

2000℃高温不化,2万次重压不坏——神奇的气凝胶

发展新材料产业是加快形成新质生产力、增强发展新动能的重要途径,对推动传统产业升级、培育新兴产业具有重要意义。气凝胶作为一种新型的高分子材料,拥有低导热系数、低密度、低介电常数等多项优异特性,在航天航空、建筑、电子、新能源汽车电池等多个领域有着广泛且前景广阔的应用,是各个国家争相深入研究的对象。

■ 本报记者 王雨红 通讯员 查蒙 陈琿晔

浙江大学杭州国际科创中心一间实验室里,一个神奇的实验正在上演——

2000℃高温下,两块经过特殊处理的不锈钢上下反复挤压一块透明物体。2万次重压下,对抗着270千克左右压力的不到100毫克的物体,每次都能重新“支棱”起来,恢复到原来形状。

这块被“极限拉练”的物体叫气凝胶,是目前世界上最轻的材料之一,素有“凝固的烟”之称,还拥有耐高温、高弹、强吸附等特性。前不久,浙江大学求是特聘教授、博士生导师高超和团队把气凝胶的隔热能力和弹性再次提升。全新的制备方法,不仅打破气凝胶无法规模化应用等瓶颈,还将成本降至原来的十分之一。这种极端环境下的热防护技术,意味着我国新材料领域又一关键技术实现了突破,为全球深空探测、核能开发等重大工程提供关键材料支撑。

这一研究成果前不久在《科学》杂志发表。有国际专家评价,这是实现气凝胶大规模制备的创造性尝试,有助于促进气凝胶低导热复合材料的工业化应用。

看似弱不禁风的“身板”,为何能挺起产业发展“硬骨头”?研发团队又如何一次次突破极限?

寻根问祖,竟是果冻的“亲戚”

偌大的实验室里,10多台设备一字排开,分别负责对气凝胶的隔热、强度、柔性等不同性能进行“拉练”。

团队成员或坐在计算机前,紧盯着屏幕上的数据变化,或围在一块块形状各异的气凝胶前,探讨材料、结构等设计,力争在性能上有新突破。

见记者到来,高超转身从桌上拿起一块气凝胶递过来——长约2厘米、大小就像普通橡皮,放在手上几乎感受不到它的重量。

实验室墙上的一张照片更为直观。一块100立方厘米的圆柱形气凝胶“踩”在一根狗尾巴草上,狗尾巴草纤细的绒毛肉眼看不到变形。

“世界上最轻的固体材料之一,果然名不虚传。”记者不禁感慨,这究竟是怎么做到的?在电子显微镜下,其中的奥秘被揭晓:气凝胶内部,纳米级的骨架分割成无数个气孔,整体结构类似一张立体渔网。其中,气孔占总体积的99%以上,固体骨架部分不到1%。高超告诉记者:“它的密度仅是空气的八分之一。”

若要为这种神奇的材料寻根问祖,它应该是果冻的“亲戚”。

1931年,美国科学家基斯特勒在吃果冻时产生了好奇:果冻水分含量高达99.5%,怎么会是胶状的形态呢?

他猜想,或许是一种纳米微孔网络结构“困住”了这些水分。如果把水分抽走,会留下一个“空气做的果冻”。这种说法让他的同事感到荒谬。于是,他们打了个赌。

为了验证自己的想法,基斯特勒用二氧化硅凝胶来模拟果冻做实验。他采用一套超慢的“干燥术”——利用目前制备气凝胶常用的超临界干燥法,在高温高压环境下通过精准控制压力和温度,既能抽走其中的液体,又能避免材料在干燥过程中收缩变形。

