

悦目金蛛拖牵丝力学性能的变异

蒋平^① 卓春晖^② 肖永红^① 吕太勇^① 廖信军^① 郭聪^{③*}

① 井冈山大学生命科学学院 生态环境与资源研究所 江西省生物多样性与生态工程重点实验室 吉安 343009;

② 福建省环境科学研究院 福州 350013;

③ 生物资源与生态环境教育部重点实验室 四川大学生命科学学院 成都 610064

摘要: 蜘蛛丝作为一种具有优良机械性能的天然动物蛋白纤维,其特有的结构和机械性能与其生物学功能密切相关。由大壶状腺纺出的拖牵丝在蜘蛛的行走、建网、捕食、逃生、繁殖等多种生命活动中均发挥了重要的功能,其机械性能会受到多种内外因素相互作用的影响。本文对在不同体重、不同猎物饲养和不同营养状态3种条件下人工抽出的悦目金蛛(*Argiope amoena*)拖牵丝与其不同单丝间的力学性能进行了比较研究。结果表明,悦目金蛛拖牵丝的力学性能在组间、组内不同个体,以及同一个体不同丝纤维间变异都较大。随着蜘蛛个体的增大,蛛丝横截面直径逐渐增大,这会使得蛛丝的力学性能更好,便于作为救命索的拖牵丝在遇到危险时承受蜘蛛体重;蜘蛛在经过1个月的饥饿后,蛛丝在屈服点附近的力学性能并未发生显著变化,而断裂点应变和断裂能均显著减小,同时也表明无论对于作为救命索还是网丝,拖牵丝的弹性形变性能在与蛛丝相关的微观进化中要优先于塑性形变。这是蜘蛛在能量摄入受到限制时对拖牵丝的投入权衡的结果。

关键词: 蜘蛛丝;力学性能;变异

中图分类号:Q957 文献标识码:A 文章编号:0250-3263(2013)04-548-07

Variability in Tensile Properties of Dragline Silk from *Argiope amoena*

JIANG Ping^① ZHUO Chun-Hui^② XIAO Yong-Hong^① LÜ Tai-Yong^①
LIAO Xin-Jun^① GUO Cong^{③*}

① *College of Life Sciences, Institute of Eco-environment and Resources, Jinggangshan University, Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Jiangxi Province, Ji'an 343009;*

② *Fujian Academy of Environmental Science, Fuzhou 350013;* ③ *Key Laboratory of Bio-resources and Eco-environment, Ministry of Education, College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610064, China*

Abstract: Spider silk is a natural animal protein fiber with excellent mechanical properties. Those biological and ecological functions required during spider's life history have shaped the silk's structures and mechanical properties. Dragline produced from major ampullate gland play most various roles for activities such as walking, building web, capturing prey escaping predators, reproduction etc. Its mechanical property may be influenced by some inner and outer factors. We examined the tensile properties of draglines from spiders(*Argiope amoena*) of different weights, from individuals fed by different foods, and from well-fed and starved spiders, and we also compared the mechanical property of filaments from the same silk. We found that the mechanical property of draglines from different individuals of the same group and silks from the same individual varied significantly,

基金项目 国家自然科学基金项目(No. 31160420,31060282,30760041),江西省自然科学基金项目(No. 2010GQN120);

* 通讯作者, E-mail: guocong@gmail.com;

第一作者介绍 蒋平,男,副教授;研究方向:蜘蛛丝蚕丝的结构、性能与功能及应用研究; E-mail: jping412@yahoo.com.cn;

收稿日期:2012-11-01,修回日期:2013-01-29

which made us difficult to determine the influence of various conditions (different weights, different foods, and well-fed and starved). With the increase of silk diameter and the increase of spider weight, the silks had better mechanical property, and these available silks were beneficial for escape. Compared to the mechanical property of the silks from the well-fed spiders, the breaking strain and breaking energy of the silks from the starved spiders decreased, but there was no difference found at yield point. It might be an investment strategy that elasticity had precedence over plasticity when intake energy of spider was limited.

