

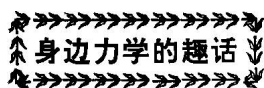
暖,乃至我在太原的父母生前也得到他无微不至的照顾;后来我们又有了对力学史的共同兴趣,多年来他积极参加力学史与方法论的学术会议,并且在这方面做得很投入.还指导过若干篇这方面的学位论文.

对于杨桂通教授的离去,我是很悲痛的,为此做了一副挽联,以表对杨兄的怀念,挽联是:

工大灵魂,惠泽千秋,同仁奋发承遗志;  
学界泰斗,桃李天下,弟子情深痛失君.

我想,这幅挽联大致能够概括他一生的成就.有许多好的同事和学生,继承他的未竟之业,他可以解除在人间的疾病痛苦放心去乐土了.安息吧,桂通兄.

(责任编辑:胡漫)



## 贝壳 IV: 冰模仿生

蒋持平<sup>1)</sup> 柴慧

(北京航空航天大学固体力学研究所,北京 100191)

**摘要** 从古战场的用“冰”如神,到文学艺术中的冰花雪韵,再到科学家手中的冰棱魔模,冰雪赋予各行各业的人以创造灵感.科学家利用水结冰时的杂质偏析现象,让冰棱在三氧化二铝陶瓷悬浮液中定向生长,形成复杂奇妙的冰棱模,析出层状多孔陶瓷,蒸发去水并注入聚合物,再压实,烧结,获得具有矿物桥的层合仿生陶瓷,韧性比组分材料高 300 多倍,模拟了贝壳珍珠母层的增韧机制.

**关键词** 冰模,矿物桥,仿生

**中图分类号:** O341 **文献标识码:** A

**doi:** 10.6052/1000-0879-16-009

本系列前 3 篇文章<sup>[1-3]</sup>介绍了人类如何逐步揭开贝壳具有超级力学性质的神秘面纱,其中贝壳珍珠母结构中文石晶片之薄(0.5 μm 厚)和晶片之间的矿物桥连接给仿生提出了挑战.

下面介绍贝壳仿生的一个重要成果——冰模仿生.特别有趣地,从古战场的用“冰”如神,到文学艺术中的冰花雪韵,再到科学家手中的冰棱魔模,我们看到冰雪赋予了各行各业的人以不同的创造灵感.

### 1 用“冰”如神

冰雪曾是战场的法宝.例如在第一次世界大战,意大利和奥地利在阿尔卑斯山的特罗尔地区交

战,双方经常用大炮轰击积雪的山坡,制造人工雪崩来杀伤敌人,死于雪崩的人数不少于 40 000.

我国古战场则提供了许多更有趣的用“冰”如神的范例.翻到古典名著《三国演义》第五十九回:

“话说曹操与马超大战于渭河.操拨三万军士取渭河沙土欲筑土城坚守.超差庞德、马岱各引五百马军,往来冲突;更兼沙土不实,筑起便倒.是时天气暴冷,彤云密布,操立不起营寨,心中忧惧.

忽人报曰:‘有一老人来见丞相,欲陈说方略.’操请入.见其人鹤骨松姿,形貌苍古.问之,乃京兆人也,隐居终南山,姓娄,名子伯,道号梦梅居士.操以客礼待之.子伯曰:‘丞相欲跨渭安营久矣,今何不乘时筑之?’操曰:‘沙土之地,筑垒不成.隐士有何良策赐教?’子伯曰:‘丞相用兵如神,岂不知天时乎?连日阴云布合,朔风一起,必大冻矣.风起之后,驱兵士运土泼水,比及天明,土城已就.’操大悟,厚赏子伯.子伯不受而去.

是夜北风大作.操尽驱兵士担土泼水,比及天明,沙水冻紧,土城已筑完.细作报知马超.超领兵观之,大惊,疑有神助.”

梦梅居士一个“用冰”的简单方略胜过数万雄兵,让神勇马超不得不叹服敌手的智慧更神妙.

本文于 2016-01-11 收到.

1) E-mail: jiangchiping@buaa.edu.cn

**引用格式:** 蒋持平,柴慧. 贝壳 IV: 冰模仿生. 力学与实践, 2016, 38(1): 97-100

Jiang Chiping, Chai Hui. Seashell IV: Ice-templated simulation. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(1): 97-100

战场用“冰”如神，神则神矣，然而“一将功成万骨枯”，杀戮气太重。但愿残酷的战争永远远离人类，永远封存在希腊神话的潘多拉盒内或禁闭在《水浒传》的伏魔殿，至多在舞台银幕或游戏机虚拟留存。