一系列操作后,基斯特勒真的做出了世界上第一块“空气果冻”——也就是气凝胶。此后,他又用氧化铝、氧化钙、氧化铁等原料制备出多种气凝胶。

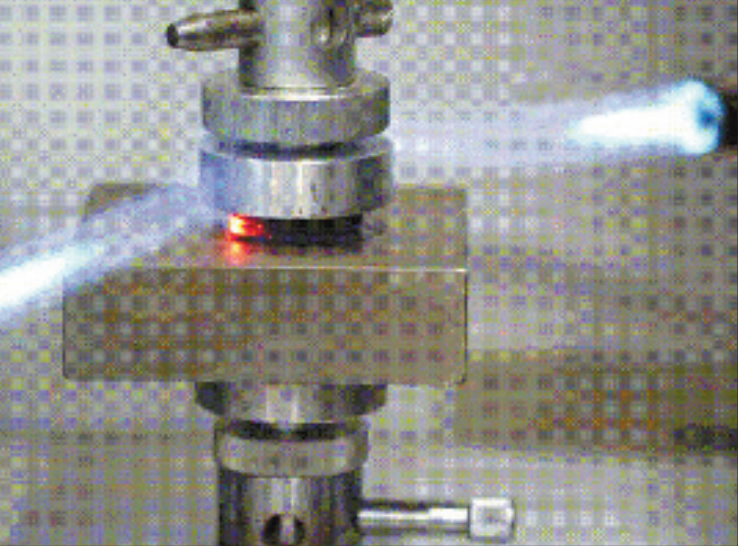
自那时起,气凝胶便开启了它的神奇之旅,吸引着一代又一代科学家对它持续探索。伴随每一次技术革新的,是不断减重且强度提升、耐用性提升的气凝胶。

除了轻,气凝胶的优势还有很多。它是隔热“王者”。热量传递靠传导、对流和辐射三种方式。气凝胶中几乎全是静止且传热“积极性”不高的空气,纳米骨架又如迷宫般复杂,热量“走”几步就晕头转向,无法“抄近路”。另外,通过添加特殊材料,气凝胶还能吸收辐射。

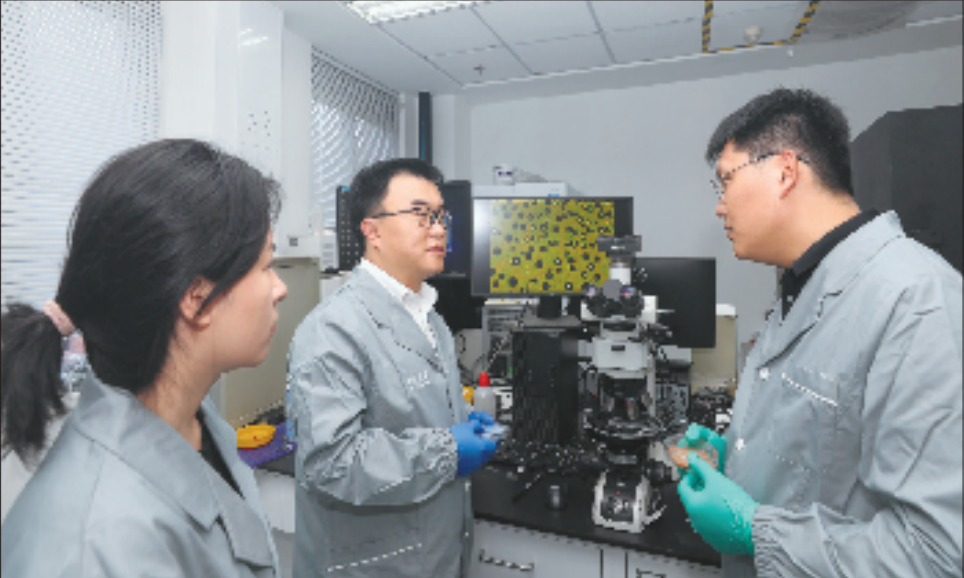
说它是清洁能手,主要得益于其多孔结



左图:不同金属氧化物制成的气凝胶颜色不同。图为高超和团队成员一同研发的数种气凝胶,压在一根狗尾巴草上。狗尾巴草的绒毛几乎不变形。



中图、右图:团队研发的气凝胶在2000℃高温、约270千克压力下做测试。



研发团队在实验室探讨优化方案。

构和极大的表面积。一块乒乓球大小的气凝胶,展开后表面积足足有一个足球场那么大。叠加本身只吸水不吸水特性,它就能像“大胃王”一样迅速“吃”掉水中的油污。

此外,气凝胶还有良好的绝缘性、阻燃性、隔音性等。种种优异性能让它在建筑、电子、化工等领域均可大放异彩,堪称材料界的“六边形战士”。

2021年,国际顶级权威学术杂志《科学》列出了可以改变世界的十种新材料,气凝胶占据首位。随后,国际纯粹与应用化学联合会又将其列入2022年度化学领域十大新兴技术。

