

基于仿鲨鱼皮表面微织构的冷却流道散热特性研究

宋佳欣¹, 林晓亮¹, 盛晓波¹, 王 鹏²

¹衢州学院, 浙江 衢州

²中国重汽集团济南动力有限公司发动机厂, 山东 济南

收稿日期: 2022年5月10日; 录用日期: 2022年6月23日; 发布日期: 2022年6月30日

摘 要

散热对精密机械、电子器件的正常工作至关重要。基于自然界中鲨鱼皮的表面微组织结构, 本文构建了光滑平直冷却流道模型和锯齿形、圆齿形两种仿鲨鱼皮表面微织构冷却流道模型, 通过采用流固耦合方法进行数值模拟, 分析对比了三种冷却流道模型的散热效果。研究表明: 两种仿鲨鱼皮表面微织构冷却流道模型相较于光滑平直冷却流道模型有比较明显的散热效果; 齿高的增大和冷却液流速的提高都能增强两种仿鲨鱼皮表面微织构冷却流道模型的散热效果; 冷却液流向与流道方向夹角的增大使两种仿鲨鱼皮表面微织构冷却流道模型的散热效果下降; 相同条件下, 锯齿形冷却流道模型相较于圆齿形结构的散热优势更为突出。研究结果可为散热优化研究提供参考。

关键词

鲨鱼皮, 仿生, 表面微织构, 散热特性, 流固耦合

Study on Heat Dissipation Characteristics of Cooling Channel Based on Microtexture of Shark Skin Surface

Jiaxin Song¹, Xiaoliang Lin¹, Xiaobo Sheng¹, Peng Wang²

¹Quzhou University, Quzhou Zhejiang

²Engine Factory of Sinotruk Jinan Power Co., Ltd., Jinan Shandong

Received: May 10th, 2022; accepted: Jun. 23rd, 2022; published: Jun. 30th, 2022

Abstract

Heat dissipation performance is important for normal function of precision machinery and elec-

tronic devices. Based on the surface microtexture of shark skin in nature, in this paper, the smooth flat cooling channel model and two kinds of shark skin surface microtexture cooling channel models with saw tooth or circular tooth are constructed. Through numerical simulation with fluid structure coupling method, the heat dissipation effects of three cooling channel models are analyzed and compared. The results show that the two kinds of shark skin surface microtexture cooling channel models have obvious heat dissipation effect compared with the smooth flat cooling channel model. The increase of tooth height and coolant flow rate can enhance the heat dissipation effect of the two kinds of shark skin surface microtexture cooling channel models. And the increase of the angle between the coolant flow direction and the flow channel direction decreases the heat dissipation effect of them. Under the same conditions, the heat dissipation advantage of cooling channel model with sawtooth is more prominent than that of cooling channel model with circular tooth. The research results can provide reference for heat dissipation optimization research.

Keywords

Shark Skin, Bionic, Surface Microtexture, Heat Dissipation Characteristics, Fluid Structure Coupling

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

仿生学利用自然界中的生物特性在各个领域为人类创造了巨大价值[1]。尤其是在传热学领域中,生物界的传热机理已为诸多学者对于机械散热结构的设计和研究提供了科学规律。秦杰[2]通过研究昆虫翅脉和树叶叶脉微流道,设计出电子元器件的仿生散热结构,并进行仿真分析与实验对比,发现两种微流道均具有良好的散热效果。吴龙文等[3]设计了多种仿生微通道拓扑结构,并对它们的散热性能和压降特性进行仿真和实验,得出蜘蛛网结构效果更佳结论。

