



仿生减阻材料的制备及其性能研究

赵德峰¹, 陈贞祥¹, 赵海燕¹, 钱风雷^{2*}

摘要:目的:应用仿生摩擦学原理制备皮肤减阻材料,并分析其减阻性能。方法:制备水减阻材料、油减阻材料、仿鲨鱼黏液减阻材料,进行包裹物漂浮测试和运动员泳池测试,分析减阻材料性能。结果:漂浮实验表明,与对照组相比,涂覆水减阻材料、油减阻材料和仿鲨鱼黏液减阻材料均有明显减阻效果($P < 0.01$),仿鲨鱼黏液材料减阻效果最佳。结论:利用仿生摩擦学原理,应用聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、聚乙烯醇(PVA)和聚丙烯酰胺(PAM)等超高分子量聚合物制备的仿鲨鱼黏液减阻材料有明显减阻效果。

关键词:仿生;减阻材料;仿鲨鱼黏液;聚乙烯吡咯烷酮

中图分类号:G818 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2020)01-0100-04

DOI:10.12064/ssr.20200113

Preparation and Properties of Biomimetic Skin Drag Reduction Materials

ZHAO Defeng¹, CHEN Zhenxiang¹, ZHAO Haiyan¹, QIAN Fenglei^{2*}

(1.Shanghai Research Institute of Sports Science, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Competitive Sports Training and Management Center, Shanghai 202162, China)

Abstract: Objective: To make biomimetic skin drag reduction material and analyze its properties. Methods: The water drag reduction material, the oil drag reduction material, and the shark like mucus drag reduction material were prepared. And then floating tests and athlete pool tests were conducted to analyze the properties of different drag reduction materials. Results: The floating tests of different drag reduction materials showed that compared with the control group, the coated water drag reduction material, oil drag reduction material and shark like mucus drag reduction material, all had obvious drag reduction effect ($P < 0.01$), among which the shark like mucus drag reduction material was the best. Conclusions: Shark like mucus drag reduction material made of ultra-high molecular polymers such as PVP, PVA and PAM based on principles of biomimetic tribology has obvious drag-reduction effect, which helps to improve swimming performance.

Key Words: biomimetic; drag reduction material; shark like mucus; polyvinyl pyrrolidone

仿生摩擦学是应用仿生学的原理和方法,研究类似生物系统表面功能特性的摩擦学科学与技术及其应用的一门交叉学科,通过揭示生物优异的摩擦学特性形成的机制以开发相应的仿生摩擦学技术,并应用这种技术于节能、减排和环境保护等方面^[1]。应用该学科原理开发的仿生减阻材料在油气运输、供水等领域有着广泛的研究和应用^[2-3],但在体育领域研究较少。水下机器人、水下航模、潜水和冲浪等水下运动中,要克服流体力学中的波阻、型阻和摩擦

阻力,因此降低游进过程中的阻力会带来更好的速度体验,并减少能量消耗。因此本研究通过应用仿生摩擦学原理进行水下减阻材料的探索性研究,制备水下运动减阻材料并分析其减阻性能。

