

文章编号:1004-7220(2018)01-0024-06

失水后干豆荚的结构与力学性能

曾羽涵¹, 徐鹏¹, 师凡迪¹, 崔莹莹³, 王丽珍¹, 樊瑜波^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京 100191;

2. 国家康复辅具研究中心, 北京 100176; 3. 中国人民大学附属中学 高三12班, 北京 100080)

摘要: **目的** 研究失水后豆荚的结构与力学性能, 探究豆荚扭转开裂而撒射种子的生物力学机制。 **方法** 通过组织学、显微结构材料学观察、力学性能测试和高速摄像, 分析绿豆荚的分层情况以及各个细胞层细胞尺寸和方向的区别, 观察豆荚弹射过程, 并总结豆荚弹射的原理。 **结果** 豆荚弹射过程是从豆荚的尾部开始出现裂痕, 从下往上逐渐裂开。同一个豆荚的不同两片细胞排布相反, 每片豆荚分为4层, 其中外层上表面和中层细胞互相正交, 且在两层正交的细胞层中间有一层细胞壁破裂的细胞。在豆荚成熟失水过程中, 外层纤维发生收缩, 中层纤维发生拉伸。 **结论** 豆荚纤维在正交方向失水收缩, 累积弹性性能, 产生预应力, 最终通过豆荚开裂来释放。

关键词: 豆荚; 弹射; 失水; 显微结构; 力学性能

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2018.01.005

The Structure and Mechanical Properties of Pods after Dehydration

ZENG Yuhan¹, XU Peng¹, SHI Fandi¹, CUI Yingying³, WANG Lizhen¹, FAN Yubo^{1,2}

(1. Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. National Research Center for Rehabilitation Technical Aids, Beijing 100176, China; 3. Class 12, Grade 3, Attached Middle School of Chinese People's University, Beijing 100080, China)

Abstract: Objective To investigate the structure and mechanical properties of pods after dehydration and the biomechanical mechanism of spreading pod seed injection due to torsion crack. **Methods** The layered pods, the cell size and direction at different cellular layers were analyzed by histology, microstructure observation, mechanical property test and high-speed photography. The process of pod ejection was observed, and the principle of pod ejection was summarized. **Results** The ejection of pods started from the crack of the bottom, and cracked gradually from the bottom to the top. The cell arrangement of two parts of the same pod was opposite. Each pod was divided into 4 layers wherein the first exterior layer and the middle layer were orthogonal to each other. There was a layer of cells between the first exterior layer and the middle layer, of which the cell wall was broken. In the process of dehydration, fibers in the outer layer shrank and fibers in the middle layer stretched. **Conclusions** Pod fiber will be contracted in the orthogonal direction after dehydration to accumulate elastic performance and generate pre-stress, and finally the pod is cracked to release the pre-stress.

Key words: pod; ejection; dehydration; microstructure; mechanical property

收稿日期:2016-12-19; 修回日期:2017-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(11421202, 11572029), 国家重点研发计划重点专项项目(2016YFC1102202)

通信作者:樊瑜波, 教授, 博士研究生导师, E-mail: yubofan@buaa.edu.cn;

王丽珍, 副教授, 硕士研究生导师, E-mail: lizhenwang@buaa.edu.cn

生物体经过长期的物竞天择达到结构完美合理^[1]。自然界中植物传播种子的方式多种多样,根据传播介质的不同,可以分为风传播、水传播、动物传播和机械传播^[2]。其中最有趣的是机械传播,即借开裂时所产生的机械力量使种子弹射。豆科植物、洋紫荆等的荚果开裂可将种子弹出 50 m^[3],其弹射能力非常惊人。试想如果能运用这种弹射能力制作一个弹射装置,将其应用到医疗器械设计,如血管支架进入体内后可自动弹开并撑开血管,实现药物缓释过程自动释放药物^[4],这将是生物医学领域的又一个革命性进步。