流体散热是众多学者研究的重要课题,不同散热结构中,流道结构及其对冷却流体的流动影响是关系散热效果的关键。Bai 等[4]通过对流体流经 V 型槽和光滑槽后速度、剪切应力、能量和湍流的仿真结果对比,解释了 V 型槽的减阻机理,并证明了有微沟槽的表面结构对减阻有明显作用。NASA 兰利研究中心的 Walsh 等[5][6][7][8]通过对三角形、矩形、V 形、圆形等沟槽的大量实验,发现三角形沟槽的减阻效果最好。诸多研究表明,当流道结构设计不合理,冷却流体的流动阻力过大,导致热量积攒和温度失衡是造成系统故障和功能失效的重要原因,因此研究冷却流道结构及其散热特性具有十分重要的意义。雒悦豪等[9][10]将一些微细沟槽表面应用到航空设备柜的散热板中,在几乎不影响其机械性能的基础上大大提高散热效率,并且散热板在采用沟槽减阻表面后,散热系统的压降可降低 8%以上,提高了散热板在一定的外界条件下的冷却效果。郑彬[11]将表面微结构应用于高超声速飞行器,发现三角形肋条状微结构对于整体舵翼有明显的减阻降温效果。

如今将仿生鲨鱼皮类的沟槽表面微细组织结构应用到流体散热方面的相关研究还较少。本文将基于前人对于散热结构的研究对鲨鱼皮表面微结构的散热特性进行分析,通过研究鲨鱼皮表的结构特征,构建出基于鲨鱼皮表面微结构的冷却流道,并建立锯齿形冷却流道模型、圆齿形冷却流道模型和光滑平直冷却流道模型进行流固耦合仿真对比,分析在不同条件下的温度场分布及降温效果,为设计冷却流道结构及提高其散热特性提供参考。

2. 仿鲨鱼皮表面微织构冷却流道几何模型建立

冷却流体所受的流动阻力越小，流体的速度变化越小，带走的热量也就更多，散热效果就越好。大自然已经创造出了减少流体阻力、加快流体运动的方法，且在以鲨鱼为代表的鱼类和以海豚为代表的鲸类水生哺乳动物的游动过程中有很明显的体现。其中 Reif 等[12]研究发现鲨鱼皮表具有很多微细结构，如图 1 所示为鲨鱼皮肤上某一处的盾鳞，盾鳞上排布着许多沟槽结构。Bechert 等[13]发现鲨鱼快速游动时，由于皮肤表面在其流动方向上有序排列着沟槽状结构，并通过模拟实验得出这种结构能最大程度地减小近 10%的摩擦阻力。基于盾鳞研究，诸多学者曾对鲨鱼皮表面沟槽结构横截面轮廓线进行拟合，如侯磊[14]采用 Gauss 函数和 Lorentz 函数分别对鲨鱼皮表面微织构进行了简化和拟合，而谢峰等[15]则采用最小二乘法对鲨鱼皮表面微织构进行了拟合和分析，均得出了更接近于实际的几何模型，其中较为典型的模型有两种：锯齿形和圆形。

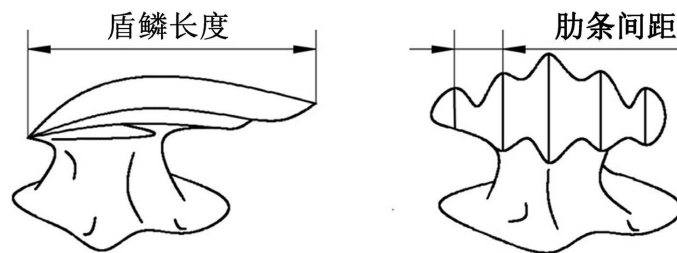


Figure 1. Schematic diagram of the structure of shark skin shield scales [16]

图 1. 鲨鱼皮盾鳞结构示意图[16]

本文假设沟槽的所有横截面轮廓曲线是完全一致的，通过参照鲨鱼皮表面沟槽结构的特征，建立了两种仿鲨鱼皮表面微织构冷却流道的物理模型，分别为锯齿形冷却流道模型和圆齿形冷却流道模型。为了对比，同时建立了光滑平直冷却流道模型，三种模型如图 2 所示。其中两种仿鲨鱼皮表面微织构冷却流道结构参数需要满足以下关系：

