

单晶高温合金 DD6 拉伸性能各向异性

Tensile Anisotropy of Single Crystal Superalloy DD6

李嘉荣, 史振学, 袁海龙, 刘世忠, 赵金乾, 韩 梅, 刘维维

(北京航空材料研究院 先进高温结构材料国防科技重点实验室, 北京 100095)

LI Jia-rong, SHI Zhen-xue, YUAN Hai-long,

LIU Shi-zhong, ZHAO Jin-qian, HAN Mei, LIU Wei-wei

(National Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural Materials, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 研究了[001], [011], [111]取向第二代单晶高温合金 DD6 的拉伸性能与断口组织。结果表明: DD6 单晶高温合金存在拉伸各向异性, 850℃以上[001]取向 DD6 单晶高温合金的抗拉强度与屈服强度分别高于[011], [111]取向合金的强度, [001], [011], [111]取向 DD6 单晶高温合金的拉伸断口具有类解理断裂与韧窝断裂的特征。

关键词: 单晶高温合金; DD6; 拉伸性能; 各向异性

中图分类号: TG132.3⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2008)12-0006-05

Abstract: The tensile properties and tensile fracture of the second generation single crystal superalloy DD6 with [001], [011] and [111] orientation were studied. The results show that DD6 alloy has tensile anisotropy, when temperature is higher than 850℃ the ultimate tensile strength and yield strength of DD6 alloy with [001] orientation are higher than those with [011] and [111] orientation, and there are the fracture features characteristic of quasi-cleavage and dimple in DD6 alloy with [001], [011] and [111] orientation.

Key words: single crystal superalloy; DD6; tensile property; anisotropy

单晶高温合金具有优良的综合性能, 自 20 世纪 80 年代以来单晶高温合金涡轮叶片逐渐获得广泛的应用, 显著推动了航空发动机技术的进步^[1-5]。在单晶高温合金涡轮转子叶片的服役中, 虽然涡轮转子叶片的主应力方向平行于单晶高温合金的[001]取向, 应主要研究与考虑[001]取向单晶高温合金的力学性能, 但由于单晶高温合金是具有面心立方晶格的各向异性材料, 除主要研究[001]取向合金性能外, 还应研究[011], [111]取向单晶高温合金的力学性能^[6-9]。

DD6 为中国自主研制成功的第二代单晶高温合金, 它具有高温强度高、综合性能优良、组织稳定及铸造工艺性能好等优点。与国外应用的第二代单晶高温合金 PWA1484, René N5 相比, DD6 合金的拉伸性能、持久性能、蠕变性能、疲劳性能、抗氧化性能及耐热腐蚀性能达到甚至部分超过其水平, 且由于 Re 含量低而具有低成本的优势^[10]。本工作在对[001]取向 DD6 单晶高温合金拉伸性能研究的基础上^[11], 进行了[011], [111]取向 DD6 单晶高温合金拉伸性能研究及断口组织分析。

1 实验方法

采用纯净的原材料真空熔炼 DD6 母合金, 在真空定向凝固炉上重熔合金、浇注并定向凝固单晶试棒。分别采用螺旋法、籽晶法制取[001], [011], [111]取向单晶试棒。然后将单晶试棒进行下述热处理: 1290℃/1h + 1300℃/2h + 1315℃/4h/空冷 + 1120℃/4h/空冷 + 870℃/32h/空冷。将热处理后的单晶试棒机械加工成拉伸性能试样, 单晶试样[001], [011], [111]的生长方向与试样的主应力轴偏离均小于 15°。分别测试[001], [011], [111]取向单晶试样的拉伸性能, 采用扫描电镜观察断口形貌。

2 结果与分析

2.1 拉伸各向异性

[001], [011], [111]取向 DD6 单晶高温合金的抗拉强度、屈服强度与伸长率示于图 1。可以看出, 室温与 700℃时[001]取向 DD6 合金的抗拉强度与屈服强

