

仿海豚皮减阻研究进展

张晨远^{1,2} 张智嘉^{1*} 丛巍巍² 魏浩¹ 张松松¹

(¹青岛哈尔滨工程大学创新发展中心 青岛 266400; ²海洋涂料国家重点实验室 海洋化工研究院有限公司 青岛 266071)

摘要 减阻材料可广泛应用于国防、工业、生产生活,具有极大的应用价值。仿生减阻作为减阻研究新的分支,受到广泛关注。由 Gray 计算海豚游动阻力与肌肉力量不匹配而产生的“Gray 悖论”开启了对海豚减阻机理的探索。本文介绍了基于海豚表皮的几种减阻机理,并介绍由其发展出的相应减阻材料的设计与测试,最后对仿海豚皮减阻研究的未来发展进行展望。

关键词 海豚皮 减阻 仿生 柔性壁 随行波

Research Progress in Drag Reduction by Imitating Dolphin Skin

Zhang Chenyuan^{1,2}, Zhang Zhijia^{1*}, Cong Weiwei², Wei Hao¹, Zhang Songsong¹

(¹ Qingdao Innovation and Development Center of Harbin Engineering University, Qingdao, 266400; ² State Key Laboratory of Marine Coatings, Marine Chemical Research Institute Co. Ltd, Qingdao, 266071)

Abstract Drag-reducing materials are widely used in national defense, industry and daily life. As a new branch of drag reduction research, biomimetic drag reduction has received widespread attention. The inconsistency for the calculated high drag on dolphins and underestimated muscle power available resulted in “Gray’s paradox”. And it has pushed the inspiration for many drag reduction mechanism. This review examines present drag reduction mechanisms based on dolphins and corresponding drag reduction materials. Moreover, a direction of the future development of drag reduction researches inspired by dolphins is pointed out.

Keywords Dolphin skin, Drag reduction, Biomimetic, Compliant wall, Traveling wave

由于水的密度以及粘度的影响,水生生物和在水中航行的船舶在前行过程中,其速度受到了流体阻力的限制,并且需要消耗较大的能量。为了减少船舶在运行过程中的燃料消耗,提升船舶的运行速度,人们开始对游速较快的水生生物进行研究,探明其减阻机理,并利用仿生技术,将其应用于实际。

海豚作为一种鲸目动物,其高速游泳的表现被人们所熟知,其游速可以超过 11m/s,这一认知也推动了对海豚减阻机制的探索^[1]。近代最早研究有关海豚减阻机制的是生理学家 Gray,他在 1936 年基于简单刚体的流体动力学模型对海豚和鼠海豚运动过程中的阻力进行了计算^[2],研究发现阻力无法与肌肉产生的可用功率相协调,这就是著名的“Gray 悖论”。自此之后掀起了研

究者对海豚减阻机制的研究热潮和将其进行实际应用的兴趣。

目前主流研究的海豚皮减阻机制主要分为:柔性壁减阻、随行波减阻、自适应减阻和壁面升温减阻,因此本文着重介绍了这四种基于海豚皮的减阻机理,并进一步对仿海豚皮减阻涂层的研究进展进行详细介绍。

1 柔性壁减阻

Kramer^[3,4]认为海豚光滑的柔性皮肤是实现边界层中的层流不从海豚身体表面分离的手段,皮肤通过粘性阻尼过程发生形变并减少阻力。粘弹性可以吸收来自压力脉动的能量和阻尼向湍流发展的 Tollmien-Schlichting 波,并基于这种策略设计了第一个模拟海豚皮的涂层,在开放水域的

* 联系人,张智嘉 E-mail: zhijia.zhang@hrbeu.edu.cn

2022-09-28 收稿,2022-12-10 接受

拖拽测试中相比对照模型实现了 59% 的减阻。虽然无法对 Kramer 实验结果进行重复,这一研究依旧引发了研究者有关柔性壁减阻的研究热潮。Carpenter 等^[5]通过严格的分析证明了 Kramer 的柔性涂层只能略微延迟边界层转换,且易被外部条件所影响。