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{w-s}{H-h} = t \\ \frac{s}{l} = n \\ A_i = \frac{4sh \sin \alpha - sl(1 + \cos \alpha)}{\sin \alpha} \\ C_i = \frac{(1 + \sqrt{2 + 2 \cos \alpha})s \sin \alpha + 2h \sin \alpha - 2(1 + \cos \alpha)}{\sin \alpha} \\ A_j = sh - \frac{sl(1 + \cos \beta)}{2 \sin \beta} + \frac{sl(\pi - \beta - \sin \beta)}{4(\cos \beta + 1)} \\ C_j = s + 2h + \frac{s(\pi - \beta)}{2 \cos \frac{\beta}{2}} - \frac{l(1 + \cos \beta)}{\sin \beta} \\ l_i = l_j = l \\ D = 4 \cdot \frac{A}{P} \end{array} \right.$$

式中： w 代表冷却流道壳体宽度， s 代表流道宽度， H 代表冷却流道壳体高度， h 代表流道高度， t 代表

冷却流道壳体宽度差和高度差的比值, l_i 代表相邻两锯齿齿顶之间的距离, l_j 代表相邻两圆齿齿顶之间的距离, n 代表锯齿或圆齿的数量, α 代表锯齿角, β 代表圆齿角, A_i 代表锯齿内截面总面积, A_j 代表圆齿内截面总面积, C_i 代表锯齿内截面总周长, C_j 代表圆齿内截面总周长, D 为水力直径, A 代表过流断面积, P 代表湿周。各参数表示如图 2 所示, 各参数选取如表 1 所示。

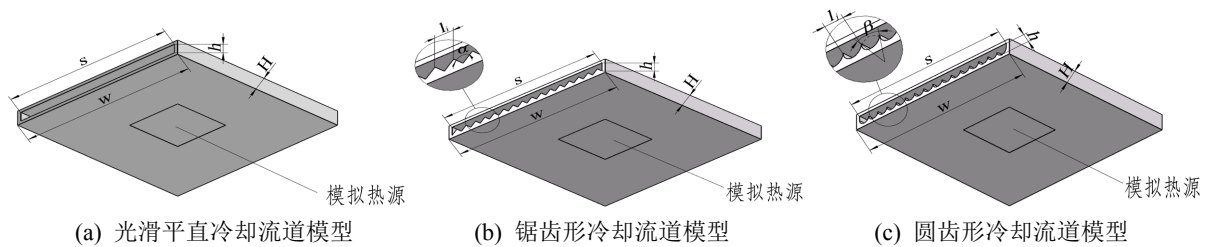


Figure 2. Cooling channel models with different structures

图 2. 不同结构的冷却流道模型

Table 1. Cooling channel model parameters

表 1. 冷却流道模型参数

参数	光滑平直冷却流道模型	锯齿形冷却流道模型	圆齿形冷却流道模型
s/mm	96	96	96
w/mm	100	100	100
h/mm	6	6	6
H/mm	10	10	10
l_i/mm	\	6	\
l_j/mm	\	\	6
$\alpha/^\circ$	\	90	\
$\beta/^\circ$	\	\	180

3. 仿鲨鱼皮表面微织构冷却流道散热特性数值模拟

3.1. 网格划分

利用 ANSYS 软件中的 Mesh 模块对所构建的两种冷却流道以及光滑平直冷却流道进行网格划分, 划分网格后锯齿形冷却流道模型得到 135,128 个网格、143,490 个节点, 圆齿形冷却流道模型得到 159,149 个网格、169,020 个节点, 光滑平直冷却流道模型得到 101,141 个网格、131,874 个节点。图 3 所示为锯齿形冷却流道模型和圆齿形冷却流道模型的局部网格划分图。