Key words: Spider silk; Tensile property; Variability

蜘蛛丝是一种天然动物蛋白纤维,具有优良的机械性能,尤其是由大壶状腺纺出的拖牵丝更是具有强度高、弹性好和初始模量大等特点。此外,蜘蛛拖牵丝在自然界中还可按可控制的速度降解,这是其他天然丝和人工丝所无法比拟(Gosline et al. 1999, Kubik 2002)。蜘蛛丝优良的性能引起了世界各国科学家的兴趣和关注,人们对蜘蛛丝的研究除了科学理论上的需要外,其最终目的是为了更深入地认识和掌握蜘蛛丝的结构与性能之间的关系,以便模仿其特有的结构来制造符合人们各种需求的功能纤维(Vollrath 2000)。已有研究表明,蜘蛛丝在氨基酸组成、蛋白亚基组成、结构、机械性能和生物学功能上都具有多样性(Vollrath 2000, 蒋平等 2010a, b, c, 2011),蜘蛛丝已成为一种研究纤维材料结构、性能与功能之间关系的良好模式纤维(Vollrath 2000, 蒋平等 2011)。由于动物丝和动物丝蛋白基材料之间在聚集态结构上的不同以及由此决定的性能不同,如蜘蛛丝纤维所具有的优异力学性能并不能由蜘蛛丝蛋白基材料如膜和多孔支架等全部传承。因此,蜘蛛拖牵丝本身也未必能被广泛地应用于生物医药材料领域。近年利用聚合物和模仿蜘蛛拉丝的纺织技术在工业化生产高性能纤维方面所取得的进展,在各种需要极高韧性和生物可降解性的商业应用中展示出良好的前景(Viney 2004)。这些模仿蛛丝的功能丝纤维可被广泛应用于医药卫生(如人造皮肤、关节、韧带、假肢、可降解的医用缝合线、药物载体等)(Vollrath 2000, Viney 2004),新型纤维材料(Garrido et al. 2002 b, Mayes et al. 1998)等诸多领域。正是因为蜘蛛拖牵丝这些卓越的优

点和广泛的应用前景,国内外对此展开了包括基因结构、蛋白质组成、分子结构和蛛丝机械性能等多领域的研究,获得了大量的成果(谢锦云等 1995, 王迎等 1997, Madsen et al. 1999, Perez-Rigueiro et al. 2001, 蒋平等 2003, 2010a, b, c, Jiang et al. 2011a, b)。

对于蜘蛛而言,由于拖牵丝具有捕食、逃生和形成网、卵袋或巢穴结构等多种生物学功能(Osaki 1999, Vollrath 1999, Vollrath 2000, 蒋平等 2003, 卓春晖等 2006, 蒋平等 2006, 2011),蜘蛛在其丝上的投入可能会受制于这些生物学功能的发挥,即蛛丝的机械性能可能是蜘蛛对多种内外因素相互作用的反应(Madsen et al. 1999, 卓春晖等 2006),但是目前有关蜘蛛丝在这方面的研究并不多见,为此本文选取大型农林蜘蛛悦目金蛛(*Argiope amoena*)为研究对象,对处于不同大小、不同猎物条件和不同营养状态下的蜘蛛所抽出的拖牵丝与其不同单丝间的力学性能进行了比较,从材料学角度对蜘蛛在三种不同因素影响下对其拖牵丝的投入进行分析,以期了解外界随机因素对丝性能的影响。

1 材料与方法

1.1 蜘蛛

1.1.1 不同猎物条件的蜘蛛 5只杂食条件的悦目金蛛,体重(535 ± 26) mg,采自四川米易县城郊。5只实验室饲养的悦目金蛛,体重(542 ± 32) mg,为采自四川米易县城郊的悦目金蛛后代,实验室以潜蝇(*Liriomyza chnensis*)饲养至 50 mg 后改用黄粉虫(*Tenebrio molitor*)幼虫进行饲养,喂食频率是每隔 4~5 d 喂 15~

20 只潜蝇,每隔 4~5 d 喂 1 只黄粉虫幼虫。

1.1.2 不同体重大小的蜘蛛 取 16 只采自四川米易县城郊的悦目金蛛,按照体重(FA 1004 型电子天平称量)平分成较轻(49.7 ± 2.9) mg、轻(165.7 ± 5.7) mg、重(359.0 ± 7.9) mg、较重(713.8 ± 15.8) mg 4 组进行实验。

