 国内外研究现状

研究者围绕纳米流体的导热系数与对流换热性能开展了大量的试验测试、理论分析和计算机模拟研究,针对纳米流体在内燃机强化传热中的应用亦有很多文献报道。

1.1 纳米流体的导热强化

研究者通过在常见传热工质(如水、醇类等)中添加各种类型纳米颗粒(如 Al_2O_3 、 CuO 、 TiO_2 等)制成纳米流体,并采用液体导热系数测试技术(如瞬态热线法、 3ω 法等)测试纳米流体导热系数。大量针对纳米流体导热系数测试的试验结果已经证实^[7-10]:纳米流体的导热系数相对基础液有较大提升,且明显高于经典固液悬浮液导热理论(如 Maxwell-Garnett 模型)的预测;试验结果还表明纳米流体的导热系数受到众多因素的影响^[11],如体积浓度,温度及纳米颗粒的材料、粒径、形状等,表现出一定的规律性及可调整性。

CuO 、 Al_2O_3 、 TiO_2 是研究者使用较多的纳米颗粒材料,研究者利用这些纳米材料制成纳米流体并测试了其导热系数。表 1、表 2、表 3 分别归纳了文献中报道的 CuO 、 Al_2O_3 、 TiO_2 纳米流体导热系数的试验测试结果,可见通过添加较低比例的纳米颗粒,即可使纳米流体的导热系数相对基础液获得较大的提升。试验结果还表明,纳米颗粒粒径越小越有利于纳米流体导热系数的提升,纳米颗粒体积浓度越大越有利于导热系数的提升,不同材料的纳米颗粒对纳米流体导热系数增大贡献程度不同。另外,近年来有不少研究者针对混合基础液(如水和乙二醇的混合液)开展纳米流体热物性研究,这种混合基础液接近于内燃机实际冷却介质的构成,研究结果表明这种混合基础液纳米流体的导热系数一般可增大 10%~20%。

研究者试图根据试验数据对经典的固液悬浮液导热系数模型(如 Maxwell-Garnett 模型)做出修正并提出一些纳米流体导热系数模型,这些模型包括 Choi 和 Yu 模型^[46]、Wang 模型^[47]、Xuan 模型^[11]、Jiang 模型^[48]、Prasher 模型^[49]、Xue 模型^[50]等。由于纳米流体的导热系数增加根源在于所添加的纳米颗粒在纳米级的作用机制,因此要想获得具有精确预测结果的导热系数模型需要首先探明其强化传热微观机理。

表 1 CuO 纳米流体导热系数最大增大比试验值

颗粒 粒径/nm	基础液	CuO 体积 分数/%	导热系数 增大比/%	参考 文献
36.00	水	5.00	60.00	[12]
24.00	水	3.41	12.00	[13]
23.00	水	9.70	34.00	[14]
33.00	乙二醇	4.00	17.00	[15]
28.60	水	4.00	36.00	[16]
33.00	水	1.00	5.00	[17]
33.00	乙二醇	1.00	9.00	[17]
29.00	水	6.00	52.00	[18]
33.00	水	4.18	16.50	[19]
33.00	水	1.00	5.00	[20]
33.00	乙二醇	1.00	9.10	[20]
29.00	水	16.00	24.00	[21]
25.00	水	7.50	32.30	[22]
27.00	水/乙二醇	8.00	24.56	[23]
55.00	水	2.00	24.00	[24]

表 2 Al₂O₃ 纳米流体导热系数最大增大比试验值

颗粒 粒径/nm	基础液	Al ₂ O ₃ 体积 分数/%	导热系数 增大比/%	参考 文献
13.00	水	4.33	32.00	[25]
33.00	水	5.00	29.00	[12]
13.00	水	4.33	32.00	[26]
38.00	水	4.30	10.00	[13]
28.00	水	5.50	16.00	[14]
29.00	乙二醇	4.00	17.00	[15]
60.40	水	5.00	23.00	[27]
38.40	水	4.00	24.00	[16]
11.00	水	1.00	9.00	[28]
47.00	水	1.00	2.00	[28]
150.00	水	1.00	0.50	[28]
10.00	水	0.50	100.00	[29]
36.00	水	10.00	30.00	[18]
38.00	水	3.00	8.00	[30]
36.00	水	6.00	28.00	[31]
47.00	水	6.00	26.00	[31]
48.00	水	1.00	4.00	[32]
20.00	水	14.60	22.00	[19]
45.00	水	4.00	13.30	[33]
282.00	水	4.00	17.70	[34]
282.00	乙二醇	3.00	16.30	[34]
36.00	水	18.00	31.00	[21]
47.00	水	18.00	31.00	[21]
15.00	水	4.00	10.10	[35]
12.00	水	4.00	5.40	[36]
10.00	水/乙二醇	3.00	11.30	[36]
50.00	水/乙二醇	3.00	10.40	[36]
36.50	水/乙二醇	8.00	17.89	[23]
13.00	水	6.00	14.50	[37]
24.40	水	6.00	18.60	[37]
40.00	水	4.00	14.40	[38]
13.00	水/乙二醇	2.00	8.40	[39]

