托马斯–杨之力学贡献 1)

刘建林 *,2) 夏 热 †

*(中国石油大学 (华东) 工程力学系，青岛 266555)

†(武汉大学动力与机械学院，武汉 430072)

摘要 托马斯–杨是一位多才多艺的学者，在光学、声学、流体动力学、医学、材料力学、考古学、语言学、保险学等众多领域做出了突出贡献，但由于种种原因使他在力学方面的贡献未曾得到学术界的足够重视. 杨在力学方面的研究涉及到材料力学、血液流动力学、能量、冲击动力学、表面浸润力学、工程结构分析等方面. 他是一位纯粹的自然哲学家，同时他能够将理论与实验和工程实际相结合，实现了后辈力学家所提倡的 "技术科学" 的理念.

关键词 托马斯–杨，材料力学，冲击动力学，能量，表面浸润力学

任何一个受过中等教育的人，都会非常熟悉 "杨氏双缝干涉" 这个著名实验. 这一实验结果正式结束了牛顿所提倡的光的 "微粒说" 的主导地位，而设计该实验的就是被公认为是光的 "波动说" 的奠基人之一的英国科学家托马斯–杨 (Thomas Young, 1773-1829).

当然，杨的贡献并不局限于光波学说方面，他在力学、声波学、生理学、艺术、机械、医学、语言、考古、保险等领域均有所涉猎，并且建树甚广. 在光学方面，他也是第一个测量了 7 种颜色光的波长的人. 他曾从生理学角度说明了人眼的色盲现象；利用他自己建立的三原色原理阐明了一切色彩都可以通过红、绿、蓝这 3 种原色的不同比例混合而得到. 杨还先于开尔文 50 多年估计了分子的大小. 在忽略血液黏性的前提下，杨推导出了血液流动中脉搏波的传播速度，即杨氏波速. 同时，他还是一位有名的医生. 在考古学方面，他研究了古埃及的罗塞塔石碑并破译了碑上的文字. 他精通绘画、音乐，几乎掌握了当时的所有乐器. 有一段时期，他甚至还成为法国一个著名马戏团的卓越骑手和走索演员. 可以说他是继亚里士多德、达–芬奇、笛卡尔和莱布尼兹之后的又一位百科全书式的学者. 他被同时代的天文学家赫歇尔誉为 "真正的具有原创性的天才", 他也被赞美为 "最后一个懂得任何事情的人 [1]". 按中国的古语来评价，杨可谓是一位天文地理无所不晓，古今中外无所不知，琴棋书画无一不精的举世奇才.

杨对于力学的发展做出了突出的贡献，但他获得的许多成果并未引起同时代学者的足够重视，因为他的很多论文写得过于简略和欠清楚，并且他不擅长于讲课，"在传授知识这方面来说，他是我所熟悉的人中最不行的一个 ······, 作为皇家学院的一位讲学者，杨是失败的；他的传授方法太简单，他似乎不能料想到他的课程中哪些部分是最使人发生困惑的 [2]". 诺贝尔奖得主瑞雷勋爵评价说："杨 ······, 由于种种原因没有得到和他同时代人的重视. 其实在他过去已经达到的学术成就中，有好些方面都是他的继承者花了很多精力才重新达到的 [3]". 具体来说，杨在力学上的贡献主要有以下几方面：

1 材料力学

1727 年，欧拉提出了类似弹性模量的 "模高"w 和 "模重"h 的概念 [4], 定义分别为

$$w = EA \tag{1}$$

$$h = \frac{E}{\rho g} \tag{2}$$

其中 E 为材料的弹性模量， A 为杆件的横截面积， ρ 为材料密度，g 为重力加速度. 80 年之后，杨在其专著《自然哲学与机械技术教程》中提出："任一材料的弹性模量，是同一材料构成的一个柱体，在柱体底部能够产生一定的压力，该压力与引起柱体某一压缩度的重量之比，等于柱体长度与其缩短量之比". 可见，杨提出的弹性模量的概念类似于欧拉提出的 "模重". 但若将杨所说的 "柱体" 理解为 "单位底面积柱体的重量", 则他的论述就是现在的弹性模量定义，故而弹性模量又被称为 "杨氏模量"[4-5].