度变化不大; 760 °C 时, 合金抗拉强度达到最高值, 屈服强度与 700 °C 基本相同; 850 °C 时, 合金抗拉强度略有降低, 屈服强度达到最高值, 出现反常屈服现象; 高于 850 °C 后, 合金抗拉强度和屈服强度开始明显降低; 980 °C 以上, DD6 合金的屈服强度显著高于第一代单晶高温合金与定向高温合金的屈服强度^[12]; 1100 °C 时, DD6 合金抗拉强度为 540 MPa。

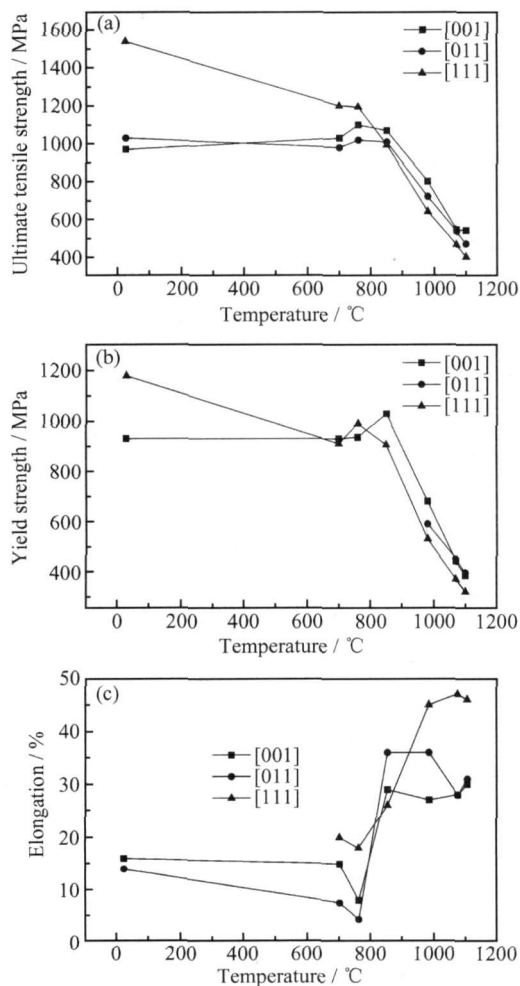


图1 [001], [011], [111] 取向 DD6 合金的抗拉强度 (a), 屈服强度 (b) 及伸长率 (c)

Fig. 1 Ultimate tensile strength (a), yield strength (b), elongation (c) of DD6 alloy with [001], [011] and [111] orientation

与 [001] 取向合金相比, 除室温以外, [011] 取向 DD6 单晶高温合金的抗拉强度稍低; 980 °C 以下, 未测得屈服强度数据; 1070 °C 与 1100 °C 时, [011] 取向合金的屈服强度与 [001] 取向合金十分接近; 大体上来看, [011] 取向合金的抗拉强度和屈服强度与 [001] 取向合金相当。

室温与 760 °C, [111] 取向 DD6 单晶高温合金的抗拉强度显著高于 [001] 取向合金的抗拉强度; 室温

时, [111] 取向 DD6 合金的屈服强度也显著高于 [001] 取向合金的屈服强度; 700~ 760 °C 条件下, [111] 取向合金的屈服强度与 [001] 取向合金基本相当; 850 °C 以上, [111] 取向合金的抗拉强度与屈服强度明显低于 [001] 取向合金。

与大多数 γ' 强化的定向高温合金及单晶高温合金一样, 760 °C 时, [001] 取向 DD6 合金的伸长率较低; 高于 850 °C 后, 合金的伸长率显著提高。[011] 取向合金伸长率的变化规律与 [001] 取向合金相近, 但室温与 760 °C 的 [011] 取向合金伸长率明显低于 [001] 取向。从不完整的数据看, 760 °C 时, [111] 取向合金伸长率也有低值; 总体上, [111] 取向合金伸长率高于 [001] 和 [011] 取向合金。

