# 麦蛾柔茧蜂副产物茧丝的结构与性能研究

胡 蝶* 黄廷莉 李小雨 严艺彬 田茂生 聂作明 蒋彩英**

（浙江理工大学生命科学与医药学院，杭州 310018）

**摘 要** **【目的】** 麦蛾柔茧蜂 *Habrobracon hebetor* 是一种隶属于茧蜂科 Braconidae 的寄生性昆虫，其所分泌的丝纤维为天然蛋白材料，相关形态结构与理化性能尚缺乏系统性研究。为探究麦蛾柔茧蜂茧丝纤维的结构与性能，挖掘昆虫丝资源，本文采用多种表征手段，对其外观形态、二级结构、丝蛋白化学组成、吸湿性能与热学特性进行分析。**【方法】** 采用扫描电子显微镜结合能谱分析观察茧丝的表面形貌与元素组成；利用傅立叶变换红外光谱和 X 射线衍射解析茧丝蛋白二级结构；通过氨基酸组分分析丝蛋白的特点；回潮率试验评估茧丝的吸湿能力；采用热重分析研究茧丝的热分解行为与热稳定性。**【结果】** 扫描电镜结果显示茧丝纤维为细长均匀的单丝结构，平均直径为（1.39±0.22）μm；能谱分析显示其主要元素为碳（66.95%）、氮（18.44%）和氧（12.59%），呈现典型的蛋白质特征。根据氨基酸组成分析，茧丝蛋白主要含丝氨酸（33.3%）、甘氨酸（24.2%）和天冬氨酸/天冬酰胺（16.7%）；测定茧丝的回潮率为 10.45%±0.26%，显著高于蚕丝（$P < 0.01$）；红外光谱与 X 射线衍射结果表明蛋白二级结构以 β-折叠和 β-转角为主。热重分析表明其热分解温度为（317.13±1.29）℃，略低于家蚕丝。**【结论】** 麦蛾柔茧蜂茧丝具有精细的微观结构、富含 β-折叠结构和 β-转角的蛋白二级结构、优异的吸湿能力和较好的热稳定性，在天然丝纤维材料的多功能化和绿色可持续开发方面展现出潜在的应用前景，为寄生蜂类昆虫丝资源的挖掘与利用提供了理论依据。

**关键词** 麦蛾柔茧蜂；副产物；丝纤维；形态结构；性能特征

# Structural and functional characterization of the cocoon silk of *Habrobracon hebetor* (Hymenoptera: Braconidae)

HU Die* HUANG Ting-Li LI Xiao-Yu YAN Yi-Bin TIAN Mao-Sheng
NIE Zuo-Ming JIANG Cai-Ying**

(College of Life Sciences and Medicine, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract** **[Aim]** To investigate the structure and properties of cocoon silk fibers from Habrobracon hebetor, and investigate their potential as a silk resource. **[Methods]** Multiple characterization techniques were used to analyze their morphology, secondary structure, silk protein composition, moisture absorption properties, and thermal properties, of H. hebetor silk. Scanning electron microscopy, combined with energy-dispersive spectroscopy, were used to observe the surface morphology and elemental composition of the silk. Fourier transform infrared spectroscopy and X-ray diffraction were employed to analyze the secondary structure of its proteins and its amino acid composition was determined to reveal characteristic features of its proteins. The capacity of the silk to regain moisture was measured to evaluate its hygroscopic properties. In addition, thermogravimetric analysis was used to assess its thermal decomposition behavior and thermal stability. **[Results]** Scanning electron microscopy revealed that H. hebetor silk fibers are slender and uniform monofilaments with an average diameter of (1.39 ± 0.22) μm. Energy-dispersive spectroscopy analysis indicates that its main elements are carbon (66.95%), nitrogen (18.44%) and oxygen (12.59%), which is typical of a protein. Amino acid analysis showed that the silk protein is mainly composed of serine (33.3%), glycine (24.2%), and aspartic acid/asparagine (16.7%). The capacity of *H. hebetor* silk to regain moisture was 10.45% ± 0.26%, which is significantly higher than that of *Bombyx mori* silk ($P < 0.01$). Fourier transform

*第一作者 First author，E-mail：hd19980315@163.com

**通讯作者 Corresponding author，E-mail：jcy@zstu.edu.cn

收稿日期 Received：2025-06-24；接受日期 Accepted：2025-08-23

infrared spectroscopy and X-ray diffraction results demonstrated that the secondary protein structures are predominantly β-sheets and β-turns. Thermogravimetric analysis indicates that *H. hebetor* silk has a thermal decomposition temperature of (317.13 ± 1.29) ℃, which is slightly lower than that of *B. mori* silk. **[Conclusion]** The cocoon silk of exhibits a fine and uniform microstructure, a secondary structure rich in β-sheets and β-turns, excellent hygroscopic properties and favorable thermal stability. These findings suggest that it has the potential to be used in multifunctional natural silk-based materials. These findings provide theoretical support for the investigation and utilization of the silk produced by parasitoid wasps.

**Key words**　Habrobracon hebetor; byproduct; silk fibers; morphological structur; performance characteristics

在漫长的生物进化历程中，泌丝行为已演化为多种昆虫赖以生存的重要手段，广泛用于自我保护、取食及繁殖等生命活动（王孟卿和彩万志，2004），超过 16 个目的 50 余万种昆虫具有泌丝的能力（Sutherland *et al.*, 2010；陈志勇，2021）。昆虫丝是一类丰富的绿色可再生资源，早在 5 000 年前，家蚕 *Bombyx mori* 丝就已用于纺织行业。随着科学技术发展，研究者们发现蚕丝有着卓越的综合力学性能、可降解性、吸湿性、热稳定性等优良特性，因而在生物医学、光学、电学、化妆品等不同领域都得到广泛应用，家蚕丝已成为目前研究最深入、应用最广泛的昆虫丝（Collin *et al.*，2011; Xia *et al.*，2014）。

