

化学法细化高温合金 K4169 的低周疲劳性能研究

Effect of Structure Refinement by Addition of Refiner on
LCF Properties of Cast Superalloy K4169

黄太文¹, 刘 林¹, 杨爱民², 熊玉华³, 赵志龙¹

(1 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072;

2 西安石油学院机械系, 西安 710065; 3 清华大学机械工程系, 北京 100084)

HUANG Tai-wen¹, LIU Lin¹, YANG Ai-min², XIONG Yu-hua³, ZHAO Zhi-long¹

(1 State Key Laboratory of Solidification Processing,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2 Department of Mechanical Engineering, Xi'an Petroleum Institute, Xi'an 710065, China;

3 Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要:采用一种新型中间合金复合细化剂,在常规生产工艺条件下对高温合金 K4169 铸件进行了晶粒细化。测试了常规工艺和细晶铸造工艺两种试样的常温和中温(700℃)条件下的低周疲劳性能。结果表明,这一新型工艺方法能有效细化高温合金 K4169 晶粒。细晶试样的室温低周疲劳性能有较大的提高,且数据的分散性有所改善;在中温时,疲劳寿命的优劣和疲劳应变幅有关:在小应变幅条件下,细晶仍然有较高的疲劳寿命,在大应变幅条件下,细晶疲劳寿命比粗晶有所降低,但数据的稳定性较好。

关键词:细化剂;晶粒细化;高温合金;低周疲劳性能

中图分类号:TG113.25; TG146.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4381(2004)11-0022-06

Abstract: The ingots of cast superalloy K4169 was refined with the addition of a trace of intermetallic compounds to the melt under conventional casting condition. The low cycle fatigue(LCF) properties were tested both for normal and refined test bars. The results show that the grains can be refined to ASTM 1.7. As a result, LCF life of refined test bars is 1.2~2 times compared to that of normal ones at room temperature. As a contrast, LCF properties at 700℃ are different, depending on the total strain amplitude. LCF life for refined samples are superior than coarse ones at small total strain amplitude, and inferior at high total strain amplitude. Fatigue data fluctuation is improved of fined grains at all conditions.

Key words: refiner; grain refinement; superalloy; LCF

整体细晶铸造的飞机发动机高温合金涡轮叶片、涡轮盘从 20 世纪 80 年代开始在国外受到重视,并在一些现代飞机发动机上得到应用^[1]。这些中温部件由于采用细等轴晶,其使用性能得到明显的改善。

获得整体细晶主要有振动法、化学法、热控法三种工艺^[2]。化学法由于工艺简单、细化效果好、成本低等优点而得到关注。对于高温合金,由于一直没有解决化学细化剂引入夹杂、影响铸件的力学性能等问题^[3],其应用一直没有什么进展。熊玉华等^[4]首先选用高温合金本身元素组成的中间合金作为化学细化剂,基本解决了引入夹杂的问题,而且细化效果良好,从而为化学法细化高温合金的应用奠定了基础。

细晶铸造可以大大提高高温合金铸件的拉伸性

能^[5,6]、持久性能^[7]和低周疲劳性能^[2,6]。对于细晶高温合金最关键的性能指标——低周疲劳性能,这方面的报道很少^[7]。因此化学法细晶铸造对疲劳性能影响的研究对该技术的完善尤为重要。

本工作在前期优化细化工艺参数工作^[8,9]的基础上,选用其中有效的一种新型复合细化剂和优化的工艺参数对 K4169 高温合金细化,测试了不同条件下的低周疲劳性能,对其疲劳寿命及断口进行了分析,以期全面的了解化学细化工艺对高温合金低周疲劳性能的影响。

1 实验材料及方法

实验所用的母合金为 K4169,其化学成分(质量

分数/%)如下: Ni52, Mo 3.05, Nb 5.3, Cr 18.4, Al 0.55, Ti 1.05, Si 0.2, Fe 余量。实验用化学细化剂为某两种中间合金组成的复合细化剂,质量比为 1:1。其参数如表 1 所示。细化剂颗粒 30~40 μm 。