用蒸馒头的方法降本增效

从刷新“世界最轻”纪录,到创新简便的制备方法,高超和团队探索了10余年。

高超打开手机,给记者看了一张照片:一块气凝胶放在蒲公英花朵上,花朵柔软的绒毛几乎没有变形。

这张入选了《自然》杂志2011年度十大图片的照片,来自美国HRL实验室、加州大学欧文分校和加州理工学院联合用镍制备的一种气凝胶。这种气凝胶便是当时世界上最轻的材料。

“能不能挑战这个极限?”彼时,高超在网上看到新闻后不禁思考起来。他长期专注石墨烯研究,决定从身边这种强度高、重量轻的“宝藏”材料着手。

制备更轻的气凝胶,材料很重要,过程更为关键。核心工艺就是“造孔”。传统的超临界干燥法虽能造出科学家想要的气孔,但需要依靠模具或添加剂。

2013年,高超带领团队探索出无模板冷冻干燥法,把溶解了石墨烯和碳纳米管的水溶液在低温真空中冻干,就能获得气凝胶。高超为其取名为“碳海绵”。它也随即打破“世界最轻材料”纪录。

什么是无模板冷冻干燥法?简单来说,就像把一杯糖水冻成冰块,糖分子会被挤到冰晶的缝隙里,在低温真空环境下,冰直接升华成气体,就变成了多孔结构,类似自然形成

的蜂窝。相比超临界干燥法,无模板冷冻干燥法的过程简便不少。

不过,随着研究的深入,团队成员不再一味追求“轻”。他们发现,自1931年世界上第一块气凝胶诞生至今,大部分气凝胶还未大规模批量化生产,商业化进程十分缓慢。

“归根结底还是制备工艺没有突破。”高超道出其中原因:不论是“魔法去水”的超临界干燥法,还是“低温抽冰”的无模板冷冻干燥法,都存在耗时长、能耗大、成本高等缺点。

能不能创造一种普适性的方法?有一回,团队成员庞凯拿着手机刷各种化学课堂的短视频,突然从“大象牙膏”小实验里找到了灵感。该实验中,双氧水和发泡剂在催化剂的作用下瞬间喷出大量泡沫,仿佛一管巨型牙膏。

“是不是找到合适的发泡剂,我们就能在石墨烯里‘造’出无数小气孔?”放下手机,庞凯越想越兴奋。

2018年,在尝试了几十种发泡剂后,他和同事成功探索出发泡法。这是个类似蒸馒头产生气孔的过程,在常温常压下就能进行,制备周期从原来的一周缩短至几十分钟。

不过,就像技艺再高超的厨师,每次蒸出的馒头也不可能完全相同,这种方法不太可控。

在此基础上,团队又反复实验,将发泡法改进为二维通道受限发泡。想象一下,你在一个非常狭窄的走廊里吹泡泡,走廊宽度只比泡泡大一点点,两侧的墙壁就会限制其形状。这种方法形成的气孔,排列会更加规则,孔径大小也更可控,成本可降至十分之一。

有了简便且通用的制备方法,大家开始拿着元素周期表“玩”了起来,一口气做了190多种类型的气凝胶。“从导电金属到绝缘陶瓷,从透明、黑白到彩色,我们的‘百宝箱’里都有。”高超略显自豪。

能像塑料一样改变世界吗

想让气凝胶在各个领域大显身手,还要让其在某些方面具备更突出的性能。意识到这一点,是在团队的一次投稿失败后——

当时,大家拿着最新研究成果向一家国际顶刊投稿,但从对方委婉的回复中,高超明白,光有简便的制备方法和丰富的种类或许还不够,研究得向更优的性能发起挑战。

那段时间,大家有空就翻阅国内外相关材料,光文献就查阅了上千篇。世界上已有的气凝胶及其性能都被一一罗列。最终,从市场需求和实用性出发,团队选择先对气凝胶的耐热和高弹性“下手”。