随着对家蚕丝研究不断深入，家蚕遗传资源的有限性和蚕丝材料性能局限日益凸显，使得当前产业化发展与行业升级面临挑战。因此，新的昆虫丝资源开发研究愈发受到重视。近年来，膜翅目 Hymenoptera 昆虫丝逐渐引起关注，其蛋白组成和结构特征已有较多研究积累。研究表明，膜翅目昆虫蜜蜂、蚂蚁和黄蜂所分泌的丝蛋白富含丙氨酸，二级结构以 α-螺旋为主，通常形成稳定的卷曲螺旋结构，这与家蚕丝以 β-折叠为主的结构明显不同，这类丝蛋白通常由 4 种同源的丝素蛋白组成，分子量普遍小于 100 kD（Sutherland *et al.*, 2006, 2012；Sezutsu *et al.*, 2007；Campbell *et al.*，2014）。

目前关于膜翅目昆虫丝力学性能与功能特性的研究相对较少。有报道表明蜜蜂丝具有较高的刚度，且丝素蛋白具有吸湿性，并且在溶胀状态下表现出高度的延展性（Hepburn *et al.*, 1979；Hepburn and Kurstjens，1988）。Zhang 等（2010）对比蚕丝与蜜蜂丝发现，蜜蜂丝纤维更加细滑，弹性模量、硬度、断裂应变均弱于蚕丝。

膜翅目寄生蜂是数量最多的寄生性天敌类群（Whitfield，2003），不仅在自然界调控寄主种群，维持生态系统平衡，在农业领域是一类重要的害虫生物防治资源，而且多数寄生蜂能吐丝结茧，保护蜂蛹不受外界环境影响。有关寄生蜂茧丝的结构与性能已引起学者的重点关注。Quicke 等（2004）及 Quicke 和 Shaw（2004）对姬蜂科和茧蜂科的 70 余种寄生蜂茧丝进行氨基酸组成分析发现，除小腹茧蜂亚科外，大部分寄生蜂的丝蛋白中丙氨酸、丝氨酸或甘氨酸含量相对较高，酸性氨基酸（天冬氨酸/天冬酰胺和谷氨酸/谷氨酰胺）一般较低，而在小腹茧蜂亚科中有近 20 种蜂丝蛋白以天冬氨酸/天冬酰胺最为丰富，且甘氨酸含量均低于 10%。麦蛾柔茧蜂 *Habrobracon hebetor* 作为一种外寄生蜂，能够泌丝结茧，其蜂茧作为副产物可进行应用开发。目前对麦蛾柔茧蜂的研究主要集中在生物防治领域，而对其茧丝的研究鲜少报道。为此本文对麦蛾柔茧蜂茧丝形态结构与理化特质进行了研究，为相关领域的生物材料研发提供理论基础，有利于挖掘新型生物资源，拓展其产业化应用领域。

## 1　材料与方法

### 1.1　麦蛾柔茧蜂茧丝的收集

麦蛾柔茧蜂及其寄主印度谷螟 *Plodia interpunctella* 为长期在实验室续代饲养的实验室种群，饲养于智能人工气候箱（型号 RXM-50A，宁波江南仪器厂），环境参数设置为温度（28±1）℃、相对湿度 75%±1%、光周期 14L∶10D。麦蛾柔茧蜂成虫以 20%的蜂蜜水喂养，挑选充分交配的健壮雌蜂寄生印度谷螟

4-5 龄老熟幼虫，待麦蛾柔茧蜂幼虫羽化后，收集新鲜蜂茧，置于恒温烘箱 60 ℃干燥后保存备用。

### 1.2 麦蛾柔茧蜂茧和丝纤维的外观形貌分析

挑选表面无明显杂质的麦蛾柔茧蜂茧，使用体视显微镜观察茧和丝的整体外观。从麦蛾柔茧蜂茧上分离单丝，用导电胶将茧和挑取的单丝粘附于扫描电子显微镜（Scanning electron microscope，SEM）载样台上，将固定后的样品置于恒温干燥箱内进行干燥。干燥完成后对样品进行喷金以增加导电性，时间为 60 s，加速电压为 3 kV，随后在扫描电镜（型号 VLTRA55，德国 Zeiss 公司）下观察茧和丝的表面形态。同时，对丝纤维进行 X 射线能量色散谱分析（Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS），分析丝的元素组成及含量。

### 1.3 麦蛾柔茧蜂茧丝的氨基酸组分分析

取麦蛾柔茧蜂茧粉末样品于水解管中，按 1∶1 比例加入 6 mol/L 盐酸 4 mL，通过氮吹仪通入氮气 15 min 后封管。密封后的样品置烘箱中 110 ℃水解 22 h。水解完成后将样品定容至 100 mL，准确吸取定容后的样品 2 mL，在温度 60 ℃条件下进行脱酸处理，脱至干燥。随后加入 0.02 mol/L 盐酸，旋混匀后通过 0.22 μm 滤膜过滤。采用英国 Biochrom30+型氨基酸分析仪对麦蛾柔茧蜂茧丝纤维进行氨基酸分析。

### 1.4 麦蛾柔茧蜂茧丝的回潮率测定

按照 GB/T 9995-1997《纺织材料含水率和回潮率的测定 烘箱干燥法》检测麦蛾柔茧蜂茧丝的回潮率。取麦蛾柔茧蜂茧丝样品和对照家蚕茧丝置于烘箱中干燥至恒重，称得质量记为 $G_0$，随即将麦蛾柔茧蜂茧丝和家蚕茧丝转移至人工气候箱，设置温度为（20±2）℃，相对湿度为 65%±3%，平衡 24 h 后再次称量记为 $G_a$，根据以下公式计算回潮率（$W$），使用 Graphpad Prism 8.0 软件对数据进行统计分析和作图。

$$W=\frac{(G_a-G_0)}{G_0}\times 100\%\ 。$$

### 1.5 麦蛾柔茧蜂茧丝的傅里叶变换红外光谱分析

将麦蛾柔茧蜂茧剪碎放入破碎仪中制成粉末，取适量已干燥的样品粉末与溴化钾粉末按 1∶100 混合，在玛瑙研钵中充分研磨均匀，随后将混合粉末转移到压片机中进行制片。采用傅立叶变换红外光谱仪（型号 JXFSTPRP-24，上海净信公司）进行测试，扫描范围为 400-4 000 $cm^{-1}$，分辨率为 4 $cm^{-1}$，实验室温湿度控制在（25±1）℃、相对湿度 30%。原始数据通过 OMNIC 软件收集分析，经过基线校正和平滑处理后导出数据，并使用 PeakFit 软件进一步进行去卷积分析、分峰拟合等后续分析。