Armon 等^[5]利用显微镜观察豆科植物紫荆花的种子荚,内外两层纤维的方向互相正交,且与长轴方向成 45°,并用复合弹性材料模拟豆荚弹开后的螺旋结构。将两个相同的弹性长条沿正交方向分别拉伸,使其伸长到预定量,然后用胶将两者粘结。当胶固化后卸去外力,此时弹性材料产生和豆荚一样的收缩形状,两层弹性材料分别沿着正交方向收缩。从粘合的双层区域剪下的长条卷曲形成螺旋形状^[6]。根据实验结果推测,植物弹射种子是由于力学性能的变化影响了细胞的生长^[7]。在植物生长过程中,组织的含水量发生变化,导致不同方向细胞的膨胀和收缩^[8]。膨胀和收缩会导致弹性能的累积并产生残余应力,残余应力通过破裂、弯曲或拉断等形式释放^[9]。豆荚弹射就是由于豆荚组织含水量的变化而导致纤维细胞沿着不同方向膨胀和收缩的结果。此外,自然界中松果张闭^[10]、小麦将种子传播到土壤中^[11]也是同样的原因。

然而,上述研究只是通过力学理论模型^[12]进行的推测,尚缺乏对豆荚组织学、材料学和生物力学特性的全面研究。本文全面观察了豆荚的组织学和显微结构、材料学以及力学性能,探索豆荚的表面形貌、细胞形态、分层情况、各个细胞层细胞尺寸和形态差异与含水量的关系、豆荚的力学参数、豆荚弹射的过程,由此提出豆荚弹射的生物力学机制。

1 材料与方法

1.1 样本选取

采用绿豆结荚后 1、3、5 周的豆荚。将豆荚摘下

后立刻称取豆荚鲜重,再将豆荚放入烘箱中烘干至重量恒定,称取干重。则豆荚含水量计算公式^[13]为:

$$\text{含水量} = (\text{鲜重} - \text{干重}) / \text{鲜重} \times 100\%$$

每个时期的豆荚都选择 3 个样本,结果取平均值。将豆荚分开成 A、B 两片,将每片豆荚分成外层、中层和内层[见图 1(a)]。外层为最外面有表皮毛的一层,中层为中间质地较硬的一层,内层为相对较薄的白色内膜。按图 1(b)方式剪切成 a、b、c、d 4 个方向的截面,分别观察。

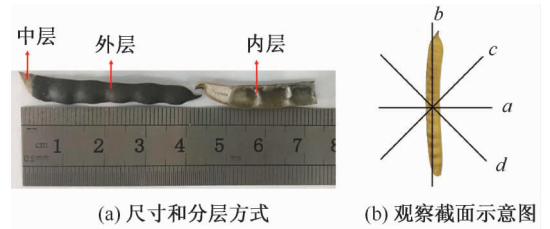


图1 豆荚尺寸和分层方式及观察截面

Fig. 1 Size and stratification of pods and observation section

(a) Size and stratification of pods, (b) Schematic diagram of observation section

1.2 材料学观察和力学性能测试

将豆荚剪成 5 mm × 5 mm,喷金 60 s 后,在扫描电子显微镜 (QUANTA FEG250, FEI 公司,美国) 下观察豆荚的内、中、外表面。将同一个豆荚的不同两片 (以下简称为豆荚 A、B) 固定、脱水、透明、浸蜡、包埋^[14],沿着 4 个剪切方向 a、b、c、d 进行 3 μm 切片,最后 HE 染色,并在光学显微镜 (BX51, OLYMPUS 公司,日本) 下观察。

将 1、3、5 周的豆荚 A、B 分成中、外两层,放入解离液 (70% 醋酸和 30% 双氧水 1 : 1 混合) 中在 90 °C 下加热 4 h^[15]。用番红染色后,在激光共聚焦显微镜 (TCS SPE, Leica 公司,德国) 下观察,激发波长 488 nm,接收范围 575 ~ 580 nm^[16]。

将豆荚剪成 5 mm × 50 mm,在力学试验机 (AG-IS, SHIMADZU 公司,日本) 上进行拉伸试验,共测试 7 组试样,观察断裂面角度,最后统计弹性模量和弹性极限的平均值和标准差。