DD6 单晶高温合金具有面心立方晶体结构, [001], [011], [111] 取向的原子排列不同, 施加应力时, 不同取向合金的形变规律也不相同, 所以导致了合金的各向异性。概括来看, [001] 取向与 [011] 取向合金的拉伸性能差别较小, 而 [111] 取向与 [001] 取向及 [011] 取向合金的拉伸性能差别较大。850 °C 以上, [001] 取向合金的抗拉强度与屈服强度明显高于 [011] 及 [111] 取向合金, 且塑性较好。所以, 从拉伸性能方面考虑, 选取合金的 [001] 取向作为叶片的主应力方向是适宜的。

2.2 断口组织

[001] 取向 DD6 合金拉伸断口及纵向形貌示于图 2。[011] 取向 DD6 合金拉伸断口及纵向形貌示于图 3。[111] 取向 DD6 合金拉伸断口及纵向形貌示于图 4。

如图 2 所示, 室温断口附近没有明显的缩颈, 室温断口为椭圆形, 这是因为在较低的温度下, 热激活的作用比较微弱, 通常只有一个或两个滑移系开动, 因此试样截面由圆形变为椭圆形, 从而断口呈现椭圆形。室温断口主要由小平面组成, 存在众多解理台阶与河流花样, 断口具有类解理断裂特征, 合金的断裂属于韧性断裂。

[001] 取向合金中温 700 °C 的试样断口附近没有明显的缩颈, 呈现椭圆形; 断口约有一半呈现出大平面, 存在河流花样。760 °C 的试样断口附近也没有明显的缩颈, 断口仍呈现椭圆形; 且存在河流花样, 宏观断口呈现一个大平面, 断口呈锋利的楔形, 断裂面的法线方向与应力方向大约成 50~ 60° 夹角, 在接近断口的试样表面可观察到滑移带, 可以断定断裂面为 {111} 面, 合金呈现类解理断裂特征。

多人在单晶高温合金断口中观察到沿 {111} 面的 (类) 解理断裂^[13-15]。解理断裂是一种断裂机制, 并不能表明合金拉伸过程中塑性变形量的大小, 不能完全根据是否具有解理断裂来判定韧性断裂与脆性断