现在通常意义上的杨氏模量为单向拉伸材料在弹性极限范围内 (注：杨也曾指出胡克定律只能在一定范围内成立), 其应力与应变的比值，是表征材料性质的一个基本力学量，与材料的几何构型无关. 而工程中对于满足胡克定律的材料往往存在另外一个参数，即弹性系数，其值等于材料受力与其变形量之间的比值，该值与材料的性质和几何构型均有联系. 由此可见，用杨氏模量来表征材料的性质更加方便，而杨氏模量也已成为材料力学、弹性力学以及工程设计中的基本力学参量.

针对杆件的单向拉压试验，杨提出杆件在发生纵向变形时必然产生横向尺寸的改变的理论. 在此基础上泊松提出了 "泊松比", 即横向变形与纵向变形之比，也是材料力学中的另外一个重要力学量. 同时杨还研究了晶体的弹性和断裂问

2010–01–25 收到第 1 稿， 2011–01–27 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金 (10802099), 教育部博士点基金 (200804251520), 山东省自然科学基金 (ZR2009AQ006) 和武汉市学科带头人计划 (201051730545) 资助项目.

2) 刘建林，男， 1977 年生，博士，副教授，主要从事软物质、固体仿生力学的研究. E-mail: liujianlin@upc.edu.cn

题，这些思想诱发了后人对于晶面滑移、加工硬化以及位错的理解 [6].

杨研究了圆轴扭转，他认为圆轴扭转时，所施加的转矩与横截面上剪应力所构成的扭矩平衡；任一点处剪应力的大小与该点到圆心的距离成正比，与扭转角也成正比．这些结论现已成为材料力学“圆轴扭转”一章中的经典内容．此外，杨还指出，由于扭转，杆的纵向纤维变为螺旋形，外部纤维受拉、内部纤维受压，其后果是圆轴相应缩短，并受到一个附加扭矩．在实际工程中，例如对于橡胶等软材料，这个扭矩的影响确实需要考虑．

对于柱的偏心拉压问题，杨认为实验中柱体往往会发生不规则的弯曲变形，是因为作用力没有恰好位于轴线上，另外有些实验本身采用了不均匀的材料，例如纤维方向原来就是弯曲的．对于图 1 所示矩形截面杆的偏心拉伸，杨确定出了中性轴的位置，即中性轴离截面形心的距离为

$$a = \frac{h^2}{12e} \tag{3}$$

其中 e 为偏心距， h 为矩形截面的高．他还正确推导出了杆件小挠度弯曲时圆弧的半径．对于本来存在微弯的等截面杆柱，他求出了承受压力 P 之后中点的挠度值．

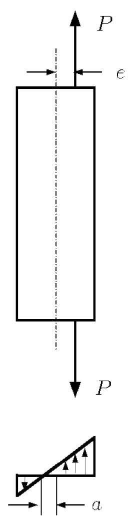

图 1　矩形截面柱的偏心拉伸，其中偏心距为 e, 矩形截面宽度 b 高度 h, 承受外载 P, 中性轴离形心距离 a

对于下端固定的柱发生偏心压缩时，杨得到了其挠曲线方程

$$y = \frac{e(1-\cos\omega x)}{\cos\omega l} \tag{4}$$

其中， l 为柱长， $\omega = \sqrt{P/(EI)}$, I 为截面惯性矩．

杨也研究了变截面柱的侧向压屈，求出了柱受压弯成一个圆弧形状时其截面宽度的变化规律．同时他探讨了两个三角柱体组成的柱子的压曲，并得到了其挠曲线．

对于矩形梁的强度与刚度，杨发现当梁的截面高度与其宽度成 $\sqrt{3}$ 的比例时刚度最大，而当高度与宽度成 $\sqrt{2}$ 的比例时强度最大；但“最富于弹力的则是其高度与宽度相等的梁”．对于薄圆管，他认为：“假设将一根管壁非常薄的管子扩大其直径，但长度不变，材料用量亦相同，则其强度将按直径比例增加，刚度则按直径平方的比例增加，但弹力将不改变”．这些结论都与后来的计算结果吻合得很好．

杨还致力于将其力学理论用于工程实践，他曾向海军部门提出过关于在船舶龙骨间使用斜肋以及其他改进船舶建造的报告．他赞成在木船建造中采用对角联条 [7]．他将船壳看作一根梁，假设一定的重量分布以及一定的水波形状来计算某些截面上剪力和弯矩的大小．他也指出了计算船的挠度的方法．这些成果是首次将力学理论应用于船舶结构设计方面，成为运用理论解决工程实际问题的典范，已经实现了后代力学家所倡导的“技术科学”的理念 [8].

