

特约专栏

## 硼改性酚醛泡沫复合材料的制备与性能研究

王 斌, 李贺军, 张雨雷, 黎云玉, 刘长青

(西北工业大学碳/碳复合材料工程技术研究中心, 陕西 西安 710072)

**摘 要:** 为改善酚醛泡沫的耐高温性能, 实验将适量的  $B_2O_3$  引入酚醛泡沫, 经模压成型、固化后, 制备出硼改性酚醛泡沫复合材料; 研究了硼改性酚醛泡沫复合材料的微观结构, 以及不同的硼含量对酚醛泡沫的压缩性能、耐高温性能的影响。结果表明, 硼改性酚醛泡沫的压缩断裂特征为假塑性断裂模式; 引入适量的  $B_2O_3$ , 可改善树脂基体相的韧性, 提高酚醛泡沫复合材料的压缩强度, 当  $B_2O_3$  含量为质量分数 4% 时, 酚醛泡沫的压缩强度最大, 为 10.14 MPa, 比纯酚醛泡沫提高了 5.18%。硼改性有利于酚醛泡沫的高温稳定性, 酚醛泡沫的热分解温度和残碳率均随硼含量的增加而有所提高; 当  $B_2O_3$  含量为质量分数 7% 时, 酚醛泡沫的耐高温性能最优, 其失重 10% 时的热分解温度为 447 °C, 比纯酚醛泡沫提高了 76.68%; 其 800 °C 下的残碳率为 66.37%, 较纯酚醛泡沫高出 16.05%。

**关键词:** 硼改性; 酚醛泡沫; 压缩强度; 热分解温度; 残碳率

**中图分类号:** TQ327.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-3962(2013)11-0641-05

## Preparation and Properties of Boron-Modified Phenolic Foams Composites

WANG Bin, LI Hejun, ZHANG Yulei, LI Yunyu, LIU Changqing

(C/C Composites Technology Research Center, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In order to improve high temperature resistance of phenolic foams,  $B_2O_3$  was incorporated in it to synthesize boron-modified composites by mold forming and curing. Microstructure of resultant phenolic foams were studied. Effects of boron content on compressive properties and high temperature resistance of phenolic foams are investigated. The results showed that compressive fracture characteristics of boron modified phenolic foams was pseudoplastic. Toughness of resin matrix and compressive strength of phenolic foams could be improved by proper amount of  $B_2O_3$ . The compressive strength of PF-4 is best, 10.14 MPa, 5.18% higher than PF-0. Boron was beneficial to improving high temperature stability of phenolic foams. Thermal decomposition temperature and carbon yield are enhanced with increase of  $B_2O_3$ . PF-7 showed better high temperature stability than others, whose thermal decomposition temperature with 10% weight loss is 447 °C, 76.68% higher than that of PF-0, and carbon yield is 66.37% at 800 °C, 16.05% higher than that of PF-0.

**Key words:** boron-modified; phenolic foam; compressive strength; thermal decomposition temperature; carbon yield

### 1 前 言

碳泡沫复合材料, 因其密度低、热膨胀系数低、尺寸稳定性好, 在无氧条件下可加热到 3 000 °C 而不熔化或软化等诸多优良特质, 已成为碳材料领域的研究热点之一<sup>[1-3]</sup>。以酚醛树脂为前驱体制得的碳泡沫复合材料具有热导率低、力学性能优异等特点<sup>[4-5]</sup>, 使其作为航

空航天领域高速飞行器热防护系统中的隔热材料, 具有无可比拟的优势。酚醛泡沫复合材料 (PF) 是一种性能优异的轻质、隔热、节能材料<sup>[6]</sup>, 作为碳泡沫复合材料的前驱体, 其结构、性能将直接影响到碳泡沫复合材料的性能。因此, 开展酚醛泡沫复合材料的研究工作, 有助于后续碳泡沫复合材料的研究。

传统的酚醛泡沫具有脆性大、延伸率低等缺点<sup>[7]</sup>, 大大限制了其应用范围。许多学者针对酚醛泡沫的增韧改性展开研究, 但耐高温性能却被不同程度的降低了<sup>[8-9]</sup>。研究表明, 将硼引入酚醛树脂可提高树脂的韧性和热稳定性<sup>[10]</sup>。文献[6]合成了硼改性酚醛泡沫, 使酚醛泡沫的长期最高使用温度由 150 °C 提高至 200 °C。