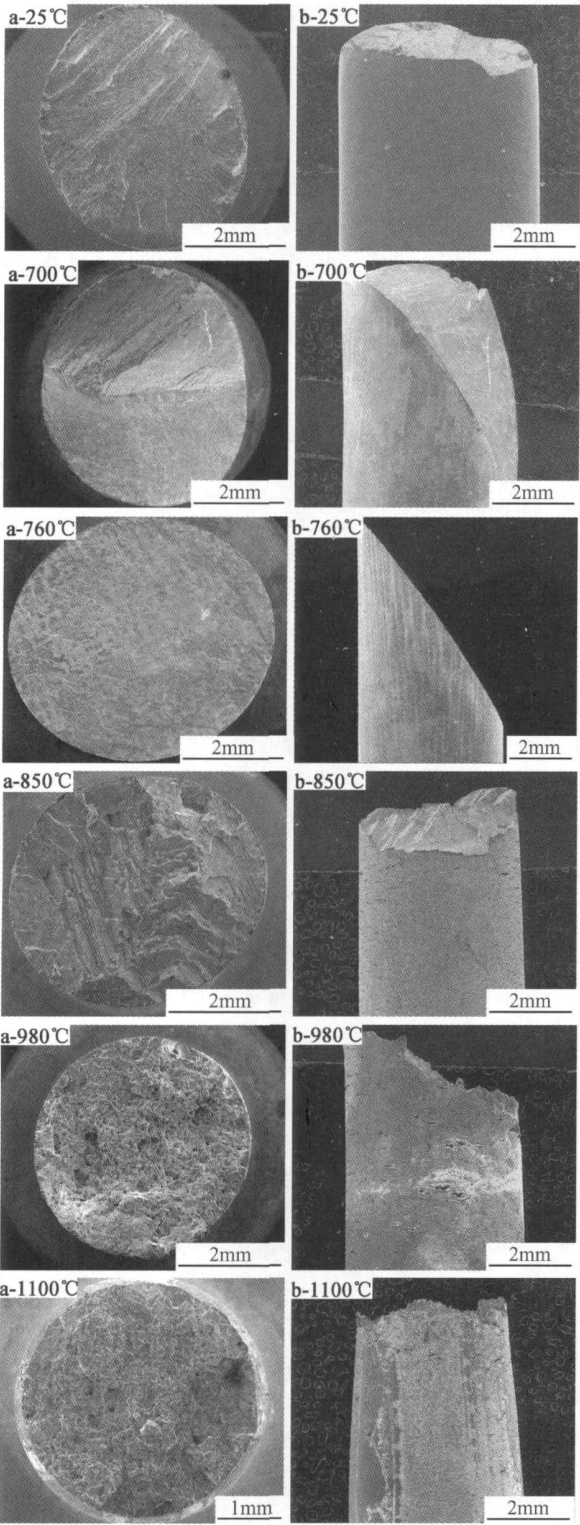


图 2 [001]取向 DD6 合金拉伸断口及纵向形貌(SEM)
(a)拉伸断口;(b)纵向形貌

Fig. 2 Tensile fracture surface and longitudinal morphology of DD6 alloy with [001] orientation
(a)fracture surface;(b)longitudinal morphology

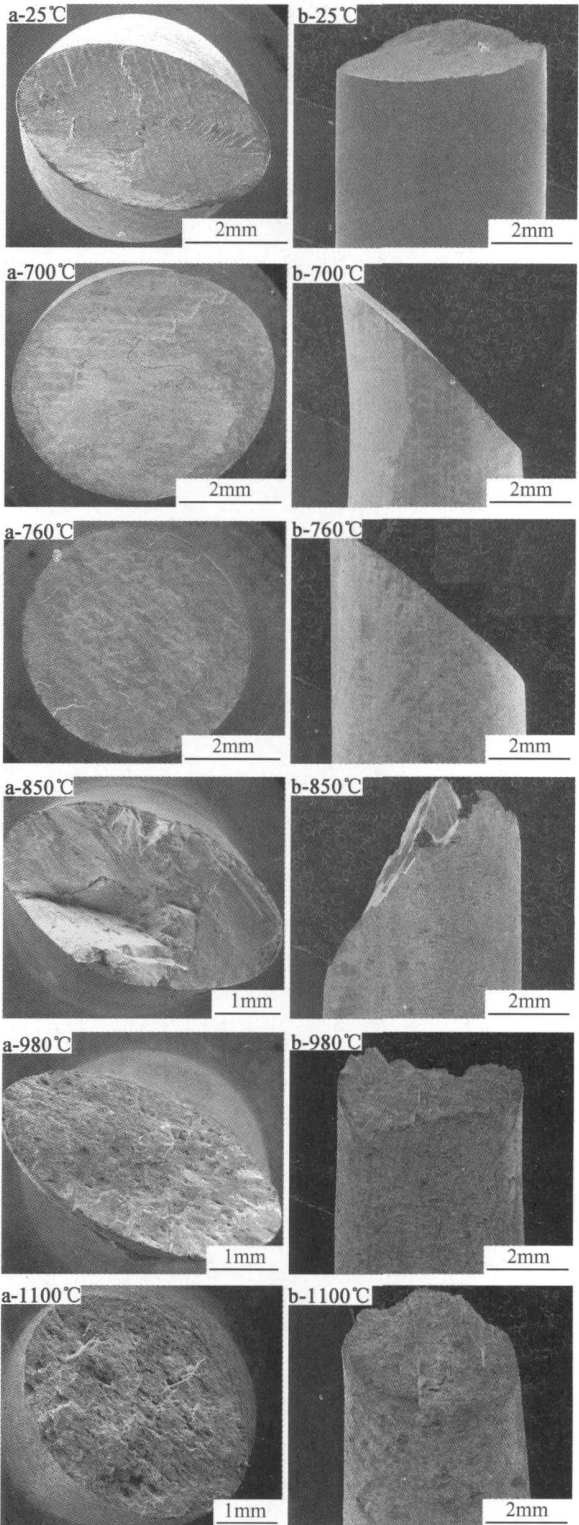


图 3 [011]取向 DD6 合金拉伸断口及纵向形貌(SEM)
(a)拉伸断口;(b)纵向形貌

Fig. 3 Tensile fracture surface and longitudinal morphology of DD6 alloy with [011] orientation
(a)fracture surface;(b)longitudinal morphology

