



基于 Micro-CT 技术的猪牛羊皮革内部结构分析

冯敏¹, 杨海亮², 陈海相¹, 岳亚雯¹, 瞿金霞¹

(1. 浙江理工大学纺织纤维材料与加工技术国家地方联合工程实验室, 杭州 310018; 2. 中国丝绸博物馆, 杭州 310002)

摘要: 为无损观察并分析皮革的内部结构特征, 首先采用微计算机断层扫描 (Micro-computed Tomography, Micro-CT) 获取猪、牛、羊皮革的二维图像, 然后利用三维重构技术生成皮革的三维立体图像, 最后通过 Dragonfly 软件的分割、增强和测量等图像处理功能, 对皮革样品进行任意虚拟切片处理, 在不破坏样品的前提下, 深入分析皮革内部的结构特征。结果表明: 猪皮革内部的毛发毛囊以 3 个为 1 组, 呈三角形排列; 牛皮革纤维束粗大, 乳头层与网状纤维层区分明显; 羊皮革纤维束细小, 毛发毛囊倾斜角度最小。猪、牛、羊皮革的不同毛发毛囊倾斜角度和深度的特征差异显著。该研究结果可为真皮革材质的鉴别提供基础数据和图像参考。

关键词: Micro-CT; 皮革; 三维结构; 虚拟切片; 毛囊

中图分类号: TS57

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2025)09-0625-09

引文格式: 冯敏, 杨海亮, 陈海相, 等. 基于 Micro-CT 技术的猪牛羊皮革内部结构分析[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2025, 53(5): 625-633.

Reference Format: FENG Min, YANG Hailiang, CHEN Haixiang, et al. Internal structural characteristics analysis of pig, cattle and goat leather based on Micro-CT[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(5): 625-633.

Internal structural characteristics analysis of pig, cattle and goat leather based on Micro-CT

FENG Min¹, YANG Hailiang², CHEN Haixiang¹, YUE Yawen¹, QU Jinxia¹

(1. National Engineering Lab for Textile Fiber Materials and Processing Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. China National Silk Museum, Hangzhou 310002, China)

Abstract: To observe and analyze the internal structural characteristics of leather, two-dimensional images of pig, cattle, and goat leather were obtained by using an Micro-CT (Micro-computed Tomography) scanner, followed by three-dimensional (3D) reconstruction to generate stereoscopic images. Through various image processing functions such as segmentation, enhancement, and measurement of the Dragonfly software, the study performed arbitrary virtual sectioning on leather samples to thoroughly analyze their internal structural characteristics without damaging the samples. The results showed that pig hair follicles were arranged in groups of three, forming a triangular pattern; the fiber bundles in cattle leather were coarse, with a distinct boundary between the papillary layer and the reticular fiber layer; the fiber bundles in goat leather were fine, and the hair follicle tilt angle was the smallest. Significant variations in follicle inclination angles and depths among pig, cattle, and goat leather provide fundamental data and images for the identification of genuine leather materials.

Key words: Micro-CT; leather; three-dimensional structure; virtual slice; hair follicle

收稿日期: 2024-12-10 网络出版日期: 2025-04-29

基金项目: 浙江省文物保护科技项目(2022001); 国家重点研发计划项目(2022YFF0904100)

作者简介: 冯敏(1998—), 女, 安徽宣城人, 硕士研究生, 主要从事纤维材料方面的研究。

通信作者: 陈海相, E-mail: chx@zstu.edu.cn

0 引言

天然皮革是动物生皮经过鞣制、染色、整理等工艺加工而成^[1],具有柔软、耐磨、高强度、高吸湿性和透水透气性等优良性能;按种类来分主要有猪皮革、牛皮革、羊皮革、马皮革、驴皮革及少量蛇皮革、鱼皮革等。随着制革技术的不断发展,皮革表层的天然结构特征可能发生改变,若加工时皮革粒面的特征被完全破坏,即使使用电子显微镜技术也难以准确区分皮革种类^[2]。

目前常用的皮革分析方法包括感官鉴别法、燃烧法、化学溶解法、红外光谱法、PCR法和显微镜法等^[3],然而部分方法具有样品破坏性,部分方法难以克服由于皮革加工处理导致的表面信息丢失问题。感官法主要依赖触觉和外观特征进行主观判断;燃烧法是利用皮革燃烧产生的气味和残渣的特征来区分皮革种类^[4];化学溶解法是根据天然纤维中蛋白质在碱性条件下易溶解的特性来分析皮革^[5];红外光谱法是利用红外光谱图中的特征峰来分析皮革特征^[6-9];PCR技术则是通过扩增不同品种天然皮革样品的DNA序列,对比其遗传信息来实现高精度鉴别^[10-13]。上述方法大多侧重皮革化学组成的分析,而对于皮革的物理结构特征的研究主要依赖于光学显微镜和电子显微镜。然而,传统的显微镜方法多局限于获取皮革样品的粒面、肉面或截面的二维特征信息,若要获取皮革内部的三维结构特征,则需进行切片或逐层打磨制样,这样不仅会破坏样品,又费时费力。探索一种高效无损的皮革内部结构信息提取新技术尤为重要^[14-16]。因此,利用微计算机断层扫描这一新技术来分析皮革内部结构特征逐渐成为研究的热点。

Micro-CT技术无需切片、喷镀或化学处理等制样步骤,凭借X射线的穿透能力,能够在不破坏样品的前提下实现全方位立体扫描,获取高分辨率的内部结构信息。近年来,该技术已被广泛应用于材料科学、建筑工程、生物医学及考古等多个研究领域^[17-21]。

本文以猪、牛、羊皮革为研究对象,采用Micro-CT技术对皮革样品进行扫描,高效无损地获取其不同正交切面的二维图像,并通过三维重构生成立体图像,结合Dragonfly软件的图像处理功能,系统分析皮革内部的结构特征,为天然皮革的特征研究与分析鉴别提供基础数据和技术支撑。

