



隔热防火，终可兼得
两材相遇，节能传奇

Aerogel insulating
glass unit

气凝胶节能玻璃

原来如此

耿平 主编

中国建材工业出版社

Aerogel insulating glass unit

气凝胶节能玻璃，原来如此

耿平 主编



中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

气凝胶节能玻璃, 原来如此 / 耿平主编. --北京:
中国建材工业出版社, 2017. 4
ISBN 978-7-5160-1811-8

I. ①气… II. ①耿… III. ①气凝胶—建筑玻璃
IV. ①TQ171. 72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 060397 号

内 容 简 介

本书讲述了气凝胶在隔热保温方面的独特优势, 以及它在各领域的应用, 同时介绍了气凝胶玻璃的节能效果。本书是玻璃行业第一本介绍气凝胶节能玻璃的图书, 旨在科普气凝胶知识, 推广气凝胶玻璃。

本书文风活泼, 通俗易懂, 可供从事气凝胶产品研发人员阅读, 也可为节能领域相关企业提供创新思路。

气凝胶节能玻璃, 原来如此

耿平 主编

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 710mm × 1000mm 1/16

印 张: 8.5

字 数: 82 千字

版 次: 2017 年 4 月第 1 版

印 次: 2017 年 4 月第 1 次

定 价: 68.80 元

本社网址: www.jcbs.com 微信公众号: [zgjcgyCBS](https://www.weixin.com/zgjcgyCBS)

本书如出现印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换。联系电话: (010) 88386906

早在19世纪30年代，气凝胶就被研制出来，并在航空领域大显身手，帮助人类探索外太空，是NASA用来捕捉“星尘”的功臣。气凝胶是已知的最轻的固体材料之一，密度仅为水的十分之一，特别是具有导热系数极低、耐高温、防爆等天然特性，在绝热保温、防火防爆、隔声降噪等方面极具禀赋，在航空航天、国防军工、绿色建筑、新能源、环境治理、太阳能热利用等领域有着广阔的应用前景，也因此引众多发达国家争相投入巨资进行研发。

很长一段时间，气凝胶价格持续高昂，无法形成量产，在隔热保温方面的“天分”远远没有发挥出来，也预示着气凝胶在节能领域的应用存在巨大机遇。国内众多产学研机构一直致力于气凝胶的研究开发，逐渐改变了气凝胶材料高不可攀的局面，使它成为本世纪最有前途的节能材料之一。可喜的是，依靠玻璃行业研究者的不懈努力，气凝胶在玻璃行业的应用取得进展，气凝胶玻璃以其优异的节能特性，必将在节能领域大放异彩。

气凝胶节能的时代脚步越来越近了。气凝胶节能材料的研发和应用，是我国节能领域取得突破性进展的动力。这种神奇的材料需要被大众认知，从而促使越来越多的人关注它、研究它、应用它，要让人们知道，气凝胶玻璃在建筑上的应用可以让我们的室内更舒适、更安静、更安全，从而大幅度节省能源消耗。

该书由玻璃行业专家耿平同志编写，介绍了气凝胶的天然特性以及在多个领域的应用，同时分析了气凝胶玻璃的性能优势，旨在科普气凝胶知识、推广气凝胶玻璃。和其他科技著作不同的是，该书没有过多的专业术语，没有繁杂的理论数据，内容有趣，文风活泼，通俗易懂，十分耐读，对气凝胶感兴趣的人，无论行业无论年龄，皆可一读。

气凝胶行业尚在发展阶段，在玻璃行业的应用才刚刚起步。本书出版的意义在于抛砖引玉、科普推广。特向行业同仁推荐，以期提供启发和参考、发现机遇。

中国建筑玻璃与工业玻璃协会 常务副会长

张作恒

若干年前，单位接到一笔气凝胶中空玻璃的订单。由于气凝胶玻璃的性能特别高，常规方法根本达不到要求，买国外的又贵又慢，也满足不了交货期的要求。单位研究决定自己研发气凝胶玻璃，通过努力，终于成功研制出了这个性能超高的新产品。当时气凝胶是很新奇的东西，不但能大大提升性能，而且能产生相当可观的附加值，后来气凝胶玻璃又申请了奖项，大家从中收益多多。从那时起，我就开始关注气凝胶的点点滴滴，并将资料收集起来，使之成为这本书的基本素材来源。这本书通过介绍气凝胶本身及其在多方面的应用实例，旨在引起大家对气凝胶的兴趣，进而激起大家想亲眼看看气凝胶、使用气凝胶这一新材料以改善自己现有产品的冲动。这本书不是气凝胶的专业书，更不是气凝胶的学术经典，只是一本介绍气凝胶的科普小册子，我尽力使这本小册子有趣、有味、有益。

