

鲨鱼皮微沟槽结构复制技术研究

赵丹阳^{*1}, 孙鹏翔¹, 王敏杰¹, 王涛²

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 表面具有大量微沟槽结构的鲨鱼皮具有良好的减阻效果, 因此鲨鱼皮复制技术成为国内外减阻技术研究的热点之一. 以鲨鱼表面微小盾鳞结构为复制模板, 采用热压成型法和真空浇注法, 分别在有机玻璃和不饱和树脂表面进行微结构复制, 同时利用触针式轮廓仪和体视显微镜对不同材料和复制方法制备的仿生鲨鱼皮进行了对比分析. 结果表明: 相对于热压成型法, 不饱和树脂作为复制模具材料, 采用真空浇注法复制的液态硅橡胶仿鲨鱼皮, 具有清晰完整的鲨鱼皮微沟槽结构, 是一种较为可行的大面积高精度复制鲨鱼皮微沟槽的方法.

关键词: 鲨鱼皮; 微沟槽; 微复制; 真空浇注; 热压成型

中图分类号: TB17 **文献标志码:** A

0 引言

随着世界范围内能源危机的蔓延, 船舶和飞机减阻技术成为节约能源的有效手段之一. 目前众多的减阻方法在实际应用上都存在一定的局限. 沟槽减阻较其他减阻方式更为实用, 因此成为了人们减阻研究的突破口. 海洋中鲨鱼经过长期进化, 表面布满了三维互锁的盾鳞结构, 这种盾鳞结构具有很大的减阻潜力^[1]. 这种微沟槽结构改变了鱼体表面流场分布, 减小了壁面剪切应力, 从而起到减阻作用. 国外一些学者研究了沟槽减阻的流体力学机理, 并对鲨鱼皮表面盾鳞沟槽结构进行了简化. Haecheon 等利用数值计算方法研究了三角形沟槽减阻机理, 数值计算结果与实验结果有较好的吻合^[2]. Bechert 等通过油洞流体实验对沟槽减阻机理做了系统研究, 结果表明: 盾鳞完整性、沟槽轮廓以及沟槽宽度是影响鲨鱼皮减阻性能的三要素^[3,4]. Lee 等利用离子速度成像技术研究了三角形沟槽和半圆形沟槽的近壁面湍流边界层流场分布^[5,6]. Choi 等提出了 U 形沟槽与高聚物涂层复合减阻技术, 使得减阻率进一步提高^[7]. 近年来, 国内一些学者也开始研究鲨鱼皮生

物约束复制技术. 韩鑫等首次提出了微压印法和微塑铸法, 主要是对经过硬化处理的鲨鱼皮原型进行塑料微压印和微塑铸, 得到与鲨鱼皮原型相反的塑料模, 再用此塑料模进行复制得到塑料鲨鱼皮^[8]. 苏炳煌等提出利用电铸法制作鲨鱼皮金属模具的工艺, 为鲨鱼皮大面积复制的实现打下了基础^[9]. 但是, 如何制作与原鲨鱼皮盾鳞结构相似度较高的鲨鱼皮模具仍是鲨鱼皮复制方面尚未解决的难题和关键技术. 本研究利用模具制作中常用的材料, 对制作鲨鱼皮微结构复制工艺进行探索, 利用热压成型法和真空复制法制作出与真实鲨鱼皮相近的高分子仿真鲨鱼皮, 并通过对复制品表面微结构的比较和分析, 找到一种鲨鱼皮微结构复制的有效途径.

1 鲨鱼皮复制工艺

本文对鲨鱼皮微结构的复制采用图 1 所示工艺流程. 首先对鲨鱼皮进行预处理, 得到可用于生物约束成型的复制样本; 然后借助热压成型和真空浇注两种材料成型手段分别制得鲨鱼皮微复制模具; 最后经模具复制得到仿鲨鱼皮.

收稿日期: 2010-11-05; 修回日期: 2012-03-30.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT12JB10).

作者简介: 赵丹阳^{*} (1976-), 男, 博士, 副教授, E-mail: zhaody@dlut.edu.cn; 王敏杰 (1958-), 男, 教授, 博士生导师.