海豚皮肤以及皮下的鲸脂层的结构是复杂且高度规则的,因此单一柔顺表面很难实现较好的减阻效果^[6]。海豚皮肤的弹性来自于大量胶原蛋白和弹性纤维,Babenko 等^[7]测定了活海豚皮肤的弹性模量(E)为 $(1.7 \sim 2.0) \times 10^4 \text{ N/m}^2$,弹性模量值随海豚的种类、身体部位、物理条件等的不同而发生变化。海豚皮肤的弹性尤其取决于皮肤深层的鲸脂层,鲸脂层具有较高的弹性,且弹性模量接近于生物橡胶。鲸脂层在外界压力下易发生形变,能够吸收流体扰动所产生的压力脉动,从而保持有利的压力梯度以稳定边界层。活海豚的皮肤可以实现最大 95% 的扰动能量的吸收与边界层中湍流脉动的能量相符^[8]。基于体积的双层柔性壁相比于单层柔性壁有着更好的减阻表现,Dixon 等^[9]的计算结果表明,单层和多层粘弹性涂层可以实现相比于刚性表面 2.5 倍和 5 倍的转换延迟。使用各向异性的柔顺壁在理论上可以实现临界雷诺数将近 10 倍的增加,且相对于各向同性柔性壁来说更不易受三维不稳定性影响^[10]。Madigosky 等^[11]研究了活海豚表面的声表面波的速度和吸收常数,结果表明,下表皮以及与其相连的鲸脂在水动力扰动的柔性响应中起到了关键作用,鲸脂的剪切柔性介于软柔性涂层和硬柔性涂层之间,其中前者会增加阻力,而后者对阻力没有显著影响。

基于柔性壁原理的减阻材料可大致分为两种(如图 1 所示):基于表面型和基于体积型。基于表面型的减阻材料(图 1(a~d))可以通过减少空间维度,从而减少了计算的难度,典型的模型是薄板-弹簧模型以及类 Kramer 型涂层(图 1(a,b))。Kramer^[3,4]在 1960 年首次将仿海豚皮肤结构的柔性材料应用于减阻,并使用拖曳法对其减阻性能进行了测试,实现了超过 50% 的减阻。Grosskreutz^[12]基于约束壁运动产生负雷诺应力来降低阻力的思路,设计了一种各向异性的柔性表面(图 1(c))。Fukagata 等^[13]在此基础上将各向异性柔性涂层(图 1(d))利用于槽道湍流减阻,并获得了 8% 左右的减阻效果。但当条件发生变

化时,涂层失去了减阻效果,因此有关该方法的减阻尚需更多研究。

基于体积型减阻材料(图 1(e~g))则是建立在 Navier 方程基础上,包含单层(图 1(e))和多层涂层(图 1(f))以及各向同性和各向异性材料(图 1(g))^[14]。Kulik 等^[15]使用单层各向同性弹性模量为 $2.2 \times 10^6 \text{ Pa}$ 的硅橡胶柔性涂层在流速为 15.5 m/s 的情况下实现了 23% 的减阻,此外在高流速下需要更硬的涂层来达到较好的减阻效果。Gaster^[16]在 Carpenter 的理论计算基础上,对表面覆有较硬橡胶的双层柔性涂层的边界层稳定性进行了测试,其中最好的涂层的临界雷诺数增加了 30%。曾志翔等^[17]将聚二甲基硅氧烷(PDMS)与乙酸乙酯混合后喷涂在铝板上,并通过测试铝板旋转的扭矩值来测量阻力。具有更好弹性的涂层有着更好的减阻效果,损耗系数最小的涂层在 50 r/min 下实现了 21.6% 的最大减阻。Schrader^[18]使用商品名为 Alpa Gel 和 Kōraform 的聚合物凝胶混合制备了 $E = 0.3 \text{ MPa}$ 的涂层,并在涂层上覆盖聚乙烯薄膜,进行实船水洞测试后,实现了 3% 的减阻。此外,最近的研究中,将柔性壁减阻与其他减阻原理相结合,开发了一些新型的减阻材料。其中哈尔滨工程大学的研究团队将柔性壁减阻和浮筏系统减阻相结合,设计了微浮筏阵列柔性壁材料,并通过浸入边界层法对多种参数对阻力的影响进行理论模拟,采用转子实验装置测量了减阻效果,最大实现了 15% 的减阻^[20~25]。在该团队后续的研究中还探讨了多孔材料^[26]以及声子晶体的准周期结构^[27]与柔性壁结合的减阻效果。准周期结构的弹性支撑柔性壁减阻材料相比周期结构的弹性支撑材料可增加 72.16% 的减阻能力。相比单一原理减阻,多种不同减阻策略的结合在一定程度上提升了减阻性能。不过这方面研究大都以理论计算为主,如何实现材料的制备及应用将是今后工作中需要研究的。