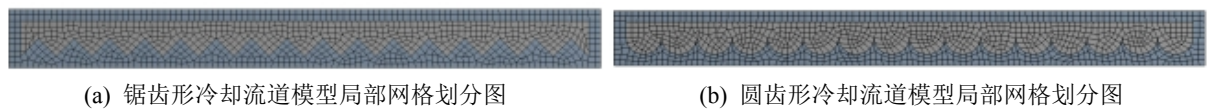


Figure 3. Local meshing diagram of two cooling channel models

图 3. 两种冷却流道模型的局部网格划分图

3.2. 仿真模型基本条件与参数的设定

为了分析比较两种仿鲨鱼皮表面微织构冷却流道模型和光滑平直冷却流道模型的散热特性, 设定选

取的流道结构材料、所加热载荷、流体初始流速、温度、出口压力等均相同。其中，冷却流道壳体材料使用金属铝，模拟热载荷为面热源，且模拟热载荷紧贴铝板下方正中心位置，不考虑其与铝板贴装的接触热阻。流体采用液态水作为冷却液，且冷却液的入口设定为速度入口，出口则设定为压力入口，通过设定热流密度的方式对模型施加模拟热载荷，并将流道模型的两个侧面设置为对称边界(sym)。假设流道壁面绝对光滑，不考虑自然对流与辐射传热。在流固耦合仿真中，对流体采用标准 Laminar 模型，并开启 Energy Equation，采用 SIMPLE 算法求解压力和速度耦合方程，离散方法的格式采用 Second Order Upwind，使用软件默认的收敛残差，而后根据计算结果合理设置迭代次数。边界条件与初始条件设置如表 2 所示。

Table 2. Boundary conditions and initial conditions parameters

表 2. 边界条件与初始条件参数

参数名称	参数设置
入口速度/m/s	0.5
出口表压/Pa	0
入口温度/°C	25
环境温度/°C	25
热流密度/kW/mm ²	100

4. 模拟结果分析

4.1. 不同冷却流道结构对散热的影响分析

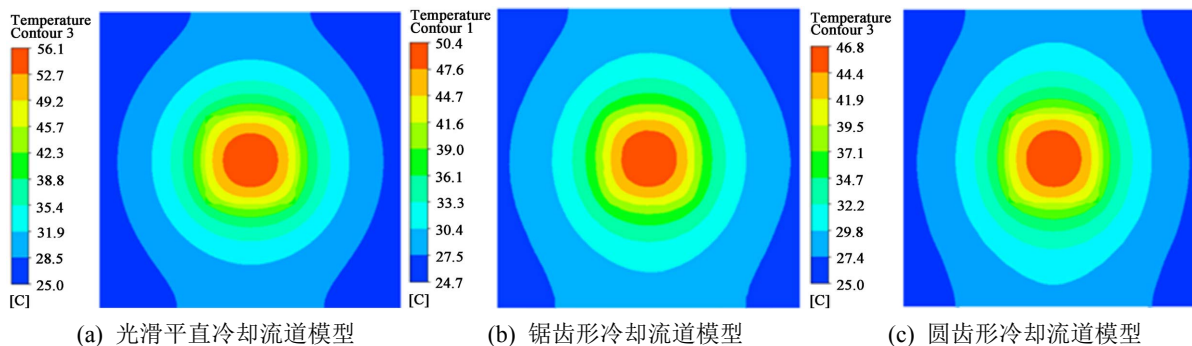


Figure 4. Cloud image of temperature field distribution of different cooling channel model structures

图 4. 不同冷却流道模型结构温度分布云图

由图 4 可知，三种冷却流道模型结构的温度场分布情况与变化趋势大致相同，皆是由中心向四周逐渐降低，但是三种冷却流道的温度场在数值上差异较大。光滑平直冷却流道模型的最高温度为 56.1°C，最低温度为 25.0°C；锯齿形冷却流道模型的最高温度为 46.8°C，最低温度为 25.0°C；圆齿形冷却流道模型的最高温度为 50.4°C，最低温度为 24.7°C。锯齿形冷却流道模型和圆齿形冷却流道模型最高温度相比光滑平直冷却流道模型分别降低了 16.58%、10.16%，而最低温度相差不大。可见相同条件下，锯齿形冷却流道模型与圆齿形冷却流道模型的散热效果较好，且锯齿形冷却流道模型散热效果最好。

基于以上分析，分别针对具有两种齿形结构的流道模型进行不同齿高下的散热效果分析。不同齿高的两种冷却流道模型最高温度如图 5 所示。从图中可以明显看出：随着齿高的逐渐增加，两种冷却流道

模型的最高温度都逐渐降低,造成该现象的原因是随着齿高的不断增加,流道的传热面积不断增加,在相同的流速下,冷却液可以带走的热量更多,从而使散热效果得到提升,其中圆齿形冷却流道模型的温度变化最为明显,说明齿高对圆齿形冷却流道模型的散热效果影响较大;但齿高相同时,圆齿形冷却流道模型的最高温度值明显大于锯齿形冷却流道模型,且齿高越低,两种冷却流道模型的最高温度差值就越大,说明在低齿高的情况下,锯齿形冷却流道模型相较于圆齿形结构的散热优势更为突出。