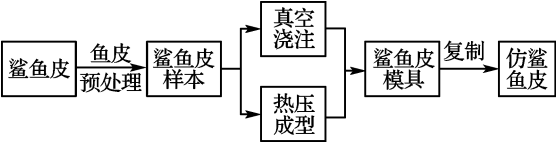
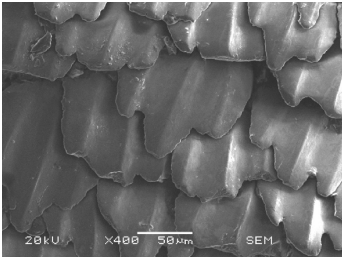


图 1 鲨鱼皮复制工艺流程图
Fig. 1 Process of shark skin replication

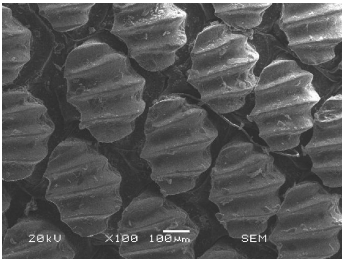
1.1 鱼皮预处理

新鲜鲨鱼皮需要经过以下处理：

- (1)将新鲜鲨鱼皮放入 5% 福尔马林溶液中浸泡,防止鱼皮腐烂损坏表面盾鳞结构；
 - (2)将鱼皮背部肌肉、筋等皮下组织剔除,防止在烘干过程中皮下组织受热变形,影响鲨鱼皮平整度；
 - (3)使用乙醇梯度溶液对鲨鱼皮进行 2 次脱水,每次脱水 20~30 min；
 - (4)用两块玻璃板将鱼皮夹住放入烘干箱中,在 45 ℃ 条件下烘干 30 min,得到鲨鱼皮复制样本.
- 鲨鱼皮表面 SEM 照片如图 2 所示.



(a) 热压成型法



(b) 真空浇注法

图 2 鲨鱼皮表面微结构 SEM 照片
Fig. 2 SEM micrograph of microstructure on shark skin

1.2 热压成型法

热压成型法鲨鱼皮复制工艺流程如图 3 所示,具体过程如下：

- (1)将经过处理的鲨鱼皮样本通过一定的压力压在 PMMA 基板上,加热至 150 ℃,保温 10

- min；
- (2)冷却至 100 ℃ 时,将鲨鱼皮样本从 PMMA 基板上剥离,冷却后得到 PMMA 鲨鱼皮模具,模具表面显微镜照片如图 4 所示；
- (3)将 PE 基板通过一定的压力压在 PMMA 鲨鱼皮模具上方,加热至 100 ℃,保温 2 min；
- (4)冷却至室温时,将 PE 基板从模具上剥离,得到 PE 仿鲨鱼皮,鲨鱼皮表面显微镜照片如图 5 所示.