有了目标,高超和团队再次化身“大厨”,每天泡在实验室里调整配方,力争做出一道口味颜值兼具的“米其林三星级大餐”。他们发现,高熵气凝胶具备这样的潜力。

简单而言,高熵气凝胶由五种及以上原子级材料分散混合而成——就像一支由多个领域顶尖专家组成的“团队”,它当然比“单人或双人作战”能量更大、性能更全面。

为了测试气凝胶的超高温力学性能,团队花费近一年时间,自己搭建了一个可以实时观测的高温熔炉。熔炉内,两块不锈钢反复挤压,温度一点点加升,气凝胶被压坏或者熔化了就重新调整其气孔结构,如此循环往复。

终于,团队制备的高熵氧化物气凝胶、高熵碳化物烯陶气凝胶均能在2000℃高温、2万余次挤压、变形99%的情况下,依然能“毫发未伤”。公开资料显示,此前的相关记录为可耐受1700℃高温、60%左右变形。

“制备高熵气凝胶的方法不仅简单高效,也大大提升了气凝胶的性能,在智能电子、微型电容器及人工生物电化学系统等方面有着巨大的应用前景。”南开大学特聘教授、纳米科学与技术研究中心主任陈永胜说。

这项新成果也引得不少企业、研究院纷至沓来寻求合作。其实在此之前,尽管制备工艺限制,气凝胶却凭借优越特性,已在部分领域有所应用——

比如在航天探测领域,中国的“祝融号”火星车、俄罗斯的“和平号”空间站、美国的“火星探索者”探测器等,都采用了气凝胶作为隔热材料;高端服装企业研发出“黑科技”面料,利用气凝胶提升衣服保暖性;建筑行业则将其添加到墙体材料中,让室内温度保持相对稳定。

研制出高熵气凝胶后,高超和团队往返于实验室和市场一线,与航天飞行器、探测车、新能源汽车等相关制造企业进行商业化可行性探讨。

以新能源汽车为例,目前已有不少企业利用气凝胶作为电池组的隔热材料,其耐热温度约400℃。今年4月,工信部发布《电动汽车用动力蓄电池安全要求》,首次将动力电池热失控后“不起火不爆炸”纳入强制标准,被称为“史上最严电池安全令”。

能耐2000℃高温的气凝胶,或将为新能源汽车动力电池打开新的技术空间。“目前我们有1条生产线经过改造后,已开始小批量生产烯陶气凝胶隔热片,预计明年能投产使用。”浙江高焓热管理技术有限公司相关负责人赖海文说。

高超预计,若他们研发的气凝胶推广顺利,其产业规模可达数十亿元。未来,随着气凝胶的大规模产业化,也许它也能像塑料一样改变世界。

美好的愿愿下,团队步履不停,不断优化着气凝胶的性能。“争取耐热线突破3000℃。”他们继续向自己发起挑战。

链接

新材料锻造新未来

21世纪科技浪潮中,新材料作为战略性、基础性产业,正引领着全球新一轮的科技革命和产业变革。

从古代的自然材料、青铜、铁器,到今天的纳米材料、复合材料,每一次材料的革新都推动着人类社会文明的进步。尤其在几次工业革命阶段,材料对经济和社会发展的推动作用显著。钢铁材料成就的机械化生产、电磁材料催生的自动化生产,以及半导体材料引领的信息化生产,都是材料技术推动工业发展的生动例证。

根据国家出台的《新材料产业发展指南》,新材料主要包括先进基础材料、关键战略材料、前沿新材料三大类。先进基础材料包括高性能金属、特种塑料与橡胶、陶瓷、玻璃等;关键战略材料包括稀土功能材料、先进半导体材料、新型能源材料及新型显示材料等,是发展战略性新兴产业的最重要原材料;前沿新材料包括用于高端医疗器械的纳米材料、石墨烯材料等。

产业链方面,新材料的制造处于中游位置,上游涉及有色金属、化学纤维、树脂、陶瓷、石墨等原材料;下游应用领域涉及光伏、建材、航空航天、新能源汽车、电子电器、医疗器械等众多领域。