### 1.6 麦蛾柔茧蜂茧丝的 X 射线衍射分析

取麦蛾柔茧蜂茧丝粉末于 X 射线衍射仪（型号 EMPYREAN，荷兰 PANalytical 公司）进行测试，分析茧丝的结晶结构，光源采用 Cu Kα 靶（入射波长 λ = 0.154 18 nm），参数设置：工作电压 45 kV，工作电流 40 mA，扫描范围 5-50°，扫描速度 10 °/min。

### 1.7 麦蛾柔茧蜂茧丝的热重分析

采用热重分析仪（型号 TGA/DSC2，美国 Mettler Toledo 公司），在氮气气氛条件下对麦蛾柔蜂茧丝的热稳定性进行检测。温度程序：起始温度为室温（平衡 5 min），以 10 ℃/min 线性升温至 1 000 ℃。原始数据通过 Origin 软件 Origin 2024 对结果进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 麦蛾柔茧蜂茧及其丝纤维的外观形貌

由体式镜观察到麦蛾柔茧蜂茧型较为规则，表面附着浮毛状的丝，整体呈长椭圆形，长（3.34±0.46）mm（$n$=30），宽（1.54±0.29）mm（$n$=30）（图 1：A）。扫描电镜表征显示茧表面由致密排列的丝纤维网络构成，无草酸钙晶体附着（图 1：B）。麦蛾柔茧蜂茧的丝由单根丝纤维组成，表面较为光滑，直径为（1.39±0.22）μm，

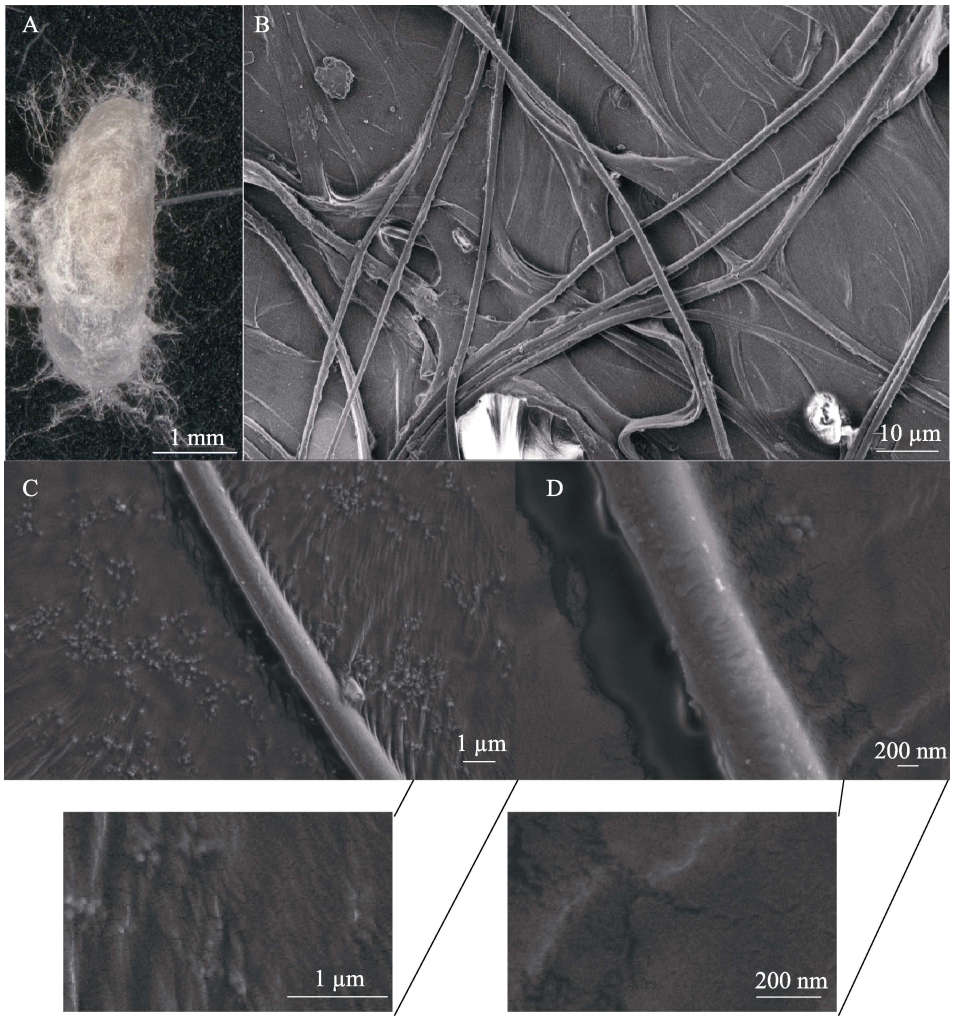



**图 1　麦蛾柔茧蜂茧及其丝纤维的显微与超微形态结构**

**Fig. 1　Ultramorphological structure of the cocoon and silk fiber of *Habrobracon hebetor***

A. 麦蛾柔茧蜂茧的形貌图；B. 麦蛾柔茧蜂茧丝的扫描电镜图；C. 麦蛾柔茧蜂丝纤维在放大倍数 6 000×下的扫描电镜图；D. 麦蛾柔茧蜂丝纤维在放大倍数 20 000×下的扫描电镜图。

A. Morphology of the cocoon of *H. hebetor*; B. Scanning electron microscopy image of the coccon silk from *H. hebetor*; C. Scanning electron microscopy image of the silk fibers from *H. hebetor* at 6 000× magnification; D. Scanning electron microscopy image of the silk fibers from *H. hebetor* at 20 000× magnification.