1.1.3 不同营养条件的蜘蛛 取 4 只悦目金蛛成体雌蛛进行实验,分别对每只蜘蛛取 5 根拖牵丝,然后停止供给蜘蛛食物 30 d,再取每只蜘蛛 5 根拖牵丝进行机械性能测定。停止供给食物期间照常供给水,每天 09:00 时对每只蜘蛛浇少许水。

1.2 拖牵丝的获取 在(26 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$,相对湿度 70% \pm 10% 的室内条件下,将 3 种不同条件下的蜘蛛固定住,利用数控雕刻机(深圳天成数控设备有限公司生产的 TC-1224 型雕刻机)以 20 mm/s 的速度将丝从蜘蛛体内匀速抽出 5 根。每根丝的长度为 100 cm,可制成 10 个丝样品。将所获得的丝分成单丝备用。

1.3 拖牵丝力学行为与性能测试 用 YG001A 型纤维电子强力仪进行拉伸实验。拉伸性能测定条件:试样夹持长度为 20 mm,拉伸速度 10 mm/min。温度 20 $^{\circ}\text{C}$,湿度为 65%。将拉伸断裂后的样品喷金,用扫描电镜(观测条件,电压 -20 kV,电流 0.6 nA)观测样品的外貌,测定其沿丝长轴旋转 90 $^{\circ}$ 前后两个位置的直径值,计算获得截面面积。拉伸实验的重复为 5 次。可通过如下表达式,从实验测得的直径得到其断裂前的任意伸长状态下丝纤维的直径与截面面积: $\pi(D_0/2)^2 L_0 = \pi(D/2)^2 L$, D_0 和 D 分别表示断裂

前后的蚕丝直径, $\pi(D_0/2)^2$ 和 $\pi(D/2)^2$,分别表示断裂前后的横截面面积, L_0 和 L 分别表示原始和最终样品长度。从等式中可看出,拉伸测试中样品体积保持不变,以前有关蛛丝和蚕丝的研究中也一直利用这一关系式(Perez-Rigueiro et al. 2001, Guinea et al. 2005b)。由这些面积把相对应的负载-位移曲线转换成应力-应变曲线,断裂能通过计算应力-应变曲线与横坐标围成的面积获得。上述所有实验过程中均很小心,以避免将丝纤维拉伸。

1.4 不同单丝间的机械性能比较材料与与方法 蜘蛛拖牵丝通常是由 2 根单丝组成的(Osaki 1999),我们通过对比不同单丝间的机械性能差异,了解外界随机因素对丝性能的影响。

随机选取上述不同体重大小梯度实验和不同营养状态蛛丝机械性能比较实验所获得的来自 10 只蜘蛛的 12 组单丝进行机械性能比较。所有数据均利用 SPSS 11.5 进行相应的统计检验。

2 结果与分析

2.1 不同猎物条件蜘蛛拖牵丝力学行为比较 比较野外抓获的蜘蛛和室内用黄粉虫饲养的蜘蛛所抽出的拖牵丝的力学行为,结果表明,二者在屈服点位移、屈服点负载、断裂点位移和断裂点负载这 4 个指标上并无显著差异(表 1)。实验结果还表明,不仅同一梯度水平不同个体间蛛丝的力学行为差异较大(表 2、3),同一个体的不同拖牵丝在断裂点位移和断裂点负载两个指标上差异也较大(图 1)。

表 1 室内饲养的和野外的蜘蛛拖牵丝屈服点位移、屈服点负载和断裂点位移、断裂点负载比较

Table 1 The comparison of the displacement and force of yield point and breaking point of draglines from spiders bred in lab and captured from field (Mean \pm SE)

	屈服点位移 Displacement at the proportional limit D_p (mm)	屈服点负载(厘牛) Force at the proportional limit F_p (cN)	断裂点位移 Displacement at the breaking D_u (mm)	断裂点负载(厘牛) Force at the breaking F_u (cN)
室内饲养 Feeding	0.34 \pm 0.05	0.11 \pm 0.01	9.51 \pm 1.94	0.80 \pm 0.07
野外 Wilding	0.44 \pm 0.07	0.13 \pm 0.02	8.22 \pm 1.81	0.91 \pm 0.12

独立样本 t -检验(双尾)的结果表明四者均无显著差异。

Using Independent-sample test (2-tailed) we find that there is no significant difference in the four indexes.