1 实验部分

1.1 材料及仪器

1.1.1 材料

皮革样品均取自浙江省质量技术监督检测研究院的成品皮革,包括2张头层猪皮革、2张头层黄牛皮革和2张头层山羊皮革。

1.1.2 仪器

Micro-CT(Xradia 610 Versa,德国蔡司有限公司);场发射扫描电子电镜(Gemini SEM 500,德国蔡司有限公司);离子溅射镀膜仪(JEC-3000FC,日本电子株式会社)。

1.2 分析方法

1.2.1 SEM样品制备及表征

皮革样品干燥处理后裁剪成约5 mm×5 mm大小,每样3份,用导电胶粘贴在钉台上,分别用于粒面、截面以及肉面的形貌扫描分析;将制好的样品放入离子溅射仪中进行镀金处理,电流20 mA、时间90 s。采用二次电子探测器,配合15 mm光阑,设置电压为3 kV,并根据实际需求选择合适的放大倍数进行扫描。

1.2.2 Micro-CT样品制备及表征

皮革样品裁剪成约5 mm×5 mm大小,使用强力胶将其垂直粘贴在大头针上,随后将大头针固定在样品台中,并置于仪器内的工作台底座上。之后,加载样品并利用可见光摄像头对感兴趣区域进行粗略地对中操作。

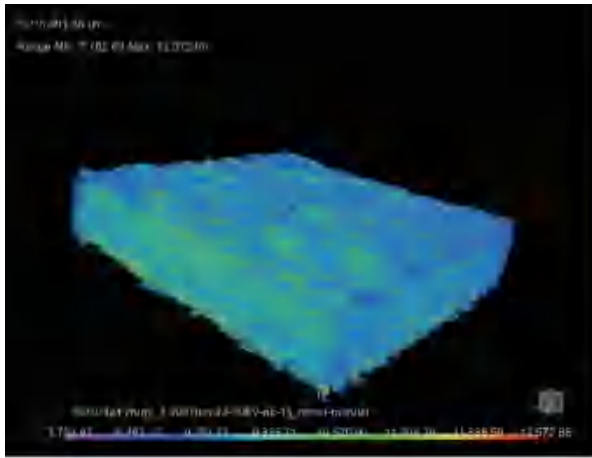
显微镜参数设置为:物镜4×,源电压60 kV,功率6.5 W,曝光时间1 s,像素模式选择Bin2,不加滤片。精确对中,并调整射线源与样品、探测器与样品的距离,当光信号强度达到约5000且透过率大于70%时,可获得3.4 μm的扫描分辨率。依据视场FOV情况选择合适的投影数量后即可开始断层图像扫描。利用皮革内部各个部位对X射线吸收的差异,当X射线穿过猪、牛和羊皮革样品后,未被样品吸收的部分被探测器获取并转换成数字信号,得到二维切片图像,经过360°全方位扫描后,可获得XY、XZ、YZ共3个正交切面的原始数据和可以自由分割与调用的三维立体图像。

1.2.3 图像分析处理

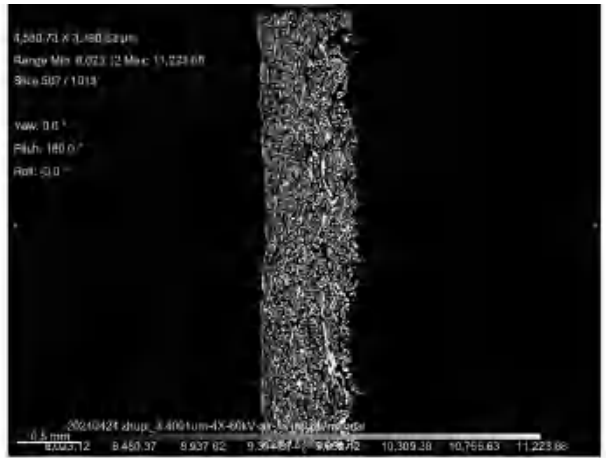
将扫描得到的原始数据导入Reconstructor软件中进行重构,对图像进一步优化,以消除样品在扫描过程中的漂移、射线硬化以及伪影等视觉干扰,有利于二维截面图像以及三维立体图像的处理。

理分析。将重建的数据导入 Dragonfly 软件,调节窗宽窗位,确保皮革样品完整呈现,生成三维立体图像、正交切面 XY 视图、正交切面 XZ 视图和正

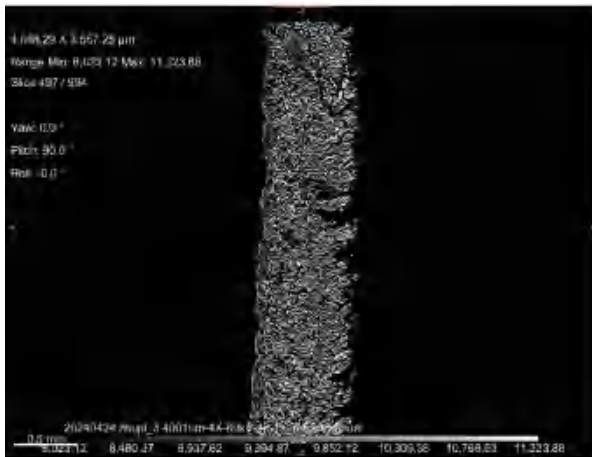
交切面 YZ 视图(见图 1)。在不同正交切面选取合适的二维切片图像,提取感兴趣的截面图像进行特征分析。