2 随行波减阻

鲸类的皮肤通常被描述为一个光滑的表面,不过由于皮下真皮乳突的存在(图 2(a)),很多种类的海豚身体表面都存在嵴状纹路(图 2(b)),这些纹路通常分布在海豚的呼吸孔和背鳍之间的背部以及身体侧面,嵴的高度范围为 $2 \sim 180 \mu\text{m}$,且随种类不同而变化^[28]。海豚嵴状纹

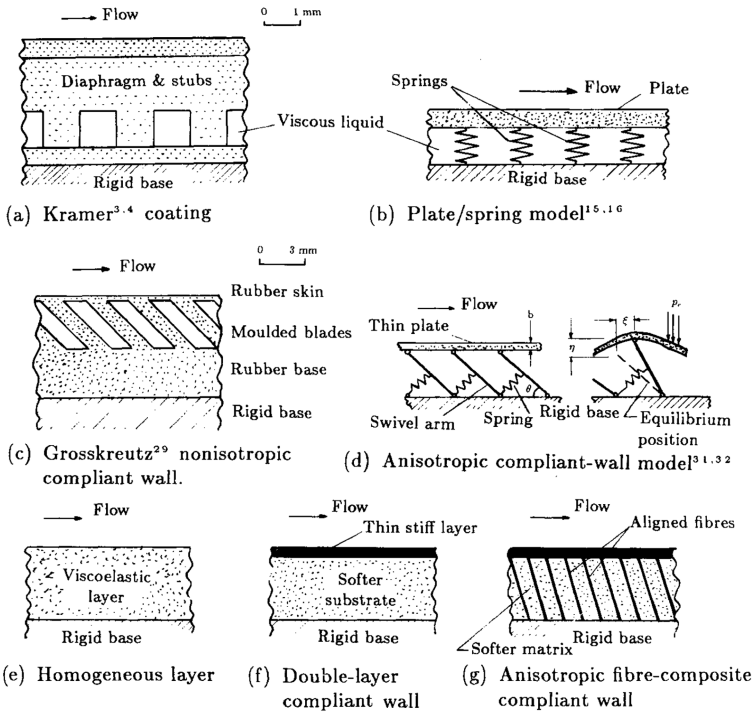


图 1 基于表面型和基于体积型柔性壁涂层

Fig. 1 Surface-based and volume-based models of compliant coatings

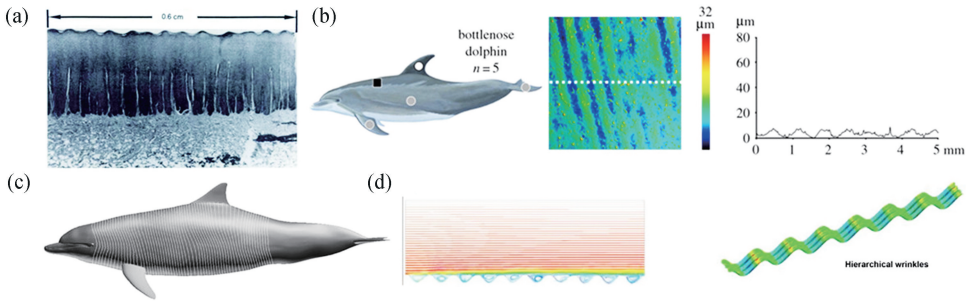


图 2 (a) 海豚表皮下的真皮乳突; (b) 海豚表皮褶皱; (c) 海豚全身的褶皱分布; (d) 分级褶皱结构减阻

Fig. 2 (a) Dermal ridges of a dolphin; (b) Skin folds of a bottlenose dolphin; (c) The distribution of dolphin fold skin throughout the body; (d) Hierarchical surface patterns for drag reduce

路的朝向不同于鲨鱼肋条的纵向排布,纹路在从眼睛开始到背鳍底部的范围内环绕身体一周且纹路方向垂直于身体的纵轴方向,而在背鳍后部的区域,嵴的朝向呈现一定程度的倾斜(图 2(c))。同时海豚皮肤表面的嵴状凸起幅度小于肋条减阻所需的尺寸要求,因此海豚表皮属于随行波减阻技术。