1 研究方法

1.1 包裹物漂浮测试

1.1.1 测试装置

游泳水槽是水平放置的直径为0.2 m、长15 m

收稿日期:2019-07-30

基金项目:上海市科委科技创新行动计划项目(19DZ1200700)。

第一作者简介:赵德峰,男,博士,副研究员。主要研究方向:竞技能力的提升。E-mail: defengzhao@126.com。

* 通讯作者简介:钱风雷,男,硕士,研究员。主要研究方向:运动人体专业。E-mail: fengleiqian@sina.com。

作者单位:1.上海体育科学研究所,上海 200030;2.上海市竞技体育训练管理中心,上海 202162。

的半圆形水槽,槽内通入恒定流速的水流。漂浮物为具有一定体积、密度能完全漂浮在水流表面的物体,测试装置如图1。

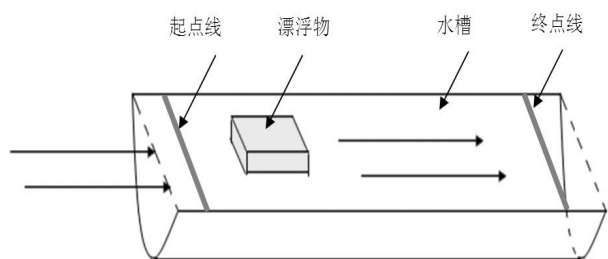


图1 测试装置简单示意图

Figure 1 Schematic Diagram of Test Devices

1.1.2 测试方法

在相同流程和流速下分别测试空白漂浮物、涂覆水减阻材料、涂覆油减阻材料和涂覆仿鲨鱼黏液减阻材料的运动时间,3种减阻材料涂覆厚度均匀一致。漂浮物放置于起点线开始计时,冲至终点线结束测试,计算漂浮时间,每种漂浮物各进行120组试验,优选误差在5%以内的30组试验数据。

1.2 统计方法

采用SPSS15.0统计软件包进行统计学处理,采用独立样本T检验(One-Way ANOVA)进行组间差异比较,数据采用平均值±标准差表示, $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$ 表示差异具有显著性。

2 研究结果

2.1 减阻材料的制备

鲨鱼黏液主要由水溶性高分子和不溶于水的脂肪类物质构成,分泌后迅速溶胀发黏形成黏液,粘附于鱼类的体表,将鱼体与水环境隔开,形成边界层,在微湍流极强的区域,黏液的局部溶解衰减了微湍流时边界层的振动,最大程度减少了游动时的阻力。因此本研究在分析鲨鱼黏液成分的基础上,选用聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、聚乙烯醇(PVA)和聚丙烯酰胺(PAM)等超高分子量聚合物减阻剂,采用纳米填充技术及微胶囊技术等制备配方,将以上多种超高分子量的聚合物减阻剂同时使用,相互配合,发挥协同效应,再配合相关助剂及护肤成分,然后根据不同减阻材料体系研究减阻效果。

本研究通过基础配方中变量物的可变范围组合出上百种配方,进而通过实验室手段检测各减阻材料配方的减阻效果,优化减阻材料配方,最终确定3

种材料配方如下。

(1)复合水减阻材料:常温下,472.9 g去离子水中加入2.5 g二甲基硅油,1 200 rpm/min搅拌5 min,快速均匀地加入6.5 g PAM、2.5 g羟乙基纤维素、5 g芦荟粉、0.5 g乙二胺四乙酸二钠、2.5 g透明质酸钠、0.1 g纳米二氧化硅,继续搅拌分散20 min后,加入2.5 g甘油同时降低搅拌速度到1 000 rpm/min,搅拌60 min。

(2)复合油减阻:常温下,384.4 g去离子水中加入2.5 g透明质酸钠、5 g PAM、1.5 g羟乙基纤维素、5 g芦荟粉、1 g PVP、0.5 g乙二胺四乙酸二钠和2.5 g甘油,1 000 rpm/min搅拌,均质(1相),35 g全氟聚醚、35 g环五聚二甲基硅氧烷、10 g椰油酰基谷氨酸二钠溶液、15 g烷基葡萄糖苷、2.5 g二甲基硅油、0.1 g纳米二氧化硅,1 000 rpm/min搅拌,均质(2相),将1相在10 min内加入2相,均质1 h。

(3)仿鲨鱼黏液减阻:常温下,2.5 g透明质酸钠溶于250 g去离子水中至均匀状态(1相);229 g去离子水中依次加入3 g烷基葡萄糖苷、8 g阿拉伯树胶、5 g PVP、2.5 g PAM并1 000 rpm/min搅拌至均匀状态(2相),将2相加入到1相中1 000 rpm/min搅拌至均匀状态,放置脱泡。

3种成品均为啫喱状,涂抹后无色、无味、无毒、无刺激、无兴奋剂成分,具有易携带、易涂抹、快干、简便等特点。

2.2 包裹物漂浮测试结果

由表1可见,与对照组相比,3种减阻材料均可增加漂浮物运动时间。涂覆水减阻减阻材料样品组的漂浮物运动时间增加了0.062 s,差异具有显著性意义($P < 0.01$);涂覆油减阻减阻材料样品组的漂浮物运动时间增加了0.126 s,差异具有显著性意义($P < 0.01$);涂覆仿鲨鱼黏液减阻材料样品组的漂浮物运动时间增加了0.146 s,差异具有显著性意义($P < 0.01$),仿鲨鱼黏液处理效果最好。