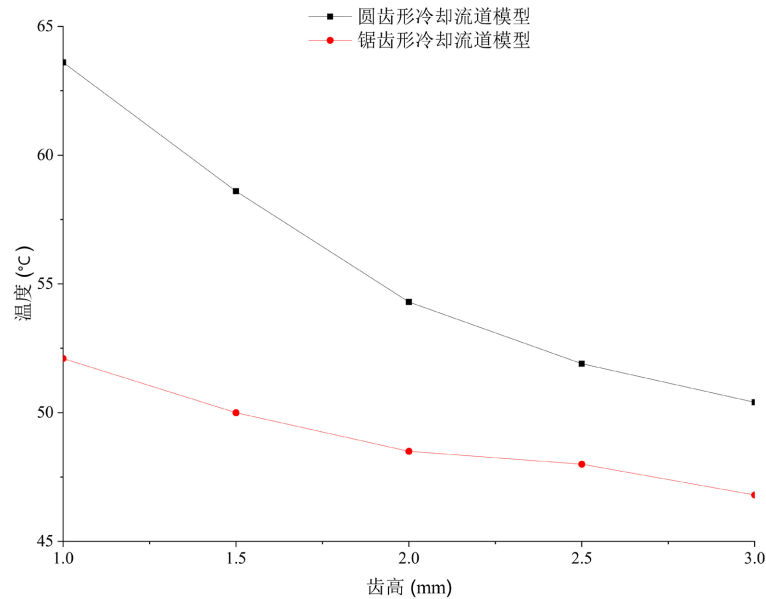


Figure 5. Maximum temperature of two cooling channel models with different tooth heights

图 5. 不同齿高两种冷却流道模型的最高温度

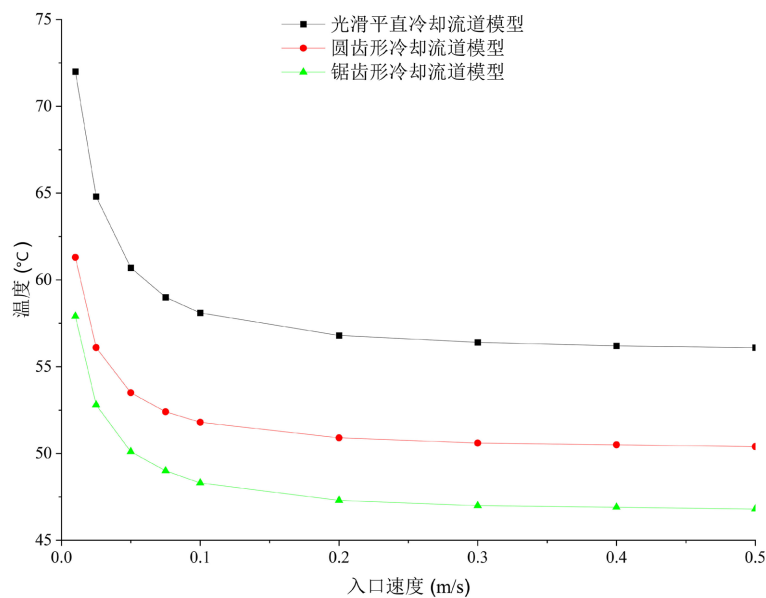


Figure 6. Maximum temperature of cooling channel model with different coolant flow rate

图 6. 不同入口速度冷却流道模型的最高温度

4.2. 不同冷却液流速对散热的影响

图 6 所示为在不同的入口速度下, 三种冷却流道模型的最高温度值。从图中可以明显看出: 三种冷却流道模型的最高温度都在随着入口速度的增大而降低; 在相同的入口速度下, 锯齿形冷却流道模型和圆齿形冷却流道模型相对于光滑平直冷却流道模型都有较好的散热效果; 在低入口流速时, 锯齿形冷却流道模型和圆齿形冷却流道模型的最高温度数值相近, 散热效果对比差异不明显, 但随着入口速度的增大, 锯齿形冷却流道模型的最高温度值会明显低于圆齿形冷却流道模型的最高温度值, 说明在入口速度相同的情况下, 锯齿形冷却流道模型的散热效果最好, 圆齿形冷却流道模型的散热效果次之, 光滑平直冷却流道模型最差。当入口速度达到 0.2 m/s 以上时, 入口速度对三者的散热能力影响效果逐渐减弱。