目前对随行波减阻的解释是:在一定流动条件下,周期波纹表面在航行中带起的随行波浪在垂直于来流方向的嵴状谷底产生一排人工平行涡,从而改变了湍流边界层内的水流形态,来流与固体表面之间的滑动摩擦变为滚动摩擦,起到减阻降噪的作用。Hagiwara 等制备了与来

流方向呈一定角度的波状硅橡胶表面,相比于平板降低了 15% 左右的壁面剪切应力。陈鹏万等通过全局起皱工艺制备了具有分级褶皱结构的 PDMS 涂层,实现了高雷诺数层流下 8.6% 的净减阻(图 2(d))。有关随行波减阻技术的研究尚停留在实验室阶段,在实际应用中是否能具有相同效果还有待研究。

3 自适应减阻

海豚表皮下存在许多真皮乳突,这些真皮乳突占到表皮长度的 50% 以上,真皮乳突间的间隙通常被大量胶原纤维、弹性组织、触觉小体和神经束所占据。鲸目动物皮肤中的神经末梢距离

身体表面约 $10\mu\text{m}$, 海豚皮肤密集分布大量神经, 其皮肤的灵敏度阈值为 $10\sim 40\text{ mg/mm}^2$, 这个值接近人类皮肤最敏感的区域(例如指尖、嘴唇和眼睑), 因此海豚皮肤能灵敏感受到外部水流环境的变化, 从而作出响应^[37]。

Babenko 等假设海豚可以通过调节血压来改变皮肤柔性, 但实验结果推翻了这一假设^[38]; 另一种假设是海豚可以通过肌肉微振动控制来改变皮肤柔性, 从而达到湍流阻尼的主动控制。在恒温动物的全身无时无刻不在产生细微的振动, 而海豚皮肤产生的振动幅度是人类的 $3\sim 4$ 倍。Ridgway 等^[37]认为通过皮肤的振动可以降低压力梯度从而减小阻力。此外, 在加速运动的海豚身体表面还观察到了皮肤的褶皱。这些褶皱可能是由沿海豚身体表面的涡流所形成的, 也可能是由肌肉的主动控制产生。这些褶皱会随着水流以波浪状的方式向后运动。Carpenter 等^[39]认为当褶

皱以自由流速度的 0.7 倍移动时会有利于减阻。在水中运动的人的皮肤同样也会形成褶皱, 但这些褶皱会增加阻力。这一现象的发生可能说明皮肤是否能够减阻与褶皱的尺寸和皮肤的弹性模量等因素有关, 同时也说明让表面实现对湍流的控制的减阻效果可能比在表面保持层流边界层要更好。

4 壁面升温

随着壁面温度上升水的粘度会变小, 从而减小阻力。Schlichting^[1]认为减小边界层内部区域液体的粘度可以使边界层更加稳定, 而稳定的层流意味着更大的临界雷诺数(图 3(a)), 因此恒温的鲸目动物可能能够利用这种机制来实现减阻。不过粘度降低所产生的减阻, 只有当水在皮肤表面被瞬间升温时才能够实现。而在游动过程中, 流速也会影响动物身体表面与水的传热效率。

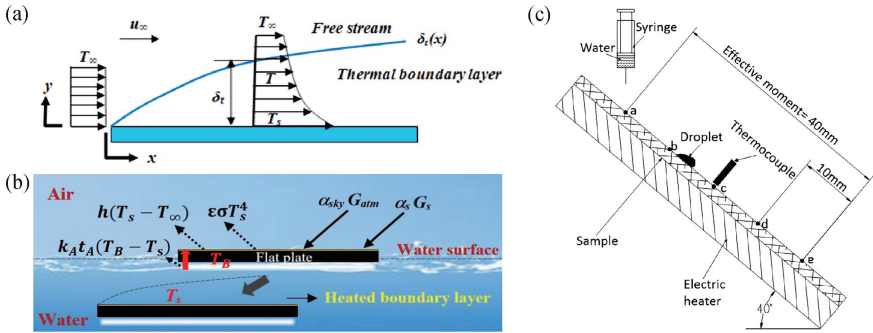


图 3 (a) 热边界层示意图^[44]; (b) 加热边界层的能量守恒示意图^[40]; (c) 水滴测试试验台示意图^[42]
Fig. 3 (a) Schematic diagram of the thermal boundary layer^[44]; (b) Schematic diagram of energy conservation in the heated boundary layer^[40]; (c) Schematic diagram of water droplet test bench^[42]