1.3 高速摄像拍摄豆荚弹射过程

将干豆荚垂直吊起,在表面温度为 80 °C 的加热灯下加热,加速其失水过程,并在高速摄像机

(i-speed 3, OLYMPUS 公司, 英国) 下拍摄, 拍摄频率为 500 帧/s。

2 结果

豆荚含水量的测定结果表明, 豆荚含水量随着时间延长逐渐降低, 生长 1、3、5 周的豆荚含水量分别为 70.5%、43.9%、11.2%。

2.1 豆荚表面形貌的观察

在扫描电子显微镜下, 可以观察到豆荚外表面

表皮上条纹凸起的角质层表面, 表皮细胞大致呈六边形。在表皮上还均匀地分布着气孔和表皮毛^[17]。豆荚中层的纤维定向排布, 而豆荚内层中的纤维没有定向排布[见图 2(a)]。

2.2 豆荚的纤维方向

在激光共聚焦扫描显微镜下, 分别观察豆荚 A、B 的外层和表层表面[见图 2(b)]。豆荚 A 外层、中层纤维分别沿着图 1(b) 所示的 *c*、*d* 方向排布。豆荚 B 外层、中层纤维分别沿着 *d*、*c* 方向排布。

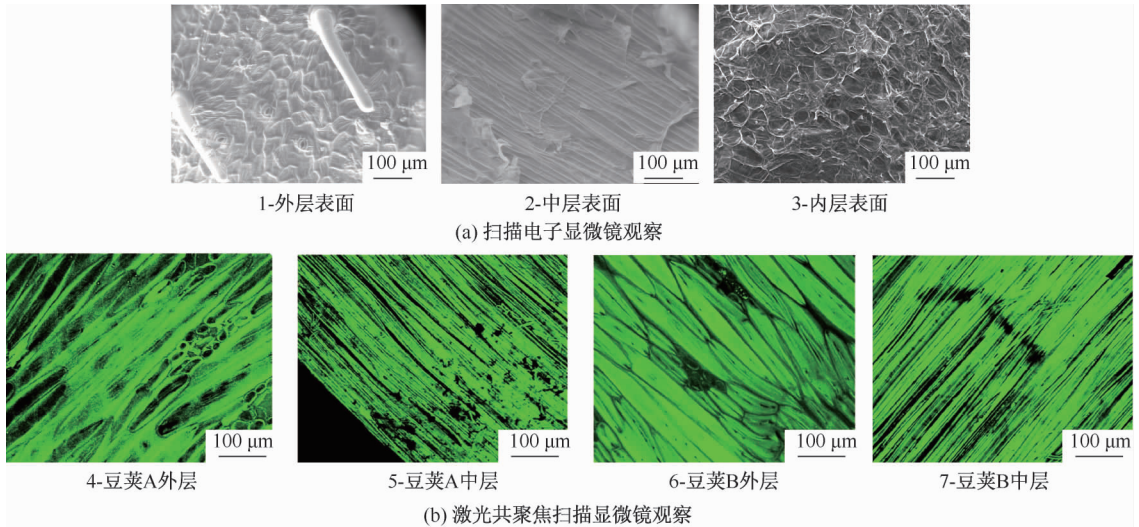


图2 不同显微镜下豆荚表面观察

Fig. 2 Pod surface observed by different microscopes (a) Under scanning electron microscope, (b) Under laser scanning confocal microscope

2.3 豆荚截面的细胞形态观察

图3所示为光学显微镜下观察到的干豆荚A、B各截面。豆荚分为4层:内层、中层和外层下表面和上表面。豆荚内层(in)由薄壁组织构成,排列杂乱无章。干豆荚的内层干且薄,极容易脱落,在光学显微镜下很难看到。豆荚中层(mid)由死的厚壁组织的纤维细胞构成,细胞尺寸小,且排列密集。豆荚外层分为上、下两层,上层(ex1)由长的厚壁活细胞组织构成,细胞尺寸大,排列松散,细胞间隙较大。下层(ex2)由厚壁细胞组织构成,细胞腔破裂,细胞呈不规则形状。这说明与其相邻的两层纤维都失水收缩了,且收缩方向不同,造成外层下表面细胞壁的破损。

