

Re 对单晶高温合金持久性能的强化作用

Strengthening Effect of Re on Stress Rupture
Properties of Single Crystal Superalloys

骆宇时, 李嘉荣, 刘世忠, 孙凤礼, 曹春晓
(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)
LUO Yu-shi, LI Jia-rong, LIU Shi-zhong, SUN Feng-li, CAO Chun-xiao
(National Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural Materials,
Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 通过对四种不同 Re 含量的单晶高温合金 1100 /140MPa 持久性能研究, 探讨了 Re 对单晶高温合金持久性能的强化作用。结果表明: 合金的稳定性显著影响 Re 对高温持久性能的强化作用。适量 Re 提高单晶高温合金的持久寿命, 过量 Re 降低合金的稳定性, 明显降低 Re 对合金的强化作用。
关键词: 持久寿命; Re; 强化作用
中图分类号: TG132.3+2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2005) 08-0010-05

Abstract: The stress rupture properties of four batches of experimental single crystal superalloys containing various levels of Re were tested at 1100 /140MPa, and the strengthening effects of Re on the stress rupture properties of single crystal superalloys at elevated temperature were investigated. The results showed that stability of single crystal superalloys significantly influenced the strengthening effects of Re on the stress rupture properties. The stress rupture properties of single crystal superalloys were enhanced with appropriate Re addition, the stability of single crystal superalloys were depressed with superfluous Re content, therefore the strengthening effects of Re in single crystal superalloys were restrained obviously.
Key words: stress rupture life; Re; strengthening effect

Re 显著影响单晶高温合金的性能, 其对单晶高温合金的作用得到了广泛关注。学者们研究了 Re 对单晶高温合金组织特征^[1-3]、合金元素扩散行为^[4,5]、TCP 相的形成及析出特征^[6,7]等的影响, 对 Re 影响单晶高温合金蠕变性能的研究^[8,9]也有诸多报道。然而, 关于 Re 对单晶高温合金持久性能的强化作用的研究报道比较少。此外, 由于 Re 昂贵的价格, 过去对 Re 在单晶高温合金持久性能的强化作用的研究大多限于某一种单一成分的合金。为充分研究 Re 在单晶高温合金中的作用, 最大限度发挥 Re 的强化作用, 合理利用 Re 元素, 所以有必要深入研究 Re 对单晶高温合金持久性能的强化作用。本工作通过调整合金 Re 含量, 探讨了 Re 对单晶高温合金持久性能的强化作用。

1 实验方法

实验用合金以第二代单晶 DD6 合金为基础(DD6 合金成分见文献[10]), 调整 Re 含量, 合金 A, B, C, D 的 Re 含量分别为: 0%, 2%, 3%, 4% (质量分数, 下同)。A, B, C 合金 Cr 含量相同, D 合金 Cr 含量

为其它三种合金的一半; 而上述四种合金的其它元素含量基本相同。采用螺旋选晶法在定向凝固炉上进行小炉熔炼及定向凝固, 制得 [001] 取向 ϕ 5 试棒。采用背射劳埃法测定取向, 试棒 [001] 结晶取向与试样主应力轴方向偏离不大于 15°。合金热处理按表 1 所给出的工艺进行。热处理后的试棒加工成标准高温持久性能试样, 在高温持久实验机上进行 1100 / 140MPa 持久实验, 直至断裂。在 S-3500N 扫描电镜上观察合金热处理组织及断裂后组织。

表 1 合金热处理工艺		
Table 1 Process of alloys after heat treatment		
Alloy	Solution treatment	Aging treatment
A	1300 / 1h+ 1310 / 2h+ 1320 / 4h	
B	1290 / 1h+ 1300 / 2h+ 1315 / 4h	
C	1305 / 1h+ 1315 / 2h+ 1325 / 4h	1120 / 4h+ 870 / 32h
D	1315 / 1h+ 1325 / 1h+ 1335 / 2h+ 1345 / 4h	