（图 1：C，D）。能谱分析结果表明，麦蛾柔茧蜂的茧丝主要元素为碳（66.95%）、氮（18.44%）和氧（12.59%），并含微量硫（0.26%）、氯（1.09%）及钾（0.48%），这说明茧丝的主要成分为蛋白质。

## 2.2　麦蛾柔茧蜂茧丝的氨基酸组成

麦蛾柔茧蜂茧丝蛋白氨基酸以丝氨酸（33.3%）、甘氨酸（24.2%）和天冬氨酸/天冬酰胺（16.7%）为主，其余氨基酸含量相对较低（图 2）。基于氨基酸组成数据，进一步计算了该丝蛋白的特征氨基酸比值，并与邓婷婷（2017）报道的家蚕丝蛋白进行对比。结果显示，麦蛾柔茧蜂茧丝中碱性/酸性氨基酸的比值较家蚕丝低，亲水性/疏水性氨基酸的比值相对较高，而小侧链氨基酸的比例较低（表 1）。

## 2.3　麦蛾柔茧蜂茧丝的吸湿性能

回潮率试验是纤维材料吸湿性能测试中最常用的方法之一，能反映材料在空气中吸收水分的能力。为比较麦蛾柔茧蜂茧丝与家蚕茧丝的吸湿性能，分别对两种茧丝进行回潮率测定，结果如图 3 所示，麦蛾柔茧蜂茧丝回潮率为 10.45%±

0.26%，家蚕茧丝的回潮率为 7.7%±0.21%。麦蛾柔茧蜂的回潮率显著高于家蚕茧丝（$P < 0.01$），表明其对水分的吸附能力更强，具备更优的吸湿性能。

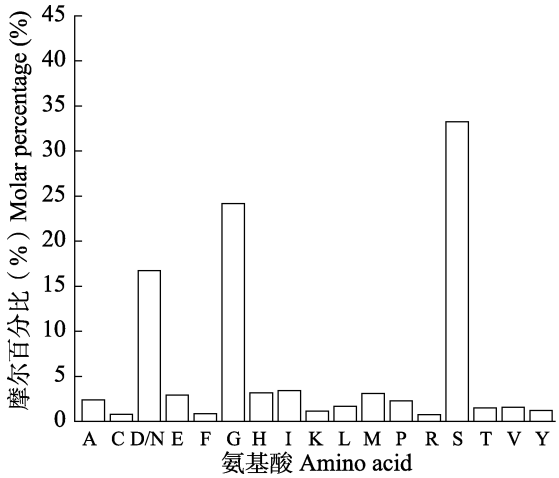



**图 2 麦蛾柔茧蜂茧丝蛋白的氨基酸组成**

**Fig. 2 Amino acid composition of the cocoon silk from *Habrobracon hebetor***

A: 丙氨酸；C: 半胱氨酸；D/N: 天冬氨酸/天冬酰胺；E: 谷氨酸/谷氨酰胺；F: 苯丙氨酸；G: 甘氨酸；H: 组氨酸；I: 异亮氨酸；K: 赖氨酸；L: 亮氨酸；M: 甲硫氨酸；P: 脯氨酸；R: 精氨酸；S: 丝氨酸；T: 苏氨酸；V: 缬氨酸；Y: 酪氨酸。

A: Alanine; C: Cysteine; D: Aspartic acid/Asparagine; E: Glutamic acid/Glutamine; F: Phenylalanine; G: Glycine; H: Histidine; I: Isoleucine; K: Lysine; L: Leucine; M: Methionine; P: Proline; R: Argnine; S: Serine; T: Threonine; V: Valine; Y: Tyrosine.

## 2.4 麦蛾柔茧蜂茧丝的红外光谱

本研究针对麦蛾柔茧蜂茧丝的红外光谱图（图 4：A），重点对酰胺 I 带（1 600-1 700 $cm^{-1}$）展开去卷积处理等处理，分析结果如图 4（B）所示。结果表明该茧丝蛋白的二级结构主要是 β-折叠和 β-转角，α-螺旋和无规卷曲含量相对较低（表 2）。

## 2.5 麦蛾柔茧丝的晶体结构

对麦蛾柔茧蜂茧丝进行 X 射线衍射测试分析，结果表明茧丝中存在 2 个主要的衍射峰，分别在衍射角 15.17°和 19.91°附近（图 5）。其中，衍射角为 15.17°的衍射峰归属于 α-螺旋结构，

**表 1 麦蛾柔茧蜂茧丝蛋白特征氨基酸的比值**

**Table 1 Ratio of characteristic amino acid in the cocoon silk from *Habrobracon hebetor***

| 类别* Type | 麦蛾柔茧蜂茧丝 Cocoon silk of *H. hebetor* | 家蚕丝** Silk fiber of *B. mori* |
|---|---|---|
| 碱性/酸性 Basic/Acidic | 0.258 | 0.376 |
| 亲水性/疏水性 Hydrophilic/Hydrophobic | 1.598 | 0.882 |
| 小侧基/大侧基 Small side groups/ Large side groups | 1.956 | 2.569 |
| 甘氨酸/丙氨酸 Glycine/Alanine | 10.267 | 1.425 |

*带有小侧基氨基酸包含甘氨酸、丙氨酸、丝氨酸、苏氨酸、脯氨酸和组氨酸，其他为带有大侧基氨基酸；亲水性氨基酸包含天冬氨酸、谷氨酸、丝氨酸、酪氨酸、苏氨酸、精氨酸、赖氨酸和组氨酸，其他为疏水性氨基酸；碱性氨基酸包含赖氨酸、精氨酸和组氨酸，酸性氨基酸包含天冬氨酸、谷氨酸（Sen and Babu, 2004）。**数据来源邓婷婷（2017）。

* Amino acids with small side groups include glycine, alanine, serine, threonine, proline and histidine, the rest are amino acids with large side groups. Hydrophilic amino acids include aspartic acid, glutamic acid, serine, tyrosine, threonine, arginine, lysine and histidine, the rests are hydrophobic amino acids. Alkaline amino acids include lysine, arginine, and histidine, acidic amino acids include aspartic acid and glutamic acid (Sen and Babu, 2004). ** Data cited from Deng (2017).