### 2 冰花雪韵

如果没有冰花雪韵，人类的文学艺术一定逊色不少。见图 1，雪花晶莹剔透，周期对称，却又灵动变化，确是大自然送给人类的神奇礼物。李白一句“欲渡黄河冰塞川，将登太行雪满山”，让壮志难酬的郁闷与豪气充溢冰雪宇宙。柳宗元一句“孤舟蓑笠翁，独钓寒江雪”，给广袤无垠、万籁俱寂的雪景配上遗世独立、峻洁孤高的心灵绝唱。当然飞雪冰花在更多的时候被视作春的使者、鲜花的化身或伴侣：

忽如一夜春风来，千树万树梨花开。

——岑参《白雪歌送武判官归京》

柳翠含烟叶，梅芳带雪花。

——高正臣《晦日置酒林亭》

红花初绽雪花繁，重叠高低满小园。

——温庭筠《杏花》

冰花和鲜花，将冰清玉洁与灿烂春光同时带给人类，让生活充满诗意。

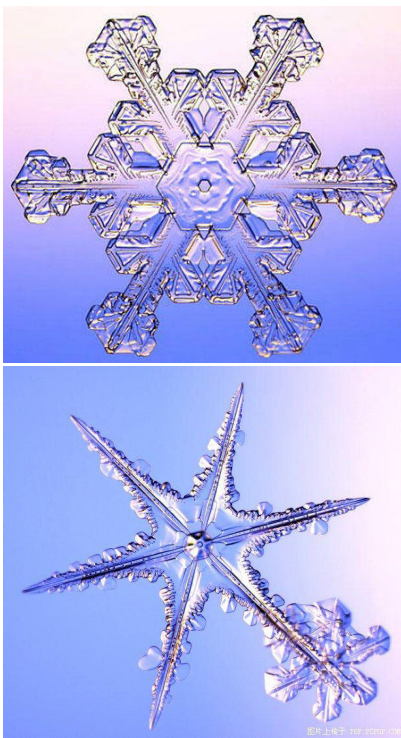


图 1 周期对称却又灵动变化的雪花

### 3 贝壳的冰模仿生

冰棱在科学家的手中又成了创造发明的魔杖。

利用水结冰时所含杂质的偏析现象可以净化工业废水<sup>[4]</sup>，有科学家灵光一闪，利用结冰时杂质的偏析现象，冷凝三氧化二铝陶瓷颗粒悬浮液浆，制造出了类似贝壳珍珠母层的结构。这种冷模铸造 (freeze casting) 仿生的方法见图 2，在事先设计好的地方引入结晶核使冰棱像手指一样沿着一个方向生长出冰晶层<sup>[5]</sup>。

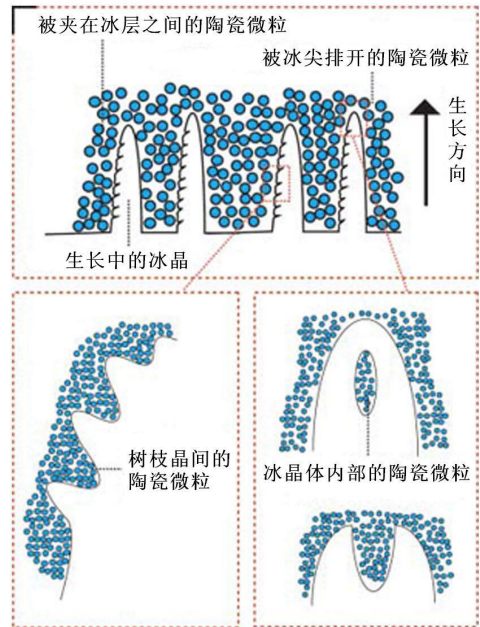
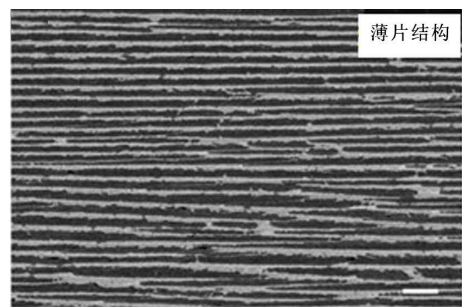


图 2 冷模铸造 (freeze casting)

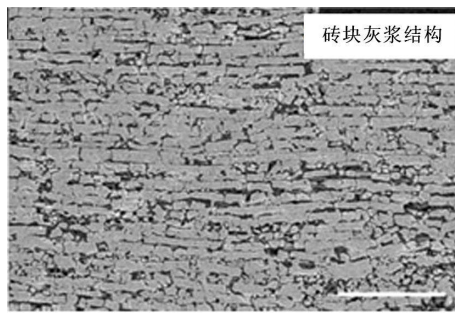
冰晶生长过程中，会将大部分的陶瓷颗粒排开，使之在层状冰晶之间形成层状多孔陶瓷，然后由蒸发去除水分，注入聚合物。见图 3(a)，光亮层是陶瓷层，暗层是聚合物<sup>[6]</sup>。

