

预应力复合条实验—— 赏豆荚的奇妙力学设计

蒋持平

1. 从小学课文到前沿原创成果说到植物传播种子，首先可能想起小学课文《植物妈妈有办法》，其中有一节：

豌豆妈妈更有办法，
她让豆荚晒在太阳底下。
啪的一声，豆荚炸开，
孩子们就蹦跳着离开妈妈。

孩提时代的事物总是有趣的，老师的生动讲述，或许还有妙处横生的录像和实验，定然印象深刻。图1那优雅的螺旋形多熟悉。没错，就是豆荚。这幅图引自 *Science*——国际公认最高级别的报道原创性成果的科技期刊。科学家 (Shahaf Armon et al, *Science*. 2011. 333: 1726–1729) 最近揭示了豆荚爆裂弹射种子的力学原理。

豆荚由内外两层细胞纤维组



图1 爆裂前和爆裂后的豆荚

织构成 (图2)，两层分别与豆荚的长轴成 $\pm 45^\circ$ 角。籽粒成熟后，豆荚自然失水，两层组织分别沿 $\pm 45^\circ$ 的方向收缩，产生爆裂内力 (预应力)，弹射种子后，豆荚变为图1右的优雅的螺旋形状。

研究表明，豆荚实现了整个生长阶段的全程和全功能的优化。它是一座知识宝库，吸引了多个学科的优秀科学家。如图2所显示，豆荚是层状纤维复合材料：轻质、柔韧，是保护籽粒的牢固盾牌。豆荚的内层是死纤维细胞，以无耗能的方式执行护卫任务。豆荚又兼运输线，通过它，绿叶光合作用所生产的营养源源不断地输往籽粒。豆荚还兼生产，看它们在阳光下与叶片相映的赏心悦目的绿色，就知道效率多高……

下面根据豆荚的爆裂弹射原

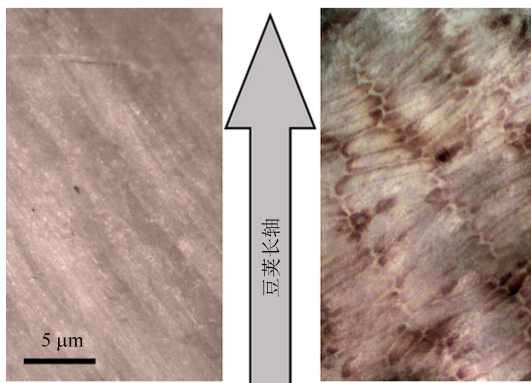


图2 豆荚的组织，左图为内层，右图为外层，细胞纤维分别与豆荚长轴 (箭头方向) 成 $\pm 45^\circ$ 夹角

理，介绍一个小实验，品味一下豆荚的奇妙力学设计。

2. 魔术螺旋——预应力复合条实验

豆荚的弹射源于两层组织沿不同方向的收缩形成的残余应力，或称预应力。预应力弹性体有一个有趣的特点：切开时会释放部分应力，形状改变。人类已经学会利用预应力，例如预应力钢筋混凝土。但是早在数千万年以前，豆荚就形成的由两个最简单的单向收缩复合的力学设计方案，及其所呈现的魔术般的变形性质仍对人类有示范作用。

干燥收缩不容易模拟控制，可以根据力学等效由橡胶拉伸后的卸力收缩代替：

从普通生活用橡胶手套上剪取平整的薄片。如图3，将两橡胶片沿正交方向分别拉伸，使其伸长到预先设定的量，用自行车补胎用胶粘结，待胶固化后卸去外力，就制作成了双层预应力橡胶片，然后裁成条 (图3阴影区)，裁剪时取条宽 w 和裁剪角 θ 的不同值，就得到不同形状的

