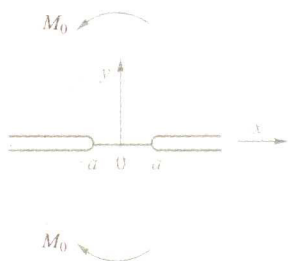
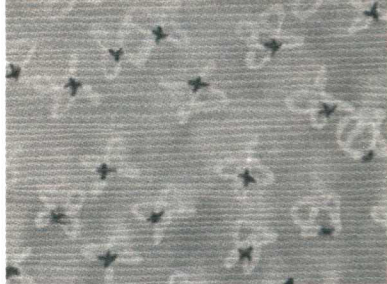


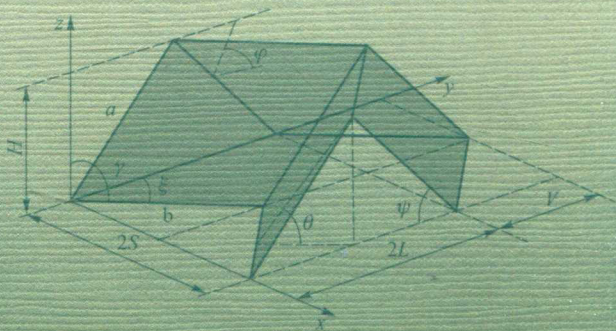
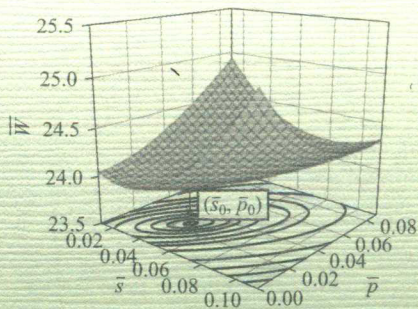
北京市科学技术协会科普创作出版资金资助



蒋持平 编著

材料力学趣话

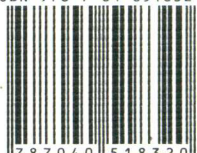
——从身边的事物到科学研究



高等教育出版社



ISBN 978-7-04-051832-0

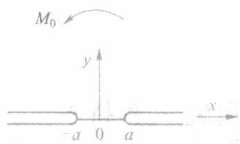


9 787040 518320 >

上架建议：力学类

定价 39.00元

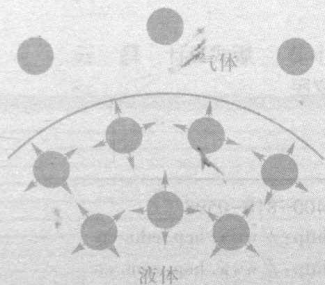
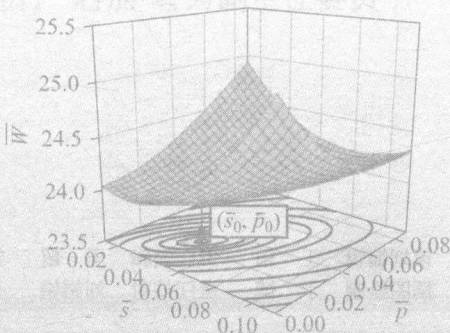
北京市科学技术协会科普创作出版资金资助



材料力学趣话

——从身边的事物到科学研究

蒋持平 编著



高等教育出版社·北京

图书在版编目(C I P)数据

材料力学趣话：从身边的事物到科学研究 / 蒋持平
编著. --北京：高等教育出版社，2019.5

(大众力学丛书)

ISBN 978-7-04-051832-0

I. ①材… II. ①蒋… III. ①材料力学-普及读物
IV. ①TB301-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 081248 号

策划编辑 王超 责任编辑 王超 封面设计 李小璐 版式设计 马云
插图绘制 于博 责任校对 刘娟娟 责任印制 赵义民

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	北京中科印刷有限公司	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
开 本	850mm×1168mm 1/32		http://www.hepmall.com
印 张	8.75		http://www.hepmall.cn
字 数	210 千字	版 次	2019 年 5 月第 1 版
插 页	2	印 次	2019 年 5 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	39.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 51832-00

中国力学学会《大众力学丛书》编辑委员会

陈立群 戴世强⁺ 刘延柱 余振苏 隋允康

王振东 武际可* 叶志明 张若京 仲 政

朱克勤 朱照宣

(注：后加*者为主任委员，后加⁺者为副主任委员)