表 1 制备的细化剂及其相关参数
Table 1 Refiners to be prepared and the relative parameters

| Refiner | Crystal structure | Density /(g·cm ⁻³) | Lattice registry |
|----------------|-------------------------|--------------------------------|------------------|
| A ₁ | (ClCs)CP2 | 8.5 | <2% |
| A ₂ | (AuCu ₃)CP4 | 7.6 | <1% |

试样在 ZG200 真空中频感应电炉(坩埚容量为 5kg)熔铸。细晶试样工艺过程是:加热到 1550℃ 熔化母合金,待熔化完全后,温度降到 1400℃ 保温,然后加入细化剂,用电磁搅拌,保温 23min 后浇铸。常规试样:加热 1550℃ 熔化后,1400℃ 保温 2~3min,直接浇铸,随炉冷却。根据国标截点法测定晶粒尺寸、用面积计量法测定断面等轴晶比例。低周疲劳实验是在

一台 100kN 的 Mayes 机械伺服疲劳试验机上进行。为了对比工艺对性能的影响,减少影响因素的水平,所有试样的实验状态为铸态。实验环境介质为静态空气,实验温度为室温和 700℃。采用全反向轴向总应变控制拉-压加载方式,所选用的名义总应变幅一般在 $\pm(0.2\% \sim 0.8\%)$ 范围内,实验波形为三角波,应变比为 $R = -1$ 。各个实验均进行至样品断裂时为止。在 Cambridge S-360 形扫描电子显微镜上对疲劳失效样品进行断口分析,以确定疲劳断裂的形式及特点。

2 实验结果及分析

2.1 晶粒细化工艺下的晶粒组织及参数

两种工艺条件下晶粒的宏观组织如图 1 所示。两种试样的宏观组织参数如表 2 所示。可以看到,该种细化剂细化效果良好,晶粒尺寸为常规工艺的 1/10,等轴晶的比例也有很大的提高,从 56% 变成 96%。

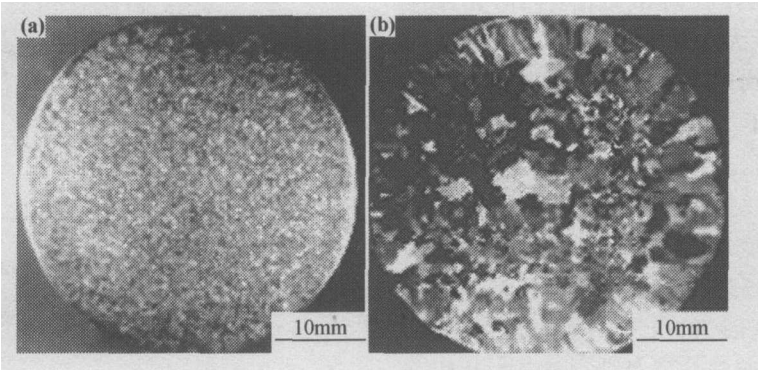


图 1 宏观晶粒组织 (a)细晶铸造; (b)普通铸造
Fig. 1 Macroscopic grain structures (a)fine grain process ; (b)conventional process

表 2 晶粒组织参数和拉伸性能
Table 2 Characteristic parameters of grain structures and tensile properties

| Process | Average grain size /mm | ASTM grade | Proportion of equixed grain/% | Tensile property at room temperature | | | | Tensile property at 700℃ | | | |
|----------------------|------------------------|------------|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------|-----------|--------------------------|---------------------|-------------|-----------|
| | | | | σ_b /MPa | $\sigma_{0.2}$ /MPa | δ /% | ψ /% | σ_b /MPa | $\sigma_{0.2}$ /MPa | δ /% | ψ /% |
| Conventional process | 2.25 | M8 | 56 | 751.3 | 592.7 | 12.3 | 16.0 | 638.3 | 502.7 | 12.1 | 16.4 |
| Fine grain process | 0.2015 | 1.7 | 96 | 936.7 | 650 | 16.1 | 20.3 | 733.3 | 610 | 8.17 | 13.0 |

众所周知,降低浇铸温度可以细化晶粒组织。但是,低的浇铸温度会使得合金液流动性差,凝固过程中的补缩能力降低,容易产生更多的缩松、缩孔缺陷。因此选择合适的浇铸温度很重要。本工作所用 1400℃ 浇铸温度,一方面细化后的晶粒度、等轴晶的比例等参数已达到要求;另一方面,研究也表明铸件