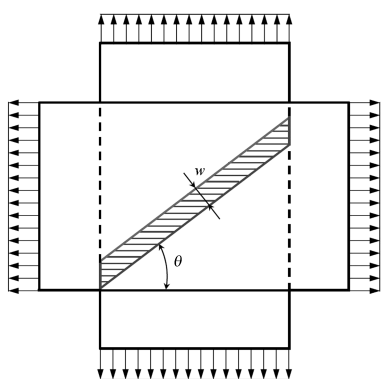


图3 双层预应力橡胶条制作

螺旋。

先观察裁剪角对螺旋形状的影响。保持条的宽度 w 不变（窄条），分别取 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 和 90° ，实验结果如图4所示。可以看到，当裁剪角 θ 从 0° 增加到 45° 时，条的形状从盘缠经历圆柱面螺旋、变成纯扭转螺旋。当 θ 从 45° 增加到 90° 时，条又经历圆柱面螺旋、变回盘缠，细心的读者会发现，此时螺旋的黑色外侧成为了内侧。



图4 不同裁剪角对应的螺旋形状

当裁剪角由 0° 变到 -90° 时，条的形状变化规律与图4相同，但是螺旋的手性特征变了，由左手螺旋变成了右手螺旋。图5显示了沿 $\theta=45^\circ$ 与 -45° 剪下的相同宽度的条的手性特征，左图为左手螺旋，右图为右手螺旋。人类曾苦苦探索自然现象的手性特征之谜，豆荚不经意地以如此简明的方式告诉我们：它是几何性质，不是材料性质。

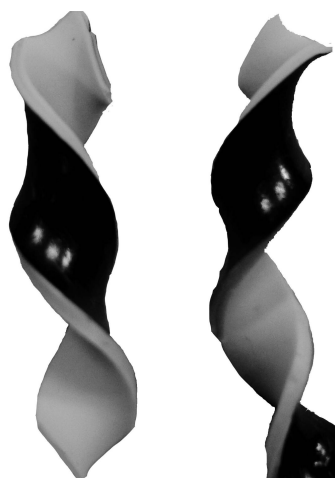


图5 螺旋的手性特征

再观察条宽的影响。图6为沿 $\theta=45^\circ$ 方向剪下的条。左条是宽条，圆柱面螺旋；右条是从左条剪下来的窄条，变成了纯扭转螺旋条。因轴线变直，显得长了一些。

我们不妨设计一个小魔术来说明有预应力和没有预应力的条的区别：图6左的预应力宽条是一个道具，另做一个外形相同但没有预应力的宽条。让观众检查，确认二者相同。然后仿照魔术师故弄玄虚，



图6 圆柱面宽条剪开后成纯扭窄条

口中念念有词，对着一个条吹口“仙气”，叫声“变直”，再让观众分别将两个宽条剪成窄条。“魔法”应验了：吹了“仙气”的那个宽条剪开后轴线变直了，成了纯扭转螺旋，而另一个剪开后轴线依然保持原来的圆柱面螺旋形状。

还有一个有趣的现象：宽条反向卷曲也能保持稳定，我们称之为双稳态性质。图7右图是对左图螺旋施加外力反向卷曲而成，螺旋的母圆柱面轴线由铅垂变为水平，仍保持稳定。更有趣的是，这样反向卷曲后，除了螺旋的白色内侧变为外侧外，螺旋的形态不变，仍然是左手螺旋，且母圆柱面半径和螺距也不变。我们也可以利用这种双稳态性质设计一个魔术，因为无预应力的宽条没有双稳态性质。

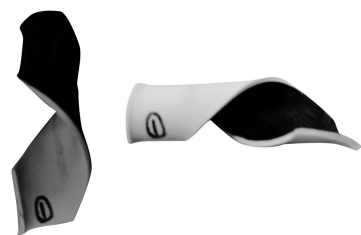


图7 宽条的双稳态性质

3. 实验课花絮

北京航空航天大学材料力学教师于2012年开发了 this 扩展型选修实验，实验课的几个花絮，不仅有趣，也可能对我们做实验有帮助。

(1) 甜蜜的烦恼

带这门选修课的老师被通知，报名的同学多，问是否要限制？答曰“不用”。因为实验选修课18~30人，以往年的经验，多也多不到哪里去。直到知道已有280多人报名，才紧急叫停，婉言谢绝