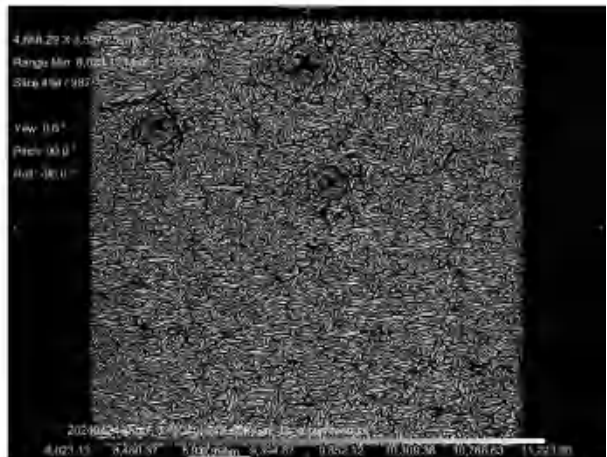
(a) 三维立体图像



(b) XY视图



(c) XZ视图



(d) YZ视图

图 1 Dragonfly 软件三维视图

1.2.4 毛发毛囊倾斜角度测量

用分割、测量工具在任意位点对样品进行分割测量,进而观察皮革内部毛发毛囊的倾斜角度等特征。在 YZ 视图中将三维坐标轴定位在一个毛发毛囊上,调整三维坐标轴角度,使其在 XY 视

图中能完整展现;使用工具测量毛发毛囊与粒面的夹角度数(见图 2),即毛发毛囊倾斜角度。每种皮革各选取 2 个样品,在每个样品中随机选择 3 个毛发毛囊,分别编号为 A、B、C,测量其倾斜角度并计算平均值。

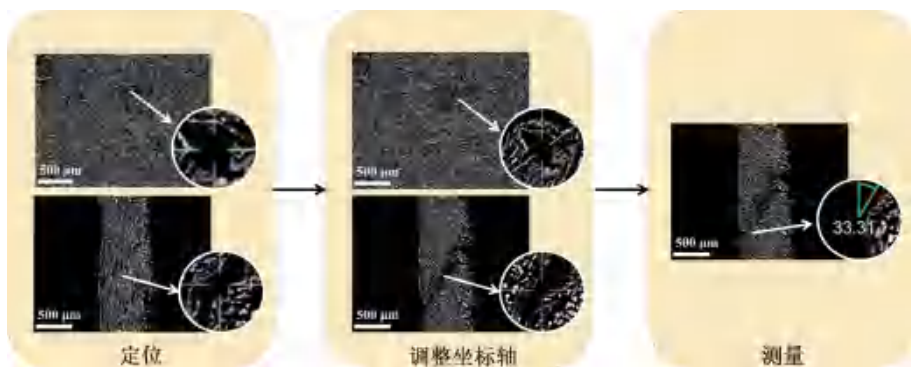


图 2 毛发毛囊测量流程

1.2.5 纤维束直径测量

扫描后,在正交切面 YZ 视图上获得约 1000 张切片图像,对这些图像从皮革粒面至肉面方向自动依序编号,从中选取具有代表性的切片,利用软件工具对纤维束直径进行测量。测量方法为:在每张切片上随机选取 10 根纤维束进行测量,并计算取平均值。

2 结果与讨论

2.1 皮革表面特征的 SEM 分析

图 3 为猪皮革、牛皮革和羊皮革的 SEM 图像。从图 3(a)、图 3(d)、图 3(g)的粒面图中可以观察到猪皮革、牛皮革和羊皮革的毛孔分布特征;图 3(b)、

图 3(e)、图 3(h)纵截面图清晰展示了猪皮革、牛皮革和羊皮革中乳头层和网状层的分界;而在图 3(c)、图 3(g)、图 3(i)的肉面图中可以发现,皮革纤维呈现均由单根纤维相互缠绕而形成的纤维束。皮革样品的粒面、肉面信息可能因涂覆层或磨损而被破坏,同时,其截面信息也可能因加工或对网状层做了分割处理而出现缺失。SEM 通过电子束与皮革样品待测表面相互作用产生多种信号,进而形成反映皮革样品表面形貌的高分辨成像图。然而,SEM 只能提供样品表面信息,每次仅能获得一个固定平面的图像,无法直接观测样品内部结构特征;一般需要经过树脂包埋、切片、重构等许多步骤才能获得立体图像,内部结构信息的获取难度大、耗时长^[22-23]。