表 3 TiO₂ 纳米流体导热系数最大增大比试验值

颗粒 粒径/nm	基础液	TiO ₂ 体积 分数/%	导热系数 增大比/%	参考 文献
27.00	水	4.35	11.60	[25]
27.00	水	4.35	11.60	[26]
40.00	乙二醇	4.00	13.00	[15]
15.00	水	5.00	30.00	[40]
34.00	水	6.80	6.00	[41]
20.00	水	2.00	4.20	[42]
10.00	水	3.00	11.40	[30]
10.00	乙二醇	3.00	15.40	[30]
34.00	水	3.00	8.70	[30]
34.00	乙二醇	3.00	12.30	[30]
70.00	水	3.00	6.40	[30]
70.00	乙二醇	3.00	7.50	[30]
25.00	水	1.00	14.40	[32]
40.00	水	2.60	6.50	[19]
15.00	乙二醇	5.00	18.00	[43]
21.00	水	3.00	7.20	[44]
13.50	水	4.00	15.10	[37]
5.00	乙二醇	7.00	19.52	[45]

分子动力学方法是一种基于牛顿力学确定论的模拟方法,能够有效揭示纳米流体处于微观层次的导热强化机制。分子动力学研究发现:纳米流体导热系数增大的机理在于微对流和颗粒表面吸附层作用^[51-52]。文献^[53-55]利用分子动力学方法研究了纳米流体的导热系数,结果表明纳米颗粒添加改变了流体的微观结构,是其导热性能显著增大的一个主要因素,另一个主要因素是纳米颗粒的不规则微运动和表面吸附作用^[53-54];并证实纳米颗粒的性质如粒径、形状、材料等对纳米流体导热系数增大程度有关键性的影响^[55]。应用分子动力学研究纳米流体的导热强化刚刚起步,目前针对纳米流体在内燃机实际工作条件下的分子动力学研究还很缺乏,如基础液为复杂分子(水和乙二醇的混合物)、内燃机实际工作温度范围、内燃机冷却水腔内部复杂几何结构和表面、内燃机高频振动等的影响。

纳米流体导热系数受到众多因素的影响(如体积浓度、温度及纳米颗粒的材料、粒径、形状等),表现出一定的规律性及可调整性,可根据内燃机对传热量的需求对纳米流体冷却介质的导热过程进行合理设计和优化,为此可借助于场协同理论中的焓耗散极值原理及温度梯度均匀化原则,研究高导热系数的固体纳米颗粒在基础液中的空间分布与导热优化问题^[56]。目前这部分研究几乎还是空白,亟需开展深入研究。

综合分析可知,纳米流体的导热系数相对常规传热工质具有明显的提升,且表现出规律性(可调整

性),如能用其作为内燃机冷却介质,将有利于内燃机燃烧室关键部件散热。当前大量研究集中在纳米流体制备和热物性测试试验及根据试验数据对经典固液悬浮液导热系数理论模型进行修正。下一步工作应针对内燃机散热实际需求设计纳米流体并对其导热系数等关键热物性参数进行试验研究,结合分子动力学模拟、场协同理论分析等进一步深入分析纳米流体的导热强化机制和优化问题,发展普遍适用的纳米流体导热系数模型。

1.2 纳米流体的对流换热强化

作为一种传热工质,纳米流体的对流换热性能和流动阻力性能至关重要。纳米流体对流换热的试验数据结果比较一致。试验研究表明^[57-58]:纳米流体传热系数相对于基础液有明显增加,并随颗粒体积浓度和雷诺数(Re)的增加而增加,而流动阻力增加并不明显。另外,与其他强化传热技术不同的是,纳米流体在湍流区对流换热性能增加更为明显,因而可以认为在所有流动状态下纳米流体均具有好的强化传热效果。

表 4 列出 Al_2O_3 -水纳米流体对流换热部分试验和数值模拟结果。这些研究结果总体上表明,在基础液中添加纳米颗粒后增加了原液体工质的对流换热性能,表征纳米流体对流换热性能的努塞尔数(Nu)随纳米颗粒体积分数的增加而增大。颗粒的性质(如粒径、形状、材料等)同样会影响纳米流体对流换热性能。不同种类纳米颗粒材料(如 CuO 、 TiO_2 、碳纳米管等)制备成的纳米流体对流换热试验结果也得到类似的结论。

表 4 Al_2O_3 -水纳米流体对流换热性能试验结果

粒径/nm	Al_2O_3 体积分数/%	Re	Nu 增大比/%	文献
13.00	1.34	$10^4 \sim 10^5$	1.07~1.30	[59]
13.00	2.78		1.24~1.35	
42.00	0.60~1.60	710~1 940	1.04~1.38	[60]
20.00	0.20~3.00	650~2 050	1.04~1.41	[61]
20.00~30.00	0.25~0.70	400~2 400	1.03~1.14	[62]
20.00	0.10~1.20	9 350~23 000	1.10~2.00	[63]