2 实验结果

图 1 为四种合金热处理后组织, γ 相均匀分布于

γ 基体。从图 1 可见, Re 含量不同的合金, 其组织形态差异明显。随合金 Re 含量的增加, γ 相立方化程度增加, 尺寸趋于细小。

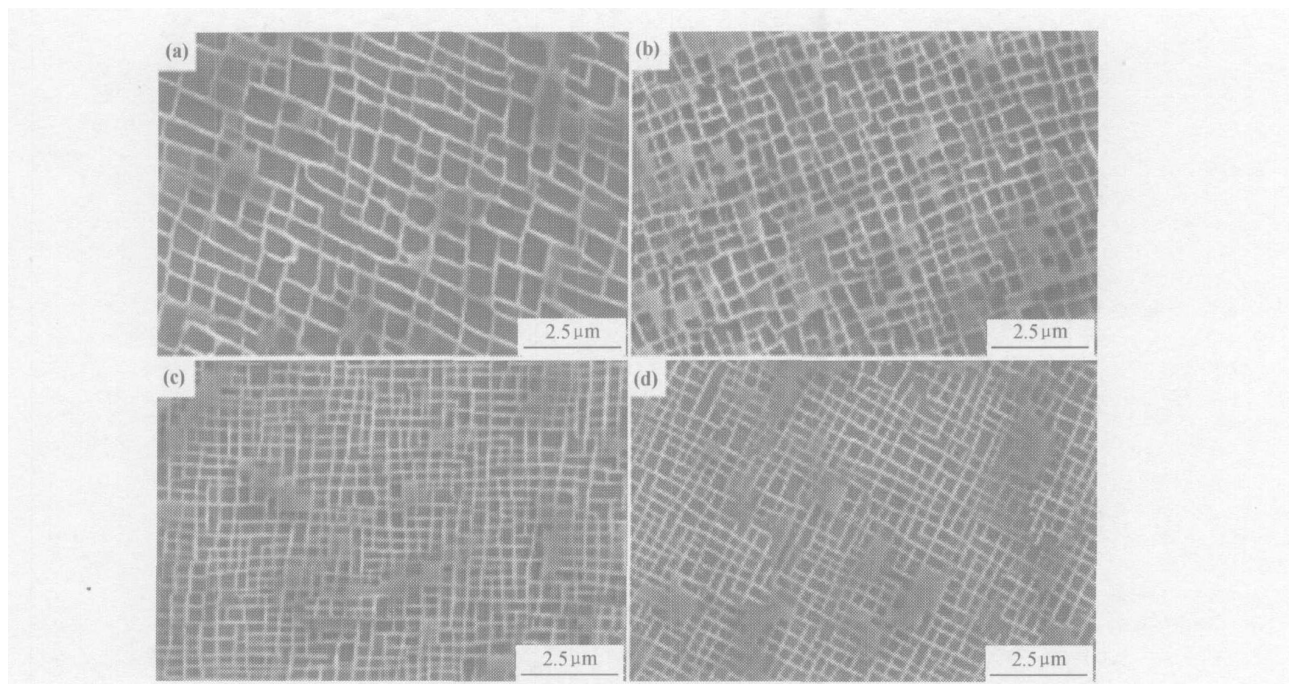


图 1 合金热处理组织 (a) 合金 A; (b) 合金 B; (c) 合金 C; (d) 合金 D

Fig. 1 Microstructures of alloys after heat treatment (a) alloy A; (b) alloy B; (c) alloy C; (d) alloy D

实验合金 1100 / 140MPa 持久寿命见图 2。含 Re 的合金 B, C, D 在 1100 / 140MPa 条件下持久寿命显著高于合金 A。Re 对单晶高温合金高温持久强度的提高有突出贡献。但与合金 B 相比, 合金 C 含 Re 量高, 其持久寿命反而明显降低。另外, 含 Re 量高达 4% 的合金 D 的持久寿命为 150h, 与含 Re 量仅为其一半的合金 B 相比, 其持久寿命增加仅为 20% 左右。