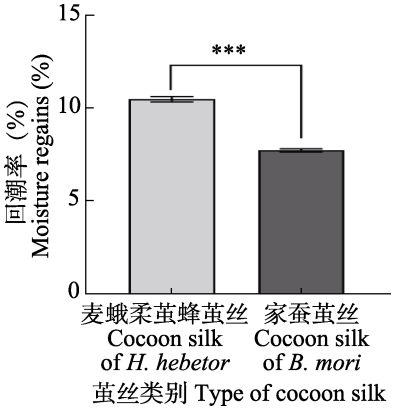



**图 3 麦蛾柔茧蜂茧丝和家蚕茧丝的回潮率**

**Fig. 3 The moisture regain of cocoon silk from *Habrobracon hebetor* and *Bombyx mori***

图中数据为平均值±标准误，***表示两者有显著差异（$P$<0.001，$t$ 检验）。

Data in the figure are mean±SE, *** means significant difference between two types of cocoon silk ($P$<0.001, $t$-test).

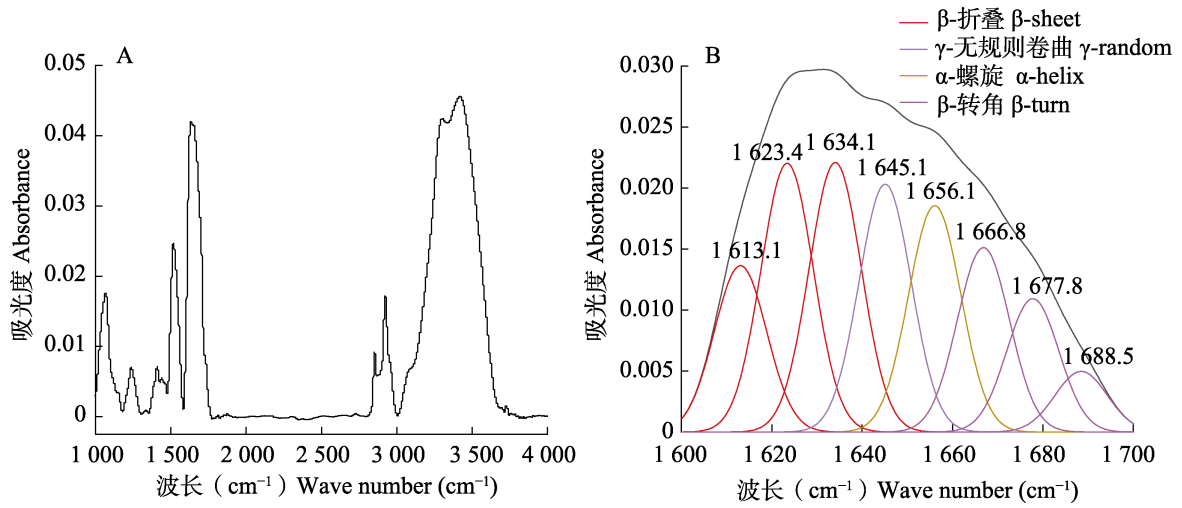



**图 4　麦蛾柔茧蜂茧丝的红外光谱图及去卷积结果**

**Fig. 4　Infrared spectra and deconvolution results of cocoon silk *Habrobracon hebetor***

A. 红外光谱图；B. 酰胺Ⅰ区去卷积分析结果。

A. Infrared spectra image; B. Deconvolution results of the amide Ⅰ band.

**表 2　麦蛾柔茧蜂茧丝的二级结构含量**

**Table 2　Secondary structure composition of cocoon silk from *Habrobracon hebetor***

| 二级结构 Secondary structure | 麦蛾柔茧蜂茧丝（%） Cocoon silk of *H. hebetor* (%) |
|---|---|
| β-折叠 β-sheet | 45.1 |
| β-转角 β-turn | 24.6 |
| α-螺旋 α-helix | 14.2 |
| 无规卷曲 Random coil | 16.1 |

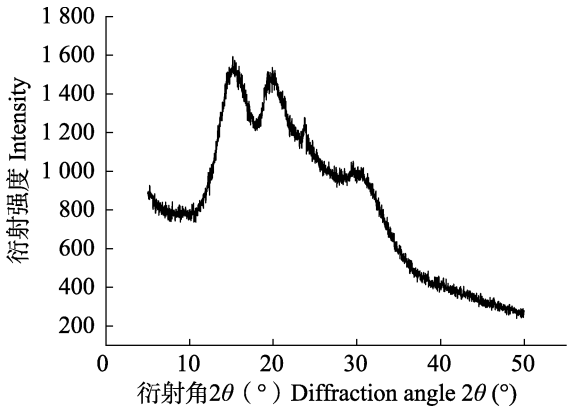



**图 5　麦蛾柔茧蜂茧丝的 X 射线衍射图谱**

**Fig. 5　X-ray diffraction patterns of cocoon silk from *Habrobracon hebetor***

19.53°衍射峰归属于 β-折叠结构。因此，麦蛾柔茧蜂茧丝纤维中的二级结构中含有 β-折叠和 α-螺旋，这与傅里叶红外光谱的分析结果相一致。

### 2.6　麦蛾柔茧蜂茧丝的热学性能

麦蛾柔茧蜂茧丝的热稳定性测试结果（图 6：A, B）中热重曲线（TG）反映麦蛾柔茧蜂茧丝在室温到 1 000 ℃的受热过程中的质量变化，微商热重曲线（DTG）为相应 TG 曲线的一阶导数，反映质量损失速率随温度的变化情况。TG 曲线显示在室温至 150 ℃的升温过程中，茧丝质量损失平缓，其主要原因是丝纤维内部结合水蒸发，此阶段损失速率相对较低。茧丝的主要热分解温度区间约在 180-450 ℃区间，随着温度升高分子结构开始发生显著解离，高分子链中羧基、氨基等官能团逐步断裂脱落，样品出现急剧质量损失（总失重率约为 62.3%），DTG 曲线在（317.13±1.29）℃处呈现最大失重速率峰，由此可知茧丝热分解温度为（317.13±1.29）℃。TG 曲线的最后一个阶段为蚕丝的热稳定阶段，此时纤维剩余物已经完全氧化分解，形成热稳定性较高的碳化产物，质量变化趋于稳定（约 23%）。