要在工程实际中应用纳米流体需要有可靠的对流换热准则式,然而纳米流体与常规流体工质相比同样表现出特殊性,导致传统的对流换热准则关联式不适用于纳米流体。研究表明:纳米流体流动换热的强化程度明显高于其导热强化程度^[11];纳米流体层流向湍流转捩的临界雷诺数小于常规流体的数值^[64];纳米流体对流换热性能的强化与很多因素有关,如导热系数、纳米颗粒的粒径、体积分数、形状、

浓度等。鉴于此,研究者利用试验数据建立了一些新的不同纳米流体对流换热系数预测模型。文献[11]中依据纳米粒子微扰动模型,通过对纳米流体对流换热试验数据进行拟合,分别得到纳米流体在层流和湍流两种流态下管内对流换热的努塞尔数关联式,式中有一些参数需要根据试验数据来确定。文献[65]在一系列假设基础上,考虑纳米颗粒与流体间的相对滑移和流体温度变化的影响,提出一种纳米流体湍流对流换热的准则关联式。

要想获得更精确的试验准则式,需要从物理本质上对纳米流体特殊的对流换热强化机理进行研究。常规的纳米流体传热系数、阻力系数试验只能给出纳米流体强化传热的最终效果,而能够揭示造成这种强化传热效果物理机制的基础试验还很少见,采用流动可视化试验技术是一种思路。文献[66]中通过纳米流体波纹管流动的可视化试验研究,发现纳米流体层流向湍流转捩的雷诺数要明显小于基础液转捩雷诺数,且随纳米颗粒体积分数的增加,流动紊乱程度明显加强。并采用电化学方法对粒径 20 nm,纳米颗粒体积分数为 2% 的 SiO_2 -水纳米流体进行测量,结果表明其质量传递系数较基础液增加了 33.6%,而其导热系数较基础液仅增加了 5.3%。这证实了纳米流体强化传热的主要原因除了由于纳米流体导热系数的增加外,更重要的是纳米流体流动特性的改变,即纳米颗粒与基础流体的相互作用强化了纳米流体质量传递。纳米流体质量传递的强化是造成纳米流体传热强化的重要原因,从纳米流体流动特性着手,开展纳米流体强化传热机制的试验研究是十分必要的。有关纳米流体流动的可视化及定量化研究工作亟待进一步深入开展。

通过分子动力学从微观角度研究纳米颗粒改变纳米流体流动特性的作用机制是获得纳米流体强化对流换热机理的另一种思路。文献[6,67]中通过分子动力学研究表明,在纳米流体以一定速度宏观流动过程中,纳米颗粒与基础液之间始终有相对平动和转动,因此它们之间存在动量交换。正是由于无数纳米颗粒在微观上的共同作用,才引起宏观上纳米流体流动及传热性能的改变。

依据场协同理论可定量地研究和解释纳米流体对流换热强化的本质原因。由于纳米颗粒的作用,纳米流体使边界层内速度场与热流场协同程度增强,相当于流动当量热源强度增加,则其对流换热能力将显著增强。而由于纳米颗粒的分布、形状、粒径等不同,在伴随流体流动过程中会使纳米流体速度

场与温度场协同程度不同,导致了纳米流体对流换热强化效果不同。研究者应用场协同理论初步开展了纳米流体强化传热的分析。文献[11]中采用格子-Boltzmann 方法计算了平板间纳米流体的流动与传热过程,应用场协同理论分析后发现近壁区的纳米流体速度矢量和温度梯度之间的夹角比水的小,表明此种情况下流体与壁面之间的换热过程被强化。文献[68-69]的研究也证实了场协同理论可用于分析纳米流体强化传热过程。

综合分析可知,目前有关纳米流体对流换热特性的试验结果比较统一,即纳米流体传热系数相对于基础液有明显增加,并随着颗粒体积分数和雷诺数的增加而增加,而流动阻力增加并不明显。传统的对流换热准则关联式不适用于纳米流体对流换热,目前尚缺少普遍适用的纳米流体对流换热准则式,需要进一步利用可视化试验、分子动力学模拟、计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟,结合场协同理论分析等方法系统地分析纳米流体强化传热的物理本质,进而建立起适用于纳米流体的对流换热准则式,推动纳米流体作为内燃机冷却介质的应用。