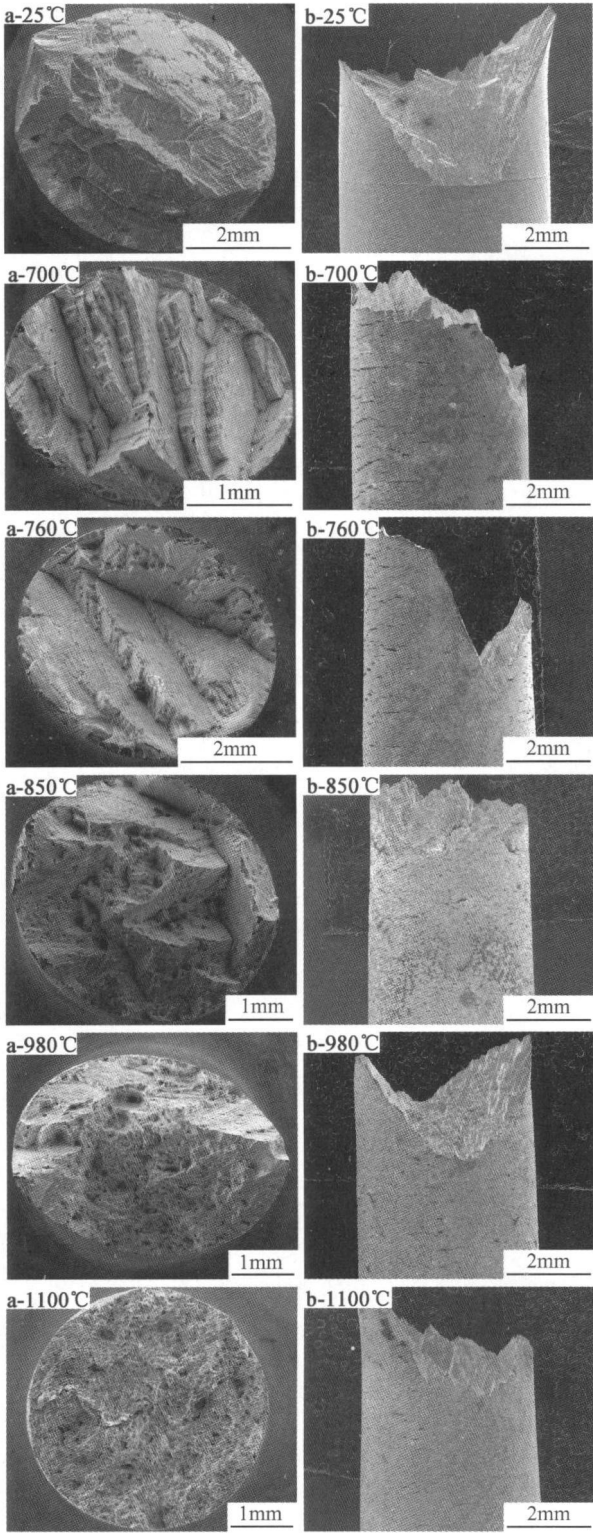


图4 [111]取向 DD6 合金拉伸断口及纵向形貌(SEM)
(a) 拉伸断口; (b) 纵向形貌
Fig. 4 Tensile fracture surface and longitudinal morphology of DD6 alloy with [111] orientation
(a) fracture surface; (b) longitudinal morphology

韧性断裂。室温至 760℃, 位错切割机制起作用, 对应于类解理断裂, 这与文献[14]的作者研究的结果基本一致。

[001]取向合金中温 850℃的试样断口附近出现缩颈, 断口具有类解理断裂与韧窝断裂的特征。中温条件下, 由于 γ' 相随温度的升高而出现反常屈服现象, 位错对 γ' 相的切割变得困难, 所以变形机制由切割方式向绕过方式转变。