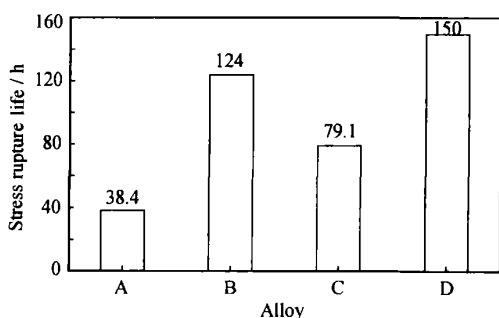


图 2 合金 1100 / 140MPa 的持久寿命

Fig. 2 Stress rupture life of the single crystal superalloys at 1100 / 140MPa

图 3, 图 4 是四种合金持久断裂试样纵截面枝晶干及枝晶间组织。合金 A, B 的断裂组织与所有单晶

高温合金蠕变持久断裂组织特征一样 (见图 3a, b, 图 4a, b), γ 筏排组织已发生一定程度的纵向合并, 并已解筏。对于不含 Re 的合金 A, γ 筏排组织还来不及进行充分纵向合并, 合金持久寿命就已达到极限。与不含 Re 的 A 合金相比, 含 Re 量为 2% 的合金 B, 其 γ 筏排发生了显著的纵向合并, 从而得到较为粗大而更不均匀的 γ 筏排组织。同时, 在合金 B 断裂试样枝晶干组织中发现有少量针状 TCP 析出。与合金 A, B 的断裂组织明显不同的是, 合金 C, D 的断裂组织中典型的 γ 筏排组织已很少 (见图 3c, d, 图 4c, d), 并有大量的 TCP 相。这些 TCP 相将 γ 筏排组织完全分割开, 组织显得零乱而分散。合金 C 与 D 中的 TCP 相形态和分布有较大差异, 合金 C 中 TCP 相主要呈针状、小块状杂乱分布, 而合金 D 中 TCP 相主要呈针状、细条状, 按一定取向规则对称分布。

3 分析讨论

3.1 Re 的作用

Re 是提高单晶高温合金持久性能的关键元素, 少量的 Re 就能够明显改善合金的持久强度^[8]。图 2 的实验结果也证实了 Re 对单晶高温合金持久寿命的突出作用。由于 Re 原子的低扩散系数、高的扩散激