1.3 纳米流体在内燃机强化传热中的应用进展

鉴于纳米流体所具有的优良传热特性,研究者试图将其作为冷却介质用于内燃机冷却水腔强化内燃机的散热。

1999 年美国 Argonne 实验室最早提出将纳米流体应用于内燃机强化传热及提高车辆热管理性能的设想^[70]。文献[71]报道美国 Argonne 实验室针对重型发动机冷却,开展了利用纳米流体强化传热的研究,结果表明纳米流体优良的换热性能可使高强度发动机冷却系统尺寸和质量降低 10%,并指出利用纳米流体对内燃机冷却系统进行强化换热是内燃机高强度发展下解决换热问题的一种趋势和最有效方式。文献[72]采用数值模拟方法研究了纳米冷却液应用于 Volvo 卡车发动机强化传热的效果,结果表明在冷却系统结构不变条件下,纳米流体可有效降低燃烧室部件和冷却液本身的温度。Valvoline 公司报道了纳米流体在内燃机冷却中的应用进展,试验表明在机油中添加 1% 体积比的碳纳米管,可使导热系数提升 150%^[73]。Delphi 公司的研究表明纳米流体可用于内燃机强化传热,可以提高内燃机效率,减小冷却系统体积和质量^[74]。文献[75]用数值模拟方法研究了纳米流体在汽车散热器中应用的传热性能,结果表明纳米流体的对流换热效果明显优于单相工质,并且传热性能受到体积比、温度、流速

等很多因素的影响。文献[76]中采用数值模拟方法研究了 Al_2O_3 和 CuO 乙二醇纳米流体应用于汽车散热器的流动和传热性能,结果表明纳米流体能够明显提升对流换热性能,且性能随着颗粒体积浓度增大而提升。文献[77]中将纳米流体用于发动机冷却系统中,研究发现发动机冷却系统传热系数和换热量随着纳米颗粒的加入有所提升。文献[78]通过试验证实汽车散热器中应用 Al_2O_3 -水纳米流体能够使传热效率提升 45%。

国内方面,浙江大学试验测试了纳米流体在车用板翅式机油冷却器中的换热性能和阻力特性,发现纳米流体换热性能优于其他工质,且工作温度增加后,纳米颗粒具有自润滑作用,使流动阻力没有明显加大^[79-80]。大连理工大学采用单相流模型,开展了纳米流体对内燃机冷却系统整体三维流动和传热的数值模拟研究,结果表明纳米流体与传统工质纯水相比可以显著提高内燃机的散热性能,且同浓度 Cu -水纳米流体的传热能力好于金属氧化物-水纳米流体^[81]。由此可见采用纳米流体作为内燃机冷却系统的冷却介质,可以有效提高冷却系统的换热效果,从而有利于活塞温度的降低。文献[82]综述了现代汽车热管理系统研究,指出传统散热器的效果已经趋近极限,而在散热器中采用新一代冷却介质纳米流体冷却的潜力巨大。文献[83]采用试验方法研究了 60 nm 的氧化铝-水/乙二醇纳米流体在温度为 70 °C、80 °C 和 90 °C 时在散热器中的对流换热特性及压降特性。结果表明,这种纳米流体能使对流换热系数提高 21%,压降增加 69%。文献[84]利用 CFD 方法对不同浓度的 Cu -水纳米流体在柴油机冷却水套内的流动和换热过程进行三维数值模拟。计算结果表明,以 Cu -水纳米流体作为传热介质可以显著提高柴油机的散热性能,随着纳米颗粒浓度的增加,柴油机散热能力增强,水泵功率损失小范围增加, Cu 颗粒在水套内的平均停留时间与其浓度相关性不明显,换热效率与纳米流体的流速相关性不明显。文献[85]利用数值模拟方法分别对水、 TiO_2 纳米流体、 Al_2O_3 纳米流体和 CuO 纳米流体在发动机冷却系统中的冷却效果进行了计算,结果表明与水相比 3 种纳米流体的对流传热系数都有一定提高,泵功增加不大,采用纳米流体可增强冷却系统的换热。文献[86]中采用数值模拟分析了不同 CuO 质量分数的纳米流体在柴油机冷却水腔中的颗粒分布、速度场分布、换热总量及水套进出口之间降压。结果表明,使用纳米流体可显著提高柴油机的散热性能,随着纳米颗粒量的增加,柴油机散热能力增

强,水泵功率损失小范围增加。文献[87]通过对水基纳米流体高效传热机理的分析,提出将其应用于船舶主机缸套冷却系统的方案,并分析了其原理和可行性。文献[88]中采用三维数值仿真技术分析了金属纳米流体的强化换热效果,结果表明:体积浓度5%的铜水纳米流体局部传热系数比纯水提高了41%,同时所需泵功也有所增加。文献[89]将纳米流体应用于内燃机冷却水腔,对6缸柴油机采用整体耦合的方法,把冷却系统与内燃机固体部件当作一个耦合体,使流固边界成为内部实时边界,对内燃机在整机冷却系统中的流动与传热特性进行研究,考察不同种类、不同体积分数、不同粒径的纳米流体对内燃机冷却系统传热的影响规律,给出了整机冷却水套内冷却液的流场、传热系数、压力场及准确的温度场分布。文献[90]在乙二醇冷却液中添加 Fe_3O_4 纳米粒子作为直喷汽油机冷却液,利用CFD数值模拟研究了不同浓度纳米流体对直喷汽油机冷却水套的传热影响,计算得到冷却液的流场、压力场及壁面温度的空间分布。结果表明,与传统冷却液相比,以 Fe_3O_4 -乙二醇纳米流体作为冷却液能够提高内燃机的散热性能,水套壁面温度降低明显,且颗粒浓度越大冷却效果越好。