由图3可以观察到豆荚A、B的*a*、*b*、*c*、*d*4个方向的截面外层下表面的形态基本相同,说明外层下

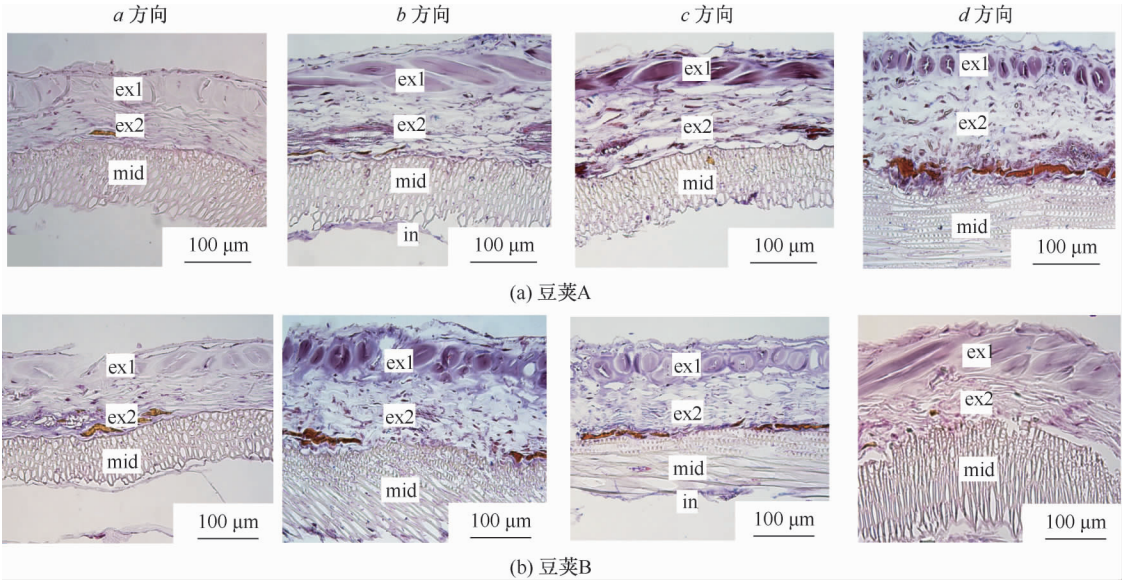
表面的细胞没有定向排布。豆荚A外表皮上层在*c*斜截面呈长条状,在*d*斜截面呈圆形状,说明豆荚A外层上表面细胞长轴方向沿着*c*方向排布。反之,豆荚B外层上表面细胞的长轴沿着*d*方向排布。豆荚A中层细胞在*c*斜截面呈圆形状,在*d*斜截面呈长条状,说明豆荚A中层细胞长轴方向沿着*d*方向排布。相反地,豆荚B中层细胞的长轴沿着*c*方向排布。

2.4 解离后的豆荚纤维细胞观察

在激光共聚焦显微镜下观察到,解离后的豆荚外层是长条状的纤维细胞,长度各异[见图4(a)];解离后的豆荚中层纤维细胞长度比外层的纤维细胞长,宽度比外层的纤维细胞窄[见图4(b)]。通过Image J测量,分别统计1、3、5周豆荚100个纤维细胞的长宽(见表1)。随着豆荚的生长,含水量呈