## 3　结论与讨论

麦蛾柔茧蜂作为一类重要的寄生性膜翅目昆虫，在寄主调控与生物防治研究中占有重要地位。其在幼虫发育过程中分泌形成的茧，不仅具有保护功能，更具有独特的研究价值。本研究通

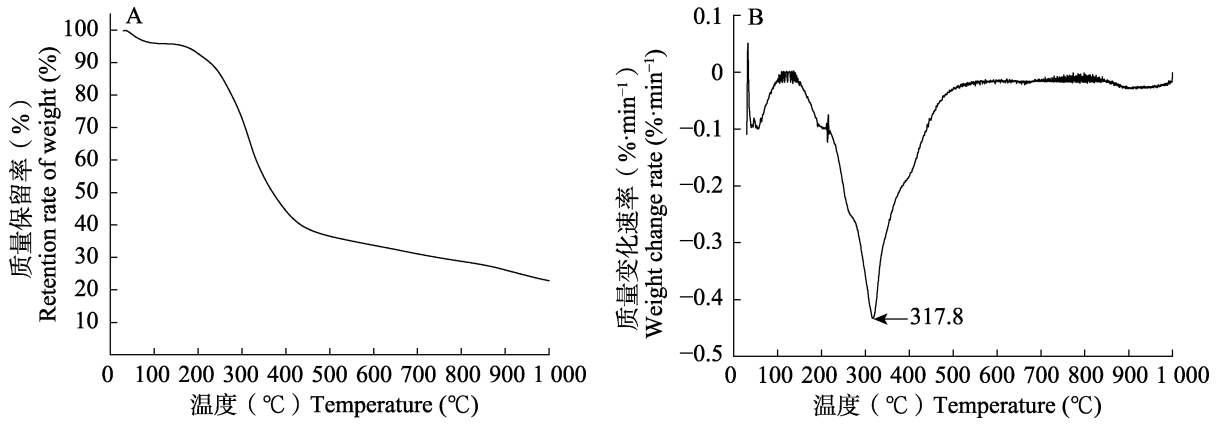



**图 6　麦蛾柔茧蜂茧丝的热重分析结果**

**Fig. 6　Thermogravimetric analysis results of cocoon silk from *Habrobracon hebetor***

A. 麦蛾柔茧蜂茧丝的热重曲线；B. 麦蛾柔茧蜂茧丝的微商热重曲线。

A. Thermogravimetric (TG) curves of of *H. hebetor* cocoon silk; B. Derivative thermogravimetry (DTG) curves of of *H. hebetor* cocoon silk.

过 SEM 表征发现，麦蛾柔茧蜂单丝直径仅为（1.39±0.22）μm，显著低于传统家蚕丝（13-18 μm）、野蚕 *Bombyx mandarina* 丝（12-15 μm）（诸鸿韬，2020）以及膜翅目的蜜蜂丝直径（5.4±1.5）μm（Zhang *et al.*, 2010）、胡蜂 *Vespula vulgaris* 丝（4-15 μm）（Ishay and Ganor, 1990），和二化螟盘绒茧蜂 *Cotesia chilonis* 茧丝直径（1.89±0.04）μm 相当（李小雨等，2024），表明丝纤维的直径可能与昆虫的大小有关（Sutherland *et al.*，2012）。

在麦蛾柔茧蜂茧中检测到多种氨基酸，主要成分为丝氨酸、甘氨酸和天冬氨酸/天冬酰胺，其它氨基酸含量均低于 5%。鳞翅目家蚕的丝是目前应用最广泛的昆虫丝，其丝蛋白的氨基酸以甘氨酸、丙氨酸和丝氨酸和酪氨酸含量较高（Vepari and Kaplan，2007）。膜翅目中意大利蜜蜂 *Apis mellifera* 丝甘氨酸含量低，天冬氨酸/天冬酰胺、丙氨酸、丝氨酸和谷氨酸含量较高，牛头犬蚁 *Myrmecia forficata* 和黄猄蚁 *Oecophylla smaragdina* 丝的氨基酸组成与蜜蜂相似，黄大胡峰 *Vespa simillima xanthoptera* 分泌的丝中富含丙氨酸和丝氨酸（Sezutsu *et al.*，2007；Sutherland *et al.*，2007；Campbell *et al.*，2014），菜粉蝶盘绒茧蜂 *Cotesia glomeratus* 茧丝主要含有天冬氨酸/天冬酰胺、丝氨酸、丙氨酸和甘氨酸（Yamada，2002；Yamada *et al.*，2004）。本研究表明麦蛾柔茧蜂茧丝蛋白的氨基酸组成明显区别于鳞翅目家蚕丝，与同属膜翅目的蜜蜂、黄蜂、蚂蚁、菜粉蝶盘绒茧蜂等昆虫也显示出一定差异，这一结果说明，昆虫丝的氨基酸组成存在多样性，可能与昆虫的生活习性与所处环境有关。与蚕丝相比，麦蛾柔茧蜂茧丝中亲水性氨基酸与疏水性氨基酸的比值更高。该比值直接影响丝纤维的吸湿性能：比值越大，表明纤维中亲水性基团越丰富，因而与水分子形成缔合水的能力越强，吸湿性能也越优越。回潮率测试结果显示，麦蛾柔茧蜂茧丝的回潮率显著高于家蚕丝，进一步验证了其吸湿性能优于后者，与其更高的亲/疏水性氨基酸比值相一致。麦蛾柔茧蜂茧丝优异的吸湿能力在开发舒适性要求较高的纺织品、医用敷料以及吸湿薄膜等材料领域具有良好的应用潜力。