综合分析可知,针对纳米流体强化内燃机冷却系统散热的研究多结合数值模拟开展,真正将纳米流体冷却介质应用于内燃机冷却水腔强化传热的试验研究还不多,也缺少相关的试验数据汇总。下一步工作应重点开展纳米流体应用于内燃机的系统性试验研究工作,从而推动纳米流体作为冷却介质在内燃机冷却系统中应用。

2 未来工作方向

纳米流体导热方面,下一步工作重点在于针对内燃机散热实际需求制备纳米流体,并对其导热系数等关键热物性参数进行试验研究,结合分子动力学模拟、场协同理论分析等进一步深入分析纳米流体的导热强化机制,发展普遍适用的纳米流体导热系数预测模型。

在纳米流体对流换热方面,目前尚缺少普遍适用的纳米流体对流换热准则式,需要进一步利用可视化试验、分子动力学模拟、CFD数值模拟,结合场协同理论分析等方法系统地分析纳米流体强化传热的物理本质,进而建立起适用于纳米流体的对流换热准则式。

在纳米流体应用于内燃机冷却系统研究方面,下一步应系统地开展纳米流体应用于内燃机的试验

研究工作,从而推动纳米流体作为冷却介质在内燃机冷却系统中应用。

参考文献:

- [1] 白敏丽. 发动机燃烧室耦合传热仿真模拟及实验研究[D]. 大连:大连理工大学,1996.
BAI M L. Numerical simulation and experimental research on conjugate heat transfer within an engine combustion chamber [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 1996.
- [2] CHOI S U S, EASTMAN J A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles [C]//New York: ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 1995.
- [3] KAKAC S, PRAMUANJAROENKIJ A. Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009,52(13/14):3187-3196.
- [4] 崔文政,白敏丽,吕继组,等. 纳米流体强化内燃机冷却系统流动的基础研究[J]. 内燃机学报,2012,30(1):49-55.
CUI W Z, BAI M L, LÜ J Z, et al. Basic research on flow of nanofluids in cooling system of internal combustion engine[J]. Transactions of CSICE, 2012,30(1):49-55.
- [5] 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.
CUI W Z, BAI M L, LÜ J Z, et al. Basic research on enhancing mechanisms of heat conduction of nanofluids for its application in cooling water jacket of IC engine[J]. Transactions of CSICE, 2013, 31(6):557-563.
- [6] 崔文政. 纳米流体强化动量与热量传递机理的分子动力学模拟研究[D]. 大连:大连理工大学,2013.
CUI W Z. Mechanism of momentum and heat transfer enhancement in nanofluids by molecular dynamics simulation [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2013.
- [7] LEE S, CHOI S U S, LI S, et al. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles[J]. Journal of Heat Transfer, 1999,121(2):280-289.
- [8] XUAN Y M, LI Q, HU W F. Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids[J]. AIChE Journal, 2003,49(4):1038-1043.
- [9] ZHENG R T, GAO J W, WANG J J, et al. Reversible temperature regulation of electrical and thermal conductivity using liquid-solid phase transitions[J]. Nature Communications, 2011,2:289.
- [10] SUNDAR L S, SINGH M K, RAMANA E V, et al. Enhanced thermal conductivity and viscosity of nanodiamond-nickel nanocomposite nanofluids[J]. Scientific Reports, 2014,4:4039.
- [11] 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,2010:74-92.
- [12] ESFE M H, KARIMIPOUR A, YAN W M, et al. Experimental study on thermal conductivity of ethylene glycol based nanofluids containing Al_2O_3 nanoparticles[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015,58:728-734.
- [13] ALLEGO M J P, LUGO L, LEGIDO J L, et al. Thermal conductivity and viscosity measurements of ethylene glycol-