Hassanalain 等^[40]对水生动物进行了热平衡分析以及模拟计算后发现, 在热带地区中午阳光照射下在水面上的鲸目动物黑色上表面的温度可达到 45°C 左右, 并且可以实现 7% 左右的减阻(图 3(b))。Babenko 等^[41]在复合柔性材料内部空腔中填充石墨纤维织物、导电橡胶等导电材料, 通过直流加热的方式改变材料的力学性能以及利用交流电磁波引起弹性波与表面波的相互作用, 影响近壁区流体的特性, 从而实现减阻, 可最大实现 35% 的减阻。Tian 等^[42]在硅橡胶中加入石墨烯增加了硅橡胶的导热性, 通过水滴法(图 3(c))测试了材料在加热状况下对其减阻性能的影响。结果表明, 在 55°C 时由于水滴粘性降低而水滴与表面的接触面积变化不大使得阻力减小; 他们还制备了添加氮化铝的硅橡胶, 同样在加热状态下

实现了减阻^[43]。不过这种技术在实际应用中的能量消耗和热传递效率是需要被关注的问题。

5 总结与展望

本文以海豚为主要研究对象, 介绍了受海豚启发的减阻技术研究的发展, 仿生减阻在很多方面扩展了传统减阻的局限性, 其效果明显。在湍流中, 流体运动是无序和复杂的, 大多数研究人员专注于减阻的作用, 而减阻的机制很少被讨论。到目前为止, 湍流下的减阻仍然是一个热门且困难的研究课题, 仿生减阻技术的发展离不开减阻理论发展的支持和推动, 因此两者相辅相成, 互相促进。

通过柔性表面、表面褶皱、边界层加热和边界层控制等技术的应用起到了稳定层流边界层的作用, 但这些机制尚未在海豚身上得到证实, 因此海

豚还具有巨大的仿生研究潜力等待挖掘。今后的仿海豚皮减阻研究可重点关注以下几方面：

(1)虽然对不同海豚皮减阻机理已经有了较为深入的探讨,但还主要集中在基础研究领域,如何将这些机理有效应用于实践还需进一步深入研究。

(2)海豚作为生物体,其所需适应的环境因素复杂多样,因此单一的减阻机理必然无法满足实际应用的减阻需求,后续的研究可以更多集中在多机理协同作用减阻的研究上。

(3)海洋污损一直以来都是海洋船舶航行阻力增加的重要因素之一,因此对减阻方面的研究势必要与防治海洋污损相结合,开发出兼具防污和减阻性能的材料,对减阻的长期有效性有着直接帮助。

总而言之,具有海豚表皮功能的仿生减阻材料虽然还面临着许多挑战,但必将在未来船舶减阻材料发展中起到重要作用。

参 考 文 献

[1] Fish F E. Bioinspir. Biomim. , 2006, 1(2) : R17~R25.
[2] Gray J. J. Experim. Biol. , 1936, 13(2) : 192~199.
[3] Kramer M O. J. Am. Soc. Naval Eng. , 1961, 73(1) : 103~108.
[4] Kramer M O. Naval Eng. J. , 1962, 74(2) : 341~348.
[5] Carpenter P W, Garrad A D. J. Fluid Mechan. , 1986, 170: 199~232.
[6] 俞洁, 刘志明, 吴文健. 第十五届船舶水下噪声学术讨论会暨船舶力学学术委员会水下噪声学组成立三十周年纪念学术会议, 郑州, 2015.
[7] Babenko V V. Bionika, 1979, 13: 43~52.
[8] Babenko V V. Hydrobionics principles of drag reduction// Proceedings Of The Agard Report 827: High Speed Body Motion In Water, Kiev, Ukraine, 1998.
[9] Dixon A E, Lucey A D, Carpenter P W. AIAA J. , 1994, 32(2) : 256~267.
[10] Yeo K S. J. Fluid Mechan. , 1992, 238: 537~577.
[11] Madigosky W M, Lee G F. J. Acoust. Soc. Am. , 1984, 79(1) : 153~159.
[12] 夏前锦, 连龙, 瞿建雄, 等. 力学学报, 2021, 53(9) : 2454~2467.
[13] Fukagata K, Kern S, Chatelain P, et al. J. Turbulence, 2008, 9: N35.
[14] Gad-El-Hak M. Prog. Aerosp. Sci. , 2002, 38(1) : 77~99.
[15] Kulik V M, Poguda I S, Semenov B N. J. Eng. Phys. , 1984, 47(2) : 878~883.
[16] Gaster M. Is the dolphin a red herring? //Turbulence management and relaminarisation. Springer, Berlin, Heidelberg, 1988: 285~304.
[17] Li L C, Liu B, Hao H L, et al. Phys. Fluids, 2020, 32(8) : 084103.
[18] Schrader L U. J. Ship Res. , 2019, 63(3) : 206~218.