后报名的同学。原来不仅相关专业、其他专业，包括文科的同学都来报名了。实验课只能小班授课，这位老师只好周六、周日和晚上加班。问他累不累，他说心里还是高兴的。于是大家戏称他有了甜蜜的烦恼。

后来教研室总结：只有不合格的教师，没有不合格的学生。教学要紧跟时代不断创新才能吸引学生。

(2) 手与小夹具

图3所示预应力夹层条实验看上去简单，其实不然。开始做实验时，橡胶条涂胶后，由两位同学双手拉伸粘结，结果总是失败，因为胶的固化需要时间，其间要保持贴合又拉力均匀不容易。后来设计了一个小夹具，解决了问题。见图8，将橡胶片一端粘在角铝上，再由螺栓固定在板上，另一端的板钻有不同距离的孔，将条拉到预定拉伸长度后，同样由螺栓固定。正交方向的另一个条也同样处理（没在图中）。荀子说：“君子生非异也，善假于物也。”按他老人家的话做，实验会顺利得多。



图8 夹具

(3) 最差与最佳

一位工科的男同学平日被同学昵称为“大牛”，没做准备，却早早夸下海口，结果实验不成功。大家起哄，授予他“最差作品”奖，并宣读授奖评语：“尾(伟)大地牛气充填(冲天)地由四不像发展到了什么也不像。”

相反，一位文科的女同学做了充分的准备，甚至还向修自行车的师傅请教了补胎技术，结果她第一个完成，而且作品最漂亮。于是大家簇拥着她，雀跃欢呼，举着她的作品绕实验桌一周。她也被评为当日“科学女皇”。

4. 科学前沿在哪里

做这个实验时，有同学问：“科学前沿在哪里？”这里引述一位老科学家的回答。他在黑板上画一个

人，然后画一个圆将人包围，再向上和向下各画一条细长通道。他解释：向上的通道代表深空探测，上探宇宙之浩瀚；向下的通道代表微观研究，下究基本粒子之奥妙。这两个通道重要但狭窄，只需少数人参加。科学前沿的主阵地在国内，即与我们的衣食住行息息相关的周围世界。那将城市瞬间变为泽国的暴雨、毁灭性的沙尘暴、盘踞一百多万平方千米的雾霾、餐桌上的食品、墙上的壁虎、树上的啄木鸟……都是我们的科学研究前沿。

将视线回到豆芽，科学家在探索：豆芽致爆的柔性致动器的新设计思路，能否引起传统的传动设计的革命性进展？

(北京航空航天大学固体力学研究所 100191)

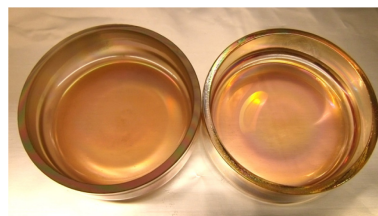
科苑快讯

提高试管婴儿成功率的金钢石

精子具有强劲的游泳能力，这是它们的自然本能。但是在培养皿中，你却无法要求它们有优秀表现，“精子活力低”是试管授精(in vitro fertilization, IVF)面临的普遍问题。不过最新的研究结果却表明，也许并不全是这些小家伙的错。

湿润的标准聚苯乙烯培养皿，其表面会软化变成一种有毒的黏性物质，可能对细胞造成伤害。覆盖了纳米金刚石的水晶培养皿(如图)，则为细胞提供了安全港；在试管授精过程中，能够存活42小时的精子百分比远高于聚苯乙烯容器。

研究者在美国材料研究学会的《在线程序库》(Online Proceedings Library)中做了报道。试管授精中的精子需要尽可能的



保护，将其转移到金刚石培养皿中可提高成活率，这也能在一定程度上改善试管授精不尽人意的低成功率。

(高凌云编译自2011年2月8日 www.sciencemag.org)