- based Al_2O_3 nanofluids[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2011, 6(1):221.
- [14] TENG T P, YU C C. Heat dissipation performance of MWCNTs nano-coolant for vehicle[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 49:22-30.
- [15] JOHN T, KRISHNAKUMAR T S. Experimental studies of thermal conductivity, viscosity and stability of ethylene glycol nanofluids[J]. *International Journal of Innovative Research in Science*, 2013, 2(1):611-617.
- [16] TIMOFEEVA E V, ROUTBORT J L, SINGH D. Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(1):014304.
- [17] LIU M S, LIN M C, HUANG I T, et al. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2005, 32:1202-1210.
- [18] ZENNIFER M A, ANIKANDAN S, SUGHANTI K S, et al. Development of CuO-ethylene glycol nanofluids for efficient energy management: assessment of potential for energy recovery[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 105: 685-696.
- [19] BOLEININGER J, KURZ A, REUSS V, et al. Microfluidic continuous flow synthesis of rod-shaped gold and silver nanocrystals[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2006, 8(33):3824-3827.
- [20] GALLEGO M J P, LUGO L, LEGIDO J L, et al. Enhancement of thermal conductivity and volumetric behavior of Fe_3O_4 nanofluids[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(1):014309.
- [21] HONG K S, HONG T K, YANG H S. Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(3):031901.
- [22] NAMBURU P K, DAS D K, TANGUTURI K M, et al. Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties[J]. *International Journal of Thermal Science*, 2009, 48(2):290-302.
- [23] MAIGA S E B, NGUYEN C T, GALANIS N, et al. Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2004, 35(3):543-557.
- [24] NIEH H M, TENG T P, YU C C. Enhanced heat dissipation of a radiator using oxide nano-coolant[J]. *International Journal of Thermal Science*, 2014, 77:252-261.
- [25] MURSHED S M S, CASTRO C N. Nanofluids as advanced coolants [M]//MOHAMMAD A, INAMUDDIN I. *Green solvents I: properties and applications in chemistry*. London: Springer, 2012:397-415.
- [26] BECK M P, YUAN Y, WARRIER P, et al. The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2009, 11(5):1129-1136.
- [27] SUGANTHI K S, VINODHAN V L, RAJAN K S. Heat transfer performance and transport properties of ZnO-ethylene glycol and ZnO-ethylene glycol-water nanofluid coolants[J]. *Applied Energy*, 2014, 135:548-559.
- [28] PUTRA N, SEPTIADI W N, RAHMAN H, et al. Thermal performance of screen mesh wick heat pipes with nanofluids [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 40:10-17.
- [29] JHA N, RAMAPRABHU S. Thermal conductivity studies of metal dispersed multiwalled carbon nanotubes in water and ethylene glycol based nanofluid[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(8):084317.
- [30] WANG L, FAN J. Nanofluids research: key issues [J]. *Nanoscale Research Letters*, 2010, 5:1241-1252.
- [31] GARG J, POUDEL B, CHIESA M, et al. Enhanced thermal conductivity and viscosity of copper nanoparticles in ethylene glycol nanofluid[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(7): 074301.
- [32] YU W, XIE H, CHEN L, et al. Investigation on the thermal transport properties of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles[J]. *Powder Technology*, 2010, 197(3): 218-221.
- [33] MOOSAVI M, GOHARSHADI E K, YOUSSEFI A. Fabrication, characterization, and measurement of some physicochemical properties of ZnO nanofluids[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2010, 31(4):599-605.
- [34] EASTMAN J A, CHOI S U S, LI S, et al. Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(6):718-720.
- [35] SUNDAR L S, FAROOKY M H, SARADA S N, et al. Experimental thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based low volume concentration of Al_2O_3 and CuO nanofluids[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, 41:41-46.
- [36] JUNEJA M, GANGACHARYULU D. Experimental analysis on influence of temperature and volume fraction of nanofluids on thermophysical properties [J]. *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences*, 2013, 3(5):233-238.
- [37] YU W, FRANCE D, SMITH D, et al. Nanofluids for thermal conditions-underhood heat transfer[C]//Washington DC:DOE Hydrogen Program and Vehicle Technologies Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, 2009.
- [38] TIMOFEEVA E V, YU W, FRANCE D M, et al. Base fluid and temperature effects on the heat transfer characteristics of SiC in ethylene glycol/ H_2O and H_2O nanofluids[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(1):014914.
- [39] ASADZADEH F, ESFAHANY M N, ETESAMI N. Natural convective heat transfer of Fe_3O_4 /ethylene glycol nanofluid in electric field[J]. *International Journal of Thermal Science*, 2012, 62:114-119.
- [40] SUNDAR L S, SINGH M K. Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluids in a tube and with inserts: a review [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2013, 20:23-35.
- [41] BARBES B, PARAMO R, BLANCO E, et al. Thermal conductivity and specific heat capacity measurements of CuO

