

# 动物毛发的形态结构及其功能特性研究

杨晓东, 任露泉

(吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室)

**摘要:** 对人发及其他 14 种动物毛发的扫描电镜 (SEM) 照片进行分析, 根据它们形态结构特征将其分为指状结构、芽状结构、鳞状结构和波状结构 4 类, 并就每种毛发结构的保温性、疏水性及其柔性进行了比较分析。分析结果表明, 具有指状细观结构形态的毛发在保温性、疏水性及柔韧性方面具有明显优势, 这一信息对研究开发新型功能材料具有借鉴作用。

**关键词:** 动物毛发; 结构形态; 保温性; 疏水性; 柔韧性

**中图分类号:** S183

**文献标识码:** A

**文章编号:** 100226819(2002)0220021204

许多生物结构与形态信息对现代仿生功能材料的研究与开发具有重要的启迪作用。20 世纪 60 年代初, Kramer 根据海豚的体表双层柔性结构形态, 研究仿造出具有明显减阻效果的“人造海豚皮”<sup>[1]</sup>; 波恩大学巴特劳特教授发现莲花的叶子表面的微型结构为具有 1  $\mu\text{m}$  细的蜡状毛刺, 这是莲花叶子不沾水的根本原因。根据这一被称为“莲花效应”的原理, 德国克莱维斯公司和弗劳恩霍夫研究所于 2000 年初在莱比锡建材展览会上推出了一种具有广泛应用范围的不粘水、抗污染的特殊薄膜<sup>[2]</sup>; 吉林大学王云鹏等根据一些典型土壤动物的体表柔性具有的减粘脱土功能信息, 研究开发了仿生柔性链及柔性网衬脱土减粘技术, 应用于自卸车及铲装车抓斗, 取得了明显的效果<sup>[3]</sup>。本文作者在研究某些土壤动物体表毛皮减阻作用时感到动物或人的毛发结构形态可能是其具有某些特别功能的重要原因<sup>[4,5]</sup>。事实上, 早在 1853 年, 有关毛的形态学研究就开始了。1925 年 Donforth, 1935 年 Toldt 分别对毛进行了分类研究<sup>[6]</sup>; 1979 年 Ortano 还出版了研究毛的专著<sup>[9]</sup>。但有关毛的形态与其功能特性的研究还很少。基于此, 本文对人发及另外 14 种哺乳动物的毛发的细观结构形态进行了分类与分析, 以期提供一些对研究开发仿生功能材料有益的结构形态信息。

## 1 毛发构成<sup>[6-8]</sup>

角蛋白是蛋白质的一大类, 是构成脊椎动物皮、毛、角、蹄的主要成分。人们对人发和羊毛中的角蛋白研究较多<sup>[3]</sup>。头发具有分级结构<sup>[2]</sup>。分级结构中的

最小组元是  $A_2$  螺旋, 其多肽链大体上与角蛋白的轴平行。从角蛋白纤维的衍射图中观测到的 0150~0155 nm 的大周期与  $A_2$  螺旋模型中的螺距 (0154 nm) 相当; 衍射图中观测到的 0115 nm 的小周期与  $A_2$  螺旋中每个残基绕轴旋转 100 时轴向平移距离 (0115 nm) 相当。

角蛋白中 3 股右手  $A_2$  螺旋向左缠绕拧成 1 根, 称为原纤维结构, 直径为 2 nm, 这是 AA 组合的超二级结构。原纤维再排列成“9+2”的电缆式结构, 称为微纤维, 直径为 8 nm。微纤维包埋在硫含量很高的无定形基质中。成百根这样的微纤维又结合成不规则的纤维束, 称大纤维, 其直径为 200 nm。

每根毛发周围是一层鳞状细胞, 中间为皮层细胞。皮层细胞横截面直径为 20  $\mu\text{m}$ 。在这些细胞中大纤维沿轴向排列, 因此每根毛发都具有有序的结构。毛发性能就决定于  $A_2$  螺旋的连接方式。

