

文章编号: 1004-0609(2005)11-1655-05

Re 对单晶高温合金高温高应力持久性能的影响^①

骆宇时, 李嘉荣, 刘世忠, 孙凤礼, 韩 梅, 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)

摘 要: 基于 DD6 合金成分, 调整合金 Re 与 Cr 含量, 浇注 5 种不同 Re 含量单晶高温合金。通过对合金在 1 038 ℃, 248 MPa 持久性能的测试及对合金断裂组织扫描、透射电镜观察与分析, 探讨了 Re 对单晶高温合金高温高应力持久性能的影响。结果表明: 在高温高应力条件下, 随合金中 Re 含量的单独增加, 合金高温高应力持久寿命提高, 而单位质量 Re 元素的强化作用减弱; 合金 Cr 含量对合金高温高应力持久寿命有显著影响, Re 含量增加的同时适当降低合金 Cr 含量, 可使合金获得较高的持久寿命。

关键词: 铼; 持久寿命; DD6 合金; 强化效应

中图分类号: TG 146.4; TG 132.3

文献标识码: A

Effects of Re on stress rupture properties of single crystal superalloys at elevated temperature and high stress

LUO Yurshi, LI Jiarong, LIU Shirzhong, SUN Feng-li, HAN Mei, CAO Chun-xiao

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

Abstract: The effects of Re on stress rupture properties of high refractory content single crystal Ni-base superalloys at elevated temperature and high stress were investigated. Based on the compositions of DD6 alloy, five experimental single crystal superalloys containing varied levels of Re and Cr were produced. High temperature stress rupture tests were carried out at 1 038 ℃ with an engineering stress of 248 MPa. The stress rupture life is found to be remarkably improved with Re addition but the strengthening effect of Re is depressed with increasing Re content only, and alloys can achieve rather longer stress rupture life by increasing Re content and decreasing Cr content at the same time.

Key words: rhenium; stress rupture life; DD6 alloy; strengthening effect

随着航空发动机进口温度和效率的不断提高, Re 作为单晶高温合金获得优异高温性能的关键元素, 已经成为发动机叶片用材料——单晶高温合金不可缺少的添加元素。Re 对单晶高温合金的作用得到了广泛关注和重视。不同研究者研究了 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也有报道^[8, 9]。然而, 关于 Re 对单晶高温合金高温高应力

条件下的持久性能影响的研究报道并不多。为充分研究 Re 在单晶高温合金中的作用, 最大限度发挥 Re 的强化效应, 合理利用 Re 元素, 有必要深入研究 Re 对单晶高温合金高温高应力持久性能的影响。据此, 本文作者进行了这方面的研究。

1 实验

实验用合金成分是以第二代单晶 DD6 合金成

① 收稿日期: 2005-07-15; 修订日期: 2005-08-20

作者简介: 骆宇时(1978-), 男, 博士研究生

通讯作者: 骆宇时, 电话: 010-62496338; E-mail: yushiluo.student@sina.com

分为基础(DD6 合金成分见文献[10]), 调整 Re 与 Cr 含量, 各合金 Re 与 Cr 的含量见表 1。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 $d15\text{ mm}$ 试棒。采用背射劳埃法测定晶体取向, 用于实验的试棒其[001]结晶取向与试样主应力轴方向偏离不大于 10° 。热处理后的试棒加工成标准高温持久性能用试样, 在高温持久试验机上进行 $1\ 038\text{ }^\circ\text{C}$, 248 MPa 持久实验。在 S-3500N 扫描电镜上观察断裂后组织。在 JEM-2000FX 透射电镜下观察断裂试样薄膜, 测定合金断裂组织中 TCP 相成分。

表 1 5 种合金中 Re 和 Cr 含量

Table 1 Contents of Re and Cr for studied alloys (mass fraction, %)