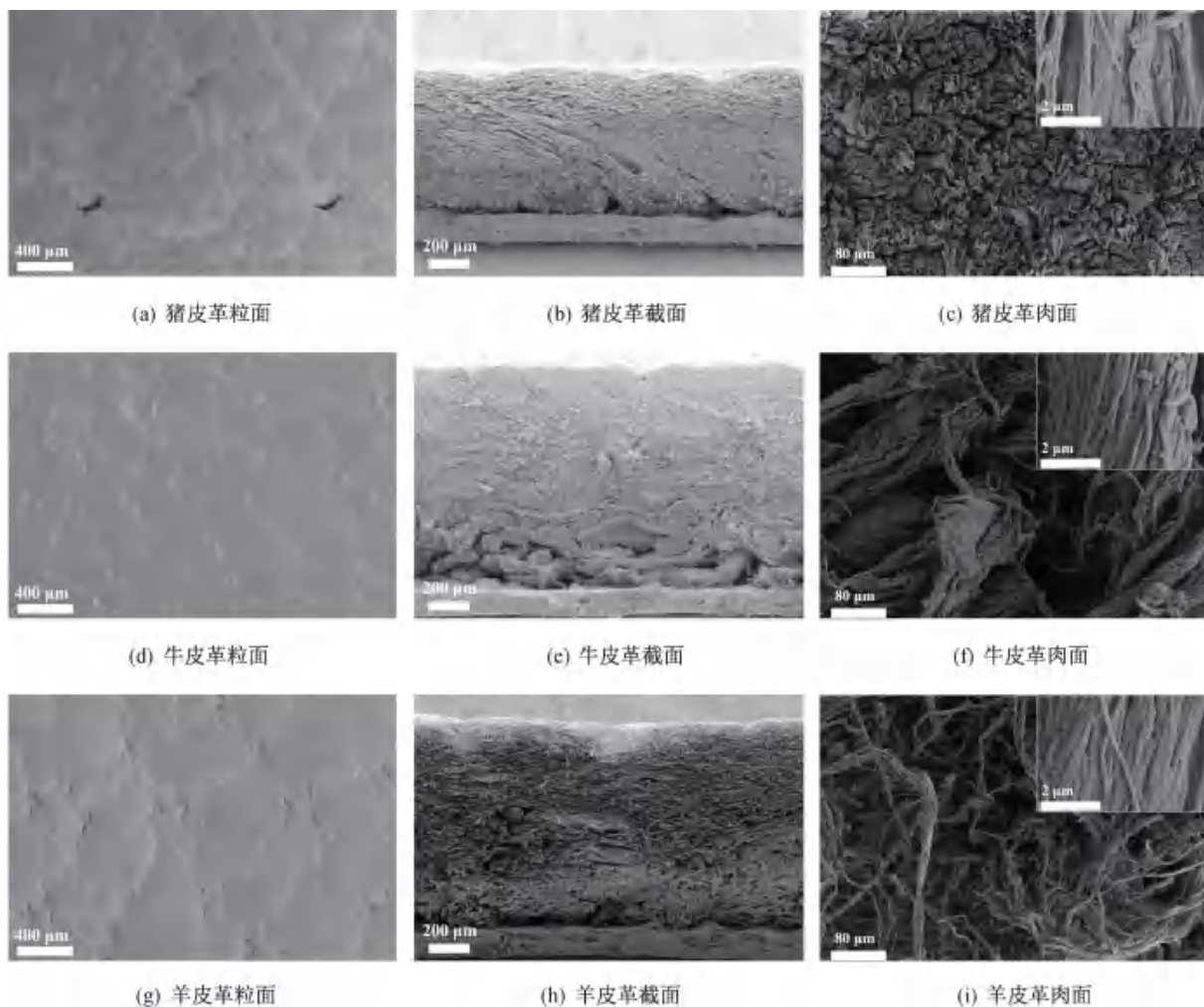


图 3 猪皮革、牛皮革和羊皮革的 SEM 图像

2.2 皮革内部结构特征的 Micro-CT 分析

2.2.1 皮革三维立体特征和剪裁效果

将手动重构的数据导入 Dragonfly 软件后,通过窗宽窗位的调节,得到去除低密度空气部分的猪、牛、羊皮革样品原始图像(见图 4(a)–(c))。

以图 4(d)–(f)为牛皮革样品为例,拖动旋转图像,可以清晰地看到皮革样品的外观特征,包括粒面乳突的起伏程度和毛孔的分布情况、肉面纤维束形态以及纵截面乳头层和网状纤维层的差异特征。同样以牛皮革为例,图 4(g)为使用剪裁工具

对牛皮革样品三维图像进行虚拟切片处理的效果,任意调节剪裁深度,可以分别观察到乳头层毛发毛囊生长和分布特征以及网状纤维层纵截面和横截面纤维束的形态和排列特征。图 4(h)为牛皮