## 2 结构与形态分析

### 2.1 样本选择

根据所能采集到的一些哺乳动物的毛皮, 共选择了貂、狐、羊、猫、鼠、兔、狗、豹、牛、驴、獾、熊、人、猪、马 15 种 15 个毛发实验样本。经技术处理后通过 Oxford ISIS 300 X2ray 能量分析仪 (Energy Analyser), eiko B5 型离子衍射仪及 JXA 2840 型扫描电镜 (SEM) 得到样本照片如图 1 至图 15。

### 2.1.2 分类原则与结果

根据毛发样本的表面结构形态特征, 将貂与狐的毛发表面结构称为指状结构; 将羊、鼠、兔毛发表面结构称为芽状结构; 将猫、狗、豹、牛、驴毛发表面结构称为波状结构; 獾、熊、人发、猪及马尾毛发表面结构称为鳞状结构。

收稿日期: 2001209217

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (59835200)

作者简介: 杨晓东 (1965-), 博士生, 副教授, 长春市, 吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室, 130025

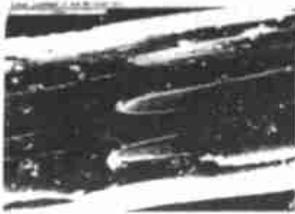


图 1 貂毛样本照片(指状)

Fig 1 Marten hair morphology (finger shape)



图 2 狐狸毛样本照片(指状)

Fig 2 Fox hair morphology (finger shape)



图 3 羊毛样本照片(芽状)

Fig 3 Goat hair morphology (sprout shape)



图 4 兔毛样本照片(芽状)

Fig 4 Rabbit hair morphology (sprout shape)



图 5 灰鼠毛样本照片(芽状)

Fig 5 Rat hair morphology (sprout shape)



图 6 猫毛样本照片(波状)

Fig 6 Cat hair morphology (wave shape)



图 7 狗毛样本照片(波状)

Fig 7 Dog hair morphology (wave shape)

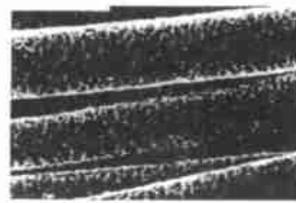


图 8 狍子毛样本照片(波状)

Fig 8 Roe deer hair morphology (wave shape)



图 9 牛毛样本照片(波状)

Fig 9 Ox hair morphology (wave shape)

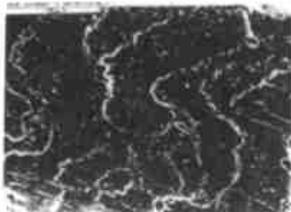


图 10 驴毛样本照片(波状)

Fig 10 Donkey hair morphology (wave shape)



图 11 獾毛样本照片(鳞状)

Fig 11 Badger hair morphology (scale shape)



图 12 熊毛样本照片(鳞状)

Fig 12 Bear hair morphology (scale shape)



图 13 人发样本照片(鳞状)

Fig 13 Man hair morphology (scale shape)

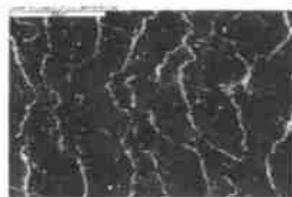


图 14 猪毛样本照片(鳞状)

Fig 14 Pig hair morphology (scale shape)

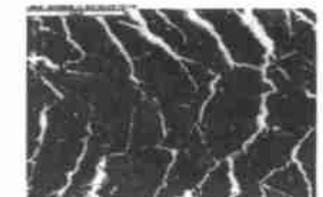


图 15 马尾样本照片(鳞状)

Fig 15 Horse mane morphology (scale shape)