中国力学学会《大众力学丛书》

总序

科学除了推动社会生产发展外，最重要的社会功能就是破除迷信、战胜愚昧、拓宽人类的视野。随着我国国民经济日新月异的发展，广大人民群众渴望掌握科学知识的热情不断高涨，所以，普及科学知识，传播科学思想，倡导科学方法，弘扬科学精神，提高国民科学素质一直是科学工作者和教育工作者长期的任务。

科学不是少数人的事业，科学必须是广大人民参与的事业。而唤起广大人民的科学意识的主要手段，除了普及义务教育之外就是加强科学普及。力学是自然科学中最重要的一個基础学科，也是与工程建设联系最密切的一个学科。力学知识的普及在各种科学知识的普及中起着最为基础的作用。人们只有对力学有一定程度的理解，才能够深入理解其他门类的科学知识。我国近代力学事业的奠基人周培源、钱学森、钱伟长、郭永怀先生和其他前辈力学家非常重视力学科普工作，并且身体力行，有过不少著述，但是，近年来，与其他兄弟学科（如数学、物理学等）相比，无论从力量投入还是从科普著述的产出看来，力学科普工作显得相对落后，国内广大群众对力学的内涵及在国民经济发展中的重大作用缺乏有深度的了解。有鉴于此，中国力学学会决心采取各种措施，大力推进力学科普工作。除了继续办好现有的力学科普夏令营、周培源力学竞赛等活动以外，还将举办力学科普工作大会，并推出力学科普丛书。2007年，中国力学学会常务理事會决定組成《大众力学丛书》編輯委员会，计划集中出版一批有关力学的科普著作，把它们集结为

《大众力学丛书》，希望在我国科普事业的大军中团结国内力学界人士做出更有效的贡献。

这套丛书的作者是一批颇有学术造诣的资深力学家和相关领域的专家学者。丛书的内容将涵盖力学学科中的所有二级学科：动力学与控制、固体力学、流体力学、工程力学以及交叉性边缘学科。所涉及的力学应用范围将包括：航空、航天、航运、海洋工程、水利工程、石油工程、机械工程、土木工程、化学工程、交通运输工程、生物医药工程、体育工程等等。大到宇宙、星系，小到细胞、粒子，远至古代文物，近至家长里短，深奥到卫星原理和星系演化，优雅到诗画欣赏，只要其中涉及力学，就会有相应的话题。本丛书将以图文并茂的版面形式，生动鲜明的叙述方式，深入浅出、引人入胜地把艰深的力学原理和内在规律介绍给最广大范围的普通读者。这套丛书的主要读者对象是大学生和中学生以及有中学以上文化程度的各个领域的人士。我们相信它们对广大教师和研究人员也会有参考价值。我们欢迎力学界和其他各界的教师、研究人员以及对科普有兴趣的作者踊跃撰稿或提出选题建议，也欢迎对国外优秀科普著作的翻译。

丛书编委会对高等教育出版社的大力支持表示深切的感谢。出版社领导从一开始就非常关注这套丛书的选题、组稿、编辑和出版，派出了精兵强将从事相关工作，从而保证了本丛书以优质的形式亮相于国内科普丛书之林。

中国力学学会《大众力学丛书》编辑委员会

2008年4月

序 言

Preface

常有年轻朋友问及科学前沿，这里转述一个通俗形象的说法：以人为心画个圆表示身边的世界，圆有上通道伸向宇宙深空，下通道伸向微观，科学要为人类谋福祉，主阵地在圆内，身边的事物关系到我们的衣食住行。

本书从国际公认的报道自然科学领域最高水平成果的《Science》《Nature》等刊物选取材料力学相关题材，结合作者的科研与教学体会，以科普小专题的形式将其介绍给读者。大道至妙，大道至美，大道至简，许多高端原创的核心思想和发现，中学文化程度的读者能探其奥妙，大学生、研究生和高端科技人员也会拍案叫绝。