的成型良好、铸造缺陷较少^[4]。良好的弹塑综合性能,是好的疲劳性能的基础,因此拉伸性能从某种方面反映了其疲劳组织。试样拉伸性能见表 2。室温下材料的拉伸强度、屈服强度、延伸率和断面收缩率都有不同程度的提高,即细晶有良好的弹塑性能。随着温度的升高,粗晶和细晶

高温合金铸件的性能指标都有所降低。特别是对于塑性指标,细晶试样降低的幅度较大。从而表现为在中温条件下,细晶仍然有较高的拉伸强度和屈服强度,而延性比粗晶的小。

2.2 循环应力-应变曲线

材料的循环应力-应变曲线可用以下指数关系来表达:

$$\Delta\sigma/2 = K'(\Delta\epsilon_p/2)^{n'} \quad (1)$$

表 3 K4169 合金粗晶、细晶应变疲劳参数

Table 3 Strain fatigue parameters of superalloy K4169

| No. | Fatigue at room temperature | | | | | | Fatigue at 700℃ | | | | | |
|-----|-----------------------------|-------|------------------------|-------|-----------------|-------|-------------------------|-------|------------------------|-------|-----------------|-------|
| | $\Delta\epsilon_f/2/\%$ | c | σ_f'/MPa | b | K'/MPa | n | $\Delta\epsilon_f/2/\%$ | c | σ_f'/MPa | b | K'/MPa | n |
| 1 | 1.31 | 0.693 | 4313 | 0.23 | 2255 | 0.111 | 0.182 | 0.682 | 2234 | 0.203 | 2223 | 0.115 |
| 2 | 1.77 | 0.645 | 5095 | 0.205 | 4019 | 0.164 | 0.126 | 0.522 | 2548 | 0.176 | 3936 | 0.176 |

Notes: 1 – samples of coarse grains; 2 – samples of refined grains

强度系数有一定的影响。细晶循环强度系数较大,和拉伸试验细晶的强度指标较高相吻合。同时循环应变硬化指数也较大。但无论对于粗晶还是细晶试样本身而言,尽管从室温到中温 700℃ 的强度有较大的变化,但硬化指数变化不大。这说明硬化指数在这个温度区间对温度不敏感。

值得注意的是,从总体上,塑性应变越大,应力幅越大;但在具体某定应变幅条件下的几个点,对应的塑性应变越大,而应力幅越小。这在室温疲劳的数据中表现得非常明显。这是因为,由于控制的是总应变,当应力大时,则弹性应变部分必然大,相应塑性应变当然就较小。塑性应变的累积对应的是疲劳破坏,因而对于控制总应变幅的低周疲劳实验,对材料微观结构和组织相当敏感。即使在同一应变幅条件下,不同试样塑性变形分量却不同,造成疲劳寿命的较大差异,使得疲劳数据点分散。表 4 为室温疲劳不同应变

表 4 疲劳寿命的对数方差

Table 4 The variance logarithm of fatigue life

| $\epsilon_T/\%$ | 0.3 | 0.5 | 0.6 |
|-----------------|-------|------|------|
| Coarse grains | 10.29 | 7.08 | 7.15 |
| Refined grains | 8.21 | 4.92 | 4.27 |

幅条件下的寿命对数方差的比较。可见细晶疲劳寿命的分散性有一定的改善。而在中温条件下,细晶疲劳点的分散性也较小(如图 2 所示)。这是因为,相对于粗晶,细晶试棒的组织较为均匀,不容易偶然形成大的有害相,所以性能的波动比较小。

2.3 细晶、粗晶试样低周疲劳寿命的比较

式中, $\Delta\sigma/2$ 是循环应力幅, $\Delta\epsilon_p/2$ 是塑性应变幅, K' 是循环强度系数, n' 是循环应变硬化指数。循环强度系数是产生一次反复循环所得到的真实应力,它与真实断裂强度成正比。该指数关系在对数坐标系中是一条直线。本工作两种工艺下的试样循环应力-应变曲线如图 2 所示。应力-应变曲线的参数可以通过线性回归的方法求出,如表 3 所示。