[001]取向合金高温 980℃与 1100℃的试样断口呈圆形, 断口附近均呈现缩颈, 1100℃的试样断口缩颈明显, 断口均呈暗灰色的纤维状, 韧窝特征明显。这是因为在高温扩散的作用下, 热激活作用加强, 合金在变形过程中开动了多个滑移系, 除了八面体滑移系以外, 还有六面体滑移系; 并且, 由于高温塑性变形过程中回复速度加快, 应力集中被显著缓解, 没有了造成类解理的条件; 所以断口呈韧窝状。断裂主要通过韧窝与韧窝之间的相遇或通过撕裂棱将韧窝相互连接起来的方式进行^[14]。

对比分析图 2 与图 3, 可以看出, [011]取向 DD6 合金拉伸断口及纵向形貌与[001]取向的相似。

从图 4 可以看出, [111]取向 DD6 合金拉伸断口及纵向形貌与[001], [011]取向合金的拉伸断口及纵向形貌有很大差异。室温与 760℃拉伸断口及纵向形貌主要呈现出多个与应力方向成一定角度的倾斜的断裂平面所组成, 具有类解理断裂特征。由于应力方向与各个滑移系{111}面特有的空间关系, 所以拉伸断裂形成如图 4 所示的断口。980℃与 1100℃的试样断口呈现韧窝断裂特征。[111]取向 DD6 合金拉伸断口及纵向形貌特征明显不同于[001]及[011]取向合金。

3 结论

- (1) DD6 单晶高温合金存在拉伸各向异性。
- (2) 850℃以上, [001]取向 DD6 单晶高温合金的抗拉强度与屈服强度高于[011], [111]取向的合金。
- (3) [001], [011], [111]取向 DD6 单晶高温合金的拉伸断口具有类解理断裂与韧窝断裂的特征。低温条件下, 合金的拉伸断口呈现明显的类解理断裂特征; 高温条件下, 合金的拉伸断口呈现明显的韧窝断裂特征; 中温条件下, 合金的拉伸断口呈现类解理断裂与韧窝断裂共存的特征。

参考文献

[1] CETEL A D, DUHL D N. Second generation nickel-base single crystal superalloy[A]. REICHMAN S, DUHL D N, MAURER