气凝胶本身就是全世界高度关注的新奇材料，虽是固体，身轻似烟，貌似弱不禁风，实则防弹防爆，是被列入国家 863、973

计划，也是 NASA 关注研究的超级航天材料，从航天飞船、航空发动机到石油化工、登山被服都有它的身影。随着气凝胶行业自身发展壮大，其产量呈爆发式增长，成本大大降低，这为气凝胶进入玻璃行业打下了基础。

创新是行业发展的动力。建筑工程玻璃从最初的单片钢化、双白中空、单银 Low - E 中空发展到双银、三银多腔超级中空，在满足建筑采光的最基本要求外，附加了安全、装饰、保温、防晒等多种功能，特别是在节能特性方面实现了巨大的提升。在建筑玻璃的发展中，节能特性一直被关注，一直在提高，我国很多省市已经提升到四步节能了，但玻璃节能似乎也遇到了一个瓶颈，特别是传热保温性能用常规方法很难再大幅提升，与保温墙体比较，玻璃再一次成了节能的短板。行业呼唤新工艺新材料新方法新产品，提升玻璃性能。真空玻璃、气凝胶玻璃就是这样的新产品，特别是气凝胶玻璃因引入了气凝胶这一新材料，更是独特新奇，值得关注。

以往的气凝胶玻璃属于简单的组合整合，已经大大提升了保温性能，突破了间隔层厚度限制的上限，但同时粉末状的气凝胶颗粒也使玻璃失去了透视的特性。最新的技术能够使气凝胶玻璃具有几乎和普通中空玻璃一样的外观，采光又透视，人们完全能够透过气凝胶玻璃清晰地观察玻璃背后的景物！

气凝胶玻璃可以广泛地应用在采光顶、体育场馆、采光隔断等部位，赋予建筑独特的效果。希望 2022 北京冬奥会场馆能用上

更多的气凝胶玻璃，给大家更多美好的新奇体验。

最后，对中国建筑玻璃与工业玻璃协会、上海同济大学沈军教授和倪星元高工、中南大学的卢斌教授、南京玻纤研究院崔军主任、贵州航天乌江机电设备有限公司宋大为部长和韦中举先生、浙江纳诺姚献东总工对本书提供的支持和帮助，对中国建材工业出版社副总编辑佟令玫以及材料工程编辑部王天恒、杨娜、李春荣、张巍巍几位编辑的辛苦付出，在此一并表示衷心的感谢！

耿 平

2017年3月

1	气凝胶的天赋异禀	001
1.1	上天揽彗尾	002
1.1.1	我们所了解的彗星	003
1.1.2	“星尘计划”	006
1.1.3	气凝胶样品采集器	007
1.2	落地隔热王	011
1.2.1	保温材料在不同形态时的导热系数	012
1.2.2	气凝胶的保温性能	018
1.3	登山轻似羽	023
1.3.1	气凝胶用于保暖的卓越潜力	025
1.3.2	气凝胶的顶级保温应用	027
1.4	如烟进百家	030
1.4.1	气凝胶在建筑节能领域的应用形式与效果	030
1.4.2	气凝胶在建筑中的应用	032

1.5	像雾又似雪	039
1.5.1	气凝胶中空玻璃特点及优势	039
1.5.2	气凝胶中空玻璃研发要点	041

2 气凝胶的前世今生 047

2.1	气凝胶的发展历程	048
2.1.1	气凝胶的发现故事	050
2.1.2	气凝胶的未来设想	052
2.2	气凝胶的分类及物理结构	054
2.2.1	气凝胶的分类	054
2.2.2	气凝胶的物理结构	059
2.3	气凝胶的生产工艺和研发成果	061
2.3.1	气凝胶的生产工艺	062
2.3.2	气凝胶的研发成果	068
2.4	气凝胶的市场分析	070
2.4.1	气凝胶国内外市场情况	071
2.4.2	气凝胶产业要事	073
2.5	气凝胶的应用	075
2.5.1	气凝胶特殊性质的应用	075
2.5.2	气凝胶在工业领域的研究应用	078
2.5.3	气凝胶的前沿应用	084
2.6	透明透视气凝胶玻璃	087