丰收的田野，成熟的大豆得及时收获。当豆荚绽开螺旋形笑脸时，籽粒已被弹射播种到大地了。想想人类的弹射装置，有动力、传力和控制系统，多复杂！豆荚的弹射却仿佛只是它全寿命多功能优化设计中不经意的一环。豆荚的双层正交纤维结构是籽粒盔甲的完美力学设计。表层叶绿素协助叶制造营养，内层兼运输通道。籽粒成熟后，正交纤维层自然干枯引起不匹配收缩，产生残余应力弹射籽粒。科学家在思考，豆荚柔性致动器设计的新概念能否给人类传动技术带来革命？



碧绿的菜畦前，达尔文曾被黄瓜卷须的魔幻般表演迷住：细长直须在微风中舞姿曼妙，接触到攀援物后，前端拴紧，然后自盘卷缩短，拉动整个藤蔓攀援。更神奇的是，老卷须受拉时盘圈数不减反增，刚度先缓慢、然后连续且急剧地增加。这样挂满瓜的藤能在微风中轻舞，狂风袭来时又有“定力”护瓜。对比人类的安全带，由完全松弛到一下刚性锁紧，不仅舒适度低，还引起过灾难性事故。力学奥秘揭开，原来卷须是豆荚的力学“姊妹”，对简单双层预应力条模型略作修改，就具有了另一种神奇的魔力！

北美大地捕蝇草叶片在为创造了植物捕食动物的奇迹而笑。那沾着“蜜汁”的叶片是可怕的罗网，0.1~0.2秒就会合拢，让昆虫有翅难逃。这种神技与古战场峡谷的滚石阵、陪伴我们童年梦幻的咣咣尺、航天器的自展开装置有相同的力学原理。只不过在功力上，人类还处在“菜鸟级”，自然已修炼到“钻石级”了。

仰望星空，火星上有神秘嵌套裂纹；俯视大地，干涸的湖泊与凝固的火山岩浆“湖面”有优雅的周期分级裂纹，它们是环境变化的科学密码；登故宫看国宝，那“开片”艺术陶瓷表面行云流水般的自然裂纹图案让我们思考科学与艺术的关联；关注工程前沿，临近空间高超声速飞行器的陶瓷热防护系统、燃气轮机的陶瓷涂层提出了陶瓷热震失效的研究课题。随着热震温差的增加，陶瓷试件的热震裂纹增多变长，剩余强度突降后却在相当范围内保持不变，反映了物质世界具有普遍意义的动态平衡与突变。我们曾长期不加节制地排污，似乎依旧白云悠悠，流水清澈，因为自然有强大的自净平衡的能力。可是突然雾霾来了，江河湖泊臭了，暴雨大旱等极端天气降临了，要恢复原有生态，需付出高昂的代价。

海潮给金色的沙滩送来形状奇特、色泽艳丽的贝壳，牛顿曾用它来比喻自己的科学发现，流露出未见科学大洋之怅惘。或许

牛顿时代还没认识到贝壳就是科学大洋的一颗明珠，它展示了跨尺度力学设计如何创造超级强韧化的奇迹。鲍鱼壳的珍珠母层是跨尺度力学的华彩乐段，由脆性低强度碳酸钙（仅0.5微米厚的文石晶片）添加5%的生物胶制造，晶片间的矿物桥更是力学设计的神来之笔。珍珠母层的发育是先长矿物桥“树干”，后生文石晶片“叶”，自然简单，却给人类的仿生提出了挑战：如何制造和砌这天文数字的超薄片，还架设矿物桥？当然，人类应当对自己的创造力充满信心，科学家独辟蹊径，以定向生长的冰棱为模分割陶瓷悬浮液，在仿生方面取得了长足的进步。

林间小路上的浪漫情趣不意被黏黏的蜘蛛网黏走。别着恼，且收住脚步端详这另一款自然超柔韧材料，它是用普通的蛋白质加氢键（弱的化学键）创造的奇迹。其奥秘也在于跨尺度力学设计，其华彩段是氢键如按扣扣住了纳米绳，当拉力达到一定大小时，氢键打开，宏观显现大变形，并形成独特的线弹性-软化-非线性硬化性质。而这独特性质又服务于建造超级带缺陷捕虫网，即昆虫撞网时，所有的丝协同捕捉。如果猎物大过网的承载能力，靶载丝急剧硬化，牺牲自己保住全网。所以自然界难找没有缺陷的蜘蛛网，有缺陷的网照样捕虫。