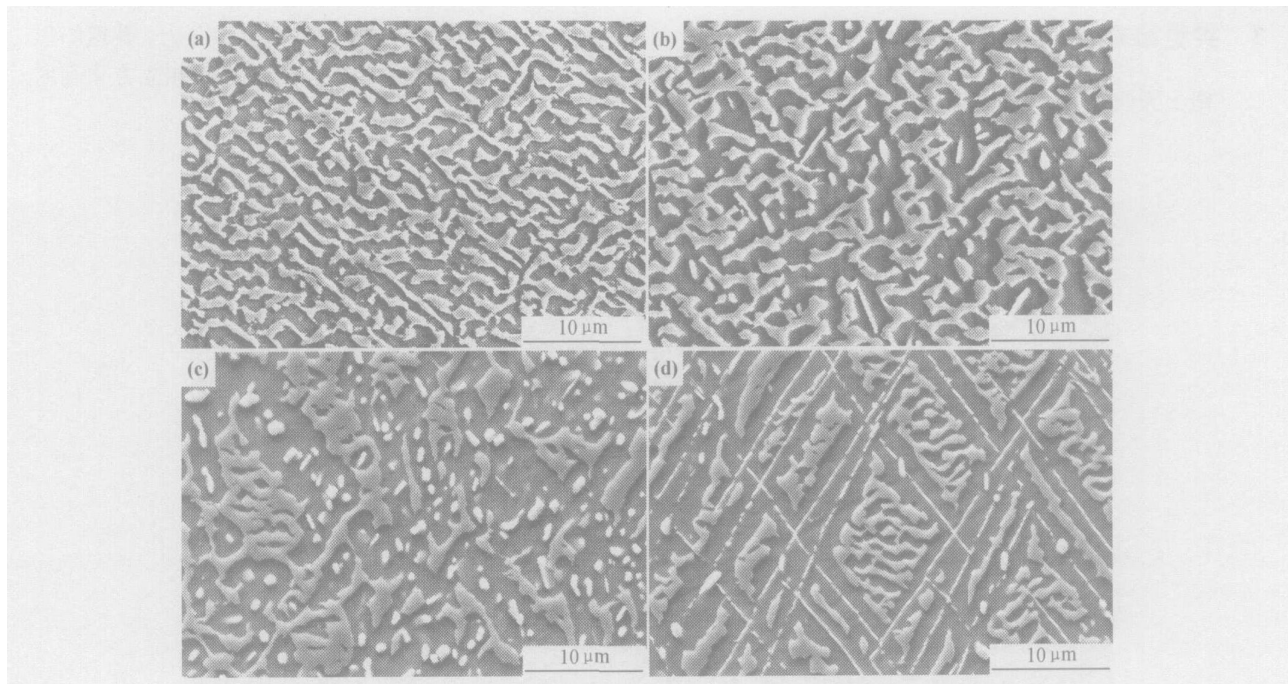


图 3 合金持久断裂试样枝晶干组织 (a) 合金 A; (b) 合金 B; (c) 合金 C; (d) 合金 D

Fig. 3 Micrographs of dendrites in stress rupture specimens (a) alloy A; (b) alloy B; (c) alloy C; (d) alloy D

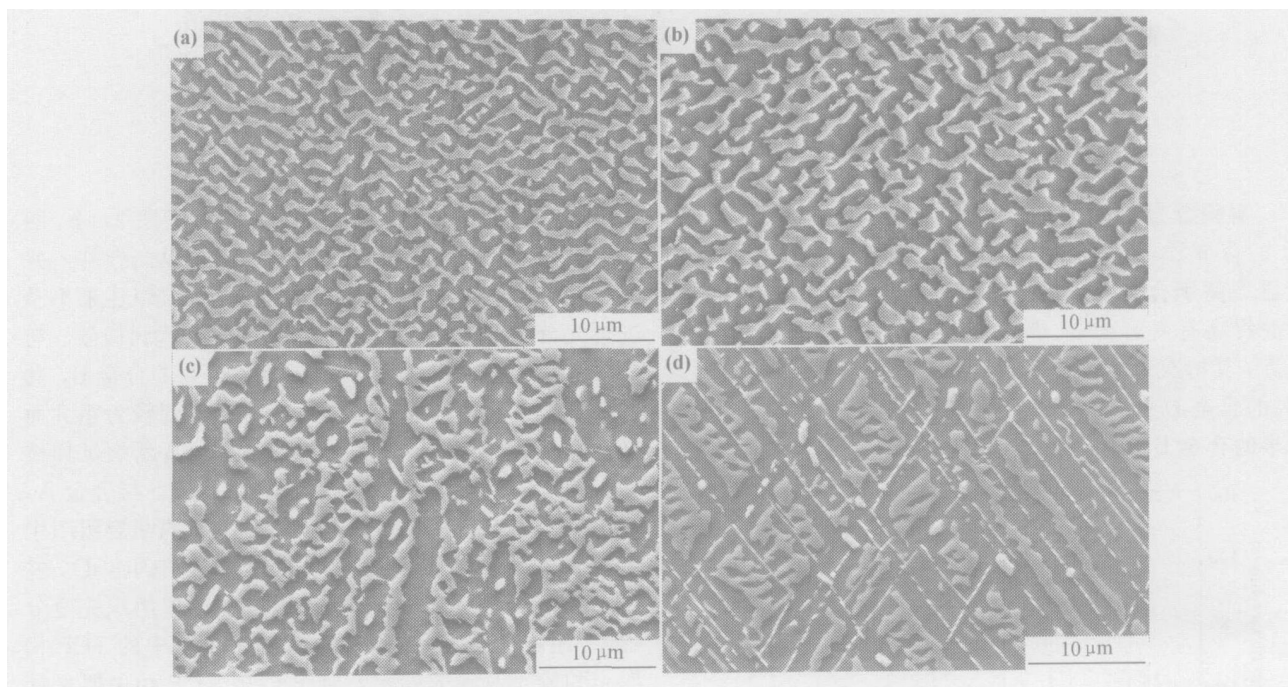


图 4 合金持久断裂试样枝晶间组织 (a) 合金 A; (b) 合金 B; (c) 合金 C; (d) 合金 D

Fig. 4 Micrographs of inter-dendrites in stress rupture specimens (a) alloy A; (b) alloy B; (c) alloy C; (d) alloy D