线性逐渐降低,豆荚外层纤维长度减小,宽度增加,豆荚中层纤维长度增加,宽度减小[见图 4(c)、

(d)].因此,在豆荚成熟失水过程中,外层纤维发生收缩,而中层纤维发生拉伸。



ex1:外层上表面;ex2:外层下表面;mid:中层;in:内层

图3 光学显微镜下干豆荚各截面图

Fig.3 Each section of dry pods under optical microscope (a) Pod A, (b) Pod B

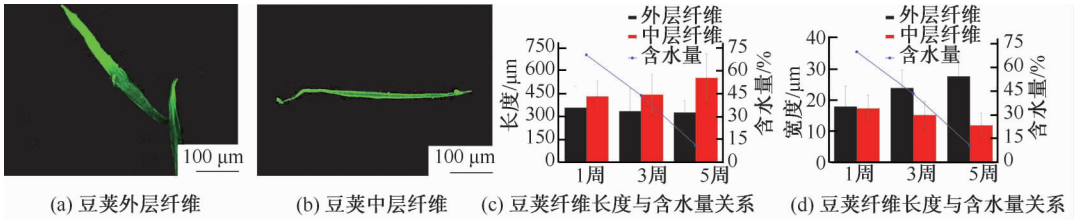


图4 解离后的纤维细胞和尺寸分布

Fig.4 Fiber cells of pod after dissociation and size distributions (a) Exterior layer of fiber cells, (b) Middle layer of fiber cells, (c) Relationship between fiber length and moisture, (d) Relationship between fiber width and moisture

表1 豆荚不同生长期的纤维尺寸

Tab.1 Fiber size of pods during different growth periods

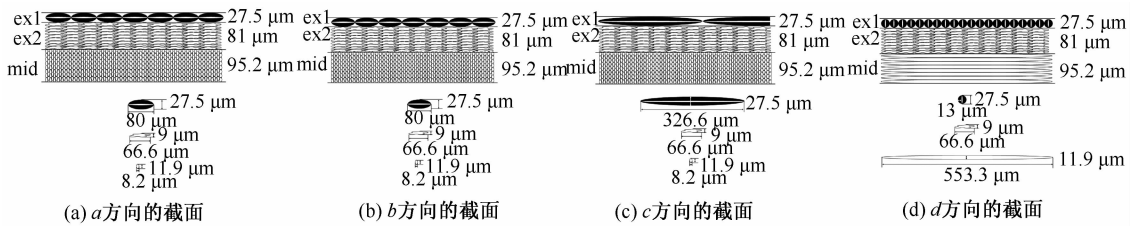
豆荚生长期/周	外层纤维长度/ μm	中层纤维长度/ μm	外层纤维宽度/ μm	中层纤维宽度/ μm
1	358.20 ± 140.06	431.75 ± 101.41	17.92 ± 6.52	17.37 ± 4.14
3	335.47 ± 145.95	444.51 ± 131.86	23.79 ± 5.68	15.18 ± 4.30
5	326.65 ± 77.09	553.29 ± 159.20	27.5 ± 6.53	11.9 ± 4.02

2.5 力学拉伸试验

经过7组力学拉伸试验,测得豆荚弹性模量为 (68.83 ± 11.27) MPa,强度极限为 (2.55 ± 0.86) MPa。经拉伸,豆荚沿着斜 45° 方向断裂,说明豆荚的纤维方向斜 45° 排布。

2.6 豆荚截面示意图

根据干豆荚的组织学观察结果,画出豆荚截面图,可以更加直观清晰地展现豆荚结构(见图5)。图中的尺寸是统计了100个组织切片和激光共聚焦显微镜下观察的结果,所得到的平均值能够准确反映豆荚截面细胞的尺寸。干豆荚外层上表面细胞沿着c方向排布,长度 $326.6 \mu\text{m}$,宽 $27.5 \mu\text{m}$,壁厚 $13 \mu\text{m}$ 。外层上表面在d方向的截面是其横截面,近似一个直径 $27.5 \mu\text{m}$ 的圆形。外层上表面在a、b截面上的长宽均介于c、d截面之间。外层下表面细胞壁破裂,没有定向排布,在各个截面排布基本一致,经过统计,外层下表面细胞长度 $66.6 \mu\text{m}$,宽度



ex1:外层上表面; ex2:外层下表面; mid:中层

图5 豆荚A截面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of pod A section (a) Under direction a, (b) Under direction b, (c) Under direction c, (d) Under direction d