可以看到,晶粒细化对于循环硬化指数 n 和循环

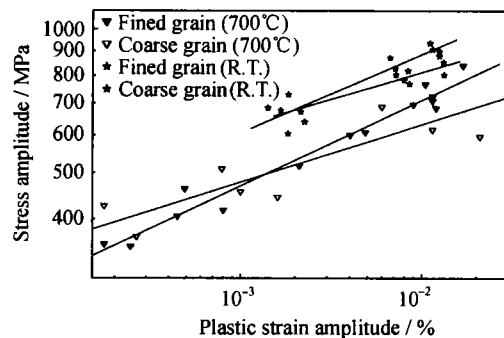


图 2 循环应力-塑性应变曲线

Fig. 2 Cyclic stress-strain curves

在常温条件下细晶组织比粗晶具有更好的疲劳寿命,如图 3 所示。在同一载荷下,细晶组织的疲劳寿命比粗晶提高 20% ~ 100% 不等;而且在长寿区比短寿命区效果更明显,即细晶对高周疲劳寿命的提高比低周更明显。在中温条件下,疲劳寿命和应变幅有关。当应变幅较大时 ($>0.4\%$),粗晶有一定的优势,但数据的分散性很大。而在小应变幅条件下,细晶的疲劳性能比粗晶的的要好。但整个中温疲劳的数据比室温疲劳的数据分散性要大。这是由于随温度的升高,组织的不均匀性越明显,从而影响到疲劳寿命数据的稳定性。另外,从总体来看,细晶寿命的提高幅度并不显著。一方面,试样是铸态的,疲劳性能的瓶颈可能是晶内的铸态组织;另一方面,晶粒细化的水平还没有达到 0.1mm 量级。

外力作用下材料的应变包括弹性应变和塑性应变两部分。在应变控制的低周疲劳实验中,总应变幅和疲劳寿命的关系也常常用弹性分量和塑性分量之

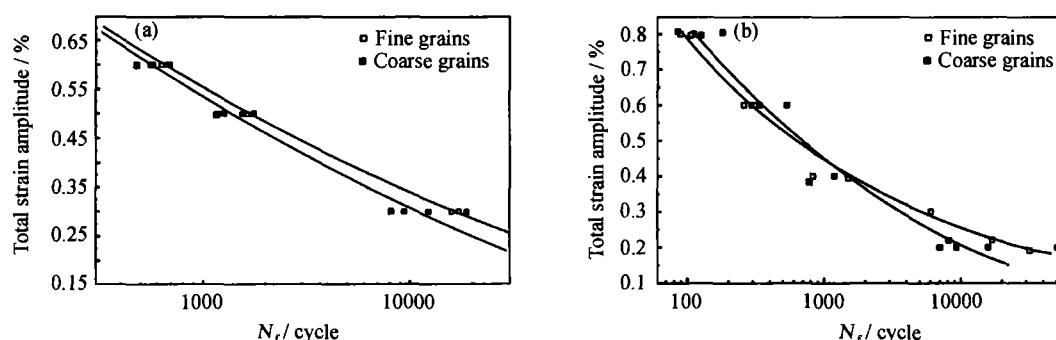


图3 粗晶、细晶疲劳寿命的比较 (a)室温疲劳性能比; (b)中温(700℃)疲劳性能比较

Fig.3 Comparison of fatigue life between coarse grain and refined grain

(a)fatigue properties at room temperature; (b)fatigue properties at 700℃

和来表达,即 Morrow 公式:

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_t/2 &= \Delta\epsilon_p/2 + \Delta\epsilon_e/2 \\ &= \epsilon'_t(2N_f)^{-c} + (\sigma'_t/E)(2N_f)^{-b} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\Delta\epsilon_t/2$, $\Delta\epsilon_p/2$ 和 $\Delta\epsilon_e/2$ 分别表示总应变幅、塑性应变幅和弹性应变幅。 $2N_f$ 为发生失效时的载荷反向数, ϵ_t 为疲劳延性系数, c 为疲劳延性指数, σ_t 为疲劳强度系数, b 为疲劳强度指数, E 为杨氏模量。如果参数 ϵ_t , σ_t , c , b 已知, 就可以通过总应变幅估算出相应的疲劳寿命。因此这些参数是低周疲劳性能测试的重要方面。