- nanofluids[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014,115(2):1883-1891.
- [42] LIU M S, LIN M C, WANG C C. Enhancements of thermal conductivities with Cu, CuO, and carbon nanotube nanofluids and application of MWNT/water nanofluid on a water chiller system[J]. Nanoscale Research Letters, 2011,6(1):297.
- [43] YU W, XIE H. A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications[J]. Journal of Nanomaterials, 2012, 2012:435873.
- [44] VAJJHA R S, DAS D K. Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009,52(21/22):4675-4682.
- [45] TAYLOR R A, PHELAN P E, OTANICAR T P, et al. Applicability of nanofluids in high flux solar collectors[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2011,3(2):023104.
- [46] YU W, CHOI S U S. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2003,5(1/2):167-171.
- [47] WANG B X, ZHOU L P, PENG X F. A fractal model for the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions[J]. Progress in Natural Science, 2004,14(1):36-40.
- [48] JIANG W T, DING G L, PENG H, et al. Experimental and model research on nanorefrigerant thermal conductivity[J]. HVAC & R Research, 2009,15(3):651-669.
- [49] PRASHER R, BHATTACHARYA R, PHELANA P E. Thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluids) [J]. Physical Review Letters, 2005,94(2):025901.
- [50] XUE Q Z. Model for the effective thermal conductivity of carbon nanotube composites [J]. Nanotechnology, 2006, 17(6):1655-1670.
- [51] SARKAR S, SELVAM R P. Molecular dynamics simulation of effective thermal conductivity and study of enhanced thermal transport mechanism in nanofluids [J]. Journal of Applied Physics, 2007,102(7):074302.
- [52] LI L, ZHANG Y W, MA H B, et al. Molecular dynamics simulation of effect of liquid layering around the nanoparticle on the enhanced thermal conductivity of nanofluids[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2010,12(3):811-821.
- [53] CUI W Z, BAI M L, LV J Z, et al. On the influencing factors and strengthening mechanism for thermal conductivity of nanofluids by molecular dynamics simulation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011,50(23):13568-13575.
- [54] CUI W Z, SHEN Z J, YANG J G, et al. A modified prediction model for thermal conductivity of spherical nanoparticle suspensions (nanofluids) by introducing static and dynamic mechanisms[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(46):18071-18080.
- [55] CUI W Z, SHEN Z J, YANG J G, et al. Influence of nanoparticle properties on the thermal conductivity of nanofluids by molecular dynamics simulation[J]. RSC Advances, 2014,4(98):55580-55589.
- [56] 李志信,过增元. 对流传热优化的场协同理论[M]. 北京:科学出版社,2010:78-94.
- [57] SUNDAR L S, SHARMA K V. Turbulent heat transfer and friction factor of Al_2O_3 nanofluid in circular tube with twisted tape inserts [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010,53(7/8):1409-1416.
- [58] TENGA T P, HUNGA Y H, JWOB C S, et al. Pressure drop of TiO_2 nanofluid in circular pipes[J]. Particuology, 2011,9(5):486-491.
- [59] PAK B C, CHO Y I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles [J]. Experimental Heat Transfer, 1998,11(2):151-170.
- [60] WEN D S, DING Y L. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004,47(24):5181-5188.
- [61] HERIS S Z, ETEMAD S G, ESFAHANY M N. Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2006,33(4):529-535.
- [62] MOJARRAD M S, KESHAVERZ A, ZIABASHARHAGH M, et al. Experimental investigation on heat transfer enhancement of alumina/water and alumina/water-ethylene glycol nanofluids in thermally developing laminar flow [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014,53:111-118.
- [63] DELAVARI V, HASHEMABADI S H. CFD simulation of heat transfer enhancement of Al_2O_3 /water and Al_2O_3 /ethylene glycol nanofluids in a car radiator [J]. Applied Thermal Engineering, 2014,73(1):380-390.
- [64] 戴闻亭,李俊明,陈晓,等. 细圆管内纳米悬浮液对流换热的实验研究[J]. 工程热物理学报,2003,24(3):633-636.
- DAI W T, LI J M, CHEN X, et al. Experimental investigation on convective heat transfer of copper oxide nanoparticle suspensions inside mini-diameter tubes [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003,24(3):633-636.
- [65] BUONGIORNO J. Convective transport innanofluids [J]. Journal of Heat Transfer, 2006,128(3):240-250.
- [66] CUI W Z, BAI M L, LV J Z, et al. On the flow characteristics of nanofluids by experimental approach and molecular dynamics simulation[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 39:148-157.
- [67] CUI W Z, SHEN Z J, YANG J G, et al. Effect of chaotic movements of nanoparticles for nanofluid heat transfer augmentation by molecular dynamics simulation[J]. Applied Thermal Engineering, 2015,76(5):261-271.
- [68] 万水,曲伟,吴邦贤,等. 纳米流体传热强化性能研究以及场协同分析[C]. 第十一届全国热管会议论文集. 北京:北京科学技术出版社,2008:146-151.
- [69] YANG J C, LI F C, CAI W H, et al. On the mechanism of convective heat transfer enhancement in a turbulent flow of nanofluid investigated by DNS and analyses of POD and FSP [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 78:277-288.
- [70] WAMBSGANSS M W. Thermal management concepts for