2010年10月,国务院作出关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定,将新材料列为重点培育和发展的7个战略性新兴产业之一。这是我国首次将新材料作为一个独立的产业,从国家战略角度进行重点扶持。

2024年,工业和信息化部等三部门还联合印发《新材料大数据中心总体建设方案》,计划到2027年,搭建形成“1+N”(1个中心主平台、N个数据资源节点)的新材料大数据中心架构体系;到2035年,新材料大数据中心体系全面建成并稳定运行,数据规模进入国际第一梯队。

新材料大数据中心是促进新材料产业创新发展的新型研发基础设施,旨在立足机制创新、协同创新、成果转化,构建新材料数据资源中心、数据产品研发中心、数据基础产品和定制化服务提供中心,主要功能为构建材料数据汇聚标准和融通平台、加强共性和前沿技术研究、开展材料数据软件产品开发应用、提供材料数据公益服务、加强材料基因领域创新人才队伍建设、推进材料数据和技术国际合作等。

近年来,虽然我国在新材料领域的创新能力快速提升,但与国际先进水平相比仍存在一定差距。此外,新材料产业的发展还受到环保、资源等方面的制约。如何在保证经济发展的同时,实现新材料产业的绿色、可持续发展,是国家新材料产业面临的重要课题。

(本报记者 王雨红 整理)

推荐阅读

《迷人的材料》

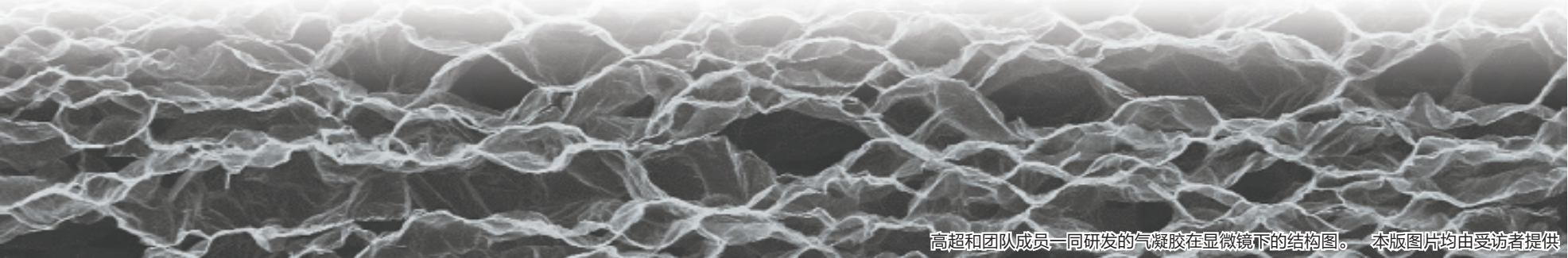
[英] 马克·米奥多尼克 著
赖盈满 译
北京联合出版公司

从茶杯、喷气发动机到家用电器、内裤,我们的生活充满了材料。但你想过没有,为什么玻璃是透明的?是什么让橡皮筋有弹性?为什么曲别针会弯曲?为什么不锈钢不生锈?水泥也能做成衣服?

世界上最薄却最坚硬的东西是什么?为什么某一种材料做成的东西会长那样?材料如何塑造了我们的世界又对我们的生活产生了怎样的影响?

该书是极富可读性、趣味性、知识性、人文性的材料科普读物,每一章都以一种材料为标题,一共介绍了钢、纸、玻璃、塑料等10种类型的材料。全书结合科学原理解析物质特性(如玻璃透光机制、不锈钢防锈原理),并追溯材料发明历程中的技术突破与文化关联(如混凝土对现代建筑的影响)。其曾获英国皇家学会科学图书奖。

该书作者为伦敦大学学院材料科学教授,并担任该校制成研究中心主任。他曾被《泰晤士报》评为2010年最具影响力的100位科学家之一,长期从事科普工作。制成研究中心则收藏多种特殊材料并与多家博物馆合作推出科普项目。



高超和团队成员一同研发的气凝胶在显微镜下的结构图。 本版图片均由受访者提供