可以发现, 晶粒细化后疲劳参数都有一定的变化(如表3所示)。对于室温疲劳, 细晶的疲劳延性指数 c 和疲劳强度指数 b 减小, 而疲劳延性系数 ϵ_t 、疲劳强度系数 σ_t 则增加。疲劳强度系数 σ_t 与真实断裂强度 σ_f 成正比, 而疲劳延性系数 ϵ_t 和断面收缩率成比例。显然, 室温疲劳细晶寿命的提高是更好的强度和塑性性能的共同结果。对于中温疲劳, 尽管细晶比粗晶的疲劳延性指数 c 和疲劳强度指数 b 仍然较小, 以及有较大的疲劳强度系数 σ_t , 但疲劳延性系数 ϵ_t 则比较低。这对于低周疲劳是不利的。说明中温疲劳细晶的优势没有室温时明显, 这是塑性降低的结果。

2.4 疲劳断口

图4是利用扫描电子显微镜观察到室温、中温疲劳的断口形貌。结果表明, 室温、中温疲劳裂纹通常萌生于试样的表面, 也有的是内裂纹源, 而且是多疲劳裂纹源的断裂, 如图4a。即使在中温条件下, 疲劳断口仍然是穿晶的, 在所有条件下的疲劳断口上都没有发现沿晶形貌。在裂纹扩展区可观察到疲劳条纹(图4b,c), 瞬断区一般呈现韧窝形貌(图4d)。

图4b为室温细晶的疲劳断口, 可以看到疲劳裂

纹出现一种多路扩展的情况。这是由于在裂纹扩展的过程中, 受到各种强化相的强烈阻碍时, 裂纹前沿的应力集中不得不开动另一个滑移系。随温度的升高, 即使在较小的应变幅(0.2%)条件下, 疲劳辉纹仍然很宽, 如图4c, 说明中温条件下疲劳裂纹的扩展速度较快。而且从辉纹中可以看到 P. Gauthier 等人提到的二次裂纹^[10], 这种二次裂纹垂直于主裂纹, 由疲劳条纹转变而成, 并沿疲劳条纹的方向扩展。

需要提到的是, 断口上没有找到细化剂引入的夹杂。

3 讨论

3.1 晶粒细化对循环响应形为的影响

晶粒细化对循环应力-应变曲线的影响较大(如图2)。从图2可以看出, 在较大塑性应变区, 对应同一应力, 细晶产生的塑性分量比粗晶要小。这就说明, 细晶对抗塑性变形的能力较强。因此, 相对于同一应变幅, 实际上细晶承受的应力要比粗晶大, 特别是在大应变幅区, 更加明显。这对疲劳寿命有一定的影响。

室温到700℃下循环硬化指数对温度不敏感, 可以利用柯特雷尔^[11]的一些观点作如下解释。作为弥散强化的质点或晶界通过阻碍位错的运动, 从而达到强化的效果。疲劳过程中循环硬化也是这样。这些质点或晶界有的是强钉扎, 有些是弱钉扎。如果是弱钉扎, 位错通过脱钉过程来实现。而脱钉的方式或者脱钉的难易程度显然和温度有关。随温度的升高, 位错的可动性增加, 从而脱钉容易, 对应疲劳过程中循环硬化的降低。而当质点的钉扎作用较强时, 滑移在晶粒间传播就通过在晶界另一侧形成新的位错束来实现这一过程。这一过程只和位错成核有关, 对温度不敏感。从这一点来看, 说明本工作中高温合金的晶