革剪裁至乳头层效果图,图中毛发毛囊形态清晰、成束聚集生长;图 4(i)为牛皮革剪裁至网状纤维层效果图,图中纤维束粗大圆润,编织松散有明显空隙。

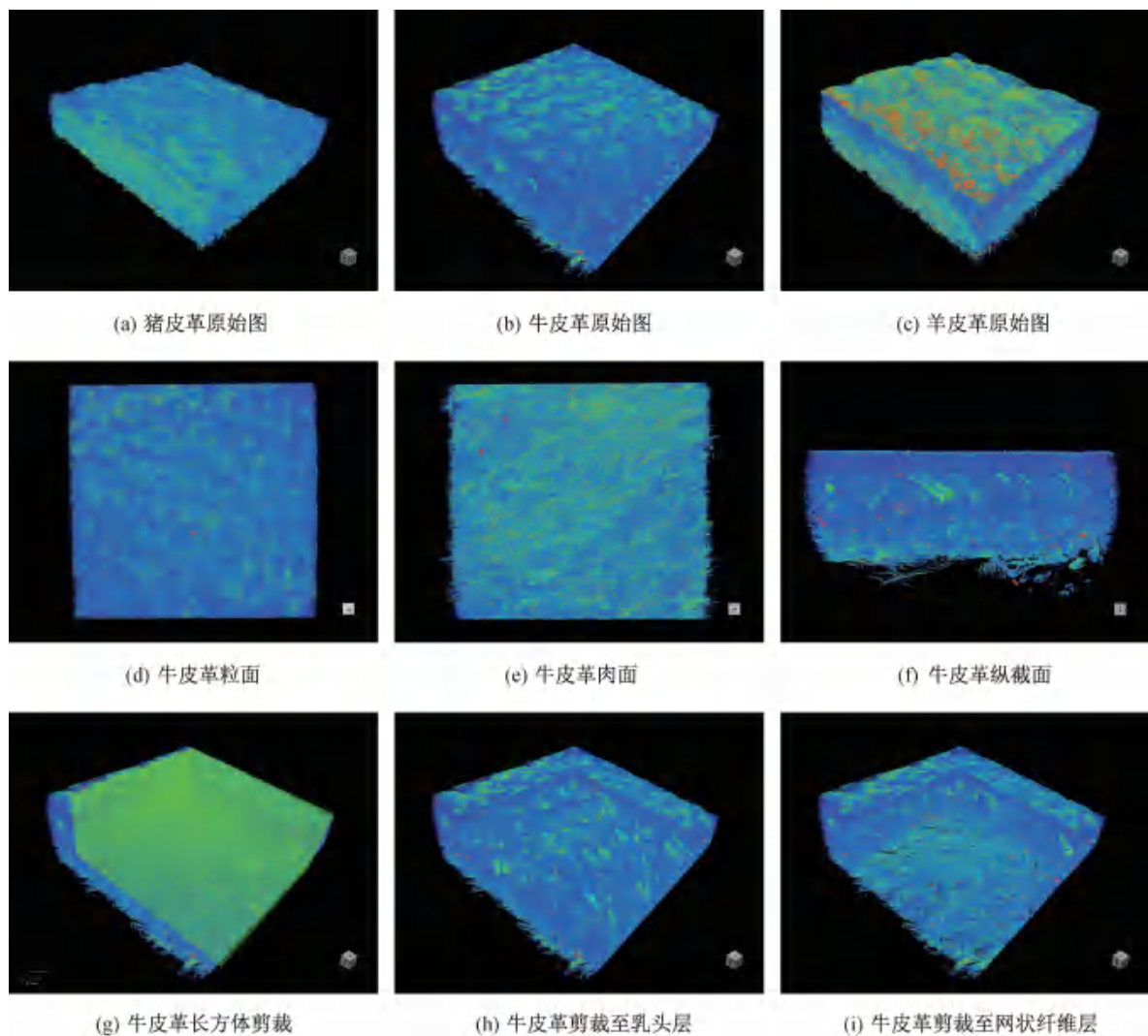


图 4 三维立体图像

2.2.2 皮革纵截面特征

图 5 为猪皮革纵截面图像。从图 5 可知:猪皮革整个革身较薄,毛发毛囊直接贯穿整个革层;纤维

束短小、粗壮,排列比较规整且无明显分层变化情况;纤维束直径较小,自粒面到肉面呈现由细到粗的变化特征。

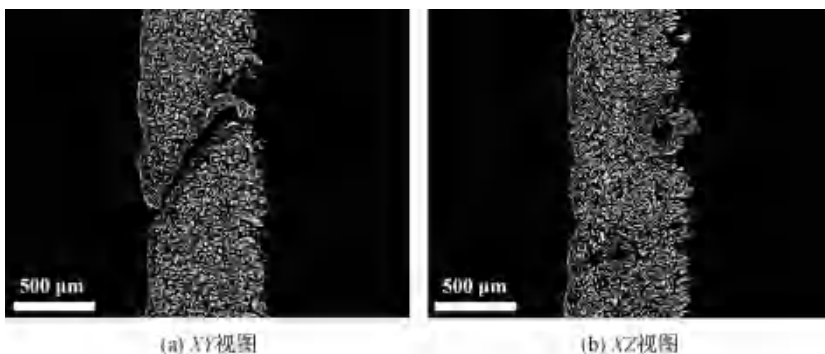


图 5 猪皮革纵截面图像

图6为牛皮革纵截面图像,可清晰观察到毛发毛囊的形态,毛发毛囊短而粗,呈直线状,截面为圆形或椭圆形;牛皮革的粒面较为平整,乳头

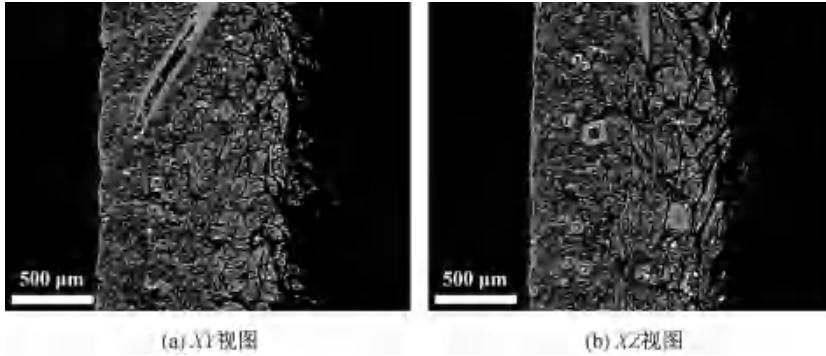


图6 牛皮革纵截面图像

图7为羊皮革纵截面视图图像。图7显示:羊皮革较薄,纤维束编织相对疏松,毛发毛囊细长且略有弯曲,截面多为不规则椭圆形,呈明显的成束

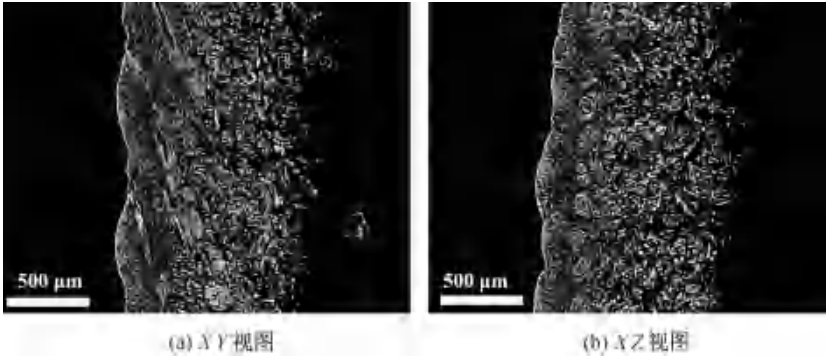


图7 羊皮革纵截面图像

生长特征;粒面凹凸不平,近粒面的乳头层纤维细密,编织紧凑,而靠近肉面纤维束编织相对疏松且空隙多。

毛发毛囊倾斜角度结果见表1。从表1可知:3种皮革的毛发毛囊倾斜角度存在明显差异,猪皮革毛发毛囊倾斜角度较大,1#和2#样品的平均值分别为 30.63° 和 27.92° ,相对标准偏差(*RSD*)较大,表明其毛发毛囊排列一致性较差;牛皮革的毛发毛囊倾斜角度适中,分别为 26.68° 和 25.86° ,*RSD*较小,表明其毛发毛囊排列较为整齐;羊皮革的毛发毛囊倾斜角度最小,平均值分别为 19.19° 和 18.53° ,*RSD*最小,表明其毛发毛囊排列一致性较高。综上所述,毛发毛囊倾斜角度是不同种类皮革的重要特征。