2.6.1	大尺寸气凝胶的制备流程	089
2.6.2	干燥成型对制备大尺寸气凝胶的影响	090
2.6.3	胶体老化对气凝胶玻璃透明度的影响	090

3 气凝胶的美好未来 093

3.1	气凝胶的发展方向	094
3.1.1	气凝胶应用的探索历程	094
3.1.2	气凝胶制备技术及发展	097
3.2	弹性气凝胶研究	104
3.2.1	弹性气凝胶的制备	105
3.2.2	弹性气凝胶的力学性能	109
3.2.3	弹性气凝胶的热学性能	113
3.2.4	研究结论	115
3.3	气凝胶节能玻璃应用设想	116
3.3.1	北欧观景玻璃屋	116
3.3.2	场馆用气凝胶节能玻璃幕墙	119
	参考文献	122



Aerogel insulating glass unit

1 气凝胶的天赋
异禀

1.1 上天揽彗尾

浩瀚太空中，有亿万星辰，
苍茫星空里，古老神奇的是彗星，
无论稚幼的孩童，还是耄耋的老翁，
对彗星总有着丝丝好奇，
甚至想探求彗星的奥秘……

其实，不光你我，就连美国航空航天局（英文缩写 NASA）也同样有着这样的好奇。他们大胆地发射了彗星探测器，想捉回来看看，它到底是一种什么样的东西，竟能如此神奇。

话说 1999 年 2 月 9 日，NASA 发射升空了一枚太空探测器——“星尘号”，探测器经过 46 亿公里的太空大旅行，飞行了 7 年，于 2006 年 1 月 15 日成功返回地球。可是有谁会想到，NASA 耗费 1.68 亿美元巨资，发射“星尘号”行星间探测器，最主要目的竟是探测维尔特二号彗星和它的彗发物质的组成成分，

要把彗星捉回来开开眼，好好研究一番。这究竟是为了什么？仅仅是为了好奇么？这其中究竟包含了什么样的奇异故事呢？

如果说宇宙是起源于一次超级大爆炸，那爆炸后的宇宙是怎样一步步发展成现在的宇宙的呢？NASA 科学家相信有些彗星的粒子事实上比太阳和行星还要古老，它们形成其他星球，我们称之为“星尘”，把星尘带回地球是检验宇宙唯一的方式。原来，NASA 捉回彗星尘埃，目的是要探索宇宙起源。那么为什么会选择彗星？如何设计最关键的捉星之手？用什么手段、靠什么材料才能完好地收集到原汁原味的星尘？这一连串的故事更是引人入胜，其中最精彩的部分正是这种神奇的材料——气凝胶。下面就一一道来。



图 1.1.1 彗头

1.1.1 我们所了解的彗星

彗星在夜晚极易看到，因其后面拖着长长的大尾巴形似扫帚而很好发现和辨认。1910 年 4 月，哈雷彗星在 2300 万 km 远的地方掠过地球时，夜空极为明亮耀眼，所有人都能清晰地看到华丽回归的哈雷彗星。在古代，彗星出现时，人们会忧心忡忡，担心上天会降下什么灾难惩戒世间的人们。但实际上，彗星本身和行星、小行星、尘埃一样，都是太阳系中的一类天体，各自运行在自己的轨道上周流不停，彗星的出现如同日升月落一样平凡普通，