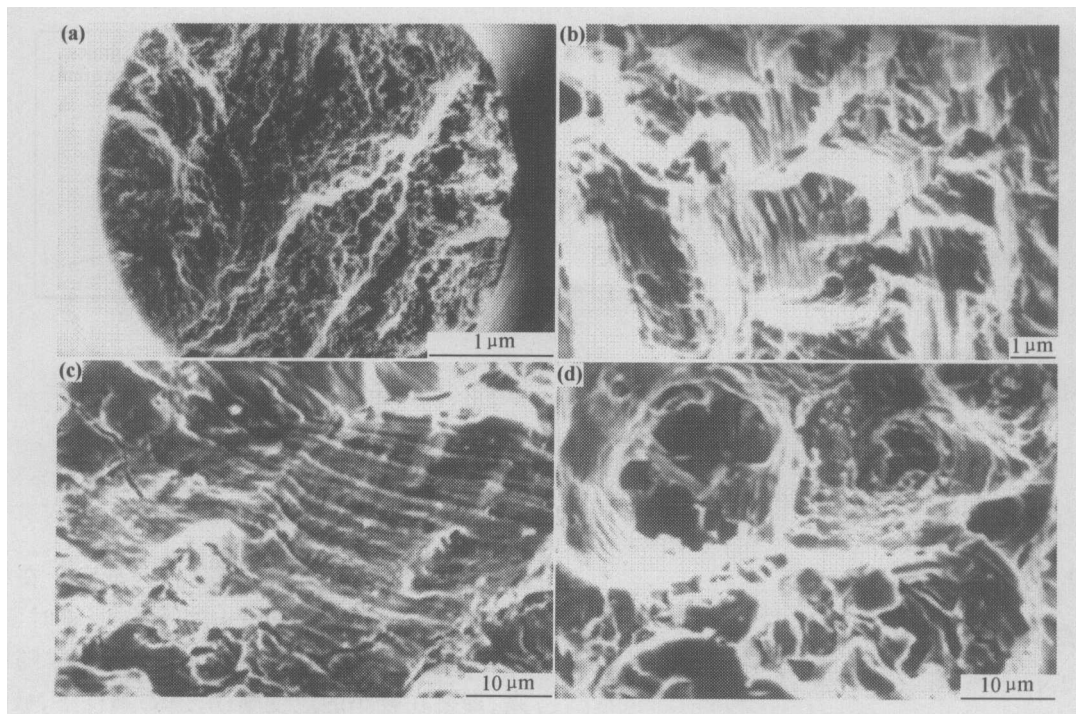


图4 疲劳断口形貌 (a)粗晶室温疲劳(0.4%);(b) 细晶室温疲劳(0.4%);
(c) 粗晶中温疲劳(0.2%);(d) 细晶中温疲劳(0.2%)

Fig.4 Micrographs of the fracture surface

(a)coarse grains, at room temperature(0.4%); (b) refined grains, at room temperature(0.4%);
(c) coarse grains, at 700℃ (0.2%); (d) refined grains, at 700℃ (0.2%)

界和弥散强化相在 700℃ 及一定应力条件下仍然能很好的钉扎,这也是细晶中温强度比粗晶相对要高的原因。

3.2 化学细化对疲劳性能的影响

疲劳裂纹的形核一般是由于变形不均匀形成的局部损伤逐渐累积形成的。对于细晶材料,由于细晶晶粒细小,屈服强度高,产生的塑性区小,包含的裂纹小。根据 J. O. Nilsson^[12],晶界面积大的细晶组织应力集中受限制,因而产生滑移的体积分量高,减小了塑性流动的不均匀性,缓和了应力集中,从而使裂纹萌生期增长。随温度的升高,结构的不稳定性提高,从而使得中温条件下疲劳裂纹的形核变得复杂起来。但细晶变形的均匀性仍然存在,所以细晶还是比较有利。不过裂纹形核在整个寿命范围内所占的比重不是很大,所以对最终性能的影响比较小。而起决定作用的应该是疲劳裂纹的扩展。

疲劳裂纹的扩展在疲劳寿命中所占的比重大。细晶的疲劳裂纹的扩展相对于粗晶,有两方面的因素。一方面,在同一应变幅下,细晶比粗晶所受的应力大,特别是在大应变幅条件下,所以裂纹扩展的驱动力较大,有利于疲劳裂纹的扩展。另一方面,阻碍裂纹扩展的弥散相和晶界较多,从而降低疲劳扩展的速度。这两种因素共同决定裂纹的扩展速度。因此

在大应变幅条件下,由于细晶裂纹扩展的驱动力增大,从而降低疲劳寿命的优势。在室温疲劳时,细晶阻碍裂纹扩展的因素占有明显优势,疲劳性能比粗晶的好。断口图 4b 裂纹的扩展受阻情况下不得不调整扩展的方向也说明这点。在中温时,由于阻碍裂纹扩展的优势在温度升高情况下有一定的削弱,从而在大应变幅下,细晶的寿命甚至不如粗晶。这可以解释不同应变幅下细晶和粗晶疲劳寿命的差异。