活能、大的原子半径、在基体中以原子团簇存在等特殊性质^[1-5],使得与不含 Re 的合金 A 相比,含 Re 的合金 B、C、D 的持久性能具有明显优势。含 Re 量仅为 2% 的合金 B,其持久寿命是不含 Re 的合金 A 的三倍多。但是,随着 Re 含量的增加,含 Re 量为 3% 的合金 C,其持久寿命却明显低于合金 B。含 Re 量是

B 合金两倍的合金 D,其持久寿命也仅比合金 B 提高 20% 左右。可以看出,对于合金 C、D 来说,Re 的强化作用并没有得到充分发挥。在四种合金中,尽管合金 D 具有最高的持久寿命,但就其 Re 的含量与持久寿命考虑,Re 在其中的强化作用远不如合金 B。

Re 对单晶高温合金具有突出强化作用的同时,

强烈促进 TCP 相的形成^[7]。四种合金 1100 / 140MPa 持久断裂组织表明, 含 Re 的合金 B, C, D 有不同程度的 TCP 相析出。合金中的 TCP 相是温度和应力共同长时间作用下诱发析出的。合金持久寿命与其 TCP 相的析出及分布见表 2 (TCP 析出量是图象分析仪对每一试样五组不同视场下测算结果的均值)。在 1100 / 140MPa 条件下, 不含 Re 的合金 A 经 38.4h 后无 TCP 相析出; 含 Re 量为 2% 的合金 B 经 124h 后仅在枝晶干区域析出少量 TCP 相; 而含 Re 量分别为 3%, 4% 的合金 C 和 D, 在枝晶干和枝晶间

都析出较多的 TCP 相(见图 3, 4)。合金 D 经 150h 后, 在枝晶干析出约 6.11% 的 TCP 相。而合金 C 仅经 79.1h 持久蠕变后, 就在枝晶干析出高达 5.98% 的 TCP 相。可见, 对于合金 C, D 来说, Re 的高含量严重影响了合金在高温持久条件下的稳定性。尤其是合金 C, Re 与 Cr 含量同时较高, 进一步降低了其稳定性, 导致了在较短的持久实验条件下较多 TCP 相的析出。

3.2 TCP 相的影响

有研究认为, 单晶高温合金中少量 TCP 相对合

表 2 合金 Re 含量与 TCP 相析出量
Table 2 Re contents and volume fraction of TCP phases of the alloys

Alloy	Mass fraction of Re/ %	Stress rupture life/ h	Volume fraction of TCP/ %	
			Dendrite	Inter-dendrite
A	0	38.4	0	0
B	2	124	1.09	0
C	3	79.1	5.98	2.74
D	4	150	6.11	3.88

金的蠕变性能影响不大^[11]。表 2 数据表明, 较多的 TCP 相对合金 C, D 的持久寿命影响较大。TCP 相的析出, 消耗了对合金强度起关键作用的合金元素。同时, 析出的 TCP 相将合金中对位错运动起主要阻碍作用的 γ 筏排组织分割开, 削弱了 γ 筏排组织对位错的阻碍作用。另外, TCP 相的析出, 使位错受阻于 TCP 相, 位错在 TCP 相处产生塞积, 最终微裂纹沿

TCP 相形成, 并且, TCP 相为裂纹扩展提供了方便通道, 裂纹易沿 TCP 相扩展。图 5 是四种合金持久断裂组织中形成的裂纹。很明显, 四种合金裂纹形成特征不同。合金 A, B 裂纹源主要在铸造缺陷或扩散形成的空位集聚处形成, 而合金 C, D 的裂纹源在 TCP 相析出处形成(见图 5c, d)。这充分证明, 较多 TCP 相的析出, 裂纹沿 TCP 相形成及扩展是导致含 Re 量较