裂^[16]。[001]取向 DD6 合金 760℃的拉伸伸长率接近 10%, 尽管断口呈现类解理断裂特征, 但合金断裂属于

- G, et al. Superalloys 1988 [C]. Warrendale, PA: TMS, 1988. 235– 244.
- [2] HARRIS K, ERICKSON G L, SIKKENG S L, et al. Development of the rhenium containing superalloys CM SX-4 and CM 186LC for single crystal blade and directionally solidified vane applications in advanced turbine engines[A]. ANTOLOVICH S D, STUSRU D R W, MACKAY R A, et al. Superalloys 1992 [C]. Warrendale, PA: TMS, 1992. 297– 306.
- [3] ROSS E W, O'HARA K S. René N4: a first generation single crystal turbine airfoil alloy with improved oxidation resistance, low angle boundary strength and superior long time rupture strength[A]. KISSINGER R, D, DEYE D J, ANTON D L, et al. Superalloys1996 [C]. Warrendale, PA: TMS, 1996. 19– 25.
- [4] WALSTON W S, O'HARA K S, ROSS E W, et al. René N6: third generation single crystal superalloy[A]. KISSINGER R D, DEYE D J, ANTON D L, et al. Superalloys1996 [C]. Warrendale, PA: TMS, 1996. 27– 34.
- [5] SETH B B. Superalloys the utility gas turbine perspective [A]. POLLOCK T M, KISSINGER R D, BOWMAN R R, et al. Superalloys 2000[C]. Warrendale, PA: TMS, 2000. 3– 16
- [6] SHAH D M, DUHL D N. The effect of orientation, temperature and gamma prime size on the yield strength of a single crystal nickel base superalloy [A]. GELL M, KORTOVICH C S, BRICKNELL R H, et al. Superalloys 1984 [C]. Warrendale, PA: TMS, 1984. 105– 114.
- [7] DALAL R P, THOMAS C R, DARDILE. The effect of crystallographic orientation on the physical and mechanical properties of an investment cast single crystal nickel base superalloy [A]. GELL M, KORTOVICH C S, BRICKNELL R H, et al. Superalloys 1984 [C]. Warrendale, PA: TMS, 1984. 185– 197.
- [8] BASOALTO H C, GHOSH R N, ARDAKANI M G, et al. Multiaxial creep deformation of single crystal superalloys: modelling and validation[A]. POLLOCK T M, KISSINGER R D, BOWMAN R R, et al. Superalloys 2000[C]. Warrendale, PA: TMS, 2000. 515– 524.
- [9] 刘金来, 金涛, 张静华, 等. 一种镍基单晶高温合金持久性能的各向异性[J]. 金属学报, 2001, 37(12): 1233– 1237.
- [10] LI J R, ZHONG Z G, TANG D Z, et al. A low-cost second generation single crystal superalloy DD6[A]. POLLOCK T M, KISSINGER R D, BOWMAN R R, et al. Superalloys 2000 [C]. Warrendale, PA: TMS, 2000. 777– 783.
- [11] 李嘉荣, 刘世忠, 王开国, 等. 第二代单晶高温合金 DD6 的拉伸性能[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(7): 272– 275.
- [12] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册第 2 卷, 铸造高温合金[M]. 第 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [13] EBRAHIMI F, YANEVICH J, DELUCA D P. Deformation and fracture of the PWA 1472 superalloy single crystal [J]. Acta Materialia, 2000, 48: 469– 479.
- [14] 刘金来. 一种镍基单晶高温合金的拉伸、持久性能及组织演化[D]. 沈阳: 中科院金属研究所博士论文, 2002.
- [15] 赵金乾. 小角度晶界对单晶高温合金 DD6 力学性能的影响[D]. 北京: 北京航空材料研究院博士论文, 2007.
- [16] 亨利 G, 豪斯特曼 D. 宏观断口学及显微断口学[M]. 曾祥华, 田继平, 柯伟, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1990.

收稿日期: 2008-07-25; 修订日期: 2008-09-20

作者简介: 李嘉荣(1962—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事单晶高温合金研究, 联系地址: 北京市 81 信箱 1 分箱(100095)。E-mail: jiarong.li@biam.ac.cn

具有超高储能密度的新型多孔炭材料

中科院金属研究所沈阳材料科学国家(联合)实验室先进炭材料研究部成会明研究员、李峰副研究员和博士研究生王大伟等与澳大利亚昆士兰大学逯高清教授合作, 在国家自然科学基金委的支持下, 设计并制备出一种局域石墨化三维层次多孔结构的新型多孔炭材料(HPGC)。该材料在高倍率条件下同时具有很高的能量密度和功率密度, 可用作超级电容器的电极材料。

该研究组发现多孔电极的电荷存储能力由多孔结构的离子传输性能(受孔的尺寸、形状及取向等因素影响)、多孔炭的电子导电性以及电解液性质和电解液与炭材料之间的物理化学相互作用等因素所决定。据此他们提出将不同尺度孔(大孔-中孔-微孔)以三维网络形式组装, 同时尽可能获得局域石墨片层结构的电极材料设计思想。

HPGC 结构的诸多特点使其制备十分困难。为此科研人员提出了采用液相无机模板方法, 制备出具有上述三维层次孔结构和局域石墨片层结构的 HPGC 材料。实验结果证明, HPGC 材料比活性炭和有序介孔炭材料具有更加优异的高倍率电化学能量存储与转换能力。优异的高倍率储能性能在水系和有机系电解液中均能实现, 该性能超过美国提出的 PNGV 功率指标。