Alloy	Re	Cr
A	0	4.3
B	2.0	4.3
C	3.0	4.3
D	4.0	4.3
E	4.0	2.0

2 结果与分析

实验合金在 $1\ 038\text{ }^\circ\text{C}$, 248 MPa 条件下持久寿命见图 1。很明显, 含 Re 的 B、C、D、E 合金于 $1\ 038\text{ }^\circ\text{C}$, 248 MPa 的持久寿命明显高于不含 Re 的合金 A。B 合金的持久寿命达到了 A 合金的两倍多, C、D 合金持久寿命达到了 A 合金的近 3 倍, 而 E 合金持久寿命达到了 A 合金的近 6 倍。显然, Re 的添加是 B、C、D、E 合金持久寿命显著提高的关键原因。与合金 B 相比, Re 含量分别增加到 3.0%、4.0% 的 C、D 合金, 其持久寿命提高并不多, 这表明, 单独增加合金 Re 含量对合金持久寿命的提高很有限。与合金 D 相比, 含 Re 量同样为 4.0% 的合金 E 持久寿命高达 98.5 h , 其持久寿命提高近一倍。就 D、E 合金成分而言, Cr 含量的不同是其唯一差异, 这表明合金中的 Cr 含量对合金高温持久寿命有显著影响, Cr 含量的不同是两合金持久性能差异明显的主要原因。

图 2 所示为 5 种合金在 $1\ 038\text{ }^\circ\text{C}$, 248 MPa 条件下持久断裂试样纵截面组织。在图 2 中, 所有合金 γ' 相都已充分筏排化。对于 A 合金, 断裂试样中的 γ' 筏排组织完善而整齐, 显得粗大而且长; 而 B 合金断裂试样中的 γ' 筏排组织稍紊乱, 显得细小而

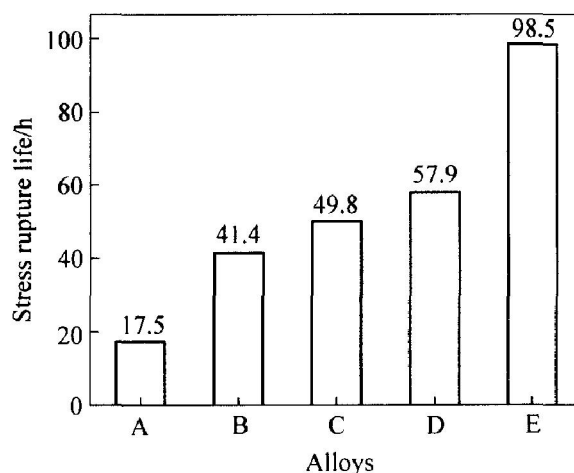


图 1 合金在 $1\ 038\text{ }^\circ\text{C}$, 248 MPa 条件下的持久寿命

Fig. 1 Stress rupture lives of single crystal superalloys at $1\ 038\text{ }^\circ\text{C}$ under 248 MPa

且短。在图 2(c)~2(e) 中, C、D、E 合金的 γ 、 γ' 组织都显得零乱而且分散, γ' 筏排组织已发生较大程度的纵向合并, 并已解筏。同时, 在合金 C、D、E 断裂试样组织中发现有针状和片状 TCP 相析出。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' 筏排组织变少, 析出的 TCP 相将 γ' 筏排组织分割开, γ' 筏排组织显得零乱而分散。

3 讨论

3.1 Re 的作用

Re 显著提高单晶高温合金高温性能^[8, 11]。由图 1 可见, Re 对单晶高温合金高温持久寿命有突出作用。图 1 还表明, 随 Re 含量的增加, 合金持久寿命增加。但由合金 B、C、D 的比较可知, 相对于合金 B, 随 Re 含量的单独增加, 合金 C、D 持久寿命的增加并不多, 如图 3 所示。B、C、D 合金中单位 Re 含量对持久寿命的提高作用依次减小。很明显, 对于合金 C、D, Re 的强化作用未得到充分发挥。对于合金 E, Cr 含量的降低, 保证了 Re 的强化效应较充分发挥, 使单位质量 Re 元素对持久寿命的提高作用显著增加。

对各合金持久断裂试样组织观察表明, 在合金 C、D、E 枝晶干、枝晶间都有部分 TCP 相析出。从表 2 可看出, 随合金 Re 含量的单独增加, 断裂组织中 TCP 相析出量增加。而对于增加 Re 含量同时降低 Cr 含量的合金 E, 其断裂组织中 TCP 相析出量明显减少。这说明, 合金 Re 含量单独增加, 合金