表 2 四个不同体重水平蜘蛛的拖牵丝屈服点和断裂点负载

Table 2 Force of yield point and breaking point of four weight levels spiders (Mean \pm SE)

参数 Parameter	体重水平 Weight level (mg)			
	49.7 \pm 2.9	165.7 \pm 5.7	359.0 \pm 7.9	713.8 \pm 15.8
屈服点负载(厘牛) Force at the proportional limit F_p (cN)	0.23 \pm 0.03	0.18 \pm 0.06	0.19 \pm 0.04	0.23 \pm 0.03
断裂点负载(厘牛) Force at the breaking F_u (cN)	0.92 \pm 0.20	0.68 \pm 0.08	1.46 \pm 0.57	1.38 \pm 0.21

表 3 四个不同体重水平蜘蛛的拖牵丝力学性能参数的比较

Table 3 The comparison of tensile parameters of spider draglines four weight levels spiders (Mean \pm SE)

体重水平 Weight level (mg)	初始模量 Elastic modulus E (GPa)	屈服点应变 Strain at the proportional limit ε_p (%)	屈服点应力 Stress at the proportional limit σ_p (MPa)	断裂点应变 Strain at breaking ε_u (%)	断裂点应力 The tensile strength σ_u (MPa)	断裂能 Energy to break unit volume of material W_l (MJ/m ³)
49.7 \pm 2.9	17.0 \pm 0.2	3.3 \pm 0.3	428 \pm 59	22.4 \pm 3.1	2 093 \pm 475	241 \pm 72
165.7 \pm 5.7	17.1 \pm 0.2	2.5 \pm 0.2	258 \pm 54	20.7 \pm 3.1	1 351 \pm 42	134 \pm 24
359.0 \pm 7.9	11.1 \pm 1.8	2.2 \pm 0.3	160 \pm 20	30.7 \pm 2.4	1 183 \pm 105	161 \pm 16
713.8 \pm 15.8	10.7 \pm 2.2	2.8 \pm 0.5	189 \pm 32	35.3 \pm 2.2	1 632 \pm 366	252 \pm 11

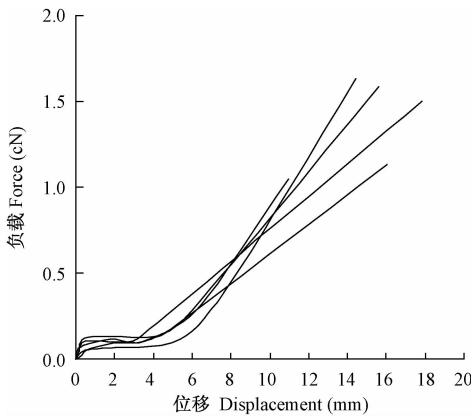


图 1 一只蜘蛛 5 根拖牵丝的负载-位移曲线

Fig. 1 Displacement-force curves of 5 draglines from a spider

2.2 不同体重大小条件下蜘蛛拖牵丝机械性能比较 比较不同大小蜘蛛的拖牵丝力学行为(负载-位移曲线),发现屈服点和断裂点负载差异均不显著(P 分别为 0.626 和 0.312,表 2)。

由于力学行为可以以力学性能参数为表征,另外蛛丝横截面积是一个影响蛛丝力学性能的重要因素,因此,我们分别从这两个方面进行了分析。

4 个体重水平梯度的初始模量无显著差异

($P=0.64$),从表 3 中,还可以看出在小型个体(较轻和轻)中,初始模量变化较小。此外,我们还发现屈服点应变差异不显著($P=0.184$),断裂点应力和断裂能差异也不显著(P 分别为 0.228 和 0.206);而屈服点应力和断裂点应变差异却极显著(P 分别为 0.005 和 0.004,)。屈服点应力在 4 个梯度水平上表现出的显著差异性(单因素方差分析),只是因为水平“较轻”与其他 3 个水平的显著差异造成的。除水平“轻”表现出的断裂点应变与水平“较轻”相当外,其他的都显示出随体重的增加而增大的趋势。