收稿日期: 2013-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51272213)

第一作者: 王斌, 男, 1981 年生, 博士研究生

通信作者: 李贺军, 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2013.11.01

可见, 酚醛泡沫中引入硼元素, 既不影响其力学性能, 亦可提高材料的热稳定性。

本文以热固性酚醛树脂、酚醛空心微球和  $B_2O_3$  为原材料, 经模压成型、高温固化处理, 制备出不同硼含量的硼改性酚醛泡沫复合材料。表征了硼改性酚醛泡沫复合材料的微观结构, 研究了不同的硼含量对酚醛泡沫的压缩性能、耐高温性能的影响规律。

## 2 实验

### 2.1 原材料

苯酚, 分析纯, 天津科密欧化学试剂厂生产; 37% 甲醛溶液, 分析纯, 天津科密欧化学试剂厂生产; 氢氧化钠, 分析纯, 天津市科密欧化学试剂厂生产; 酚醛空心微球, 密度  $0.25 \text{ g/cm}^3$ , Asian Pacific 公司生产;  $B_2O_3$ , 分析纯, 天津科密欧化学试剂厂生产。

### 2.2 硼改性酚醛泡沫复合材料的制备

按  $n_1$  (甲醛):  $n_2$  (苯酚) = 1.2 ~ 1.5 的摩尔比, 将甲醛和苯酚加入到三口烧瓶, 于  $70 \sim 90 \text{ }^\circ\text{C}$  水浴加热、搅拌反应, 同时加入少量 NaOH 溶液调节反应体系的 pH 值, 至反应体系达到适当粘度时停止, 即得到本实验所用的热固性酚醛树脂。

将酚醛空心微球过 140 目筛网, 去除大颗粒; 再将其与酚醛树脂缓慢搅拌均匀; 酚醛微球与酚醛树脂的体积比为 7:3。随后加入不同含量的  $B_2O_3$ , 超声分散均匀, 记为混合物 A。将混合物 A 注入模具中, 室温下静置 24 h, 再升温至  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  固化 24 h; 固化完全后冷却脱模, 即得到硼改性酚醛泡沫复合材料。合成的 4 组酚醛泡沫分别记作 PF-0, PF-1, PF-4 和 PF-7, 对应不同的  $B_2O_3$  含量(质量分数)(0%, 1%, 4% 和 7%); PF-0 为未改性的纯酚醛泡沫。

### 2.3 微观结构与性能测试

#### 2.3.1 微观结构表征

采用 EQUINOX55 型傅立叶红外光谱仪 (FT-IR) 测定酚醛泡沫的红外光谱, 扫描波数为  $400 \sim 4\,000 \text{ cm}^{-1}$ 。采用 JSM6400 型扫描电子显微镜 (SEM) 表征酚醛泡沫的表面形貌及微观结构。

#### 2.3.2 力学性能测试

采用 CMT-5304 电子万能试验机, 测试酚醛泡沫试样的压缩强度。试样尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 加载速率为  $0.5 \text{ mm/min}$ 。为消除密度对材料力学性能的影响, 计算压缩强度与材料密度的比值, 即比压缩强度。每组计算 5 个试样, 取平均值。

#### 2.3.3 热物理性能测试

采用德国 NETZSCH STA409 型热重分析仪表征酚醛泡沫在  $N_2$  气氛下的热失重行为。

## 3 结果与讨论

### 3.1 硼改性酚醛泡沫复合材料的微观结构

酚醛泡沫复合材料改性前后的显微形貌如图 1 所示。对比图 1a, b 发现, 二者形貌相近, 均由树脂基体相、空心微球相和少量孔隙相组成。基体相的韧带是由酚醛树脂分子聚合链固化而形成的三维交联固相骨架结构。空心微球相呈微米级球状结构均匀分散在基体上, 偶有微球相互交联, 微球尺寸由十几微米至近百微米。孔隙相主要分布在基体上, 也有少量孔隙分布在微球之间。孔隙的出现是由于制备过程中的机械搅拌和固化过程中  $H_2O$  分子逃逸所致。连续的孔隙相对复合材料的力学性能有一定影响, 应尽量避免。由于 B 与 C 元素的中子序数接近, 无法通过 SEM 和 EDS 测试其分布情况, 可通过 FT-IR 测试表征酚醛泡沫复合材料的化学组成。