2　冲击动力学

杨是冲击动力学的奠基人之一，他给出了满足胡克定律的材料断裂前的冲击应力计算方法，从动能的角度考虑了弹性体的冲击问题．他认为准静态地将质量为 m 的物体放置在弹性体上，当弹性体变形为 H 时发生破坏，则此重物从 $H/2$ 高度落下，或者 $m/100$ 的重物从 $50H$ 高度落下将同样会使该弹性体破坏．当棱柱杆承受纵向冲击时，杆的回弹力与其长度成正比．同时他也发现存在一个极限，即一物体冲击另一物体时，无论第一物体的整个体积如何小，在未克服第二物体的回弹力并将它破坏时，其速度是不可能增加的．

对于一根矩形梁遭受冲击，冲击体在梁上所作用的最大力与冲击点处的挠度公式为

$$P = \left(k_1\frac{bh^2}{l}\right)^2 \tag{5}$$

$$\delta = k_2\frac{Pl^3}{bh^3} \tag{6}$$

其中， b 为矩形的宽度．则弹性体的应变能可为

$$U = \frac{1}{2}P\delta = \frac{1}{2}k_1k_2bhl \tag{7}$$

根据这些计算，杨认为梁内由一次打击所产生的已知最大弯曲应力所累积的能量与其体积成正比．

3　能量

杨是第一个定义了现代意义上“能量”概念的人．在杨之前，学术界对力、动量和动能的概念区分不清．牛顿认为动量应该定义为质量与速度平方之积，即 mv^2．笛卡尔提出了正确的“动量”概念，即 mv．惠更斯与莱布尼茨认为笛卡尔的动量是一种“死力”，他们认为 mv^2 为“活力”．1801 年，杨在英国皇家学院演讲时，首次提出用“能量”的概念来代替“活力”．尽管这儿的能量仅仅指的是动能，但已经是正确力学概念上的一次飞跃了．此后，在朗金、开尔文、迈尔、焦耳、亥姆霍兹等人的努力下，终于正式建立了能量转化与守恒定律 [7].

4 表面浸润力学

1804 年, 杨研究了光滑基底上液滴的接触角, 提出了著名的杨氏方程, 即液滴的接触角由接触线处的 3 个界面张力决定

$$\gamma_{\mathrm{SV}}-\gamma_{\mathrm{SL}}=\gamma\cos\theta_Y \tag{8}$$

其中, $\gamma_{\mathrm{SV}}, \gamma_{\mathrm{SL}}, \gamma$ 分别表示固 / 气、固 / 液和液 / 气界面的界面张力, θ_Y 为接触角, 也称为 "杨氏接触角"[9], 如图 2 所示. 60 年后, 杜布拉 (Dupré) 在接触角的基础上提出了粘附功的概念, 故而杨氏方程也称为 "杨 – 杜布拉方程". 在此基础上, Wenzel 于 1936 年、 Cassie 于 1944 年分别提出了描述粗糙基底上液滴接触角的模型, 从而奠定了表面仿生学的基础 [10-11].

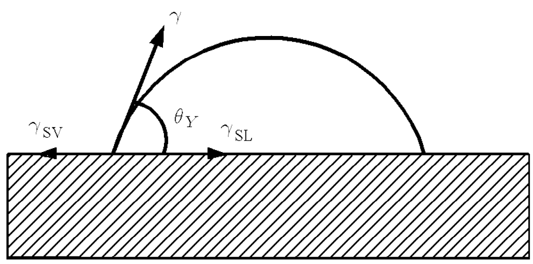

图 2 光滑基底上的液滴, 接触线处的角度为杨氏接触角

在表面浸润力学领域, 除了上述的杨氏方程外, 还有另外一个控制液滴形貌的拉普拉斯方程, 即液 / 气界面上任一点的内外压差 Δp 等于表面张力与该点处平均曲率的乘积, 用如下公式表示

$$\Delta p=\gamma\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right) \tag{9}$$