表1 不同减阻材料水槽运动时间对比($\bar{X} \pm S$)

Table 1 Comparison of Swim Time with Different Drag Reduction Materials ($\bar{X} \pm S$)

	N	运动时间/s
对照组	30	6.043±0.010
水减阻组	30	6.105±0.013**
油减阻组	30	6.169±0.010**
仿鲨鱼黏液组	30	6.189±0.012**

注:*表示与对照组相比,差异具有显著性 $P < 0.05$;**表示差异具有非常显著性 $P < 0.01$



3 分析与讨论

创立于 20 世纪 60 年代的仿生学对人类的生产 and 活动带来了重大影响,逐步渗透到生活的各领域,仿生学是生命科学与机械、材料和信息等工程技术学科相结合的交叉学科,目的是研究和模拟生物体的结构、功能和行为,为工程技术提供新的设计理念^[4]。仿生学在体育领域的应用主要集中在动作仿生^[5]、康复器材仿生^[6]、材料仿生^[7-9]等几个方向,仿生摩擦学是仿生学与摩擦学相结合的交叉学科,在体育领域研究较少。有研究将鲨鱼减阻应用于泳衣设计,达到提高运动成绩的目的。目前研究最多的是仿生鲨鱼皮减阻和仿生超疏水表面减阻,其中仿生鲨鱼皮表面减阻是通过直接复刻鲨鱼皮表面的盾鳞结构和仿鲨鱼皮沟槽实现减阻目的^[9-11]。

鲨鱼可以在水中高速游动,除了特殊的体型和身体结构外,还有鱼类体表黏液的作用^[12]。黏液将鱼体与水环境隔开,形成边界层。在微湍流极强的区域,黏液的局部溶解衰减了微湍流时边界层的振动,最大程度地减少了游动时的阻力,可以使鲨鱼瞬间提速,并在一定时间内保持相当高的速度^[13]。因此本研究主要进行仿鲨鱼黏液减阻的研究,运动中阻力减少能量消耗。研究表明鲨鱼黏液中的减阻成分主要包括高分子量水溶性大分子、表面活性剂类物质以及气泡等。因此本研究依据鲨鱼体表黏液的成分及作用原理,将多种超高分子量的聚合物减阻材料组装在一起,并采用纳米填充技术,配合其他助剂结合形成类鲨鱼黏液的水凝胶,进而研究各种减阻材料的实际减阻效果。

宋美艳等通过乳液聚合法制备表面具有聚乙二醇支链的聚苯乙烯微球,将微球悬浮液与丙烯酸酯聚合物乳液共混,采用涂覆的方式制备仿生减阻涂层,具有减阻和防污性能,对水下构件表面设计提供新的途径^[14]。由于本研究制备的减阻涂层可应用于人皮肤表面,必须具备无毒、无兴奋剂、无刺激等特性,这限制了材料和方法的选择。因此,本研究优先选用安全无毒的高分子聚合物减阻材料,同时在配方中添加了小分子活性保湿营养成分,有利于皮肤对减阻材料的吸收,提高了减阻材料的停留时间,并使其在实现良好减阻效果的同时进行皮肤的保护及保养。在此基础上,本研究采用纳米填充、微胶囊技术制备的纳米微胶囊,将减阻材料完全包覆起来,可以在水中缓慢连续释放。

研究结果表明,涂覆水减阻材料、油减阻材料和仿鲨鱼黏液减阻材料的漂浮物运动时间均明显增

加,与空白漂浮物组相比,差异具有显著性意义($P < 0.01$),但仿鲨鱼黏液处理效果最好。本研究的 3 种减阻材料配方均含有多种水溶性高分子聚合物减阻材料(如聚丙烯酰胺、聚氧化乙烯、瓜尔胶、羟乙基纤维素等)。涂抹减阻材料后,物体在水中游动时表面会形成一层减阻薄膜,将物体与水环境隔开,其减阻机理是涂层表面溶解出来的线型高分子抑制初始剪切涡,吸收压力脉动能量,溶胀涂层的柔性效应抑制和吸收压力脉动,减小物体与水之间的摩擦阻力,起到减阻的效果,提高游泳速度。

