

·科技纵横·

# 心脏支架、折纸艺术与超材料设计

泊松比 (Poisson's ratio) 是力学中的一个概念, 它的定义是材料受到纵向压力 (或拉力) 的时候, 在弹性范围内它的横向变形量与纵向变形量的比值, 泊松比也叫横向变形系数。人们在日常生活中所见到的大部分材料的泊松比都在 0~0.5 之间, 例如: 空气的泊松比为 0, 铝的泊松比为 0.33, 水的泊松比为 0.5。传统材料受到外力挤压的时候, 在压力作用的方向会收缩, 而同时在垂直于压力的方向会发生膨胀。而负泊松比材料则正好相反, 当负泊松比材料受到外界压力的时候, 其同时会在平行与垂直于外力的方向发生收缩。负泊松比材料在军事、航天航空、汽车、船舶、医疗、体育用品等各个行业有着广泛用途。负泊松比特性很大程度上是由其微观几何结构所决定。所以可以通过设计其微观结构来获得所需的材料特性, 这也催生了一个新兴的研究领域——超材料设计 (metamaterial design)。心脏支架就是一个几何、材料、机械和医学等多个学科结合的例子。

心脏支架 (图 1), 又称冠状动脉支架, 是一种常见的手术器材。从功能上分析, 动脉支架具有收缩和膨胀两种状态, 收缩的时候体积应该尽量的小, 从而可以顺利通过动脉血管。用传统材料制成的动脉支架在圆周径向收缩时, 会在圆柱的纵向拉伸, 即具有正泊松比。但是在动脉支架的应用中, 人们希望找到一种理想材料, 当径向压缩支架时, 其纵向长度也收缩, 即具有负泊松比的材料。这样, 手术风险会被降低。

自然界中所有的材料都具有正泊松比, 负泊松比材料只能被人工制造出

来。负泊松比的弹性形变特性是由材料微观结构的几何模式决定的。图 2 显示了具有负泊松比的动脉支架, 它是最近被发明出来的新型支架。整体上, 在收缩状态, 材料比较致密, 体积较小; 而在膨胀时, 材料是各项同性的, 向各个方向均匀扩张。

负泊松比材料的微观结构具有高度的对称性。历史上最早的负泊松比材料来自于折纸艺术, 折纸激发出许多负泊松比材料设计的灵感。古典的折纸艺术不允许使用剪刀、浆糊, 只能沿着折痕折叠, 如图 3 所示的魔球。

当魔球形变时, 纸上任意两点之间 (在纸面上) 的最短路径保持不变, 任意两点间的测地距离也不改变。这种形变被称为是等距形变 (isometric deformation)。当表面发生等距形变时, 内部体的形状也发生改变, 这种曲面被称为是柔性曲面 (flexible surface)。

普通的纸张材质比较刚硬, 容易折成四面体、六面体这样的刚性曲面, 很难构成自由曲面。但是, 一旦折叠成自由曲面之后, 整体柔性增加了很多, 可以用于形变成各种形状。

一个封闭曲面, 如何判定它是否具有刚性, 是一个古老的几何命题。这个问题的一种解决思路与广义相对论有关。在广义相对论中, 爱因斯坦度量描绘了时空的几何。

给定一个多面体曲面, 可以用数学的方法来判定它是刚性还是柔性的。如图 4 所示, 左侧多面体是刚性的, 右侧是柔性的。首先, 需将多面体曲面的内部进行三角剖分, 得到一个四面体网格 (有时, 需在多面体内部加入顶点才能



图2 具有负泊松比的心脏支架



图3 折出的魔球

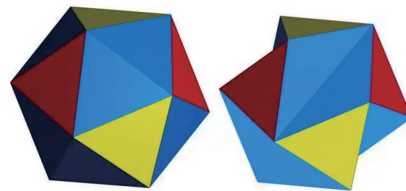


图4 刚性多面体(左)和柔性多面体(右)

得到三角剖分)。然后, 结合 Schläfli 定理计算希尔伯特-爱因斯坦能量的海森矩阵 (Hessian Matrix), 如果零空间的维数等于内顶点个数的 3 倍, 那么多面体具有刚性; 否则, 多面体具有柔性。海森矩阵零空间的维数反应了 origami 的柔性维度。

柔性几何为超材料设计提供了理论依据。目前, 人们对于柔性几何的研究才刚刚开始, 无论在理论上, 还是在实际中都有很多尚未解决的问题, 也是非常具有潜力的方向。在这里, 人们又一次看到自然真理的普遍联系: 古老的折纸和广义相对论出乎意料地紧密结合。人们期待着机械力学、材料科学和现代几何的一场深刻合作。

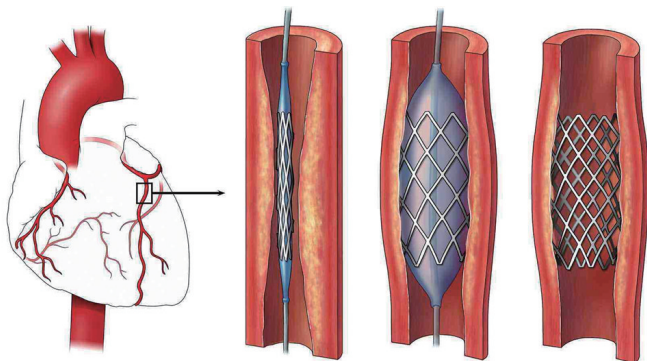


图1 动脉支架收缩前后示意图 (图片来源: 搜狐网)

### 文/陈仕魁, 顾险峰

**作者简介** 1. 纽约州立大学石溪分校机械工程系助理教授; 2. 纽约州立大学石溪分校计算机系终身教授, 清华大学丘成桐数学科学中心访问教授。

(责任编辑 王丽娜)