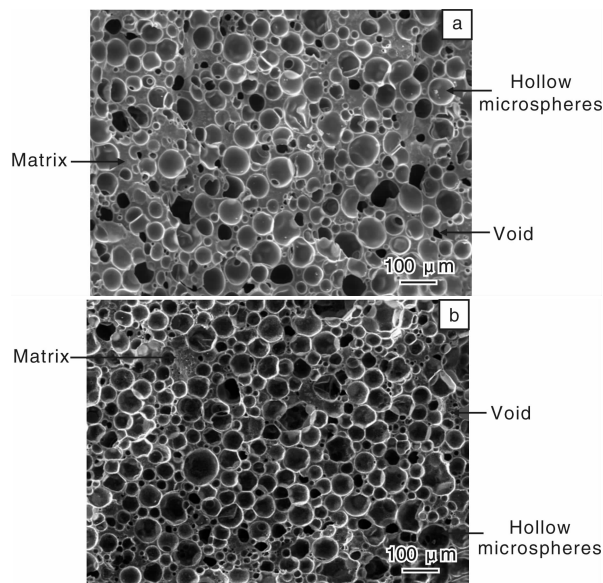


图 1 纯酚醛泡沫与硼改性酚醛泡沫的 SEM 照片: (a) 纯酚醛泡沫复合材料, (b) 硼改性酚醛泡沫复合材料

Fig. 1 SEM images of pure phenolic foam composites and boron-modified phenolic foam composites: (a) pure phenolic foam composites and (b) boron-modified phenolic foam composites

图 2 为硼改性酚醛泡沫复合材料的红外光谱图。 $3\,409 \text{ cm}^{-1}$  处为 Ph-OH 振动吸收峰, 其峰值低于游离酚羟基特征吸收峰的频率范围 ( $3\,590 \sim 3\,610 \text{ cm}^{-1}$ ), 表明酚醛泡沫中的游离酚含量很低<sup>[11]</sup>;  $1\,209.1 \text{ cm}^{-1}$  处为 Ph-OH 的 Ph-O 吸收峰。 $2\,921 \text{ cm}^{-1}$  和  $2\,854 \text{ cm}^{-1}$  处为  $-CH_2-$  的振动吸收峰;  $1\,601 \text{ cm}^{-1}$  和  $1\,475 \text{ cm}^{-1}$  处为苯环骨架的碳碳键振动吸收峰;  $1\,012.4 \text{ cm}^{-1}$  处为  $-CH_2-OH$  振动吸收峰,  $756 \text{ cm}^{-1}$  处为苯环取代的邻位特征峰。对比发现, 硼改性后酚醛泡沫的 Ph-OH 峰强降低, 并在

1 379  $\text{cm}^{-1}$  处左右出现较弱的硼酸酯 -B-O- 键振动吸收峰<sup>[12]</sup>。据此推断, 固化过程中部分硼原子与酚醛中的 Ph-OH 发生了脱水缩合反应, 生成硼酯键; 由于随着固化程度的加剧, 其中一部分硼酯键转变为含有 B-O 配位键的六元环结构, 该六元环结构使 -B-O- 键的吸收峰值下降<sup>[13]</sup>, 因此硼酯键在红外光谱中的峰强较弱。硼改性酚醛泡沫的化学组成仍以酚醛聚合物为主, 但形成了部分含硼的三维交联结构。