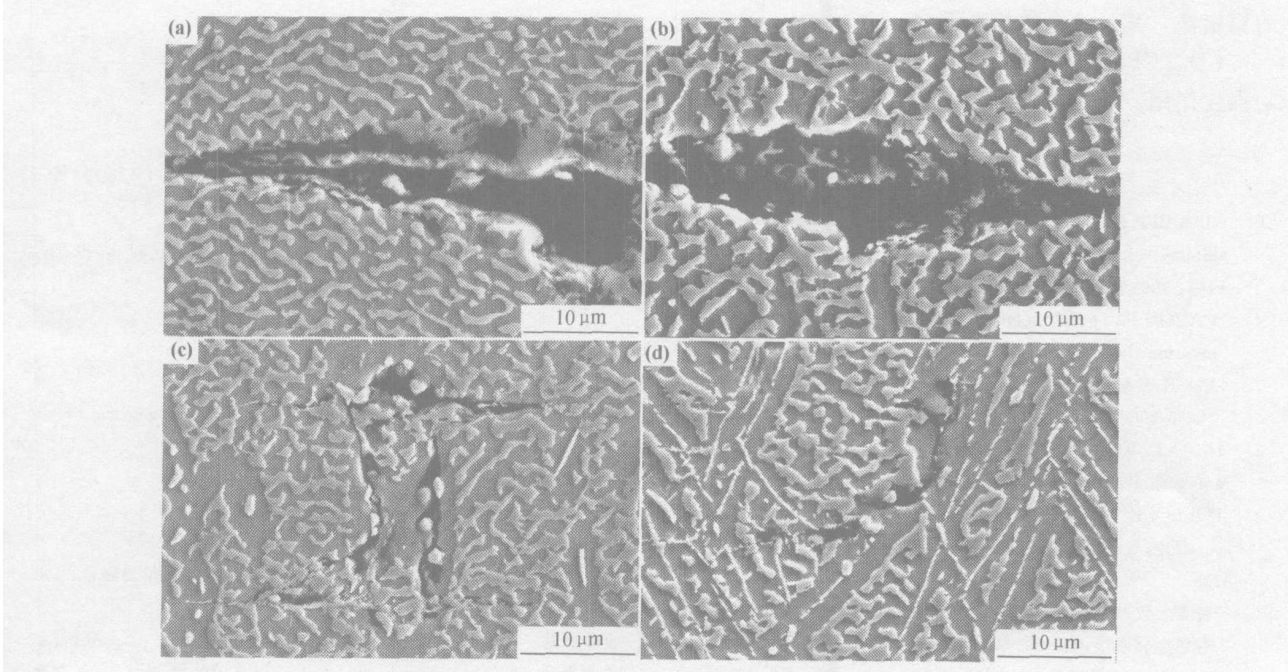


图 5 合金的裂纹特征 (a) 合金 A; (b) 合金 B; (c) 合金 C; (d) 合金 D

Fig. 5 Characteristic of cracks (a) alloy A; (b) alloy B; (c) alloy C; (d) alloy D

高的合金 C 持久寿命明显低于含 Re 量仅为 2% 的 B 合金的主要原因,也是含 Re 量高达 4% 的合金 D 相对合金 B 持久寿命提高不多的原因之一。

3.3 Re 强化作用的发挥

1100 /140MPa 下,与合金 C 相比,合金 D 的持久寿命比其高近一倍。合金 D 较高的持久寿命原因除了其具有较高含量的 Re 的作用外,重要原因之一是合金 D 具有比合金 C 低的 Cr 含量,使其 TCP 相析出倾向低于合金 C,合金稳定性增加,保证了 Re 在较长时间内对合金的强化作用。与合金 C 一样,合金 D 中 TCP 相的析出,消耗了对合金起重要强化作用的元素,使这些元素的强化作用,尤其是 Re 的强化作用未充分发挥。相对于合金 C, D,合金 B 具有最高的稳定性,在 1100 /140MPa, 124h 后仅析出 1.09% 的 TCP 相, Re 元素的强化作用得到了充分发挥。

综上所述,合金的稳定性是影响合金高温持久强度的关键因素之一,也是影响 Re 元素强化作用的重要因素。Re 可以显著提高单晶高温合金的高温强度,但如果合金没有优异的稳定性, Re 的强化作用也无从发挥。可见,保证合金的稳定性,是充分发挥 Re 的强化作用,获得优异高温持久性能的关键。