只是恰好被地球人看到了而已，和福祸没有半点关联。不安的人们还真是多虑了，可谓庸人空惧彗，杞人徒忧天。

天文学证实，彗星由彗头、彗尾组成，其尺寸非常巨大。彗星最前端的大圆头叫做彗头，彗头的直径可以达到几十万千米，而太阳系八大行星中最大的木星直径约为14万千米。人们所看到的彗星，其实是被太阳加热了的彗头中直径仅有几千米固体部分（彗核）释放出的密度极低的气体而已。在大多数情况下，这些气体的密度比地球上实验室所能达到的真空还要低，但它们却具有良好的反射阳光的能力，因此看上去很亮。当气体从彗头被释放出来之后，太阳风——太阳发出的带电粒子流——就会把它吹向后方形成彗尾。太阳风的速度非常快，远远大于彗星的运动速度，因此彗尾会笔直地向后延伸出去。太阳风还会电离这些气体，太阳风中的磁场会把产生的离子搜集到一起并且拽着它们一起运动。当电子和这些离子重新结合的时候就会发出蓝光。和气体一起从彗核吹出来的还有尘埃，其中包含有硅酸盐、矿物以及其他稳定的物质。这些物质的密度要比气体高得多，因此不会屈从于太阳风的摆布，这就是人们看到的弯曲的彗尾。由于反射阳光，它们会呈现出黄色或者红色。所以可以看到蓝色的彗尾从彗头笔直向后延伸，而黄色的尘埃彗尾则呈弧线向外延伸很长。

表象如此，作为彗星核心的固体部分彗核又是怎样一回事呢？彗核是一个巨大冰球，冰球里面夹杂着少量的岩石、尘埃、砂砾

以及氨、二氧化碳、甲烷等混合物。当彗星接近太阳时，这些冰会从固体直接升华成气体，形成彗星巨大的彗头以及长长的彗尾。每当彗星从太阳旁经过时因受热挥发逃逸大量气体，从而流失大量的物质。这里的“大量”意味着每秒数百吨，相对于一颗彗星的总质量这其实仅仅是很小的一部分，但考虑到这一过程所持续的时间以及它从太阳旁经过的次数，质量流失就会变得相当可观。因此我们看到的彗星都在慢慢地“溶解”变小。就算是壮观的哈雷彗星也终有一天会冰崩瓦解成石块、砂砾、尘埃和气体，从而像一颗寻常的流星一样消失在茫茫夜空。所以说，观测彗星也要“趁早”。

实际上，太阳系和太阳系内的一切都源自于一团星际气体和尘埃云，也就是说太阳在最初的时候就是一颗很大的彗星，由此推知，现在的彗星和几十亿年前的太阳类似，所以探索彗星就非常重要了。通过研究彗星能揭示太阳系诞生和地球生命起源的奥秘！而且，彗星是由太阳系诞生时的残余物质组成的，来源于太阳系外围的柯伊伯带，这里温度常年保持在零下200摄氏度以下，比较好地保存了45亿年前太阳系刚诞生时的状态。而“星尘号”飞船探测的彗星“维尔特二号”尤其具备这些特质。这颗彗星在1974年才发现，到目前为止它在太阳系内圈才运行了5个周期，相比之下哈雷彗星已在太阳系内侧转了不少圈了。这就意味着，“维尔特二号”彗星的物质成分变动很小，大部分还保持着太阳系初生时的状态。如果采集其样本，极可能获得很罕见很重

要的数据。基于以上事实和分析, NASA 启动了“星尘计划”系统工程, 开始了对彗星的大胆探索行动。

1.1.2 “星尘计划”

“星尘计划”是一项繁杂的系统工程, 简单地说包括目的、过程、结果及费用预算等几大部分。目的是捕捉彗星的灰尘, 在彗星飞过选其外侧尾部, 巧妙地抓取彗星的尘埃, 这非常类似于太极拳中的“揽雀尾”, 我们就形象地称之为“揽彗尾”。然后将收集到的彗星尘埃带回地球进行研究。抓取的过程包括设计星尘探测器、发射出去、收集星尘、返回地球、深入研究。不含发射费用为 1.68 亿美元, 包含发射则为 2.21 亿美元。其中如何实现无损捕获每秒 6100m 的星尘颗粒是项目的核心, 更是高科技。NASA 使用了一种全新的硅基固体材料, 它有海绵那样的多孔结构, 99.8% 的空间被真空填充, 如果这种材料被空气填充, 它几乎能在空气中飘浮, 这就是神奇的材料——气凝胶。当颗粒撞上气凝胶, 它就被埋在材料里面, 画出比自己长 200 倍的胡萝卜形的轨迹, 在此期间减速停止, 就像在飞机跑道上滑行制动减速一样。因为气凝胶外观微微泛蓝,



图 1.1.2 星尘号探测器