其中, R_1 和 R_2 为该点处的两个主曲率半径. 这个公式几乎同时被拉普拉斯和杨独立发现, 所以常被称为 "杨 - 拉普拉斯方程". 而类似的表达式在固体结构的微纳米尺度上也存在, 此时固体法向应力的间断值 $\Delta\sigma$ 等于表面应力 τ_0 与该点的平均曲率之乘积 [12]

$$\Delta\sigma=\tau_0\kappa \tag{10}$$

同时, 对杨 – 拉普拉斯方程进行坐标变换, 笔者也发现了受该方程控制的液桥与悬臂梁发生大变形时具有相似性 [13].

杨氏接触角和杨 – 拉普拉斯方程开创了表面浸润科学研究的先河, 该领域被诺贝尔奖得主德让那 (de Gennes) 称为 "软物质", 目前已在石油、冶金、材料、农药喷洒、化工、化妆品研发、人体器官等领域得到了广泛应用. 杨 - 拉普拉斯方程已经成为工程中测量表面张力的重要依据. 最近, 德国科学家巴泽洛特 (Barthlott) 提出了 "莲花效应"[14], 利用接触角的概念解释了荷叶表面的超疏水特性, 并据此研发了很多超疏水材料. 目前运用杨氏方程进行表面仿生的工作正方兴未艾, 如火如荼.

5 结 论

总之, 托马斯 – 杨在力学上的贡献是巨大的, 他的研究领域甚为广泛, 从固体到流体, 从静态到动态都有所涉猎, 他甚至是冲击动力学和表面浸润力学的奠基人之一, 也是材料力学领域成果颇丰的学者. 杨是一个专注于研究自然哲学的人, 他的出发点就是为了探究自然界的本质, 他的研究动机源自于对自然界规律的兴趣和好奇心. 他在表面浸润力学方面的奠基性成果引发了当今科学研究的热点, 包括微纳米仿生、微流体器件、微机电系统等. 他在材料力学和冲击动力学、血液流动力学方面的贡献已经在工程中得到了广泛引用. 他致力于将其高深的理论与实验结合, 同时也将理论用来解决工程实际问题. 从工程实际中提炼力学模型, 进行分析, 进而上升到理论高度, 反过来指导工程实践, 这本身就是杨解决问题的思路, 同时也是后辈力学家所提倡的哥廷根学派 "工程科学" 的内涵所在.

参 考 文 献

1 Robinson A. The Last Man Who Knows Everything. Life of Thomas Young. Oxford: Oneworld, 2006

2 Peacock G. Life of Thomas Young. London: John Murray, Albermarle St, 1855

3 铁摩辛柯著, 常振楫译. 材料力学史. 上海: 上海科学技术出版社, 1961

4 老亮. 中国古代材料力学史. 湖南: 国防科技大学出版社, 1991

5 武际可. 力学史. 重庆: 重庆出版社, 2000

6 Hondros ED. Dr. Thomas Young: Natural philosopher. *J Mater Sci*, 2005, 40: 2119-2123

7 Young T. A Course of Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts. London: Printed for J Johnson, 1807

8 郑哲敏. 学习钱学森先生技术科学思想的体会. 力学进展, 2001, 31(4): 484-488

9 Young T. An essay on the cohesion of fluids. *Phil Trans R Soc Lond*, 1805, 95: 65-87

10 Gurtin ME, Murdoch AI. A continuum theory of elastic material surfaces. *Arch Ration Mech Anal*, 1975, 57: 291-323

11 Liu JL. Analogies between a meniscus and a cantilever. *Chin Phys Lett*, 2009, 26: 116803

12 Wenzel RN. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Indu Eng Chem*, 1936, 28: 988-994

13 Cassie, ABD, Baxter S. Wettability of porous surfaces. *Fara Soc*, 1944, 40: 546-551

14 Neinhuis C, Barthlott W. Characterization and distribution of water-repellent self-cleaning plant surfaces. *Ann Bot*, 1997, 79: 667-677