### 2.1.3 形态特征比较

#### 1) 指状结构

从电镜照片看,貂与狐狸毛发表面具有明显的指状结构,它们直径在 30~ 50 Lm,指状单元的数目

沿圆周方向约为10排左右,指长约40 Lm,排列方式皆为两排间错开。其不同点在于貂毛的指状单元尖部与底部宽度相差不大,具有较平滑的边缘,单元间隙狭长,有较大的“沟槽空隙”;而狐狸毛发的指状单元明显呈尖顶等腰三角形,底部宽度远大于尖部,其单元间隙较浅平,“沟槽空隙”不大。指状单元的长宽比,貂毛约为6:1,狐狸毛约为4:1。

#### 2) 芽状结构

将具有花瓣芽孢状的羊、灰鼠、兔毛归结为芽状结构。它们直径一般在20~40 Lm,沿周方方向“芽孢”单元分布数目2~3个。芽孢单元的轴向间距为10 Lm左右,芽孢单元的形状似圆头锹面,没有明显的尖部,且尖部与底部宽度变化较缓。芽状单元的长宽比,羊与鼠毛约在0.15:1,兔毛约在1:1。

#### 3) 波状结构

具有波纹形状的表面结构单元的有猫、狗、狍、牛、驴的毛发,它们的直径一般在20~50 Lm之间,波状单元宽度几乎横绕毛干全周,每一波状单元轴向间距5 Lm左右,波状单元的长宽比很小,有的波形不十分规则。

#### 4) 鳞状结构

獾、熊、人发、猪及马尾毛发表面结构形似鳞片,称为鳞状结构。它们通常具有比较清晰的界限轮廓,且边缘线比较硬直,有坚硬感。鳞片的大小及分布规则性不强,有凌乱感。鳞片单元的轴向间距大致在10 Lm,看不出有明显的长宽比。

### 3 功能特性分析

#### 3.1.1 保温性

毛皮的保温性能除与其密度有一定关系外,与其细观结构形态有很大关系。貂毛表面指状结构单元与其毛干间具有剥离间隙,像是在毛干周围分布一些“枝干”一样,这一点是其具有极好柔性与保温特性的重要原因。因为较大的空隙可以贮存空气,减缓空气流动速度,热交换的速度也降低了。不同的表面单元形态决定了其保温性能的差异。一般情形下,保温性能由好到差的顺序为指状、芽状、波状和鳞状。

#### 3.1.2 疏水性

角蛋白是构成动物毛发的主要成分,许多动物毛发表面具有蜡质层<sup>[4]</sup>。含水量增大可以显著减小持续应力。头发在相对湿度从0增大到100%的情况下,轴向肿胀仅有1%,而杨氏模量与切变模量的比值从217:1(表明有部分各向同性的性质)减小到0.15:1(完全是各向异性材料)<sup>[7]</sup>。由此推断,水并没有进入规则排列的 $\alpha$ 螺旋部分,而是进入无规

则排列的基质相中。貂的毛皮具有相当好的疏水性,水与其接触角远大于90°;狐狸毛皮与水的接触角也比较大,因而也具有好的疏水性。这与其表面结构单元形态密不可分,指状单元间的“沟槽”有利于水珠“顺流而下”,其他3种单元的结构形态不如指状结构,其疏水性依次减弱,亲水性依次增强。

#### 3.1.3 柔韧性

柔软性由大到小的顺序为指状、芽状、波状和鳞状,与其结构单元形态特征直接相关。单元长宽比越小,其柔软性越差;反之,单元长宽比越大,其刚度就越大。角蛋白的伸缩性能很好。在湿热条件下,一根毛发可以拉长到原有长度的2倍而不断裂。角蛋白的机械性能受其中吸附水的含量影响很大。以羊毛为例,在不同湿度下的应力应变曲线的起始部分都完全是弹性的,具有相同的斜率。对应的弹性模量约为4 GPa,其次屈服点出现在应变力为0.102处。其屈服过程是相邻 $\alpha$ 螺旋间的氢键被破坏的结果<sup>[8]</sup>。