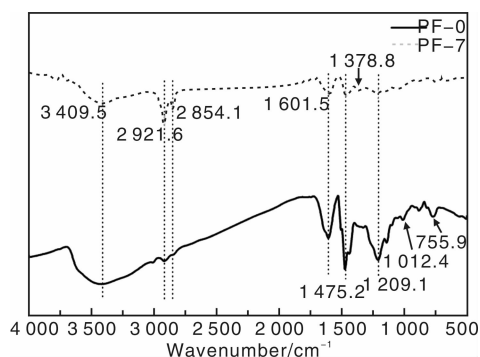


图 2 硼改性酚醛泡沫复合材料的红外光谱图

Fig. 2 FTIR spectrograph of boron-modified phenolic foam composites

### 3.2 硼改性酚醛泡沫复合材料的压缩性能

硼对酚醛泡沫复合材料压缩强度、比压缩强度的影响如图 3 所示。随着硼含量的增加, 酚醛泡沫的压缩强度呈现先增大后减小的趋势; PF4 的压缩强度最大, 为 10.14 MPa, 较 PF-0 提高了 5.18%。向酚醛泡沫中引入适量硼元素, 在固化过程中 Ph-OH 的氢原子部分被硼原子取代, 分子结构中形成柔性较大、键更长的 -B-O- 键, 这种含硼的三维交联结构可使树脂基体相的韧性有所提高<sup>[10,14]</sup>, 表现为压缩过程中, 相同应力载荷下, 改性酚醛泡沫比纯酚醛泡沫抑制裂纹萌生, 抗裂纹扩展能力强, 提高了断裂应力, 使材料压缩强度提高。但过多的 -B-O- 键大幅度增加了酚醛树脂高分子链之间的交联度, 易使酚醛树脂基体的脆性增大, 因此表现为当硼含量超过 4% 时, 硼改性酚醛泡沫的压缩强度有所降低, PF-7 的压缩强度为 9.71 MPa, 仅比 PF-0 高 0.73%。

酚醛泡沫的比压缩强度受硼含量的影响趋势与前者亦不相同, 总体表现为改性酚醛泡沫的比压缩强度较纯酚醛泡沫有所降低, 仅 PF4 的比压缩强度 ( $26.27 \text{ MPa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ) 略高出 PF-0 ( $26.05 \text{ MPa} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ) 0.84%。由于酚醛泡沫的密度随硼含量的增加不断增大, 其增幅超过了改性酚醛泡沫压缩强度的增幅, 故消除密度对材料强度的影响之后, 表现为 PF-4 的比压缩强度略高于 PF-0, PF-1、PF-7 的比压缩

强度均低于 PF-0。

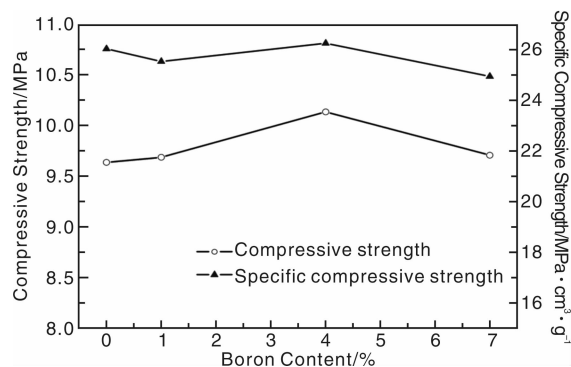


图 3 硼含量对酚醛泡沫压缩性能的影响

Fig. 3 The Effect of content of boron on compressive properties of phenolic foams composites

图 4 为酚醛泡沫复合材料典型的压缩应力-应变曲线(以 PF4 为例), 其压缩断裂特征呈现假塑性断裂模式。曲线波动较大, 表明试样在载荷作用下发生了不同程度的断裂。压缩过程大致分为 3 阶段: 线弹性区、平台区和致密化区。初始受力后, 酚醛泡沫发生弹性变形, 当应变达到一定程度, 进入屈服阶段: 空心微球之间挤压变形、破裂, 微球碎片填充了原有空间, 酚醛泡沫继而进一步压实, 使其可以继续承受载荷; 屈服平台区亦是酚醛泡沫吸收能量的主要阶段, 平台区越长, 则吸收能量越多<sup>[15]</sup>。当原有的空间被微球碎片填实后, 屈服平台区结束, 进入致密化阶段; 经历屈服点之后的应力下降, 酚醛泡沫的强度在此阶段有所回升, 甚至超过屈服点强度。但有必要指出, 在致密化阶段之前, 材料已经失效。