电镜扫描的结果表明蛛丝直径随体重的增加而增大,测量数据显示随着蛛丝体重梯度的增加,其直径依次为(2.63 \pm 0.03)、(2.65 \pm 0.06)、(3.30 \pm 0.11)、(4.05 \pm 0.16) μm ,这可能是蜘蛛纺器随身体发育的结果。此外,蛛丝直径变化的幅度随蜘蛛体重的增加而增大。

2.3 不同营养条件下蜘蛛拖牵丝机械性能比较 从表 4 可以发现,蜘蛛在经过 1 个月的饥饿后,拖牵丝的初始模量、屈服点应变和屈服点应力的变化均不显著,断裂点应变在饥饿条件下变小,断裂点应力在饥饿前后变化不显著,而断裂能减小。此外,其中的 2 只蜘蛛在经过 1 个月饥饿后,所抽出的拖牵丝只有 1 根,这与

表 4 蜘蛛饥饿前后拖牵丝力学性能参数比较 (配对双尾 *t*-检验)

Table 4 The comparison of tensile parameters before and after the starvation (paired *t*-test, 2-tailed)

参数 Parameter	初始模量 Elastic modulus E (GPa)	屈服点应变 Strain at the proportional limit ϵ_p (%)	屈服点应力 Stress at the proportional limit σ_p (MPa)	断裂点应变 Strain at breaking ϵ_u (%)	断裂点应力 The tensile strength σ_u (MPa)	断裂能 Energy to break unit volume of material W_t (MJ/m ³)
$\Delta \pm SE$	0.64 ± 1.52	-0.36 ± 0.26	-50.1 ± 27.2	$18.2 \pm 3.9^*$	410 ± 195	$201 \pm 41^*$

* $P < 0.05$

正常情况下观察到的蜘蛛拖牵丝普遍是由 2 根纤维细丝组成的情况不相符。

2.4 不同单丝间的机械性能比较 图 2A ~ F 为不同单丝间的机械性能比较结果,对随机选取的 12 组单丝的机械性能进行比较,我们发现即使是同 1 根丝中的不同单丝之间,其在初始模量、屈服点应变、屈服点应力、断裂点应变、断裂

点应力和断裂能上表现出的差异性也会很大。

3 讨论

蜘蛛丝是一种经几亿年进化而来的天然动物蛋白纤维,是为蜘蛛的生存与繁殖所设计的,其特有的结构和性能与其生物学功能以及蜘蛛所栖息的生态环境密切相关 (Eberhard 2001,