表1 毛发毛囊倾斜角度

样品	编号	毛发毛囊倾斜角度/ $^\circ$				<i>RSD</i> /%
		A	B	C	平均	
猪皮革	1#	31.58	24.43	35.88	30.63	16.96
	2#	25.14	33.41	25.20	27.92	
牛皮革	1#	28.99	26.52	24.52	26.68	6.43
	2#	25.27	24.99	27.31	25.86	
羊皮革	1#	19.43	19.98	18.17	19.19	4.72
	2#	19.12	18.97	17.51	18.53	

层的纤维束编织细密紧凑,接近肉面纤维束逐渐变得疏松且粗大,肉面纤维束更加疏松,空隙较多。

2.2.3 皮革横截面特征

横截面(正交切面YZ)能够直观呈现皮革由粒面到肉面的毛发毛囊分布特征以及纤维束形态和编织情况。猪皮革经扫描后,在正交切面YZ视图上有1029张切片,其中含猪皮革样品横截面的切片约在第400张至第650张之间。图8为选取的具有代表性的切片图像。图8显示:猪皮革内部纤维束结构相对简单,毛发毛囊排列较为稀疏,通常呈3束一组,且以锐角三角形的形式聚集;纤维束整体短粗、编织干净规整,紧密度在不同切片中有所变化。其中,靠近粒面纤维束编织较为致密,空隙较少;靠近肉面纤维束分布松散,出现明显的空隙。

牛皮革经扫描后,在正交切面YZ视图上有980张切片,其中含牛皮革样品横截面的切片约在第350张至第750张之间。选取具有代表性切片图像进行分析,结果如图9所示。由图9可以看出:牛皮革毛发毛囊并未贯穿整个革层,从粒面到肉面可以观察乳头层和网状纤维层结构的变化;在乳头层中,