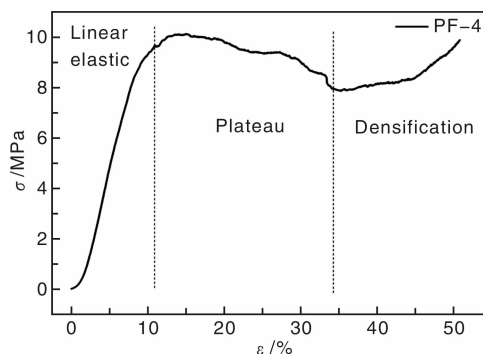


图 4 PF-4 酚醛泡沫的压缩应力-应变曲线

Fig. 4 The curve of compressive strain with stress of PF-4

### 3.3 硼改性酚醛泡沫复合材料的热失重行为

对不同硼含量的酚醛泡沫进行  $\text{N}_2$  气氛下的热失重分析, 结果如图 5 所示。可以看出, 随硼含量的增大, 酚醛泡沫的热分解温度和残碳率不断提高。失重 5% 时的热分解温度由 PF-0 的 209  $^{\circ}\text{C}$  升至 PF-7 的 303  $^{\circ}\text{C}$ , 提

高了 44.98%；失重 10% 时的热分解温度由 PF-0 的 253 °C 升至 PF-7 的 447 °C，提高了 76.68%；失重 20% 时的热分解温度由 PF-0 的 333 °C 升至 PF-7 的 538 °C，提高了 61.56%。酚醛泡沫在 600 °C 时的质量保持率由 PF-0 的 58.08% 增加至 PF-7 的 73.39%；在 800 °C 下的残碳率由 PF-0 的 50.32% 增加至 PF-7 的 66.37%，提高了 16.05%。

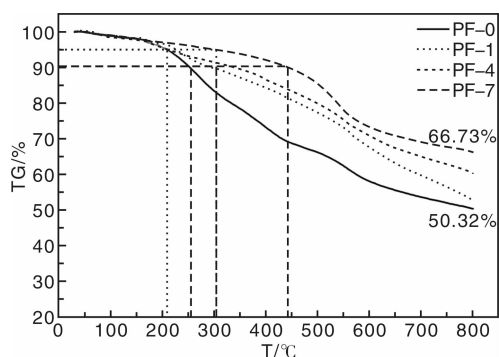


图 5 硼改性酚醛泡沫  $N_2$  气氛下的热失重曲线

Fig. 5 TGA curves of boron-modified phenolic foams in nitrogen atmosphere

纯酚醛泡沫 (PF-0) 耐高温性最差，是因酚醛树脂自身氧化降解所致。随着温度的升高，聚合物中的氧与酚环之间的次甲基形成过氧化物，酚羟基作用于苯环，使得次甲基邻近的羟基加速氧化。将硼引入酚醛泡沫，部分硼原子进入酚醛分子链形成硼酯键和 B-O 配位键，硼氧键的键能 ( $774.04 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) 大于碳碳键的键能 ( $334.72 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )<sup>[16]</sup>；未进入高分子链的硼原子以  $B_2O_3$  形式存在， $B_2O_3$  高温熔融，可封锁树脂基体中部分活性官能团，降低裂解反应的剧烈程度，同时可与树脂基体形成 B-O-C 键<sup>[17]</sup>，增大了酚醛高分子链段热运动的位阻，在一定程度上抑制了树脂高温下的进一步热裂解，促进树脂结构重排平稳过渡，有效提高了酚醛泡沫的高温稳定性。因此，酚醛泡沫的耐热性能随着硼含量增加而有所提高。

对 PF-7 酚醛泡沫做进一步 DTG 分析，结果如图 6 所示，可分为 3 个阶段：室温 ~ 400 °C，400 ~ 650 °C 和 650 ~ 800 °C。400 °C 前，PF-7 的热失重较小，这一阶段的失重主要由固化反应过程中残余的水分子和其他小分子物质挥发而引起，同时发生分子间的交联缩合反应<sup>[12]</sup>。PF-7 酚醛泡沫在 400 ~ 650 °C 间出现明显的热失重，失重率达 21.32%，这一阶段主要是酚醛泡沫发生非均相分解，大分子链断裂并发生碳化，当裂解产物进一步聚合成二聚体或三聚体时，大量放热，同时释放出一氧化碳、二氧化碳、甲烷、酚、甲酚和二甲酚等<sup>[18]</sup>。当温度超过 650 °C，苯环进一步分解、碳化，酚醛泡沫