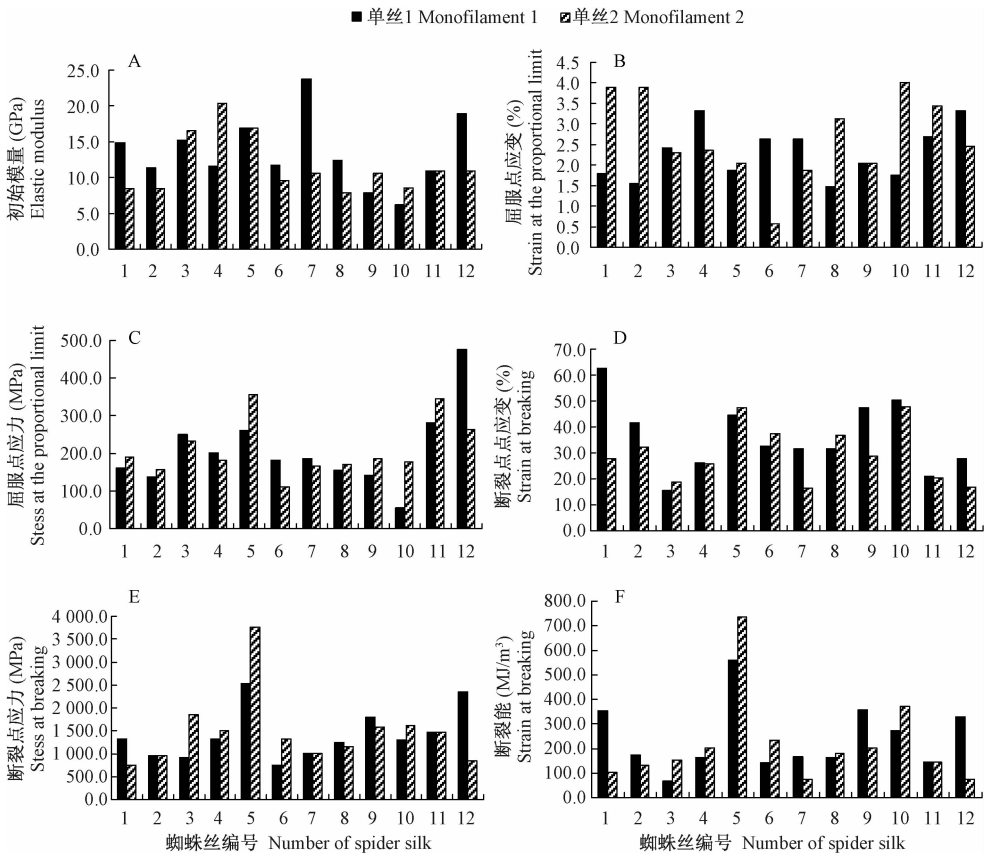


图 2 同一根丝的不同单丝力学性能的比较

Fig. 2 The comparison of tensile properties of filaments from the same silk

A. 初始模量比较; B. 屈服点应变比较; C. 屈服点应力比较; D. 断裂点应变比较; E. 断裂点应力比较; F. 断裂能比较。

A. The comparison of Young's modulus; B. The comparison of strain at yield point; C. The comparison of stress at yield point; D. The comparison of strain at breaking point; E. The comparison of stress at breaking point; F. The comparison of breaking energy.

Opell et al. 2001, Hawthorn et al. 2002, Blackledge et al. 2006)。研究表明影响蛛丝力学性能的直接因素有两个方面:蛛丝的横截面积和蛛丝的分子结构,而影响这两个方面的又有很多因素,如蜘蛛的体重、大小、体温、纺管、营养水平、食物谱、丝的种类、纺丝方式、纺丝时的温度、湿度、介质、速度等(Vollrath 1999, Garrido et al. 2002a,b, Zax et al. 2004, Guinea 2005a,b, Liu et al. 2005, Tso et al. 2005, Elices et al. 2005, Swanson et al. 2006)。Madsen 等(1999)等对园蛛科(Araneidae)、肖蛸科(Tetragnathidae)、球腹蛛科(Theridiidae)和盗蛛科(Pisauridae)4科中5种蜘蛛的拖牵丝力学性能进行了研究,结果表明,它们的力学性能在种间、种内和个体三个水平上都表现出较大的差异。从本文4个研究结果中可以看出,悦目金蛛拖牵丝的力学性能在组间、组内不同个体,以及同一个体不同丝纤维间变异都较大。正是由于这种变异使得我们很难判断实验控制条件对蛛丝机械性能的影响(Work 1976, Dunaway et al. 1995, Madsen et al. 1999)。另外测量误差也是一个重要的因素,如对于同根丝单丝间比较,丝材料取材位置差异(位置差可能在几厘米和十几厘米间)也可能是造成我们数据变异性大的另一个因素。Madsen 等(1999)、Guinea 等(2005a)认为蛛丝的这种巨大变化可能具有其重要的生态学意义:由蜘蛛大壶状腺纺出具有多种力学性能的拖牵丝可能是蜘蛛长期适应一系列不同的变化的外界环境而进化出来的一种策略。

随着蜘蛛个体的增大,蜘蛛拖牵丝横截面直径逐渐增大,这会使得拖牵丝的力学性能更好,便于作为救命索的拖牵丝在遇到危险时承受蜘蛛体重,作为网丝一部分的拖牵丝也会由于横截面半径的增大而能承受更大的猎物冲击(Vollrath 1999)。对十字园蛛(*Araneus diadematus*)、络新妇蛛(*Nephila edulis*) (Vollrath 1999)和三带金蛛(*Argiope trifasciata*) (Guinea et al. 2005a)的研究表明,蛛丝的力学性能随蜘蛛体重增加而增强。但是我们本次研

究中并未发现拖牵丝的力学性能随蜘蛛个体体重的增加而增强(表2),这可能是因为蜘蛛能根据每次抽丝时的瞬时环境条件而调节拖牵丝的机械性能,从而导致其巨大变异造成的(表3)。