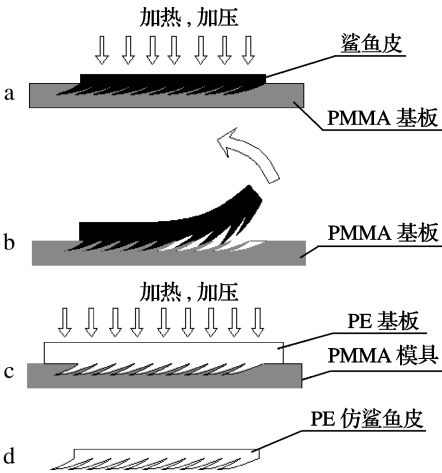


图 3 热压成型法工艺流程
Fig. 3 Process of hot embossing method

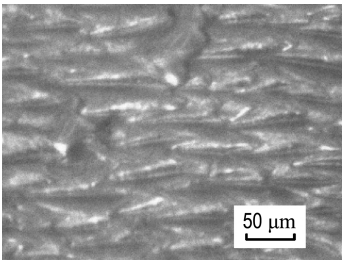


图 4 PMMA 鲨鱼皮模具
Fig. 4 Shark skin mold made by PMMA

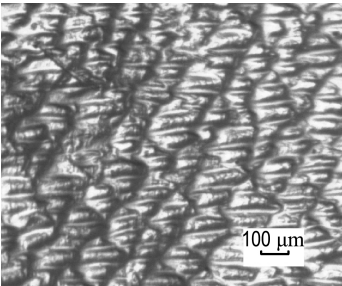


图 5 PE 仿鲨鱼皮
Fig. 5 Shark skin replica made by PE

1.3 真空浇注法

真空浇注法复制鲨鱼皮是指向鲨鱼皮样本表面浇注液态复制材料,然后利用抽真空设备去除复制材料中的气泡,待复制材料凝固后脱模得到鱼皮复制品的方法.真空浇注法复制鲨鱼皮工艺流程如图6所示,具体过程如下:

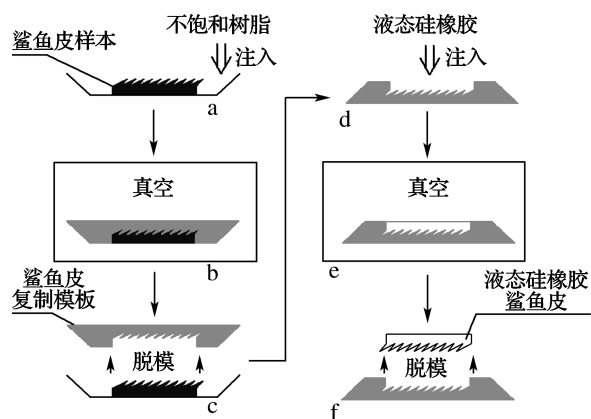


图6 真空浇注法工艺流程

Fig. 6 Process of vacuum casting method

(1)将鲨鱼皮样本固定在容器底部,样本表面喷涂适量干性脱模剂;将不饱和树脂 191、促进剂、固化剂按质量比 100 : 2.3 : 2.3 均匀混合后,浇注到容器中;

(2)将容器放入真空干燥器中抽真空,2 min 内将压力降到 10~20 kPa 时停止,保持压力 10~20 min;

(3)将不饱和树脂和鱼皮样本脱离,得到具有盾鳞微结构表面的不饱和树脂鲨鱼皮模具如图7所示;

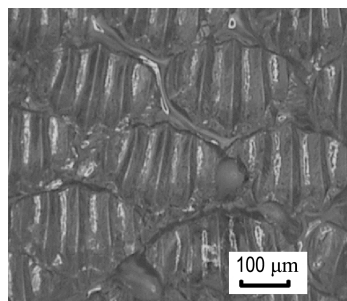


图7 不饱和树脂鲨鱼皮模具

Fig. 7 Shark skin mold made by unsaturated resin

(4)将不饱和树脂鲨鱼皮模具固定在容器中,

向不饱和树脂模具表面喷涂适量干性脱模剂,将液态硅橡胶与固化剂按质量比 100 : 2.4 均匀混合后,浇注到鲨鱼皮模具中;

(5)将容器放入真空干燥器中抽真空,当压力达到 10~20 kPa 时停止抽真空,保持压力 15~20 min;

(6)将凝固的硅橡胶从模具中脱模,得到具有鲨鱼盾鳞微沟槽结构表面的硅橡胶仿鲨鱼皮如图8所示。

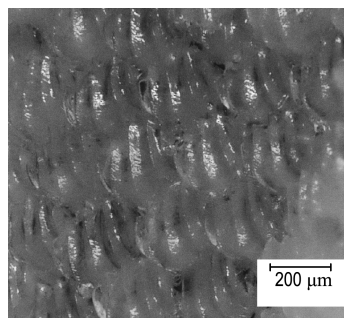


图8 液态硅橡胶仿鲨鱼皮

Fig. 8 Shark skin replica made by liquid silicone rubber

2 结果与分析

从热压成型法得到的鲨鱼皮模具和鱼皮复制品光学照片中,可以看出鲨鱼皮表面微沟槽已经基本被复制了下来,但是 PE 鲨鱼皮复制品微沟槽表面出现很多微小凹坑,并且鳞片之间的层次性没有得到体现.这是由于热压法所使用的鲨鱼皮表面微沟槽尺寸在 50 μm 左右,鱼皮表面的微结构尺寸接近复制材料的溢边值,而温度的限制使得塑料熔体流动性变差,熔体无法全部填充进沟槽之中,从而造成了沟槽表面的凹坑。