[19] Carpenter P W. Status of Transition Delay Using Compliant Walls//Viscous Drag Reduction In Boundary Layers, 1990, 123: 79~113.
[20] 宋永健. 微浮筏阵列蒙皮减阻性能实验研究. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2021.
[21] 王鹏. 微浮筏阵列多孔柔性蒙皮的流动稳定性及减阻性能研究. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2021.
[22] 陈辉. 基于浸入边界法的仿生柔性蒙皮减阻性能研究. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2021.
[23] 张子凯. 基于惩罚浸入边界法的微浮筏阵列柔性蒙皮减阻性能研究. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2021.
[24] Zhao D, Cui J, Dong L, et al. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2021: 1~14. <https://doi.org/10.1080/15397734.2021.1980006>.
[25] 张文轩. 多节点载荷下微浮筏阵列薄板的随机振动响应分析. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2021.
[26] Cui J, Zhao D, Liu S, et al. Ships Offshore Struct. , 2022: 1~12. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2032991>.
[27] Chen L, Liu S, Zhao D, et al. Proc. Inst. Mech. Eng. M, 2022, 236(4) : 14750902221076239.
[28] Wainwright D K, Fish F E, Ingersoll S, et al. Biol. Lett. , 2019, 15(7) : 20190103.
[29] Gnone G, Caresano F, Cosmai T, et al. Mar. Mammal Sci. , 2008, 24(3) : 711~718.
[30] 黄苗苗, 张楠, 卜淑霞, 等. 船舶力学, 2021, 25(04) : 416~425.
[31] Tian G Z, Fan D L, Feng X M, et al. RSC Adv. , 2021, 11(6) : 3399~3428.
[32] 黄微波, 王宝柱, 卢敏, 等. 船舶力学, 2005(01) : 14~17.
[33] Zhang H, Yoshitake N, Hagiwara Y. Changes in Drag Acting on an Angled Wavy Siliconrubber Plate as a Model of the Skin Folds of a Swimming Dolphin//Bio-mechanisms of Swimming and Flying. Springer, Tokyo, 2008: 91~102.
[34] Lin G, Li J, Xu Z, et al. Adv. Mater. Interf. , 2021, 8(1) : 2001489.
[35] Lang A W, Jones E M, Afroz F. Bioinsp. Biomim. , 2017, 12(2) : 026005.
[36] 周开亚, 李悦民. 海洋与湖沼, 1981(06) : 566~572.
[37] Ridgway S H, Carder D A. IEEE Eng. Med. Biol. , 1993, 12(3) : 83~88.
[38] Yu C, Liu M, Zhang C, et al. Giant, 2020, 2: 100017.
[39] Carpenter P W, Davies C, Lucey A D. Curr. Sci. Assoc. , 2000, 79(6) : 758~765.
[40] Hassanalain M, Abdelmoula H, Mohammadi S, et al. J. Therm. Biol. , 2019, 84: 292~310.
[41] Babenko V V, Chun H H, Lee I. J. Hydrodynamics, 2010, 22(5) : 45~50.
[42] Tian L M, Wang Y J, Li Z Y, et al. Exp. Therm. Fluid Sci. , 2017, 85: 363~369.
[43] Tian L, Wang Y, Jin E, et al. Adv. Mech. Eng. , 2017, 9(4) : 1687814017697628.
[44] Hassarialian M, Abdelmoula H, Ayed S B, et al. J. Therm. Biol. , 2017, 66: 27~32.