蜘蛛在经过1个月的饥饿后,会导致可利用的氨基酸量减少,从而使丝的化学组成发生改变,造成丝的机械性能发生变化(Craig et al. 2000)。但本研究发现了一个有趣的现象,即饥饿条件下的拖牵丝在屈服点附近的力学性能并未发生显著变化,而断裂点应变和断裂能均显著减小,这可能表明了蜘蛛在能量摄入受到限制时的一种投入策略的变化,这种变化遵循权衡原则(Vollrath et al. 2001)。无论对于作为救命索还是网丝,拖牵丝的弹性形变性能在与蛛丝相关的微观进化中优于塑性形变:对于救命索作用的拖牵丝而言,弹性形变可以使蜘蛛迅速回到网上;而对于网丝而言,较大的弹性模量可以使网结构更稳定。另外,部分蜘蛛拖牵丝单丝根数减少,这可能是由于蜘蛛在缺乏营养条件下,有限能量在维持基本生命与纺丝间权衡的结果。

参 考 文 献

- Blackledge T A, Hayashi C Y. 2006. Silken toolkits: biomechanics of silk fibers spun by the orb web spider *Argiope argentata* (Fabricius 1775). *Journal of Experimental Biology*, 209(13): 2452–2461.
- Craig C L, Riekel C, Herberstein M E, et al. 2000. Evidence for diet effects on the composition of silk proteins produced by spiders. *Molecular Biology and Evolution*, 17(12): 1904–1913.
- Dunaway D L, Thiel B L, Viney C. 1995. Tensile mechanical property evaluation of natural and epoxide-treated silk fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 58(3): 675–683.
- Eberhard W G. 2001. Trolling for water striders: active searching for prey and the evolution of reduced webs in the spider *Wendilgarda* sp. (Araneae, Theridiosomatidae). *Journal of Natural History*, 35(2): 229–251.
- Elices M, Guinea G V, Pérez-Rigueiro J, et al. 2005b. Finding inspiration in argiope trifasciata spider silk fibers. *Journal of Materials*, 57(2): 60–66.
- Garrido M A, Elices M, Viney C, et al. 2002a. Active control of spider silk strength: comparison of drag line spun on vertical and horizontal surfaces. *Polymer*, 43(4): 1537–1540.