从真空浇注法得到的鲨鱼皮模具和鱼皮复制品光学照片中,可以看出鲨鱼皮模具和鱼皮复制品表面光滑度比热压成型法要好,复制鱼皮鳞片层次性明显、完整性好.由于不饱和树脂 191 和液态硅橡胶的流动性要比塑料熔体好得多,没有出现热压成型法中出现的微小凹坑和层次性差的问题.但是抽真空速度以及真空度大小直接影响复制质量.如图9所示的鲨鱼皮模具是在绝对真空度 50 kPa 条件下制成的,可以看出如果抽真空速度过慢或者是真空度不足都会导致气泡不能及时

从盾鳞间隙中排出,容易在复制品表面形成气孔,并对鲨鱼皮盾鳞结构复制精度产生负面影响。

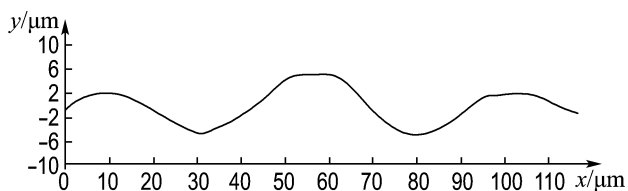


图9 鲨鱼皮模具中的缺陷

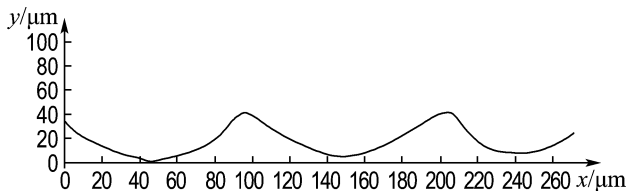
Fig. 9 Disfigurements on shark skin mold

为了更精确地比较两种复制工艺,利用英国泰勒公司的 Talysurf CLI2000 触针式轮廓仪分别对鲨鱼皮样本及两种微复制模具进行了三维扫描成像。由于两种复制工艺所采用的鲨鱼皮样本不同,分别对两种鲨鱼皮样本和对应的鲨鱼皮模具进行测量。图 10(a)、(b)分别为热压成型法和真空浇注法所采用的鲨鱼皮单个鳞片样本截面轮廓曲线。图 11(a)、(b)分别为热压成型法和真空浇注法所制成微复制模具的截面轮廓曲线。

下面以沟槽宽度和鳞脊高度来衡量鳞片沟槽复制精度。将从图 10、11 中计算得到的平均沟槽宽度 s 和中心鳞脊高度 h 加以对比,结果如表 1 所示。



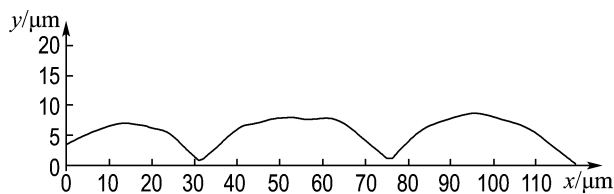
(a) 热压成型法



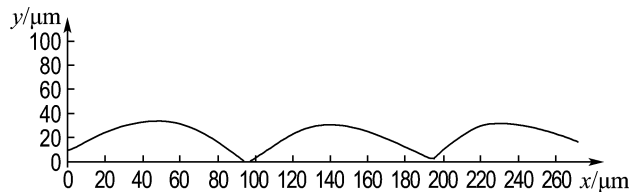
(b) 真空浇注法

图 10 热压成型法和真空浇注法所用鲨鱼皮样本截面轮廓曲线

Fig. 10 Cross-section contour of shark skin sample used by hot embossing method and vacuum casting method