齐艳杰阐述了主催化剂、助催化剂、聚合物的相对分子质量及相对分子质量分布、聚合物的空间构型、聚合物后处理等对高分子减阻剂减阻性能的影响,研究认为减阻剂的溶解能力是影响减阻效果的关键因素之一^[15]。本研究设计了水减阻、油减阻和仿鲨鱼黏液减阻 3 种减阻材料,虽然都有明显减阻效果,但由于配方不同,涂覆物体表面后,溶解能力存在一定差异,仿鲨鱼黏液的溶解能力最好,减阻效果更明显。张松松通过仿生学原理制备超疏水涂层和水凝胶缓释涂层,考察减阻的可能性并对减阻机理进行了分析,研究通过对涂层的形貌及表面浸润性等性能进行分析,发现表面粗糙度对疏水性具有重要的影响^[16]。但由于测试条件限制,本研究未进行水下机器人、水下航模、潜水及冲浪等水下运动项目的减阻效果差别研究,在今后研究中,将制备的三种减阻材料应用于不同表面结构的水下运动器材上,并分析其减阻性能,会发挥出更大的经济和社会效益。

4 结论

利用仿生摩擦学原理,应用聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、聚乙烯醇(PVA)和聚丙烯酰胺(PAM)等超高分子量聚合物制备的仿鲨鱼黏液减阻材料在水下运动减阻方面有明显减阻效果。

参考文献:

- [1] 张嗣伟.发展仿生摩擦学的展望[J].润滑与密封,2018,43(1):1-2.
- [2] 李光吉,蒲侠,雷朝媛,等.具有非光滑表面的仿生减阻材料的研究简介[J].材料研究与应用,2008,2(04):455-459.
- [3] 顾春元,狄勤丰,施利毅,等.纳米颗粒在储层微流道中的减阻机理实验研究[J].实验流体力学,2010,24(06):6-10+15.
- [4] 孙久荣,戴振东.仿生学的现状和未来[J].生物物理学报,2007,(2):109-115.



[5] 叶青,周亚东.华佗五禽戏养生机理[J].辽宁中医药大学学报,2018,20(4):121-123.

[6] 安宁.手指康复机器人的机构及其控制方法研究[D].天津:河北工业大学,2017.

[7] Wen L., Weaver J. C., Lauder G. V. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function[J]. The Journal of Experimental Biology, 2014, 217(10): 1656-1666.

[8] Guo S. Z., Qiu K., Meng F., et al. 3D Printed Stretchable Tactile Sensors[J]. Advanced Materials. 2017, 29(27):1701218.

[9] 马付良,曾志翔,高义民,等.仿生表面减阻的研究现状与进展[J].中国表面工程,2016,29(1):7-15.

[10] 张伟,刘政,周刘勇,等.FDM技术在仿鲨鱼皮盾鳞结构成型中的应用研究[J].塑料科技,2018,46(9):104-109.

[11] Bering J. Nanotechnology in textile finishing state of the art and future prospects[C]. MRS Fall Meeting, Boston: M. A., 2005.

[12] 刘庆萍.水-固界面系统二元仿生耦合减阻研究[D].长春:吉林大学,2013.

[13] 刘德明.鱼类体表粘液流变行为的研究[D].杭州:浙江大学,2011.

[14] 宋美艳,赵曼,石淑先,等.微球构筑防污减阻涂层的制备[J].中国表面工程,2018,31(5):134-141.

[15] 齐艳杰,陆江银,王春晓.高分子减阻剂研究进展[J].新疆大学学报(自然科学版),2013,30(1):75-80.

[16] 张松松.仿生减阻涂层的制备及性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.

(责任编辑:刘畅)

《体育科研》声明

- 1、本刊现采用网络采编系统,投稿作者请登录网站(<http://www.shtyky.cn>)注册投稿,本刊所刊发文章均可在该网站上免费阅读、下载。
- 2、本刊不以任何形式收取版面费,不设任何代理机构,任何冒名收取审稿费、版面费的行为均与本刊无关。监督电话:021-64330794。
- 3、作者文责自负,须保证文章为原创作品并且不涉及泄密问题。本刊所刊载文章仅代表作者本人观点,不代表本刊立场。