- Garrido M A, Elices M, Viney C, et al. 2002b. The variability and interdependence of spider drag line tensile properties. *Polymer*, 43(16): 4495 – 4502.
- Gosline J M, Guerette P A, Ortlepp C S, et al. 1999. The mechanical design of spider silks: from fibroin sequence to mechanical function. *The Journal of Experimental Biology*, 202(23): 3295 – 3303.
- Guinea G V, Elices M, Pérez-Rigueiro J, et al. 2005a. Stretching of supercontracted fibers: a link between spinning and the variability of spider silk. *Journal of Experimental Biology*, 208(1): 25 – 30.
- Guinea G V, Elices M, Real J I, et al. 2005b. Reproducibility of the tensile properties of spider (*Argiope trifasciata*) silk obtained by forced. *Journal of Experimental Zoology*, 303(1): 37 – 44.
- Hawthorn A C, Opell B D. 2002. Evolution of adhesive mechanisms in cribellar spider prey capture thread: evidence for van der Waals and hygroscopic forces. *Biological Journal of the Linnean Society*, 77(1): 1 – 8.
- Jiang P, Guo C, Lü T Y, et al. 2011a. Structure, composition and mechanical properties of the silk fibres of the egg case of the Joro spider, *Nephila clavata* (Araneae, Nephilidae). *Journal of Biosciences*, 36(5): 897 – 910.
- Jiang P, Lü T Y, Xiao Y H, et al. 2011b. Morphology, fibrous composition and tensile properties of drag-silk produced by two species of orb spider. *International Journal of Materials Research*, 102(10): 1261 – 1269.
- Kubik S. 2002. High-Performance fibers from spider silk. *Angewandte Chemie International*, 41(15): 2721 – 2723.
- Liu Y, Shao Z Z, Vollrath F. 2005. Extendedwet-spinning can modify spider silk properties *Chemical Communications*, (19): 2489 – 2491.
- Madsen B, Shao Z Z, Vollrath F. 1999. Variability in the mechanical properties of spider silks on three levels: interspecific, intraspecific and intraindividual. *International Journal of Biological Macromolecules*, 24(2/3): 301 – 306.
- Mayes E L, Vollrath F, Mann S. 1998. Fabrication of magnetic spider silk and othersilk-fiber composites using inorganic nanoparticles. *Advanced Materials*, 10(10): 801 – 805.
- Opell B D, Bond J E. 2001. Changes in the mechanical properties of capture threads and the evolution of modernorb-weaving spiders. *Evolutionary Ecology Research*, 3: 567 – 581.
- Osaki S. 1999. In the mechanical strength of spider's drag-lines reasonable as lifeline? *International Journal of Biological Macromolecules*, 24(2/3): 283 – 287.
- Perez-Rigueiro J, Elices M Llocat et al. 2001. Tensile properties of *Argiope trifasciata* drag line silk obtained from the spider's web. *Journal of Applied Polymer Science*, 82(9): 2245 – 2251.
- Swanson B O, Blackledge T A, Beltran J, et al. 2006. Variation in the material properties of spider dragline silk across species. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 82(2): 213 – 218.
- Tso I M, Wu H C, Hwang I R. 2005. Giant wood spider *Nephila pilipes* alters silk protein in response to prey variation. *The Journal of Experimental Biology*, 208(6): 1053 – 1061.
- Viney C. 2004. Self-assembly as a route to fibrous materials: concepts, opportunities and challenges. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8(2): 95 – 101.
- Vollrath F. 1999. Biology of spider silk. *International Journal of Biological Macromolecules*, 24(2/3): 81 – 88.
- Vollrath F. 2000. Strength and structure of spider's silks. *Reviews in Molecular Biotechnology*, 74(2): 67 – 83.
- Vollrath F, Madsen B, Shao Z Z. 2001. The effect of spinning conditions on the mechanics of a spiders' dragline silk. *Proceedings of the Royal Society B; Biological Sciences*, 268(1483): 2339 – 2346.
- Work R W. 1976. Theforce-elongation behavior of web fibers and silks forcibly obtained from orb-web-spinning spiders. *Textile Research Journal*, 46: 485 – 492.
- Zax D B, Armanios D E, Horak S, et al. 2004. Variation of Mechanical Properties with Amino Acid Content in the Silk of *Nephila Clavipes*. *Biomacromolecules*, 5(3): 732 – 738.
- 蒋平, 刘姝, 卓春晖. 2010a. 干燥与拉伸对蜘蛛拖牵丝超收缩性能的影响. *材料科学与工程学报*, 28(3): 352 – 356.
- 蒋平, 吕大勇, 肖永红, 等. 2010b. 悦目金蛛和棒络新妇卵袋丝物理化学结构表征及其力学性能. *生物物理学报*, 26(2): 149 – 163.
- 蒋平, 吕大勇, 肖永红, 等. 2011. 三种不同功能蛛丝的超微结构与拉伸力学行为. *材料科学与工程学报*, 29(5): 734 – 741.
- 蒋平, 沈丽, 杨孔, 等. 2003. 三种类型蜘蛛丝的结构及生物学功能. *动物学杂志*, 38(5): 10 – 14.
- 蒋平, 吴梦玲, 肖永红, 等. 2010c. 棒络新妇卵袋丝氨基酸组成及其力学行为. *纺织学报*, 31(5): 1 – 5.
- 蒋平, 卓春晖, 杨文博, 等. 2006. 棒络新妇和悦目金蛛丝腺形态初步观察. *蛛形学报*, 15(2): 90 – 97.
- 王迎, 谢锦云, 梁宋平. 1997. 大腹园蛛拖丝蛋白一级结构初步研究. *生物化学与生物物理学学报*, 29(5): 469 – 474.
- 谢锦云, 陈平, 莫永炎, 等. 1995. 三种蜘蛛丝蛋白组成分析. *激光生物学报*, 4(3): 705 – 709.
- 卓春晖, 蒋平, 王昌河, 等. 2006. 蛛网结构性能及其适应性. *四川动物*, 25(4): 898 – 902.