继续进行结构调整并向无机结构转化，最终形成以玻璃碳为主的硼改性碳泡沫。

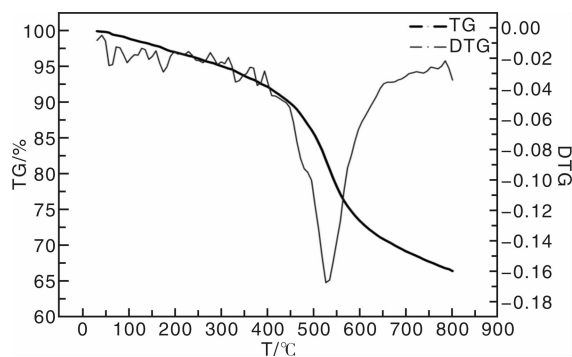


图 6 PF-7 酚醛泡沫  $N_2$  气氛下的热失重曲线

Fig. 6 TG and DTG curves of PF-7 in nitrogen atmosphere

## 4 结 论

(1) 以热固性酚醛树脂与酚醛空心微球为原料，与适量  $B_2O_3$  混合，经模压成型、固化后可制备出硼改性酚醛泡沫复合材料。该制备工艺周期短、成本低廉。

(2) 随着硼含量的增加，酚醛泡沫的压缩强度呈现先增大后减小的趋势；当  $B_2O_3$  含量 (质量分数) 为 4% 时，该复合材料的压缩强度最大，为 10.14 MPa，比纯酚醛泡沫提高了 5.18%。硼改性酚醛泡沫复合材料的压缩断裂呈假塑性断裂模式。

(3) 硼改性有利于提高酚醛泡沫的高温稳定性，酚醛泡沫的热分解温度和残碳率均随硼含量的增加而有所提高。当  $B_2O_3$  含量 (质量分数) 为 7% 时，酚醛泡沫的耐高温性能最优：其失重 10% 时的热分解温度为 447 °C，比纯酚醛泡沫高 76.68%；其 800 °C 下的残碳率为 66.37%，较纯酚醛泡沫高出 16.05%。

## 参考文献 References

- [1] Bruneton E, Tallaron C, Gras-Naulin N, *et al.* Evolution of the Structure and Mechanical Behavior of a Carbon Foam at Very High Temperatures [J]. *Carbon*, 2002, 40 (11): 1 919 - 1 927.
- [2] Gallego N C, Klett J W. Carbon Foams for Thermal Management [J]. *Carbon*, 2003, 41 (7): 1 461 - 1 466.
- [3] Maslov K, Kinra V K. Damping Capacity of Carbon Foam [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 367 (L-2): 89 - 95.
- [4] Wang S B, Luo R Y. Preparation and Characterization of Resin-Derived Carbon Foams Reinforced by Hollow Ceramic Microspheres [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527 (15): 3 392 - 3 395.
- [5] Luo Bingcheng (罗炳程), Wu Xiaowen (吴小文). 炭化温度