毛发毛囊成团聚集,纤维束极细且缠绕在毛囊周围,毛发毛囊倾斜角较大,横截面接近圆形;在网状纤维

层中,纤维束粗大圆润,每根纤维束由多根同向排列的纤维构成。

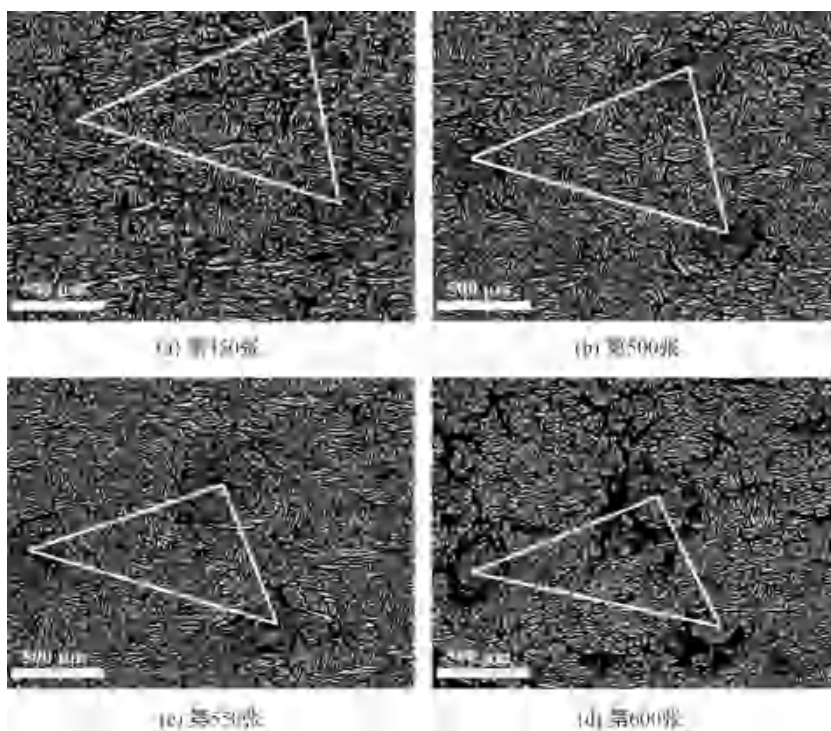


图 8 猪皮革横截面图像

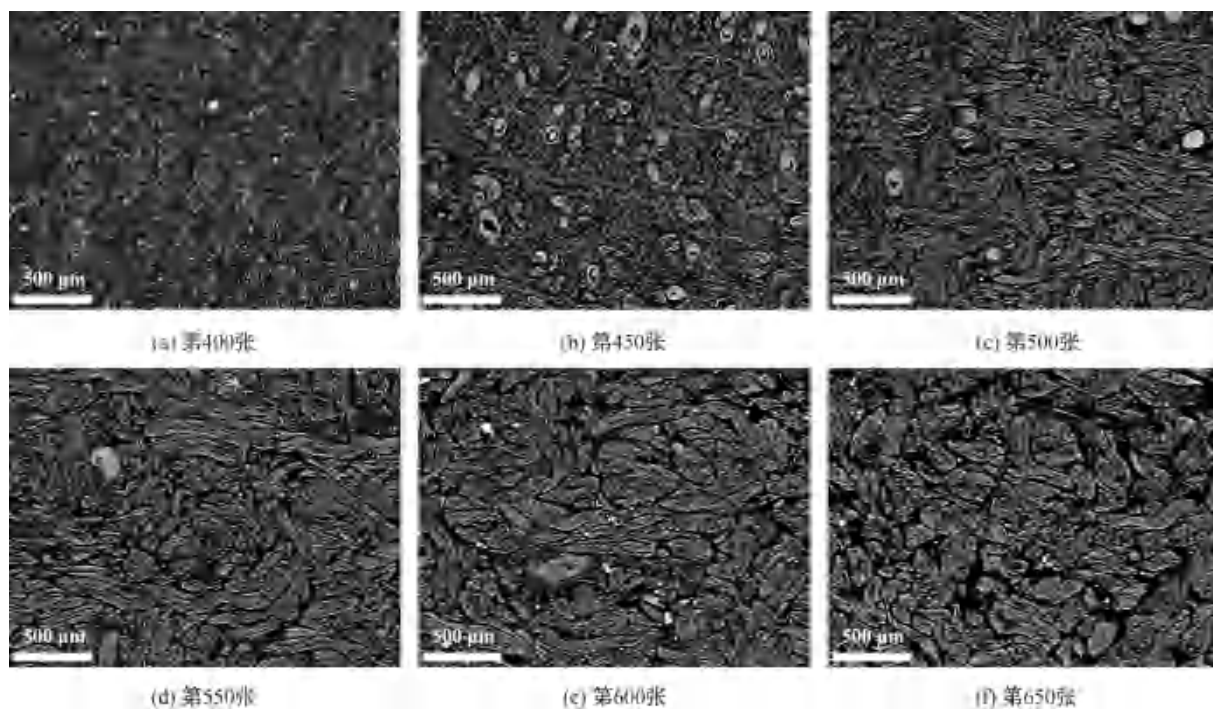


图 9 牛皮革横截面图像

羊皮革经扫描后,在正交切面 YZ 视图上有 989 张切片,其中含羊皮革样品横截面的切片约在第 300 张至第 700 张之间。选取具有代表性的切片图像进行分析(见图 10),与牛皮革类似,羊皮革的乳头层和网状纤维层也存在明显的差异。乳头

层中,毛发毛囊呈规律性排列,多为几根针毛和绒毛一组呈线性生长在一起,纤维束极细,缠绕在毛囊周围,毛发毛囊倾角较小,横截面上毛发毛囊呈椭圆形;网状纤维层中,纤维束较细且弯曲,排列无明显规律。

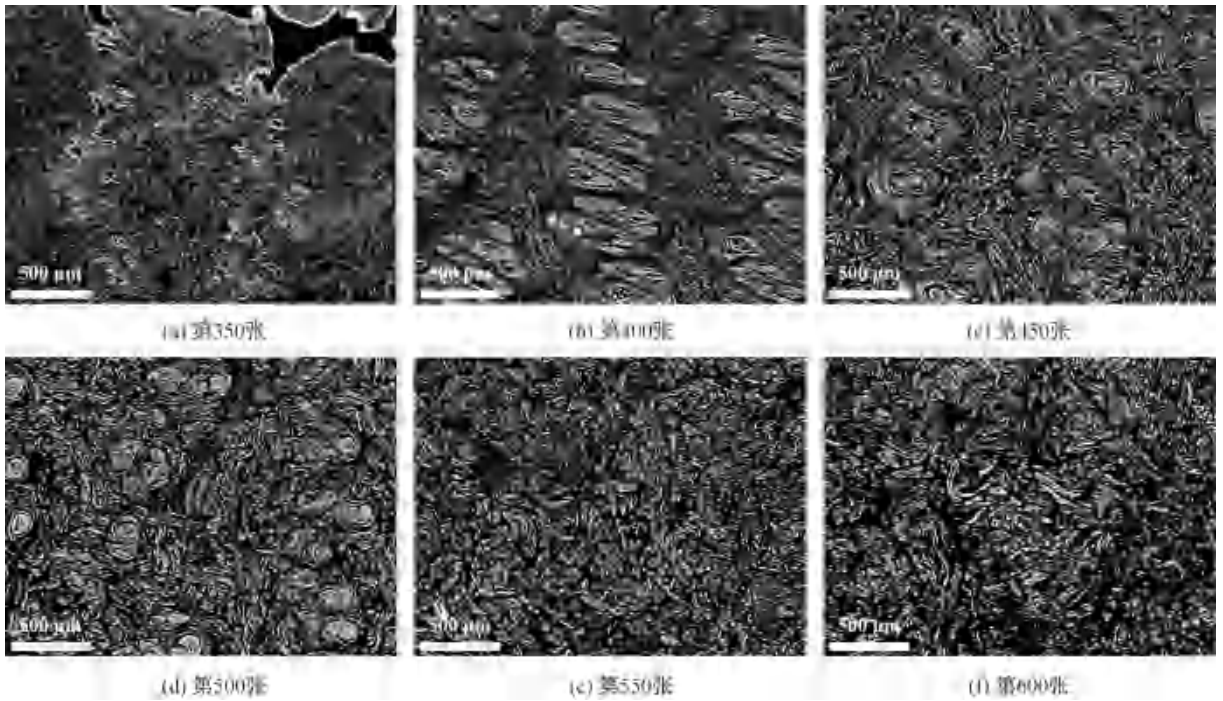


图10 羊皮革横截面图像

通过纤维束直径测量计算,探究猪、牛、羊皮革纤维束直径随深度变化的趋势,结果如图11所示。图11显示:随着切片深度(从粒面到肉面)的增加,3种皮革的纤维束直径均呈增大趋势,但增幅和变化规律存在明显差异。牛皮革的纤维束直径随切片深度增加而呈显著增大趋势,尤其在深度 $300\ \mu\text{m}$ 之后,最大直径可达 $140\ \mu\text{m}$ 。同时,误差棒较大,表明其纤维束在深层区域分布不均,可能受松散程度影响;羊皮革的纤维束直径整体较小,随深度增加由 $10\ \mu\text{m}$ 逐渐增长至 $30\ \mu\text{m}$,且变化幅度较小,表明其纤维束较细且紧密缠绕,内部结构稳定;猪皮革在近粒面($<300\ \mu\text{m}$)中,其纤维束直径与牛皮革相近,在更深层切片($>300\ \mu\text{m}$)中,直径增大趋缓,且存在一定波动,该现象可能与其纤维束长径比较小、接近肉面时容易松散有关。以上结果表明,牛皮革的