“骤雨打新荷”的夏日诗情沿历史长河飘来。科学家也在研究水滴落疏水面的现象，发现在疏水面加合适的脊纹，可以大大缩短水滴回跳时间。此项研究对减轻冻雨凝固在飞机、风力发动机叶片、输电线路等表面造成的冰灾影响有重要应用价值。循着亲水与疏水的研究线，我们会看到纳米布沙漠的雾姥迎风“斗”雾的奇景，原来它在用亲疏水相间的背部收集雾水饮用。这样的亲疏水图案经人厌槐叶萍稍加变化，又成为水下聚气闭水的法宝。受自然的启示，人类制造了多雾缺雨山区的拦雾网、自清洁玻璃等。

环顾身边，复合材料的应用日益增长，智能化程度日益提高，因而有学者称我们的时代是合成材料与智能材料时代。复合



材料的细观力学方法也能够用于研究电磁热声光等有效物理性能，并揭示这些完全不同的物理现象在数学本质规律方面的惊人相同或相似，揭示复合材料可以产生组分材料所没有的新性质，揭示组分材料的随机分布引起有效性质突变的规律。

折纸是童趣，是艺术。人类折纸技艺的精湛复杂连我们自己都感到惊叹。自然却发展了简约奇妙的折纸技法：树芽展叶，花蕾绽开，昆虫伸翼，飞鸟亮翅，地表皱褶……千姿百态的薄片展开或收拢，都是一气呵成。师法自然，我们大大简化了卫星的太阳能电池板的折叠和展开，开发了具有超常泊松比、变形自锁、力学性能可调的超材料，设计了折纸型可编程物质、折纸型机器人。用 DNA 折纸术制造的纳米尺度地图，一滴水能装 500 亿份。

或许读者朋友想自己动动手了。正好近年作者承担了北京航空航天大学国家级材料力学精品课和资源共享课、北京市级力学实验教学中心的建设工作，虽然通过验收，却有一个外人难以察觉的短板——学生对新开设的创新实验选修课积极性不高，这促使作者放弃了一个重要科研课题的申请，集中精力思考这门课的创新问题。

根据豆荚弹射和黄瓜卷须攀援开发的“双层预应力条实验”于 2012 年秋首次开课，受欢迎程度远超预期。原定 30 人的课程，几天就有 280 余人报名，不得不提前截止报名。报名的学生中有不少文科生，最先完成作品的就是一位外语系的女同学。她准备充分，还提前向修自行车的师傅学习了橡胶粘结手艺。看着她的作品呈现魔术般的变形性质，大家欢呼雀跃，封她为当日的“科学女皇”，簇拥着她手举杰作绕实验桌一周……本书力求避开繁复的理论公式（少量可跳过），通过图和小实验引入绝妙却极简的力学创新核心。

最后，我要感谢当年在读的硕士生和博士生对本书的贡献，他们是尚伟、侯慧龙、武小峰、柴慧、严鹏、陈富利、刘清漪、康博奇和郭乾坤；感谢实验室姜开厚老师和后来的赵婧老师；感

谢中国科学院力学研究所宋凡和邵颖峰研究员；感谢《大众力学丛书》编委会武际可、戴世强、王振东教授和王超编辑。本书应武际可教授邀约，大部分短文曾在《力学与实践》发表。

蒋持平
于北京
2016年

目 录
Contents

- § 1 豆荚 I : 弹射播种 / 1
- § 2 豆荚 II : 螺旋魔术 / 8
- § 3 豆荚 III : 趣味实验 / 16
- § 4 豆荚 IV : 自然大美 / 24
- § 5 黄瓜藤卷须 I : 自盘卷拉拽 / 33
- § 6 黄瓜藤卷须 II : 临摹实验 / 42
- § 7 裂纹图案 I : 周期分级 / 51
- § 8 裂纹图案 II : 数值仿真 / 59
- § 9 裂纹图案 III : 剩余强度平台 / 68