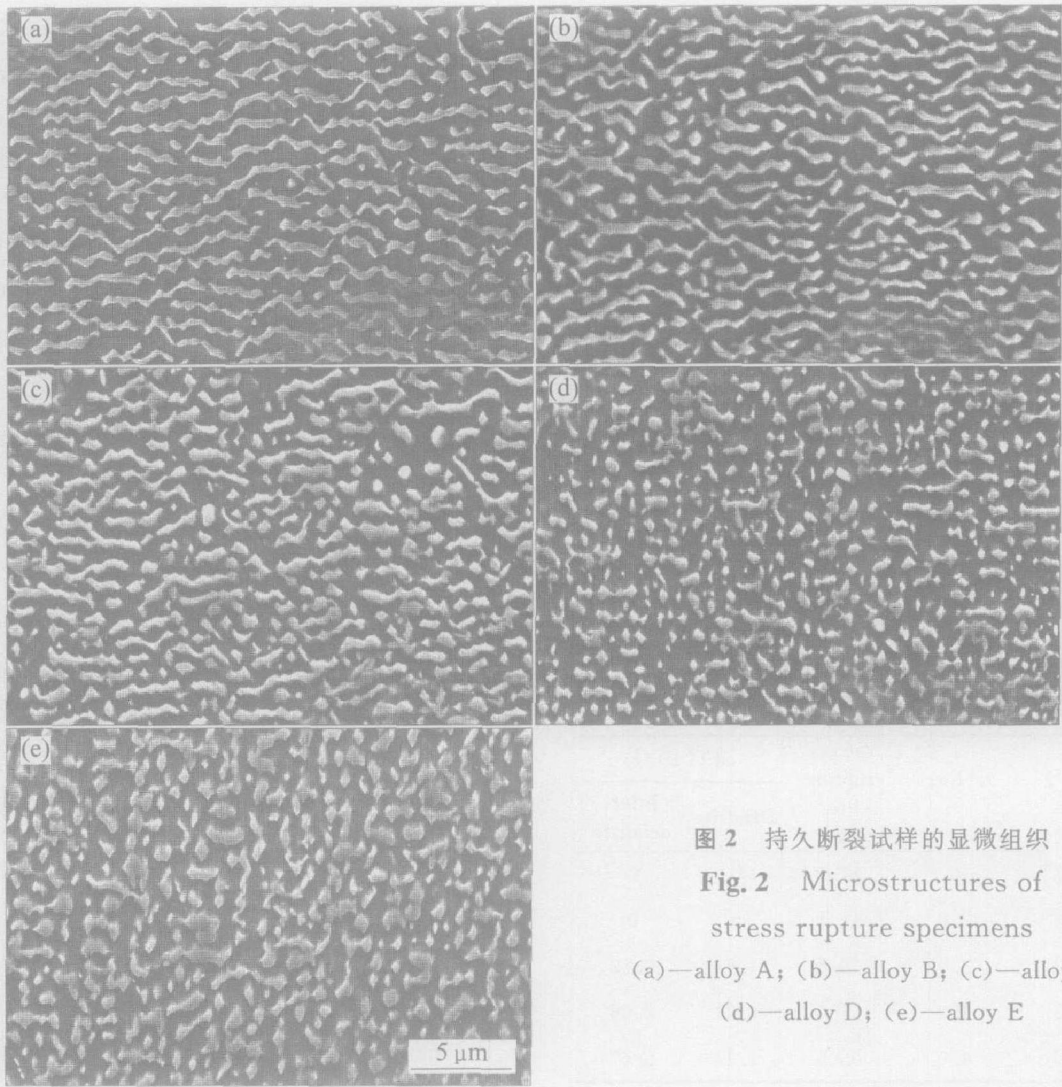


图 2 持久断裂试样的显微组织
Fig. 2 Microstructures of stress rupture specimens
(a)—alloy A; (b)—alloy B; (c)—alloy C; (d)—alloy D; (e)—alloy E