- 对煤研石增强泡沫炭材料力学性能的影响[J]. *Chinese Journal of Materials Research* (材料研究学报), 2013, 27(1): 91–96.
- [6] Huang Jianqing(黄剑清), Pan Anjian(潘安健). 硼改性酚醛泡沫的耐高温性能[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composite* (玻璃钢/复合材料), 2007, (6): 26–28.
- [7] Miao Changli(缪长礼), Kuang Songlian(匡松连). 聚酰胺改性酚醛树脂及泡沫性能[J]. *Aerospace Materials & Technology* (宇航材料工艺), 2012, (2): 61–63.
- [8] Zhang Yingjie(张英杰), Li Xiaofeng(李晓峰). 聚酰亚胺改性酚醛泡沫[J]. *Acta Polymerica Sinica* (高分子学报), 2013, (8): 1 072–1 079.
- [9] Shen H B, Steven N. Mechanical Characterization of Short Fiber Reinforced Phenolic Foam[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, 34(9): 899–906.
- [10] Qiu Jun(邱 军), Wang Guojian(王国建). 不同硼含量硼改性酚醛树脂的合成及其性能[J]. *Journal of Tong Ji University: Natural Science* (同济大学学报: 自然科学版), 2007, 35(3): 381–384.
- [11] Chen Zhiqin(陈智琴), Liu Hongbo(刘洪波). 高残炭率酚醛树脂的耐热性能研究[J]. *Engineering Plastics Application* (工程塑料应用), 2006, 34(11): 56–60.
- [12] Chen Xiaofei(陈孝飞), Li Shujie(李树杰). 硼改性酚醛树脂的固化及裂解[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica* (复合材料学报), 2011, 28(5): 89–95.
- [13] Xia Liya(夏立娅). *Structure, Curing Kinetics and Thermal Properties of Boron-Containing Bisphenol-F Formaldehyde Resin* (双酚-F 硼 酚醛树脂的结构、固化机理和热性能研究) [D]. Baoding: Hebei University, 2004.
- [14] Yan Liansheng(闫联生), Yao Dongmei(姚冬梅). 硼酚醛烧蚀材料的研究[J]. *Journal of Solid Rocket Technology* (固体火箭技术), 2000, 23(2): 69–73.
- [15] Gupta N, Kishore, Woldesenbet E. Studies on Compressive Failure Features in Syntactic Foam Material[J]. *Journal of Materials Science*, 2001, 36(18): 4 485–4 491.
- [16] Zhang Min(张 敏), Wei Junfa(魏俊发). 耐高温耐烧灼热固性硼酚醛树脂的合成[J]. *Chinese Journal of Synthetic Chemistry* (合成化学), 2004, 12(1): 77–80.
- [17] McKee DW, Spiro C L, Lamby E J. The Effects of Boron Additions on the Oxidation Behavior of Carbon[J]. *Carbon*, 1984, 22(6): 507–511.
- [18] Delian Yi(易德莲), Ouyang Zhaozhui(欧阳兆辉). 硼硅双改性酚醛树脂的合成与性能[J]. *China Adhesives* (中国胶粘剂), 2008, 17(1): 12–15.

## 常温常压下存在三维金属碳获理论证实

据物理学家组织网 2013 年 11 月 7 日(北京时间)报道, 一国际研究小组从理论上证实, 可能存在处于常温常压下并具有金属特性的三维(3D)形式的碳, 这一研究成果将极大地推进碳科学的研究。

碳不仅是形成生命的化学基础, 而且具有丰富的化学和物理特性, 一直备受材料科学家关注。碳可以以多种结构形式存在, 如石墨、金刚石、巴克敏斯特富勒烯(巴克球)、碳纳米管和石墨烯等。但一直未找到能够在常温常压条件下稳定存在并且具有金属特性的三维形式的碳。

来自北京大学、美国弗吉尼亚联邦大学和中国科学院上海技术物理研究所的研究人员采用最先进的理论方法证明, 可以操纵碳形成一个三维的具有金属性质的环环相扣的六角形结构, 这一结构碳在常温常压下可稳定存在,。

“环环相扣的六角形提供了两个独特的性质——六角形的排列方式能够产生金属特性, 而通过四面体键环环相扣的形式则确保了稳定性。”这项研究的带头人、弗吉尼亚联邦大学人文与科学学院物理学教授普鲁·耶拿说。这些属性的正确组合, 将有望适用于各种不同的技术。

“与需要 3 万亿帕斯卡的压力制造金属碳的高压技术不同, 这一结构在常温常压条件下很稳定, 或许可以用苯或聚苯分子来合成。”另一位研究带头人、北京大学教授、同时兼职于弗吉尼亚联邦大学的王倩(音译)说。

“在研发适用于负微分电阻器件或超导设备的轻金属方面, 新的金属碳结构可能具有重要的应用前景。”王倩说。耶拿表示, 他们的工作仍处于早期阶段, 但他希望这些发现能推动相关研究从理论进入实验阶段。

(来源: 中国科技网)