这样制造的陶瓷层板的陶瓷相体积分数还太低，于是科学家在垂直于层的方向加压使之致密，然后烧结，形成如贝壳珍珠母层的砖块-灰浆结构，见图 3(b)。此时陶瓷相的体积含量可达 80%。

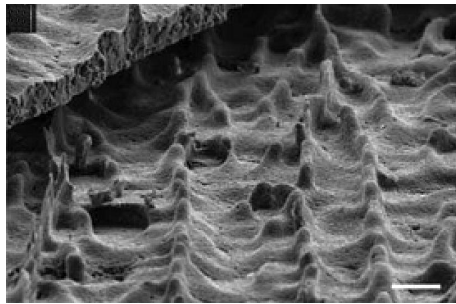


(a) 冰模铸造的陶瓷层 (亮层) 和灌注的聚合物层 (暗层)

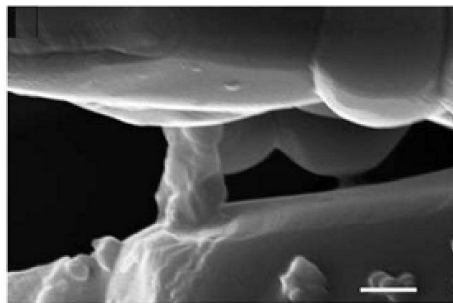
图 3



(b) 垂直于层的方向压实后烧结成的砖块-灰浆结构



(c) 悬浮液中加入蔗糖使陶瓷表面改性, 出现连绵微型丘陵



(d) 烧结后出现仿生矿物桥

图 3(续)

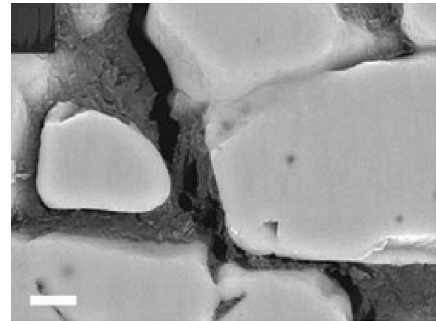
还有一个难题, 就是如何模拟贝壳珍珠母层中文石晶片的发育成熟和未发育成熟的矿物桥. 科学家在悬浮液中加入蔗糖, 将陶瓷层片的表面改性, 见图 3(c), 陶瓷层片表面出现了连绵起伏的微型丘陵, 较为成功地模拟了贝壳文石晶片的表面. 经烧结, 陶瓷层片某些表面突起被烧结连接, 形成了仿生矿物桥, 见图 3(d).

#### 4 增韧效果

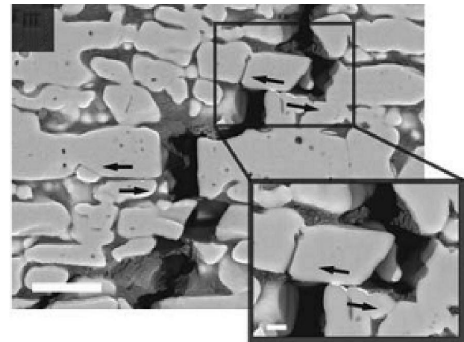
实验表明, 冰模仿生陶瓷复合材料的韧性比其组分材料的韧性提高了 300 倍以上. 为了研究增韧机制, 科学家进行了拉伸实验, 观察裂纹的萌生和扩展过程.

图 4(a) 显示, 与天然贝壳一样, 冰模仿生陶瓷复合材料的裂纹也是沿粘结层萌生和扩展, 传播途

径呈之字形, 增加了能耗. 图 4(b) 显示, 仿生陶瓷复合材料的失效形式不是像工程陶瓷一样直线解理断裂, 主要是陶瓷片黏滑拔出, 同时, 裂纹的萌生和扩展呈弥散状而不是局部集中, 复制了贝壳的增韧机制 [3].



(a) 裂纹沿粘结层之字形传播



(b) 陶瓷片黏滑拔出

图 4 冰模仿生陶瓷复合材料的断裂

传统方法仿生的陶瓷层片的厚度要比贝壳的文石晶片至少厚两个数量级, 利用冰模仿生缩小到了一个数量级, 特别是冰模仿生模拟了矿物桥及其与粘结剂协同的增韧机制. 但是仿生陶瓷与贝壳的差距仍然是明显的, 不仅是仿生陶瓷层片的厚度仍大一个数量级, 还有成分的差距, 活体鲍鱼壳生物胶体积含量仅为 5% 左右, 生物陶瓷体积含量约为 95%, 而冰模仿生的陶瓷含量还只能达到 80% 左右.