9.0 μm 。干豆荚中层细胞沿着 d 方向排布,长度 553.3 μm ,宽度 11.9 μm 。中层细胞在 c 方向的截面是其横截面,近似一个六边形,相邻细胞交叉排列,无缝隙。通过统计,长度 11.9 μm ,宽度 8.2 μm 。

2.7 豆荚弹射过程

在高速摄像机下拍摄的豆荚弹射过程。整个豆荚开裂过程持续 10 ms。在 2 ms 时,可以观察到豆荚尾部开始出现裂口,随后豆荚从尾部开始开裂,慢慢向上延伸,并形成螺旋状,在 10 ms 时,整个豆荚完全裂开(见图 6)。

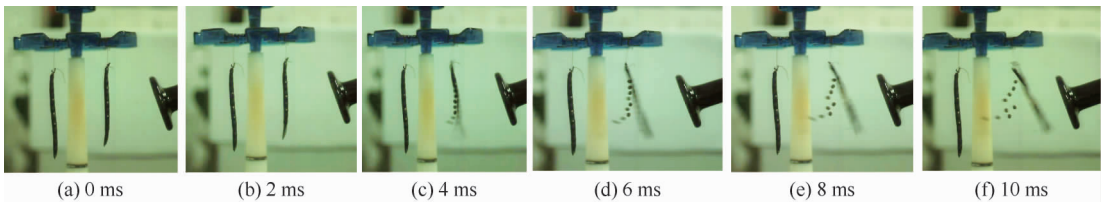


图6 豆荚弹射过程

Fig. 6 Process of pod ejection (a) 0 ms, (b) 2 ms, (c) 4 ms, (d) 6 ms, (e) 8 ms, (f) 10 ms

3 讨论

豆荚成熟后,从豆荚的尾部开始出现裂痕,从下往上逐渐裂开,裂开后形成螺旋状,将种子弹射,这是其特殊结构导致的。组织学观察结果发现,豆荚分 4 层,其中豆荚 A 外层上表面纤维方向与 c 方向一致,豆荚 A 中层纤维方向与 d 方向一致,豆荚 B 外层上表面纤维与 d 方向一致,豆荚 B 中层纤维与 c 方向一致。豆荚外层上表面和中层的纤维细胞方向是正交的,且与垂直方向呈 45° ,拉伸断裂后形成的 45° 断裂面进一步证明了这个结论。与 Armon 等^[5]通过模拟实验推测出的理论一致。

在组织切片图中观察到,互相正交的外层上表面和中层之间有一层细胞壁破损的细胞层,说明这两层纤维都失水收缩了,且收缩方向不同,从而造成外层下表面层细胞壁的破损。

在激光共聚焦显微镜下观察到,随着豆荚成熟失水,豆荚外层纤维长度减小,宽度增加,豆荚中层纤维长度增加,宽度减小。因此,在豆荚成熟失水

过程中,外层纤维发生收缩而中层纤维发生拉伸。

因此,本文认为豆荚弹射机制为:豆荚由于含水量的变化,在互相正交的外层和中层纤维方向上发生了收缩和膨胀,其中豆荚外层纤维发生收缩,中层纤维发生膨胀。膨胀和收缩使豆荚产生弹性性能的累积,并产生预应力。这种预应力可以通过破裂,即豆荚弹开裂来释放。在正交方向上的收缩膨胀使豆荚弹开形成螺旋形。同一个豆荚的不同两片(即豆荚 A、B)的豆荚外层上表面和中层的纤维细胞方向正好相反,该结构导致豆荚弹开后,一片形成左手螺旋,另一片形成右手螺旋。

目前研究更多地针对于干豆荚的显微结构和力学性能,为了进一步探讨豆荚弹射原理,下一步将对新鲜豆荚与干豆荚的纤维细胞,追踪不同生长期豆荚的纤维细胞的形态和力学性能变化。

4 结论

通过对干豆荚的组织学和显微结构材料学观察以及力学性能测试,得出以下结论:

(1) 豆荚外层上表面和中层的纤维细胞方向是正交的,导致豆荚在正交的纤维上累积弹性能,产生预应力,最终通过豆荚开裂来释放。

(2) 互相正交的外层上表面和中间层之间有一层细胞壁破损的细胞层,说明这两层纤维都失水收缩了,且收缩方向不同,从而造成细胞层的细胞壁破损。

(3) 在豆荚成熟失水过程中,外层纤维发生收缩,中层纤维发生拉伸。

(4) 对于同一个豆荚的不同两片(即豆荚 A、B),豆荚外层上表面和中层的纤维细胞方向正好相反,这样的结构导致豆荚弹开后,一片形成左手螺旋,另一片形成右手螺旋。

(5) 豆荚外层上表面的纤维比豆荚中层纤维又短又粗,这一结构对细胞壁失水速率和预应力具有影响。

(6) 豆荚弹射过程是从豆荚的尾部开始出现裂痕,从下往上逐渐裂开,裂开后形成螺旋状。

参考文献:

- [1] NARAYAN RJ, KUMTA PN. Advances in biomedical and biomimetic materials: Ceramic transactions [M]. USA: John Wiley & Sons, 2009.
- [2] HARTMANN HT, KESTER DE, DAVIES FT, *et al.* Plant propagation: Principles and practices [M]. USA: Prentice-Hall Inc., 1997.
- [3] 杨期和, 杨和生, 刘惠娜. 植物种子的传播方式及其适应性 [J]. 嘉应学院学报, 2013, 31(5): 50-59.
- [4] DEY NS, MAJUMDAR S, RAO M. Multiparticulate drug delivery systems for controlled release [J]. Trop J Pharm Res, 2008, 7(3): 1067-1075.
- [5] ARMON S, EFRATI E, KUPFERMAN R, *et al.* Geometry and mechanics in the opening of chiral seed pods [J].

Science, 2011, 333(6050): 1726-1730.

- [6] SEFFEN KA, YOU Z, PELLEGRINO S. Folding and deployment of curved tape springs [J]. Int J Mech Sci, 2000, 42(10): 2055-2073.
- [7] 赵丹, 胥春. 力学影响细胞凋亡及其信号转导机制研究进展 [J]. 医用生物力学, 2014, 29(2): 188-192.
- ZHAO D, XU C. Advances in force-affected cell apoptosis and its signal pathways [J]. J Med Biomech, 2014, 29(2): 188-192.
- [8] 蒋持平, 刘清漪, 柴慧, 等. 豆荚弹射传播种子中的力学 II: 螺旋魔术 [J]. 力学与实践, 2012, 34(3): 92-94.
- [9] ZIJLSTRA G, GROEN M, POST J, *et al.* On the role of the residual stress state in product manufacturing [J]. Mater Des, 2016, 105: 375-380.
- [10] REYSSAT E, MAHADEVAN L. Hygromorphs: From pine cones to biomimetic bilayers [J]. J R Soc Interface, 2009, 6(39): 951-957.
- [11] ELBAUM R, ZALTZMAN L, BURGERT I, *et al.* The role of wheat awns in the seed dispersal unit [J]. Science, 2007, 316(5826): 884-886.
- [12] 邓林红. 哮喘等慢性气道疾病中气道缩窄的生物力学模型研究最新进展 [J]. 医用生物力学, 2016, 31(4): 347-355.
- DENG LH. Recent advances in modeling of airway mechanical behaviors in association with airway constrictions in asthma [J]. J Med Biomech, 2016, 31(4): 347-355.
- [13] 卡德尔·阿布都热西提. 干旱胁迫下不同作物品种叶片含水量的测定 [J]. 喀什师范学院学报, 2009, 30(6): 50-53.
- [14] 李和平. 植物显微技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [15] 杜中, 王幼群. 简便的植物组织解离法 [J]. 植物杂志, 2003(4): 45.
- [16] DONALDSON LA, RADOTIC K. Fluorescence lifetime imaging of lignin autofluorescence in normal and compression wood [J]. J Microscopy, 2013, 251(2): 178-187.
- [17] 祝廷成, 钟章成, 李建东. 植物生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.