4.3. 不同冷却液流向对散热的影响

为更好的研究冷却液从不同方向流入对三种冷却流道模型散热效果的影响, 在此, 利用平行四边形法则将入口速度沿平行于流道和垂直于流道两个方向进行分解, 并将平行于流道的入口速度与垂直于流道的入口速度的比值称为夹角比值, 也就意味着在入口速度大小相同方向不同时, 夹角比值越大, 入口速度的方向和平行于流道方向之间的夹角越大。

由图 7 所示为冷却液以不同夹角比值进入冷却流道时三种冷却流道模型的最高温度折线图, 可以看出: 随着夹角比值的逐渐增大, 三种冷却流道模型的最高温度值逐渐升高, 说明冷却液流向与平行于流道方向夹角越大, 散热效果越差, 造成该结果的原因应为, 由于夹角比值的不断增大, 流体在冷却流道中的湍动能增大, 使流速减慢, 从而导致了热量在冷却流道之中囤积; 不同夹角比对于圆齿形冷却流道模型和锯齿形冷却流道模型的散热能力影响效果相近, 但除了夹角比值在 10 左右时圆齿形冷却流道模型最高温度比锯齿形冷却流道模型低外, 三种冷却流道模型的最高温度值由高到低均为光滑平直冷却流道模型、圆齿形冷却流道模型、锯齿形冷却流道模型。说明总体上看, 锯齿形冷却流道模型在不同的夹角比值下散热效果都较其它两者更好。

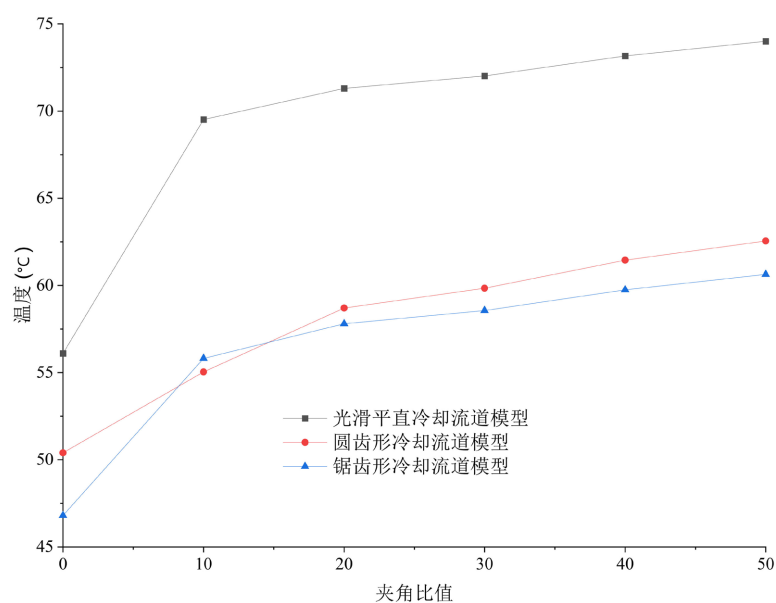


Figure 7. The maximum temperature of the three cooling channel models when the coolant enters the cooling channel with different included angle ratios

图 7. 冷却液以不同夹角比值进入冷却流道时三种冷却流道模型的最高温度

5. 结论

本文主要研究仿鲨鱼皮表面微织构散热特性, 并根据鲨鱼皮表的沟槽结构, 构建了两种冷却流道模型, 采用数值模拟的方法对两种冷却流道模型以及光滑平直冷却流道模型进行流固耦合仿真, 通过对比分析得出以下结论:

1) 一定条件下, 三种冷却流道模型的温度场分布及变化趋势大致相同, 相比光滑平直冷却流道模型, 两种仿鲨鱼皮表面微织构冷却流道模型结构都有较好的散热效果。

2) 随着齿高的逐渐增加, 两种仿鲨鱼皮表面微织构冷却流道模型散热效果逐渐增强, 同齿高下, 锯齿形冷却流道模型相较于圆齿形结构散热效果好, 低齿高时散热优势更为突出。

3) 三种冷却流道模型的散热效果都随着入口速度的增大而增强, 入口速度小时, 锯齿形与圆齿形冷却流道模型的散热能力相近, 入口速度较高时锯齿形冷却流道模型的散热能力较好。

4) 冷却液流向与流道方向夹角越大, 不同冷却流道模型的散热效果越差, 夹角比值对于圆齿形冷却流道模型和锯齿形冷却流道模型的散热能力影响效果相近, 但总体而言, 不同夹角比值下锯齿形冷却流道模型更利于散热。

本文的研究对精密机械、电子器件的散热结构设计 with 精度保持等具有重要意义。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目(202011488011, 202211488023); 浙江省教育厅科研资助项目(Y201942770); 衢州市科技特派员项目(2020T024, 2021T024); 衢州学院 2021 年校级实验室开放项目(KFXM202103)。

参考文献

- [1] Bhushan, B. (2012) *Shark Skin Surface for Fluid-Drag Reduction in Turbulent Flow*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25408-6_10
- [2] 秦杰. 仿生微流道散热器结构优化及流动散热特性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2012: 1-33.
- [3] 吴龙文, 卢婷, 陈加进, 等. 芯片散热微通道仿生拓扑结构研究[J]. 电子学报, 2018, 46(5): 132-138.
- [4] Bai, Q., Bai, J., Meng, X., *et al.* (2016) Drag Reduction Characteristics and Flow Field Analysis of Textured Surface. *Friction*, **4**, 165-175. <https://doi.org/10.1007/s40544-016-0113-y>
- [5] Walsh, M.J. (2012) Riblets as a Viscous Drag Reduction Technique. *AIAA*, **21**, 485-486. <https://doi.org/10.2514/3.60126>
- [6] Hefner, J.N., Bushnell, D.M. and Walsh, M.J. (1983) Research on Non-Planar Wall Geometries for Turbulence Control and Skin-Friction Reduction.
- [7] Walsh, M.J. (1982) Turbulent Boundary Layer Drag Reduction Using Riblets. AIAA, Aerospace Sciences Meeting, Hampton, Virginia. <https://doi.org/10.2514/6.1982-169>
- [8] Walsh, M.J. and Lindemann, A.M. (1984) Optimization and Application of Riblets for Turbulent Drag Reduction. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Hampton, Virginia. <https://doi.org/10.2514/6.1984-347>
- [9] 雒悦豪, 田锡天, 马贵斌, 等. 微细沟槽面提高航空设备柜散热率的仿真分析[J]. 航空制造技术, 2014, 448(4): 94-95.
- [10] 雒悦豪, 陈学永, 田锡天, 等. 探索减小航空设备柜散热系统通道压降的方法[J]. 航空精密制造技术, 2013, 49(3): 47-51.
- [11] 郑彬. 基于表面微结构的高超声速飞行器减阻降温技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015: 62-84.
- [12] Reif, W.E. (1985) Squamation and Ecology of Sharks. *CFS Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, **78**, 1-255.
- [13] Bechert, D.W., Bruse, M., Hage, W., *et al.* (1997) Experiments on Drag-Reducing Surfaces and Their Optimization with an Adjustable Geometry. *Journal of Fluid Mechanics*, **338**, 59-87. <https://doi.org/10.1017/S0022112096004673>

-
- [14] 侯磊. 椭圆振动辅助切削微结构的轨迹生成与过程仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [15] 谢峰, 王秀英, 雷小宝. 鲨鱼皮减阻结构的几何建模与数值分析[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(7): 1472-1476.
- [16] 刘宝胜, 吴为, 曾元松. 鲨鱼皮仿生结构应用及制造技术综述[J]. 塑性工程学报, 2014(4): 56-62.