4 结论

(1) 单晶高温合金中 Re 细化 γ 组织,提高 γ 的立方化程度。

(2) Re 显著影响单晶高温合金的持久性能。适量 Re 提高单晶高温合金的持久寿命;过量 Re 降低合金的稳定性,减少合金的持久寿命。

(3) TCP 相的析出,弱化了 Re 对单晶高温合金的强化作用。

参考文献

- [1] GIAMEI A F, ANTON D L. Rhenium additions to a Ni-base superalloy: effect on microstructure [J]. Metall Trans A, 1985, (16): 1997–2005.
- [2] CARON P. High γ solvus new generation nickel-base superalloys for single crystal turbine blade applications [A]. POLLOCK T M, KISSINGER R D, BOWMAN R R, et al. Superalloys 2000 [C]. Pennsylvania: Warrendale, 2000. 737–746.
- [3] HINO T, KOBAYASHI T, KOZUMI Y, et al. Development of a new single crystal superalloy for industry gas turbines [A]. POLLOCK T M, KISSINGER R D, BOWMAN R R, et al. Superalloys 2000 [C]. Pennsylvania: Warrendale, 2000. 729–738.
- [4] 曾强, 马书伟, 郑运荣. Re 对 Al 在 Ni 中扩散的影响 [J], 中国有色金属学报, 2003, (8): 899–904.
- [5] CHONG LONG FU, ROGER REED, ANDERSON JANOTTI, et al. On the diffusion of alloying elements in the nickel-base superalloys [A]. GREEN K A, POLLOCK T M, HARADA H,

et al. Superalloys 2004 [C]. Pennsylvania: Warrendale, 2004. 867–876.

- [6] DAROLIA R, LAHRMAN D F, FIELD R D. Formation of topologically close packed phase in nickel-based single crystal superalloys [A]. REICHMAN S, DUHL D N, MAURER G, et al. Superalloys 1988 [C]. Pennsylvania: Warrendale, 1988. 255–264.
- [7] RAE C M F, KARUNARATNE M S A, SMALL C J, et al. Topologically close packed phases in an experimental rhenium-containing single crystal superalloy [A]. POLLOCK T M, KISSINGER R D, BOWMAN R R, et al. Superalloys 2000 [C]. Pennsylvania: Warrendale, 2000. 767–776.
- [8] FOSTER S M, NIELASEN T A, NAGY P. Enhanced rupture properties in advanced single crystal superalloys [A]. REICHMAN S, DUHL D N, MAURER G, et al. Superalloys 1988 [C]. Pennsylvania: Warrendale, 1988. 245–254.
- [9] LI Jia-rong, TANG Ding-zhong, LAO Ring-ling, et al. Effects of rhenium on creep rupture life of a single crystal superalloys [J]. J Mater Sci, 1999, (1): 53–57.
- [10] LI Jia-rong, ZHONG Zheng-gang, TANG Ding-zhong, 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]. Pennsylvania: Warrendale, 2000. 777–783.
- [11] WALSTON W S, O'HARA K S, ROSS E W, et al. Rene N6: third generation single crystal superalloy [A]. KISSINGER R D, DEYE D J, ANTON D L et al. Superalloys 1996 [C]. Pennsylvania: Warrendale, 1996. 27–34.

收稿日期: 2005-04-14; 修订日期: 2005-06-10

作者简介: 骆宇时 (1978–), 男, 博士研究生, 从事单晶高温合金方面的研究, 联系地址: 北京市 81 信箱 1 分箱 (100095)。

* * * * *

(上接第 9 页)

(3) 同一温度下弹性模量随应变率的增大而升高。

(4) 同一应变率下弹性模量、应变率敏感性随温度的升高而降低。

参考文献

- [1] MEISSNER J and HOSETTLER J. A new elongational rheometer for polymer melts and other viscoelastic liquids [J]. J Rheol Acta, 1994, 33: 1–21.
- [2] 杜灵玄, 邵毓俊, 史伟琪. 塑料测试 [M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1992.
- [3] 许风和. 高分子材料力学试验 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.

收稿日期: 2005-02-10; 修订日期: 2005-06-06

作者简介: 颜悦 (1966–), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为透明材料, 联系地址: 北京市 81 信箱 9 分箱 (100095)。