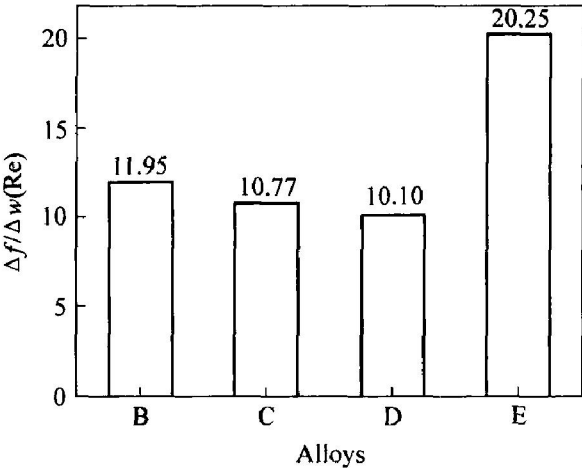


图 3 单位质量 Re 元素对合金持久寿命的提高作用
Fig. 3 Enhancement effect of unit Re on stress rupture lives (*f*)

组织稳定性降低, Cr 含量降低, 合金组织稳定性增加。

Re 对单晶高温合金具有突出强化效应的同时,

强烈促进 TCP 相的形成^[7]。合金于 1 038 ℃, 248 MPa 条件下的持久断裂组织表明, 含 Re 的 C、D、E 合金有不同程度的 TCP 相析出。合金持久寿命与其 TCP 相析出及分布见表 2。在 1 038 ℃, 248 MPa 条件下, 不含 Re 的合金 A 和含 Re 量为 2% 的合金 B 断裂组织中无 TCP 相析出; 而含 Re 量分别为 3% 合金 C、及 4% 的合金 D 和 E, 在枝晶干和枝晶间都析出较多的 TCP 相。合金 C 在枝晶干析出约 1.64% 的 TCP 相; 合金 D 在枝晶干析出高达 6.21% 的 TCP 相; 而降低了 Cr 含量的合金 E 断裂试样中 TCP 相析出量明显减少。可见, 对于 C、D、E 合金, Re 的高含量影响了合金高温持久条件下的组织稳定性。尤其是 C、D 合金, 高的 Re 含量的同时含高的 Cr 量, 进一步降低了其组织稳定性, 导致了在较短的持久时间内较多 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 相对合金的蠕变性能影响不大^[12, 13], 表 2 的数据表明, 一

定量的 TCP 相析出对合金 C、D 的高温高应力持久寿命有明显影响。表 3 所列为 C、D、E 合金 TCP 相成分,相成分数据表明,TCP 相的析出,消耗了对合金高温强度起关键作用的合金元素如 W、Re 等,从而贫化了合金相中高熔点元素。基体中高熔点元素的贫化使两相间合金元素的扩散加剧,弱化了 γ 及两相界面。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(图 2(c)、2(d)),削弱了 γ 筏排组织对位错的阻碍作用。另外,TCP 相的析出,可使位错受阻于 TCP 相,并塞积,最终微裂纹易沿 TCP 相形成。并且,TCP 相为裂纹扩展提供了通道,裂纹易沿 TCP 相扩展。可以推测:大量 TCP 相的析出,是导致含 Re 量较高的合金 C、D 持久寿命相对 B 合金提高不多的主要原因。

表 2 合金中 Cr、Re 含量与 TCP 析出量

Table 2 Cr and Re contents and volume fractions of TCP phases of alloys					
Alloy	$w(\text{Cr})/\%$	$w(\text{Re})/\%$	Stress rupture life/h	$\varphi(\text{TCP})/\%$	
				Dendrite	Interdendrite
A	4.3	0	17.5	0	0
B	4.3	2.0	41.4	0	0
C	4.3	3.0	49.8	1.64	0.62
D	4.3	4.0	57.9	6.21	2.06
E	2.0	4.0	98.5	2.14	0.67

表 3 合金 TCP 相的成分

Table 3 Compositions of TCP phases (mass fraction, %)				
Alloy	Al	Cr	Co	W
C	4.61	5.60	9.74	27.65
D	4.42	5.80	9.68	29.32
E	3.24	1.87	7.17	15.31
Alloy	Mo	Ta	Re	Ni
C	6.30	1.62	21.50	Bal.
D	6.92	1.51	23.19	Bal.
E	5.66	5.23	17.14	Bal.