蠕变损伤是高温疲劳需要考虑的问题。特别是对于小应变幅、长疲劳寿命的情况下,蠕变和疲劳的交互作用可能产生一定的影响。文献表明^[13],弯曲晶界状态会减轻疲劳-蠕变交互作用的程度,因此细晶抵抗疲劳蠕变交互作用较强。可见,在小应变幅、长寿命区,如果考虑到蠕变的作用,细晶也具有优势。总体来看,在中温(700℃)条件下,尽管细晶不如室温疲劳那样表现出明显的优势,但大应变幅条件下细晶实际承受的应力也比较大。同时,粗晶疲劳点的分散性也说明粗晶的疲劳性能稳定性比较差。所以中温细晶仍然有一定的优势。陈国祥等人认为^[14],晶粒位向对裂纹萌生、扩展有很大影响。并提到晶粒尺寸大于或等于 ASTM M8 时,晶界位相的差异能引起疲劳寿命数据的波动。本工作常规铸造的晶粒尺寸在 ASTM M8 左右,因而,其不同位向可能对性能产生

影响,使得数据稳定性比不上细晶。

4 结论

(1)采用新型化学细化剂在常规生产条件下对高温合金 K4169 进行晶粒的细化,得到很好的细化效果。晶粒平均尺寸由常规铸造的 2.25mm 细化到 0.2015mm,断面等轴晶比例由 56% 提高到 96%。表明该种工艺方法是一种有效的细晶铸造技术。

(2)常规铸造和细晶铸造试样的室温、中温(700℃)疲劳都是多疲劳源、裂纹穿晶扩展。

(3)化学法细晶铸造 K4169 的室温疲劳寿命比粗晶提高 20%~100%,且数据的分散性也有一定的改善。

(4)在中温(700℃)大应变幅($\geq 0.4\%$)条件下,粗晶的疲劳寿命比细晶的要长,但数据的分散性很大。在小应变幅($< 0.4\%$)的条件下,细晶的疲劳寿命要比粗晶的好。

参考文献

- [1] 刘发信,袁文明.高温合金细晶铸造技术的发展和运用[J].材料工程,1995,(5):7-11.
- [2] MONDOLF L F. Grain refinement in the casting of nonferrous Alloys[A]. ABBASCHIAN G J, DAVIED S A. Grain Refinement in Casting and Welds [C]. New York: The Metallurgical Society of AIME, 1983. 3-50
- [3] DENZINE A F. Advanced casting Technology[A]. AGARD Conference Proceeding[C]. Paris: Advisory Group for Aerospace Research and Development, 1982. 12-16.
- [4] 熊玉华. K4169 高温合金化学法晶粒细化工艺及机理的研究[D].西安:西北工业大学,2000.
- [5] WOULD S M, BENSON H. Development of a conventional fine grain process[A]. GELL M. Superalloy 1984 [C]. New York: Met Soc TMS-AIME, 1984. 3-12.
- [6] BOUSE G K. Mechanical properties of microcast-x alloy 718 fine grain investment casting[A]. LORIA A. Superalloy 718-Metallurgy and Application[C]. Pittsburgh: TMS, 1989. 69-73.
- [7] DENNISON J P. Grain refinement by the introduction to the melt of oxide particles pre-dispersed in metal strip[A]. ABBASCHIAN G J, DAVIED S A. Grain Refinement in Casting and Welds [C]. New York: The Metallurgical Society of AIME, 1983. 139-149.
- [8] 熊玉华,李培杰.铸造工艺参数和细化剂对 K4169 高温合金铸态组织的影响,晶粒组织及晶粒细化机理[J].金属学报,2002,38(5):529-533.
- [9] 刘林.镍基高温合金铸件的晶粒组织控制-铸造工艺参数的影响[J].航空学报,1994,15(11):1357-1361.
- [10] GAUTHIER P, DE RABAUDY H, AUVINET J. Secondary cracking process during fatigue crack propagation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1973, 5(4):977-981.
- [11] SYMPOSIUM N P L, STATIONAR H M. The relation between the structure and mechanical properties of metals [M]. London: Her Majesty's Stationary Office, 1963. 122.
- [12] NILSSON J O, THORVALDSSON T. Low cycle-fatigue behaviour of alloy 800h at 600℃-effect of grain size and γ -precipitate dispersion[J]. Fatigue & Structures, 1985, 8(4):373.
- [13] 陈国良.高温合金学[M].北京:冶金工业出版社,1987. 142-144.
- [14] 陈国祥,许静君. K18 高温合金低周疲劳性能影响因素的研究[A].荣科.铸造高温合金进展[C].北京:中国科学技术出版社,1993.188-193.
- [15] BECK T R. A non-consumable metals anode for production of aluminum with low-temperature fluoride melts[J]. Light Metals, 1994, 15417.
- [16] NIU Y, GESMUNDO F, VIANI F. The air oxidation of two-phase Cu-Cr alloys at 700-900℃ [J]. Oxid Met, 1997, 48:357.
- [17] HAUGSRUD R, KOFSTAD P. On the high temperature oxidation of Cu-rich Cu-Ni alloys [J]. Oxid Met, 1998, 50: 189.
- [18] VILLARS P, et al. Hand of ternary alloy phase diagrams[M]. Ohio: ASM, 1997. 8734.
- [19] WILLIAM G. The handbook of binary phase diagrams[M]. New York: The General Electric Company, 1978. 820
- [20] WANG C L, et al. Densification phenomenon of powders by hot pressing[A]. KOSUGE K and NAGAI. Proceedings of 2000 powder metallurgy world Congress[C]. Kyoto: The Japan Society of Powders and Metallurgy, 2000. 793.
- [21] MARTIN G. Phase stability under irradiation: ballistic effects [J]. Phys Rev, 1984, 30: 1424.
- [22] BELLON P, AVERBACK F S. Nonequilibrium roughening of interfaces in crystals and shear: application to ball milling[J]. Phys Rev Lett, 1995, 74: 1819.
- [23] KOCH C C. Synthesis of nanostructured materials by mechanical milling: problems and opportunities[J] Nano Mater, 1997, 9: 13.
- [24] 付广艳,牛焱.不同方法制 Cu-Cr 合金氧化行为的研究[J].金属学报,2003,39: 297.