有一句谚语: 在大海的沙滩上可以拾到各式各样的贝壳, 可是要索取珍珠, 必须潜入海洋的深处. 从认识贝壳的砖块-灰浆结构的增强机制, 到认识嵌套分级结构的裂纹多级偏转强韧化机制, 到认识矿物桥-有机胶蛋白质链的协同强韧化作用, 再到冰模仿生, 人类在不断刷新潜入无垠科学海洋的深度.

让我们为老科学家点赞, 他们的不懈探索使我们在神秘莫测大自然面前不再妄自菲薄. 让我们为

初登科学的蛟龙号潜水器的年轻朋友点赞,因为更为神奇美好的科学明天孕育于他们的出征宣言:

“我们出发了!”

### 参考文献

- 1 蒋持平. 贝壳 I: 科学与力学美. 力学与实践, 2015, 37(2): 270-272
- 2 蒋持平. 贝壳 II: 从神话到科学话结构分级嵌套. 力学与实践, 2015, 37(4): 547-549
- 3 蒋持平. 贝壳 III: 贯通尺度之桥. 力学与实践, 2015, 37(5): 656-658
- 4 Gay G, Azouni MA. Forced migration of nonsoluble and soluble metallic pollutants ahead of a liquid-solid interface during unidirectional freezing of dilute clayey suspensions. *Crystal Growth and Design*, 2002, 2(2): 135-140
- 5 Deville S, Saiz E, Nalla RK, et al. Freezing as a path to build complex composites. *Science*, 2006, 311: 515-518
- 6 Munch E, Launey ME, Alsem DH, et al. Tough, bio-inspired hybrid Materials. *Science*, 2008, 322: 1516-1520

(责任编辑: 胡漫)

## 从竹筒粽子说起 ——浅谈火箭回收相关的航天原理

马曙光<sup>1)</sup>

(清华大学航天航空学院, 北京 100084)

**摘要** 太空探索公司 (SpaceX) 成功回收“猎鹰 9 号”火箭第一级, 点燃了大众对于火箭回收的关注热情. 本文试图通过简单易懂的方式向大众介绍一些与火箭回收相关的航天原理, 利用竹筒粽子这一生活中常见的事物解释宇宙第一速度、多级火箭、软着陆等科学概念.

**关键词** 航天, 火箭回收, 竹筒粽子, 软着陆

**中图分类号:** V42 **文献标识码:** A

**doi:** 10.6052/1000-0879-16-007

北京时间 2015 年 12 月 22 日, 美国太空探索公司 (SpaceX) 的“猎鹰 9 号”火箭在佛罗里达州发射升空. 火箭一二级分离后, 载有通信卫星的二级火箭继续入轨, 而一级火箭则成功降落在了指定着陆区域. 此举创造了航天飞行的新历史, 这是人类历史上首次成功回收商业轨道火箭. 这次试验标志着人类在火箭回收领域取得巨大突破, 航天发射的费用可能会大幅降低, 廉价太空时代或许即将到来.

说起航天, 大家一定会觉得是“高大上”. 诚然, 航天涉及到人类社会最前沿的科学和最先进的

技术, 但这并不意味着航天就高深莫测、难以理解. 航天探索体现了人类对于未知的好奇, 作为生活在 21 世纪的人, 我们应当对航天有一些基本的了解和认识<sup>[1]</sup>.

航天中一些基本原理其实并不难. 就以这次火箭回收为例, 我们完全可以把它想象成在吃完竹筒粽子之后把竹筒回收利用. 大家都知道, 如果我们在买到竹筒粽子之后直接把竹筒扔掉, 而不是收集起来再次利用, 那粽子的价格一定会高好几倍 (甚至很可能我们再也吃不起了). 对于火箭而言, 火箭第一级上的储液箱和发动机占了火箭制造成本的很大一部分, 如果能将这些东西成功回收利用, 将大幅降低制造火箭的费用.

当然, 回收火箭肯定不像回收竹筒那么简单. 如果要想解释清楚火箭回收这件事, 我们需要从航天的原理说起. 假设我们朝远方扔粽子, 粽子在被扔出去后会下自然下落, 最后落到地面上, 这是因为粽子受到了地球重力的作用. 大家应该都有这样的体验, 我们扔出物体的初速度越大, 物体会落得越

本文于 2016-01-07 收到.

1) E-mail: thumsg@163.com

**引用格式:** 马曙光. 从竹筒粽子说起 —— 浅谈火箭回收相关的航天原理. 力学与实践, 2016, 38(1): 100-102

Ma Shuguang. Rice dumplings in bamboo tube and rocket recovery technology. *Mechanics in Engineering*, 2016, 38(1): 100-102