红外光谱法是表征昆虫丝蛋白分子构象的重要手段。研究表明丝蛋白的特征吸收峰主要集中在酰胺Ⅰ、酰胺Ⅱ和酰胺Ⅲ的吸收带之中（Asakura *et al.*，1985; Krimm and Bandekar，1986），其中酰胺Ⅰ带常用于分析丝蛋白的二级结构（Susi and Byler，1986），β-折叠结构通常对应于酰胺Ⅰ区域 1 600-1 640 $cm^{-1}$ 波段（Xie *et al.*，2022），螺旋结构分布于 1 665-1 654 $cm^{-1}$

区间（Dong *et al.*，1990；Yang *et al.*，2015），而 1 688-1 666 $cm^{-1}$ 范围内的特征峰则归属于 β-转角结构（Chou and Fasman，1977）。本研究发现麦蛾柔茧蜂茧丝蛋白的晶态结构同时含有 β-折叠、β-转角、α-螺旋和无规卷曲，其中 β-折叠和 β-转角的含量更高。这一特征与目前发现的大部分膜翅目昆虫丝的二级结构较为一致，与鳞翅目昆虫家蚕丝蛋白的分子结构也表现出较高相似性，而与同为膜翅目的蜜蜂、蚂蚁、胡蜂等差异较大（Thorat *et al.*，2020）。家蚕丝蛋白以 β-折叠为主，这种结构特征与其茧壳的高强度和保护功能密切相关（Vepari and Kaplan，2007）。社会性昆虫如蜜蜂、蚂蚁和胡蜂的丝蛋白主要以 α-螺旋结构为主，这种结构转变与其社会性生活方式的进化相关（Thorat *et al.*，2020）。蜜蜂丝本身为脆性材料，其单独构成的茧在保护方面的作用相对有限，而工蜂在幼虫吐丝结茧前以蜂蜡封盖巢房，可以提供额外的屏障（李诗怡和胡福良，2016）。幼虫羽化后成蜂将残留的茧丝与蜂蜡进一步结合形成天然复合材料，能够显著提高巢体硬度和强度，有利于蜂巢整体的稳定性与耐久性（Hepburn *et al.*，1979；Hepburn and Kurstjens，1988；李诗怡和胡福良，2016）。相比之下，麦蛾柔茧蜂并不具备蜜蜂那样的社会化行为，其茧的构建完全依赖自身分泌的丝，该丝具有较高的 β-折叠结构含量，赋予其较强的机械性能，形成的茧不仅为幼虫发育提供稳定的物理屏障，还能有效抵御外界环境压力，如捕食与脱水等威胁。麦蛾柔茧蜂茧丝的热分解温度为（317.13±1.29）℃，低于家蚕丝（334.0 ℃）。与家蚕丝相比，麦蛾柔茧蜂茧丝较低的热稳定性可能通过化学修饰或复合材料设计得到改善，从而扩展其应用范围。

作为寄生性天敌昆虫的副产物，麦蛾柔茧蜂茧丝的利用可与害虫生物防治形成协同效应。与依赖人工养殖的家蚕丝不同，该茧丝可通过优化害虫管理过程中的副产物回收实现低成本获取，符合循环经济理念。然而，目前麦蛾柔茧蜂茧丝在实际应用中仍存在瓶颈。首先，麦蛾茧蜂的茧丝产量较低且来源分散，限制了其在产业中的推广应用。其次，由于丝纤维直径较细，难以满足传统纺织领域对纺织材料的要求。此外，茧丝的生物相容性、生物降解性、成膜性等性能仍缺乏研究，因此在生物医学材料等领域的应用方向尚不明确。针对上述问题，未来可从以下几个方向开展研究：构建茧丝的可持续获取体系，如通过优化寄主养殖模式提高茧丝产量和高效回收；利用基因组和蛋白组技术开展丝蛋白表达基因的解析鉴定，通过基因工程技术重组表达丝蛋白实现大规模生产；系统研究茧丝的生物相容性等理化性能，明确其在功能材料中的潜在应用方向；结合材料改性与复合技术探索其在高附加值领域的应用，如柔性电子器件、生物医用材料等，推动其逐步向产业化迈进。

综上，本研究对麦蛾柔茧蜂茧丝的结构与性能进行了分析，表明该蜂茧作为一种新型天然丝蛋白材料具有良好的应用潜力，但其开发利用尚处于初级阶段，今后仍需继续深入研究，从而拓展天然丝资源的开发与应用途径。

## 参考文献 (References)


Asakura T, Kuzuhara A, Tabeta R, Saito , 1985. Conformational characterization of *Bombyx mori* silk fibroin in the solid state by high-frequency carbon-13 cross polarization-magic angle spinning NMR, X-ray diffraction, and infrared spectroscopy. *Macromolecules*, 18(10): 1841–1845.

Campbell PM, Trueman HE, Zhang Q, Kojima K, Kameda T, Sutherland TD, 2014. Cross-linking in the silks of bees, ants and hornets. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 48: 40–50.

Chen ZY, 2021. Comparative study on structure, properties and composition of Lepidopteran silk. Master dissertation. Chongqing: Southwest University. [陈志勇, 2021. 鳞翅目昆虫丝的结构、性能与成分比较研究. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]

Chou PY, Fasman GD, 1977. Beta-turns in proteins. *Journal of Molecular Biology*, 115(2): 135–175.

Collin MA, Edgerly JS, Hayashi CY, 2011. Comparison of fibroin cDNAs from webspinning insects: Insight into silk formation and function. *Zoology*, 114(4): 239–246.

Deng TT, 2017. Study on the structure and properties of *Bombyx mori* silk, *Bombyx mandarina* silk and *Antheraea assama* silk. Master dissertation. Chongqing: Southwest University. [邓婷婷, 2017. 家蚕丝、野桑蚕丝及琥珀蚕丝的结构和性能研究. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]

Dong A, Huang P, Caughey WS, 1990. Protein secondary structures in water from second-derivative amide I infrared spectra. *Biochemistry*, 29(13): 3303–3308.