- higher-efficiency heavy vehicles [C/OL]//SAE Paper, 1999, 1999-01-2240. (1999-04-26). <https://doi.org/10.4271/1999-01-2240>.
- [71] CHOI S U S. Nanofluids for improved efficiency in cooling systems[R]. Lemont:Argonne National Laboratory, 2006.
- [72] SARIPELLA S K, YU W, ROUTBORT J L, et al. Effects of nanofluid coolant in a class 8 truck engine[C/OL]//SAE Paper, 2007, 2007-01-2141. (2007-11-01). <https://doi.org/10.4271/2007-01-2141>.
- [73] LOCKWOOD F E, ZHANG Z G, FORBUS T R, et al. The current development of nanofluid research[C/OL]//SAE Paper, 2005, 2005-01-1929. (2005-04-11). <https://doi.org/10.4271/2005-01-1929>.
- [74] WALLNER E, SARMA D H R, MYERS B, et al. Nanotechnology application in future automobiles [C/OL]//SAE Paper, 2010, 2010-01-1149. (2010-04-12). <https://doi.org/10.4271/2010-01-1149>.
- [75] HUMINIC G, HUMINIC A. The cooling performances evaluation of nanofluids in a compact heat exchanger[C/OL]//SAE Paper, 2012, 2012-01-1045. (2012-04-16). <https://doi.org/10.4271/2012-01-1045>.
- [76] VAJJHA R S, DAS D K, NAMBURU P K. Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al_2O_3 and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2010,31(4):613-621.
- [77] LEONG K Y, SAIDUR R, KAZI S N, et al. Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid based coolant (nanofluid as a coolant in a radiator)[J]. Applied Thermal Engineering, 2010,30(17/18):2685-2692.
- [78] PEYGHAMBARZADEH S M, HASHEMABADI S H, JAMNANI M S, et al. Improving the cooling performance of automobile radiator with Al_2O_3 /water nanofluid[J]. Applied Thermal Engineering, 2011,31(10):1833-1838.
- [79] 钟勋,俞小莉. 纳米流体在车用机油冷却器中的强化换热试验研究[J]. 内燃机工程, 2011,32(3):74-78.
- ZHONG X, YU X L. Experimental study on heat exchange enhancement of nanofluids in vehicle oil cooler[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011,32(3):74-78.
- [80] 钟勋,俞小莉,张宇,等. 纳米流体柴油机机油冷却器传热试验设计[J]. 内燃机学报, 2011,29(1):67-71.
- ZHONG X, YU X L, ZHANG Y, et al. Design of heat transfer experiment for nanofluid in diesel oil cooler [J]. Transactions of CSICE, 2011,29(1):67-71.
- [81] BAI M L, XU Z, LV J Z. Application of nanofluids in engine cooling system [C/OL]//SAE Paper, 2008, 2008-01-1821. (2008-06-23). <https://doi.org/10.4271/2008-01-1821>.
- [82] 于莹潇,袁兆成,田佳林,等. 现代汽车热管理系统研究进展[J]. 汽车技术, 2009,8:1-7.
- YU Y X, YUAN Z C, TIAN J L, et al. Research progress of modern vehicle thermal management system (VTMS) [J]. Automobile Technology, 2009,8:1-7.
- [83] 王玮,叶奇昉,陈江平. Al_2O_3 纳米流体用于散热器的换热特性研究[J]. 流体机械, 2009,37(5):1-5.
- WANG W, YE Q F, CHEN J P. Research on heat transfer performance of Al_2O_3 nanofluid in radiator[J]. Fluid Machinery, 2009,37(5):1-5.
- [84] 杨帅,邹任玲,周毅,等. 纳米流体作为柴油机冷却系传热介质的数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010,38(2):285-289.
- YANG S, ZOU R L, ZHOU Y, et al. Numerical simulation onnanofluids as heat transfer medium for diesel engine cooling system[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010,38(2):285-289.
- [85] 彭稳根,刘元春,胡彦伟,等. 发动机冷却系统内纳米流体强化换热模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011,43(1):109-113.
- PENG W G, LIU Y C, HU Y W, et al. Simulation of heat exchange enhancement using nanofluids in engine cooling system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(1):109-113.
- [86] 胡文君,陈希颖. CuO 纳米流体作为柴油机冷却介质的数值计算分析[J]. 现代车用动力, 2012,1:40-50.
- HU W J, CHEN X Y. Numerical simulation on CuO nanofluids as cooling medium in diesel engine cooling system[J]. Modern Vehicle Power, 2012,1:40-50.
- [87] 李国祥,尹衍升,张拥军. 水基纳米流体主机冷却系统及其余热利用[J]. 船舶工程, 2013,35(S1):88-90.
- LI G X, YIN Y S, ZHANG Y J. Nanofluids M/E cooling system and its waste heat utilization [J]. Ship Engineering, 2013,35(S1):88-90.
- [88] 唐刚志,张力,焦志盛. 发动机冷却水套设计及改进[J]. 内燃机工程, 2014,35(4):91-96.
- TANG G Z, ZHANG L, JIAO Z S. Design and improvement of engine cooling water jacket[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014,35(4):91-96.
- [89] 白敏丽,张志文,吕继组,等. 流固耦合研究纳米流体在内燃机冷却水腔中的传热[J]. 燃烧科学与技术, 2015,21(1):14-19.
- BAI M L, ZHANG Z W, LÜ J Z, et al. Heat transfer of nanofluid applied in internal combustion engine cooling system based on fluid-solid coupling method[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2015,21(1):14-19.
- [90] 徐梦杰,王惜慧. 基于 Fe_3O_4 -乙二醇纳米流体直喷汽油机冷却水套传热研究[J]. 车用发动机, 2017(2):12-18.
- XU M J, WANG X H. Heat transfer of water jacket for GDI engine based on Fe_3O_4 -glycol nano-fluid[J]. Vehicle Engine, 2017(2):12-18.