### 4 结语

本文首次对人发与14种哺乳动物毛发的细观结构形态作了对比分析。根据毛发表面结构形态的特征,将其分为指状、芽状、波状和鳞状4类。它们的单元长宽比由大到小,毛发的保温性、疏水性与柔韧性与其长宽比大小相一致,即指状结构在保温、疏水和柔韧性优于芽状、波状及鳞状结构。这一信息对研究开发具有良好保温、疏水和柔性功能仿生结构材料有重要参考价值。

#### [参 考 文 献]

- [1] 侯晖昌 减阻力学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [2] 科技点滴[J]. 新华文摘 2000, (3): 160
- [3] 王云鹏 柔性非光滑减粘脱附的仿生研究[D]. 长春: 吉林工业大学, 1997.
- [4] 任露泉, 杨晓东, 佟金 动物皮毛柔性减阻作用的试验研究[J]. 中国机械工程 2000, 11(11): 1272- 1273
- [5] 杨晓东, 任露泉 仿生柔性减阻系统模型及其实验研究[J]. 中国机械工程 2001, 12(8):
- [6] 景松岩, 张伟 毛皮学[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1995
- [7] 崔福斋, 冯庆玲 生物材料学[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [8] Stenn K S et al The molecular and structural biology of hair[M]. Annals of the New York Academy of Science, V 642, 1991
- [9] Ortanos C E, et al Hair Research[M]. New York: Springer-Verlag Press, 1979

## Morphology Structures and Properties of Animal Hairs

Yang Xiaodong, Ren Luquan

(The Key Laboratory for Terrain Machinery Bionics Engineering of Jilin University,  
Ministry of Education, Changchun 130025, China)

**Abstract:** Geometrical morphology and chemical constitution of hairs of man and 14 animals, i.e., marten, fox, goat, mouse, rabbit, cat, dog, roe deer, ox, donkey, badger, bear, pig and horse, were examined by scanning microanalyzer, energy analyzer and X-ray photoelectron spectrometry. These hairs were divided into 4 classes which were called finger shape, sprout shape, wave shape and scale shape, respectively, in the light of hair surface morphology characteristics. Animal hair surfaces display geometrical unsmoothed and rough structures with various patterns and sizes. The heat preservation, hydrophobic behaviour and flexibility of the samples were compared with each other. The finger shape structure morphology of hairs has more obvious superiority than other 3 classes in heat preservation, hydrophobic behaviour and flexibility. The information plays an important role in studying and developing new type bionics materials.

**Key words:** animal hair; structure morphology; heat preservation; hydrophobic properties; flexibility

### 1998~ 2000 年《农业工程学报》检索指标

《中国科技期刊引证报告》(CJCR)及其本刊检索数据

《中国科技期刊引证报告》(CJCR)是由中国科技信息研究所,选择多种期刊评价指标,以一定的中国科技论文统计源期刊(2000年为1406种期刊)引用的数据为依据,对科技期刊论文进行统计分析,进而按照客观数据对期刊进行评价排序。

该报告每年一版,为中国广大科技工作者,期刊编辑部和科研管理部门科学评价期刊,客观准确地选择和利用期刊提供了权威参考依据。

统计数据表明(见表1),本刊最近3年的影响在逐步扩大。

统计数据表明:本刊在农业工程类期刊中位居榜首,与农业类名牌期刊尚有较大差距。

表1 1998~ 2000 年《农业工程学报》检索指标  
(中国科技信息研究所:《中国科技期刊引证报告》)

年度	总被引频次 <sup>3</sup>	影响因子 <sup>3</sup>	即年指标	地区分布数	基金和资助论文比例	海外作者论文数	备注:
1998	183	0.132	0.070	24	0.38	—	“3”为较重要指标; 本刊海外论文薄弱
1999	234	0.189	0.078	22	0.49	6	
2000	287	0.238	0.073	23	0.51	0	

(本刊辑)