Hepburn HR, Chandler HD, Davidoff MR, 1979. Extensometric properties of insect fibroins: The green lacewing cross-β, honeybee α-helical and greater waxmoth parallel-β conformations. *Insect Biochemistry*, 9(1): 69–77.

Hepburn HR, Kurstjens SP, 1988. The combs of honeybees as composite materials. *Apidologie*, 19(1): 25–36.

Ishay JS, Ganor E, 1990. Comb cells and puparial silk in the oriental hornet nest: Structure and function. *Journal of Morphology*, 203(1): 11–19.

Krimm S, Bandekar J, 1986. Vibrational spectroscopy and conformation of peptides, polypeptides, and proteins. *Advances in Protein Chemistry*, 38: 181–364.

Li SY, Hu FL, 2016. Research on microstructures and physical properties of honeybee silk. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 18(2): 47–51. [李诗怡, 胡福良, 2016. 蜜蜂丝的微观结构与物理性能研究. 中国农业科技导报, 18(2): 47–51.]

Li XY, Hu D, Huang TL, Yao HW, Jiang CY, 2024. Morphological structure and physicochemical properties of silk fibers from the cocoons of the parasitoid wasp, *Cotesia chilonis* (Matsumura) (Hymenoptera: Braconidae). *Journal of Environmental Entomology*, 46(5): 1255–1260. [李小雨, 胡蝶, 黄廷莉, 姚洪渭, 蒋彩英, 2024. 二化螟盘绒茧蜂茧丝纤维的形态结构与理化性能. 环境昆虫学报, 46(5): 1255–1260.]

Quicke DLJ, Shaw MR, Takahashi M, Yanechin B, 2004. Cocoon silk chemistry of non-cyclostome Braconidae, with remarks on phylogenetic relationships within the Microgastrinae (Hymenoptera: Braconidae). *Journal of Natural History*, 38(17): 2167–2181.

Quicke DLJ, Shaw MR, 2004. Cocoon silk chemistry in parasitic wasps (Hymenoptera, Ichneumonoidea) and their hosts. *Biological Journal of the Linnean Society*, 81(2): 161–170.

Sen K, Babu KM, 2004. Studies on Indian silk. I. Macrocharacterization and analysis of amino acid composition. *Journal of Applied Polymer Science*, 92(2): 1080–1097.

Sezutsu H, Kajiwara H, Kojima K, Mita K, Tamura T, Tamada Y, Kameda T, 2007. Identification of four major hornet silk genes with a complex of alanine-rich and serine-rich sequences in *Vespa simillima xanthoptera* Cameron. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 71(11): 2725–2734.

Susi H, Byler DM, 1986. Resolution-enhanced fourier transform infrared spectroscopy of enzymes. *Methods in Enzymology*, 130: 290–311.

Sutherland TD, Campbell PM, Weisman S, Trueman HE, Sriskantha A, Wanjura WJ, Haritos VS, 2006. A highly divergent gene cluster in honey bees encodes a novel silk family. *Genome Research*, 16(11): 1414–1421.

Sutherland TD, Weisman S, Trueman HE, Sriskantha A, Trueman JW, Haritos VS, 2007. Conservation of essential design features in coiled coil silks. *Molecular Biology and Evolution*, 24(11): 2424–2432.

Sutherland TD, Weisman S, Walker AA, Mudie ST, 2012. Invited review the coiled coil silk of bees, ants, and hornets. *Biopolymers*, 97(6): 446–454.

Sutherland TD, Young JH, Weisman S, Hayashi CY, Merritt DJ, 2010. Insect silk: One name, many materials. *Annual Review of Entomology*, 55: 171–188.

Thorat L, Joseph E, Nisal A, Shukla E, Ravikumar A, Nath BB, 2020. Structural and physical analysis of underwater silk from housing nest composites of a tropical chironomid midge. *International Journal of Biological Macromolecules*, 163: 934–942.

Vepari C, Kaplan DL, 2007. Silk as a biomaterial. *Progress in Polymer Science*, 32(8/9): 991–1007.

Whitfield JB, 2003. Phylogenetic insights into the evolution of parasitism in Hymenoptera. *Advances in Parasitology*, 54: 69–100.

Wang MQ, Cai WZ, 2004. Silk and silk glands of insects. *Entomological Knowledge*, 41(1): 90–95. [王孟卿, 彩万志, 2004. 昆虫的丝和丝腺. 昆虫知识, 41(1): 90–95.]

Xia QY, Li S, Feng QL, 2014. Advances in silkworm studies accelerated by the genome sequencing of *Bombyx mori*. *Annual Review of Entomology*, 59: 513–536.

Xie DF, Deng FH, Shu JX, Zhu CY, Hu XT, Luo SJ, Liu CM, 2022. Impact of the frying temperature on protein structures and physico-chemical characteristics of fried surimi. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(7): 4211–4221.

Yamada H, 2002. Characterization of a serine/aspartic acid-rich fibrous protein from the parasitic wasp *Apanteles glomeratus*. *International Journal of Wild Silkmoth Silk*, 7: 79–84.

Yamada H, Shigesada K, Igarashi Y, Takasu Y, Tsubouchi K, Kato Y, 2004. A novel asparagine-rich fibrous protein (Xenofibron) from the cocoons of the parasitic wasp *Cotesia* (= *Apanteles*) *glomerata*. *International Journal of Wild Silkmoth Silk*, 9: 61–66.

Yang H, Yang S, Kong J, Dong A, Yu S, 2015. Obtaining information about protein secondary structures in aqueous solution using Fourier transform IR spectroscopy. *Nature Protocols*, 10(3): 382–396.

Zhang K, Si FW, Duan HL, Wang J, 2010. Microstructures and mechanical properties of silks of silkworm and honeybee. *Acta Biomaterialia*, 6(6): 2165–2171.

Zhu HT, 2020. Comparative research on silk and silk protein of butterflies and moths. Master dissertation. Chongqing: Southwest University. [诸鸿韬, 2020. 蝶类与蛾类昆虫丝及丝蛋白的比较研究. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]