- §10 裂纹图案Ⅳ：利用与防害 / 76
- §11 贝壳Ⅰ：科学与艺术珍品 / 85
- §12 贝壳Ⅱ：多级微结构 / 91
- §13 贝壳Ⅲ：贯通尺度之桥 / 98
- §14 贝壳Ⅳ：冰模仿生 / 104
- §15 蜘蛛丝Ⅰ：超柔韧 / 111
- §16 蜘蛛丝Ⅱ：多级微结构 / 118
- §17 蜘蛛丝Ⅲ：带损伤工作网 / 125
- §18 亲疏水Ⅰ：雾姥“斗”雾 / 134
- §19 亲疏水Ⅱ：人厌槐叶萍“闭”水 / 146
- §20 亲疏水Ⅲ：液滴回跳时间 / 154
- §21 复合材料Ⅰ：细观力学模型 / 162
- §22 复合材料Ⅱ：随机中的突变 / 172
- §23 复合材料Ⅲ：乘积与放大效应 / 180

- § 24 折纸 I：从玩到科学 / 186
- § 25 折纸 II：超材料 / 195
- § 26 折纸 III：可编程物质与机器人 / 203
- § 27 压杆 I：多波失稳 / 213
- § 28 压杆 II：刚杆-弹簧模型 / 219
- § 29 从有限到半无限裂纹 / 224
- § 30 双杠支腿位置 / 232
- § 31 让科学想象插翅高飞 / 238
- § 32 杆的礼赞 / 242
- 后记 追寻纯净的科学理想 / 244

§ 7

豆荚 I：弹射播种

Section

摘要 本章从豆荚弹射传播种子时形成美妙的自扭螺旋引出当代力学交叉领域的课题，介绍豆荚精巧的双层正交显微组织及其在保护籽粒、输导和储存营养物质、协同绿叶进行光合作用等方面的多功能优化；介绍籽粒成熟后，豆荚两层组织自然枯萎失水，在正交的方向不同步收缩积累变形能，无须另外供能便可及时将成熟的籽粒弹射出去的精妙力学设计。

材料
力学
趣话

1.1 从小学语文课文到科学研究

如序言所说，科学要为人谋福祉，科学的主阵地在我们的身边。本书就从曾经的小学语文课文《植物妈妈有办法》开始，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。”

老师的讲述生动形象，或许还有妙趣横生的录像，可能我们



自己还会动手晒爆豆荚做个科学小实验。这些都那么令人难以忘怀。

郊游就是寻找童年记忆的机会。金秋，斑斓的丰收大地，醉人的穗实清香。忽然“啪啪啪”几声悦耳熟悉的爆裂声打断了我们的沉思，原来在身旁没及时收割的大豆地里，有豆荚在阳光和清风的抚摩下爆裂了，将籽粒弹射出来。孩提时代学到的植物传播种子的知识也随着这弹射声回到我们的脑际。

那真是八仙过海，各显神通：有潇洒的风力传播，像木蝴蝶、云杉、百合、郁金香的种子自带了薄片形状的“飞行器”遨游天下，风滚草乘风滚动洒播种子；有优雅的水力传播，像松叶菊、马齿苋的果实在大雨中开裂让种子随水流旅行，椰子壳就是天然游泳圈，载种子飘过茫茫大海到孤岛上安家；有死缠烂磨的搭载传播，像苍耳、鬼针草等的种子外表具有倒钩、刺毛、黏液一类的粘附器，依附动物的皮毛或禽鸟的羽毛奔向或飞向远方；也有投桃报李的友情搭载传播，像山葡萄、冬青、南天竹、铁冬青、榕树等的种子坚硬的表皮外有美味果肉，鸟兽食后将种子排泄安置在遥远的原野山巅，作为对馈赠美味的答谢，还回送一抔优质肥料；刚才见到豆荚的劲射则是自力更生的弹射传播，在这个队伍中还有芝麻、油菜、喷瓜等，其中喷瓜成熟后内部浆液胀破果皮，携带种子竟能喷出五六米远……

或许，我们会俯身摘下几个开裂的豆荚，赏玩赏玩那自然形成的美妙扭转螺旋面（一片左手螺旋，一片右手螺旋）。然后呢，可能是笑笑，扔了，继续自己的金秋梦幻游。

同样的生活趣事，如果与有准备的科学家邂逅后会发生什么呢？从书名知道，我们不涉及生物学、农学等其他领域的科学家激动人心的成果，单道似乎与之关系不大的力学家。他们在玩赏之余，还想问个究竟：为什么是这样美妙的螺旋面？怎样形成的？这一问就引出了本章将要向读者介绍的力学研究成果，发表在国际公认报道自然科学领域最高水平成果的刊物之一