

为 15 % 时, 掺杂组元对石墨晶格造成的缺陷也大大增加, 反而使石墨晶格尺寸变小, 材料整体石墨化程度降低。

表 1 ZrC/C 复合材料的基本晶格参数

Tab. 1 Crystalline parameters of ZrC/C composites

制备材料	$d_{002}/\text{nm}$	平均微晶尺寸		石墨化度
		$L_z/\text{nm}$	$L_y/\text{nm}$	/ %
F-Zr-5	3.378	39.6	39.6	72.1
F-Zr-7.5	3.376	43.2	43.2	74.4
F-Zr-10	3.373	50.0	50.0	78.2
F-Zr-15	3.378	39.6	39.6	72.1

固体中担负导热的物质(载流子)有电子、晶格振动、光子等, 非金属固体主要靠量子化的弹性晶格振动(即声子)传递热量, 结晶石墨材料的热导率可以用 Debye 公式表示如下:

$$\kappa = (1/3) c \cdot v \cdot L$$

式中  $c$  为每单位体积的热容量,  $v$  为声子的传播速度(即在固体中的音速),  $L$  为声子的平均自由行程(为声子从一次散射至再次散射移动的距离)。在常温下, 热导率主要由  $L$  决定。一方面 Zr 对石墨材料有较强的催化石墨化作用, 掺 Zr 量增加促进材料内部微晶长大, 增大了声子的平均自由行程, 热导率随之得到提高。另一方面, 石墨材料的导电性也与石墨晶格有密切关系<sup>[8]</sup>, 由图 3 看出当  $\text{ZrO}_2$  加入较多时, 逸出 CO 气体时在碳基体内形成过多的孔洞, 同时 C 和  $\text{ZrO}_2$  反应生成 ZrC 时也会在材料内形成晶界, 都会造成一定的晶体缺陷, 增加了声子散射的效果, 声子的热导率也随之降低。

#### 4 结论

(1) 掺 Zr 量的增加, ZrC/C 复合材料的力学性能和热导率不断提高, 在掺 Zr 量为 10 % 时, 材料的弯曲强度达最大值, 而热导率在 Zr 含量为 7.5 % 达到最佳。

(2) SEM 图片显示 Zr 在材料中均匀分布; 材料的微晶尺寸和石墨化度随着 Zr 加入量的增加而增大, 当 Zr 含量为 10 % 时达到最大。这些微观结构和材料的宏观性能是相对应的。

#### 参考文献

- 1 Pierson H O. Handbook of carbon graphite, diamond and fullereness. Noyes Publications, New Jersey, 1993; 43: 51 ~ 63
- 2 丘哲明. 固体火箭发动机材料与工艺. 1995: 285
- 3 Thoms C R. Essential of carbon-carbon composites, Redwoos Books, Great Britain, 1993: 204
- 4 Chang H W, Rusnak R M. Carbon, 1978; 16: 309
- 5 Peng T C. Carbon, 1979; 17: 157
- 6 Crocker P, Mcenaney B. Carbon, 1991; 29: 881
- 7 Ehrburger P, Baranne P, Lahaye J. Carbon, 1986; 24: 495
- 8 日本碳素材料学会. 新碳材料入门. 1996: 26, 35, 46
- 9 张光晋. 掺杂石墨导热、导电性能及其微观结构的研究. 中国科学院山西煤炭化学研究所硕士论文集, 2001: 22
- 10 邹林华, 黄启忠, 邹自强等. 炭/炭复合材料石墨化度的研究. 炭素, 1998; (1): 8 ~ 11
- 11 Takashi H, Kuroda H, Akamatu H. Carbon, 1964; 2: 432 ~ 433
- 12 Kelly B T. Physics of graphite. London and New Jersey: Applied Science publishers, 1981: 20 ~ 21
- 13 唐钠德. 阿斯克兰 R. 材料科学与工程. 1988: 69
- 14 宋正芳. 碳石墨制品的性能及应用. 机械工业出版社, 1987: 46 ~ 47

(编辑 任涛)

## 无损检测用钴 - 60 源

无损检测用钴 - 60 源采用厚度为 0.4 mm 的镀镍金属钴片或 1 mm × 1 mm 的镀镍金属钴片作为靶材料, 经高通量反应堆的热中子辐照后, 按  $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$  核反应生成高比活度钴 - 60, 然后将其定量分装在双层不锈钢(1Cr18Ni9Ti)包壳内, 内外包壳均氩弧焊密封, 即制成无损检测用钴 - 60 源。经浸泡法和计数法检验源的泄漏和表面污染, 完全符合 GB4076 规定。

钴 - 60 源结构合理, 工艺成熟, 质量可靠, 使用安全, 其主要技术指标达到国际同类产品水平; 发射出的能量高(1.17 MeV 和 1.33 MeV), 穿透能力大, 主要用于厚度为 50 mm ~ 200 mm, 钢铁工件的无损检测, 在石油化工、高压容器、工业锅炉、冶金、兵器、工业原子能等行业具有重要意义。本成果的经济、社会效益巨大。

(中国核动力研究设计院第一研究所, 610005, 成都 291 信箱 100 分箱)

· 李连清 ·