3.3 合金组织稳定性

与合金 D 相比,在 1038 °C, 248 MPa 条件下,合金 E 持久寿命提高了近一倍。合金 E 更高的持久寿命是由于合金 E 具有比合金 D 低一倍的 Cr 含量,使其 TCP 相析出倾向明显弱于合金 E,合金组织稳定性增加,TCP 相析出时间延迟,保证了 Re 在较长时间内对合金强化效应的发挥。与合金 D 一

样,合金 C 中 TCP 相的析出,消耗了大量对合金起重要固溶强化效应的高熔点、低扩散元素,使这些元素的强化效应,尤其是 Re 的强化效应未充分发挥合金就过早断裂。相对于合金 C、D,合金 B、E 具有较高的组织稳定性,在 1038 °C, 248 MPa 条件下,Re 元素在其中的强化效应得到较充分发挥。

从合金 B、C、D、E 的比较可知,合金的组织稳定性是影响合金高温持久寿命的重要因素之一,也是影响 Re 元素强化效应发挥的重要因素。Re 可以显著提高单晶高温合金的高温蠕变强度,但合金没有优异的组织稳定性,Re 的强化效应也无从发挥。在第四代单晶高温合金 TMS-138 中加入 Ru 的设计目的即是通过 Ru 抑制含 Re 合金中 TCP 相的析出,保证合金的组织稳定性,以保证 Re 元素强化效应的充分发挥,从而获得优异的高温持久性能^[14]。对具有优于 TMS-138 高温蠕变性能的 TMS-162 合金的最新研究表明,合金中的 Ru 并不是合金的强化元素,其对蠕变强度显著提高的贡献来自于对合金中相的稳定作用^[15]。可见,保证合金的组织稳定性,是充分发挥 Re 的强化效应、获得优异高温高应力持久性能的关键。

4 结论

1) 单晶高温合金的 Re 含量显著影响合金的高温高应力持久性能。合金 Re 含量在一定范围内的增加,使合金高温高应力持久寿命增加。

2) 在高温高应力条件下,随合金 Re 含量的单独增加,单位质量 Re 元素的强化作用减弱。适当调整合金成分,可较大程度提高 Re 对合金的强化作用。

3) Re 促进 TCP 相的析出,弱化 Re 在单晶高温合金高温高应力持久过程中的强化作用。

4) Re 含量增加的同时,适当降低合金 Cr 含量,可使合金获得较高的持久寿命。

REFERENCES

- [1] Giamei A F, Anton D L. Rhenium additions to a Ni-base superalloy: effect on microstructure[J]. Metall Trans A, 1985, A16: 1997-2005.
- [2] Caron P. High γ solvus new generation nickel-base superalloys for single crystal turbine blade applications [A]. Superalloys 2000[C]. Pennsylvania: Warrendale, 2000. 737-746.

- [3] Hino T, Kobayashi T, Koizumi Y, et al. Development of a new single crystal superalloy for industry gas turbines[A]. 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, 13(4): 899 - 902.
ZENG Qiang, MA Shu-wei, ZHENG Yun-rong. Influence of rhenium on the diffusion behavior of aluminum in nickel[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(4): 899 - 902.
- [5] Fu C L, Reed R, Janotti A, et al. On the diffusion of alloying elements in the nickel-base superalloys[A]. 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]. 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]. 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]. 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]. Superalloys 2000[C]. Pennsylvania: Warrendale, 2000. 777 - 783.
- [11] Rüsing J, Wanderka N. Rhenium distribution in the matrix and near the particle-matrix interface in a model Ni-Al-Ti-Re superalloy[J]. Scr Mater, 2002, 46: 235 - 242.
- [12] Walston W S, O'Hara K S, Ross E W, et al. Rene N6: third generation single crystal superalloy[A]. Superalloys 1996 [C]. Pennsylvania: Warrendale, 1996. 27 - 34.
- [13] Erickson G L. The Development and Applications of CMSX-10[A]. Superalloys 1996[C]. Pennsylvania: Warrendale, 1996. 35 - 44.
- [14] Koizumi Y, Kobayashi T, Yokokawa T, et al. Development of a new single crystal superalloy TMS-138[A]. The 2nd International Symposium on High Temperature Materials 2001[C], Tsububa: NIMS, 2001. 30 - 36.
- [15] Koizumi Y, Kobayashi T, Yokokawa T, et al. Development of next-generation Ni-base single crystal superalloys[A]. Superalloys 2004[C]. Pennsylvania: Warrendale, 2004. 35 - 43.

(编辑 陈爱华)