(a) 热压成型法



(b) 真空浇注法

图 11 热压成型法和真空浇注法微复制模具截面轮廓曲线

Fig. 11 Cross-section contour of shark skin mold made by hot embossing method and vacuum casting method

表 1 两种鲨鱼皮复制模具复制精度对比

Tab. 1 Replicated precision comparison of two molds for shark skin replication

	$s/\mu\text{m}$		误差/%	$h/\mu\text{m}$		误差/%
	鱼皮	模具		鱼皮	模具	
热压成型法	50	45	10.0	8.7	7.3	16.09
真空浇注法	98	93	5.1	35.5	33.0	7.04

从表 1 中可以看出,两种复制模具在沟槽宽度与沟槽深度方面较鱼皮样本都有一定程度的收缩,热压成型法变形高于真空浇注法。在微沟槽的复制精度方面,真空浇注法比热压成型法有所提高。

3 结 论

(1)在仿鲨鱼皮表面盾鳞结构的完整性及微沟槽的复制精度方面,真空浇注法要优于热压成型法,是复制鲨鱼皮表面微结构较为理想的方法,为大面积复制鲨鱼皮奠定了工艺基础。

(2)真空浇注法的关键在于抽真空环节,抽真空速度以及真空度大小直接影响着鲨鱼皮模具和仿制品的表面完整性。抽真空速度过慢或真空度不足将会导致鲨鱼皮盾鳞间的微气泡来不及排出,使复制表面布满气泡,影响复制质量。

参考文献:

- [1] BALL P. Shark skin and other solutions [J]. **Nature**, 1999, **400**:507-509
- [2] HAECHON C, PARVIZ M, JOHN K. Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets [J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 1993, **255**(1):503-539
- [3] BECHERT D W, BRUSE M, HAGE W. Experiments with three-dimensional riblets as a idealized model of shark skin [J]. **Experiments in Fluids**, 2000, **28**:403-412
- [4] BECHERT D W, BARTENWERFER M, HOPPE G, *et al.* Drag reduction mechanisms derived from shark skin [C] // **The 15th Congress Proceeding of the International Council of the Aeronautical Sciences**. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1986
- [5] LEE S J, JANG Y G. Control of flow around a NACA 0012 airfoil with a micro-riblet film [J]. **Journal of Fluids and Structures**, 2005, **20**(5):659-672
- [6] LEE S J, LEE S H. Flow field analysis of a turbulent boundary layer over a riblet surface [J]. **Experiments in Fluids**, 2001, **30**:153-166
- [7] CHOI K S, GSDD G E, PEARCEY H H, *et al.* Tests of drag-reducing polymer coated on a riblet surface [J]. **Applied Scientific Research**, 1989, **46**:209-216
- [8] 韩鑫, 张德远. 鲨鱼皮复制工艺研究[J]. 中国科学: E 辑, 2008, **38**(1):9-15
- [9] 苏炳煌, 李光吉, 蒲侠, 等. 鲨鱼皮表面微结构在分子表面的复制方法初探[J]. 材料研究与应用, 2008, **2**(4):460-464

Study of replicated technology of micro-riblets on shark skin

ZHAO Dan-yang^{*1}, SUN Peng-xiang¹, WANG Min-jie¹, WANG Tao²

(1. Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology,

Dalian 116024, China)

Abstract: It has been proved that micro-riblets on shark skin can help to reduce drag. Therefore, the replicated technology of micro-riblets on shark skin becomes one issue in drag-reduction field. Shark skin with micro-placoid scale was taken as the replicated template, and hot embossing method and vacuum casting method were applied to studying the replicated technology on plexiglass and unsaturated resin. The replication samples made by different materials and methods were observed and measured by the stereomicroscope and the stylus profiler. The experimental results show that compared with the hot embossing, the vacuum casting is a relatively perfect method for micro-riblets replication, which uses the unsaturated resin as mold material and casts the liquid silicone rubber under vacuum, micro-riblets on shark skin surface are replicated clearly and perfectly. It is found that the vacuum casting is an effective replication technology which is suitable to form large-area and highly accurate micro-riblets.

Key words: shark skin; micro-riblets; micro-replication; vacuum casting; hot embossing