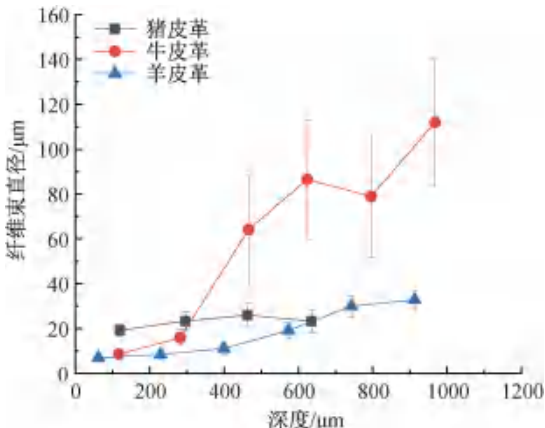


图11 纤维束直径变化曲线

纤维束直径增大最显著,结构较为疏松,羊皮革纤维束直径较小且变化幅度较小,结构相对紧密;猪皮革则介于二者之间,在深层区域增大不明显,可能受纤维束排列方式的影响。

3 结论

本文利用 Micro-CT 技术获取猪、牛、羊皮革的数据图像,结合 Dragonfly 图像处理软件对其内部结构特征进行无损分析,揭示了不同皮革在纤维束形态以及毛发毛囊等方面的特征,主要结论如下:

a) Micro-CT 技术无需对样品进行包埋、切片和喷镀等复杂的前处理,克服了传统显微法在样品制备和内部结构观察方面的不足,利用软件处理直接获取皮革内部图像数据。

b) 猪、牛、羊皮革内部结构差异显著。猪皮革内部纤维短小圆润,呈规律性编织;牛皮革粒面平整,分层差异显著,网状纤维层中纤维束粗大;羊皮革粒面有明显乳突,乳头层和网状纤维层中纤维束均细小且无规则缠结。

c) 毛发毛囊是不同种类皮革的重要特征之一。猪皮革中的毛囊 3 个 1 组呈三角形结构,毛发毛囊排列分散,倾斜角度较大且差异明显;牛皮革毛发毛囊成团生长,分散散乱,倾斜角度居中;羊皮革针绒毛成组呈线性生长,毛发毛囊排列紧密,倾斜角度最小且差异较小。毛发毛囊的倾斜角度受皮革种类及内部结构均匀性影响。

参考文献:

- [1] 马建中,刘凌云. 现代制革技术与实践(续)[J]. 西部皮革, 2004, 26(4): 48-49.
- [2] 褚乃清,俞凌云,唐莉纯,等. 现有天然皮革鉴别技术的局限性及应对建议[J]. 中国皮革, 2017, 46(3): 27-30.
- [3] 吴冬燕,孙晨晓,卞歆灵. 浅析皮革材质鉴定方法及应用[J]. 中国纤检, 2024(3): 49-52.
- [4] 顾乐华. 皮革的化学鉴定方法[J]. 印染助剂, 2008, 25(1): 45-46.
- [5] 刘慧. 用化学溶解法鉴别皮革的方法探讨[J]. 中国纤检, 2020(12): 57-59.
- [6] 孙琳琳,张磊,孙辛未. 采用傅立叶红外光谱法鉴别牛皮和聚氨酯革的研究[J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52(4): 34-35.
- [7] 杨海亮,郑海玲,周旸. 基于红外光谱的古代皮革制文物的老化评估及清洁保护[J]. 中国皮革, 2023, 52(5): 19-23.
- [8] 应楚楚,林华,高璨. 红外光谱分析技术在皮革及人工革鉴别中的应用[J]. 西部皮革, 2014, 36(2): 31-34.
- [9] Narayanan P, Janardhanan S K. An approach towards identification of leather from leather-like polymeric material using FTIR-ATR technique[J]. Collagen and Leather, 2024, 6(1): 1.
- [10] 陈宗良,王学川. DNA技术鉴别皮革和毛皮材质的研究现状与展望[J]. 中国皮革, 2019, 48(1): 14-17.
- [11] 毛小慧,刘敏. 天然皮革定性PCR检测方法的研究[J]. 中国皮革, 2014, 43(14): 97-99.
- [12] 赖心田,陈国培,洪晓明,等. 皮革制品DNA属性鉴定技术的研究[J]. 中国皮革, 2014, 43(9): 9-12.
- [13] Vuissoz A, Worobey M, Odegaard N, et al. The survival of PCR-amplifiable DNA in cow leather [J]. Journal of Archaeological Science, 2007, 34(5): 823-829.
- [14] 董改革,李成族,周秋成. 基于皮革毛孔分布特征的牛/羊皮革鉴别[J]. 中国纤检, 2024(4): 74-77.
- [15] Haines B M, Barlow J R. The anatomy of leather[J]. Journal of Materials Science, 1975, 10(3): 525-538.
- [16] Jawahar M, Vani K, Babu N C. Leather species identification based on surface morphological characteristics using image analysis technique [J]. Journal of the American Leather Chemists Association, 2016, 111(8): 308-314.
- [17] 张锐,余露,肖涉恒,等. Micro-CT技术在某地下工程裂隙岩体三维显微结构表征的应用[J]. 电力勘测设计, 2023(5): 52-56.
- [18] 吕志伟. X射线显微CT及闪烁体材料表征[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023:3-7.
- [19] Yu B H, Ren J B, Wang K S, et al. Experimental study on the characterization of orientation of polyester short fibers in rubber composites by an X-ray three-dimensional microscope [J]. Materials, 2022, 15(10): 3726.
- [20] 张华勇,马楠,刘鹏杰,等. 基于显微CT的皮革三维结构获取与观察方法[J]. 中国皮革, 2020, 49(2): 15-18.
- [21] Zhang H, Cheng J, Li T, et al. Observation and Analysis of Leather Structure Based on Nano-CT [C]// Tegtmeier D, Meyer M. 35th IULTCS Dresden Congress 2019. Dresden, Germany. Verein für Gerberei-Chemie und-Technik e. V. 2019:695-701.
- [22] 金帅,王会强,赵建新,等. 金相制备技术的发展[J]. 热处理, 2024, 39(5): 1-5.
- [23] 苗长坤. 铬鞣羊皮纤维网络三维重构研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2017:27-30.

(责任编辑:张会巍)