基金项目:国家重点基础研究计划资助项目(G2000067202)

收稿日期:2004-01-14;修订日期:2004-08-29

作者简介:黄太文(1975-),男,博士生,主要从事高温合金的组织控制及性能的研究,联系地址:西北工业大学 543 信箱(710072)。

(上接第 21 页)

- [7] BECK T R. A non-consumable metals anode for production of aluminum with low-temperature fluoride melts[J]. Light Metals, 1994, 15417.
- [8] NIU Y, GESMUNDO F, VIANI F. The air oxidation of two-phase Cu-Cr alloys at 700-900℃ [J]. Oxid Met, 1997, 48:357.
- [9] HAUGSRUD R, KOFSTAD P. On the high temperature oxidation of Cu-rich Cu-Ni alloys [J]. Oxid Met, 1998, 50: 189.
- [10] VILLARS P, et al. Hand of ternary alloy phase diagrams[M]. Ohio: ASM, 1997. 8734.
- [11] WILLIAM G. The handbook of binary phase diagrams[M]. New York: The General Electric Company, 1978. 820
- [12] WANG C L, et al. Densification phenomenon of powders by hot pressing[A]. KOSUGE K and NAGAI. Proceedings of 2000 powder metallurgy world Congress[C]. Kyoto: The Japan Society of Powders and Metallurgy, 2000. 793.
- [13] MARTIN G. Phase stability under irradiation: ballistic effects [J]. Phys Rev, 1984, 30: 1424.
- [14] BELLON P, AVERBACK F S. Nonequilibrium roughening of interfaces in crystals and shear: application to ball milling[J]. Phys Rev Lett, 1995, 74: 1819.
- [15] KOCH C C. Synthesis of nanostructured materials by mechanical milling: problems and opportunities[J] Nano Mater, 1997, 9: 13.
- [16] 付广艳,牛焱.不同方法制 Cu-Cr 合金氧化行为的研究[J].金属学报,2003,39: 297.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50271079)和辽宁省教委科研基金(202112022)

收稿日期:2003-10-08;修订日期:2004-05-08

作者简介:曹中秋(1965-),男,教授,博士,研究方向为材料制备及腐蚀与防护,联系地址:中国科学院金属研究所(110016)。