

文章编号: 1004 - 0609(2004) 09 - 1489 - 05

GH4049 镍基高温合金的高温蠕变行为^①

陈立杰, 谢里阳, 江铁强

(东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110004)

摘 要: 研究了镍基变形高温合金 GH4049, 在实际工作温度范围 700~900 °C, 应力 137~600 MPa 下的高温拉伸蠕变行为, 得到了蠕变后的高温应变恢复曲线。提出了应用参数优化估计的方法, 在较大温度及应力范围内, 计算稳态蠕变率的宏观唯象公式中的各参数, 并用 ZA27 和 GH4049 合金的实验数据验证了该方法的可行性。GH4049 合金各温度下的稳态蠕变速率与所施加的应力, 在双对数坐标系下呈线性关系, 应力指数平均值为 7.685 1, 平均稳态蠕变激活能为 543.6 kJ/mol。

关键词: GH4049 合金; 蠕变行为; 稳态蠕变速率; 应变恢复; 稳态蠕变激活能; 参数优化估计

中图分类号: TG 146.15

文献标识码: A

Tensile creep behavior of GH4049 nickel-based superalloy at high temperature

CHEN Li-jie, XIE Li-yang, GANG Tie-qiang

(School of Mechanical Engineering and Automation,
Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The high temperature tensile creep behavior including high temperature strain recovery after creep was investigated for GH4049 nickel-based wrought superalloy. The selected temperature range was 700 ~ 900 °C in terms of the actual service temperature and the applied stress range was 137 ~ 600 MPa. An optimization method of parameter estimate was presented to calculate the constants in the phenomenological equation of steady-state creep rate in a larger temperature and stress range and then the feasibility of the optimization method was validated for ZA27 alloy and GH4049 superalloy. For GH4049 superalloy, there is a linear relationship between the steady-state creep rate and the applied stress in the logarithm coordinate system at all studied temperatures. The mean stress exponent is 7.685 1 and the steady-state creep activation energy is 543.6 kJ/mol, which is much greater than the activation energy for the atomic self-diffusion of Ni.

Key words: GH4049 nickel-based superalloy; tension creep behavior; steady-state creep rate; strain recovery; steady-state creep activation energy; optimization method of parameter estimate

GH4049 合金是一种复杂合金化的难变形镍基高温合金, 在高温下具有良好的抗氧化性能以及高的抗拉强度、蠕变抗力等。它主要用作在 900 °C^[1] 以下温度工作的航空发动机涡轮转子叶片和其他高温承力件。航空发动机涡轮转子叶片, 在高温工作环境中承受较大的离心负荷、气动力等, 因而拉伸

蠕变特性的研究是该合金性能研究的一项基础工作。目前对于 GH4049 合金短时性能的研究较为充分, 对其长时蠕变特性的研究尚显欠缺。而对于航空发动机热端构件用镍基高温合金, 根据实际承载状况, 所需的长时实验研究涉及范围较广, 应包括^[2]: 拉伸蠕变响应、应力松弛、蠕变后高温应变

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G19990650)

收稿日期: 2004-02-01; 修订日期: 2004-05-17

作者简介: 陈立杰(1975-), 女, 博士研究生。

通讯作者: 陈立杰, 电话: 024-83678622; E-mail: chenlj_lizzy@126.com

恢复、多级加载蠕变响应历史等,这是GH4049合金的应用及其结构件强度分析与寿命预测的基础。

本文作者对GH4049合金在某航空发动机涡轮叶片工作温度范围内,不同应力下的高温蠕变行为进行了研究,包括拉伸蠕变响应、蠕变后高温应变恢复及稳态蠕变速率理论分析。

1 实验

1.1 材料

GH4049合金棒材在热处理状态下使用,热处理制度为:1 200 ℃、2 h,空冷+1 050 ℃、4 h,空冷+850 ℃、8 h,空冷+表面渗铝。试样为双头螺纹试样,初始计算段尺寸为 d 8 mm×100 mm。

在Cambridge S-360型扫描电镜下进行能谱分析所得合金主要化学成分见表1。

表1 GH4049合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of GH4049
(mass fraction, %)

Al	Ti	Cr	Fe	Co	Mo	W	Ni
3.78	1.69	10.08	0.71	15.03	5.02	6.00	Bal.

GH4049合金原始组织形貌^[3]如图1所示。它以面心立方结构的有序金属间化合物 γ' 为主要强化相,典型的 γ' 析出相为 $(\text{Ni, Co})_3(\text{Al, Ti})$,呈方形,其体积分数约为40%,对镍基高温合金的高温力学性能起主要作用。在GH4049合金晶界上有链状分布的 M_6C 型碳化物,晶粒内有零星分布的块状MC型碳化物。

1.2 实验方法

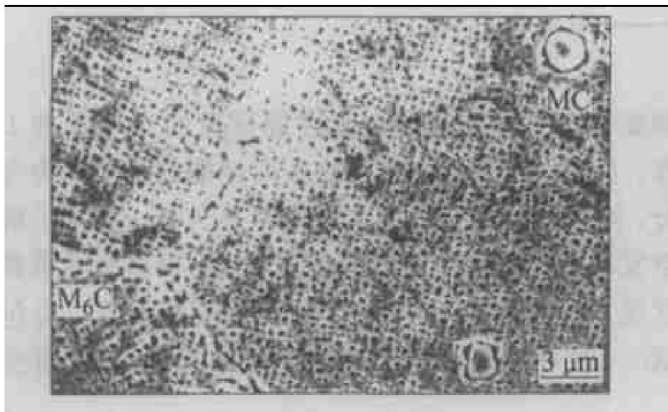


图1 GH4049合金原始组织

Fig. 1 Original microstructure of GH4049 nickel-based superalloy

蠕变实验采用100 h定时截尾,卸载后保温进行4 h应变恢复。根据GH4049合金实际的工作温度范围,选择实验温度为700~900 ℃,属高温蠕变^[4, 5]($t > 0.5 t_m$, t_m 为熔点,℃)。在高温区,随温度与应力的升高,蠕变性能变化较大,各温度下均采用相同的应力范围难以实现。因而本实验以温度为参数,应力的选取以能获得稳态蠕变速率为标准,总应力范围为137~600 MPa。

2 结果与分析

2.1 高温蠕变与应变恢复曲线

图2所示为GH4049合金在800与850 ℃下的蠕变曲线。各应力下具有明显的稳态蠕变阶段,稳态蠕变速率随应力及温度的升高而增加。由图2(a)可见,该合金在800 ℃下,承载为380 MPa时,保载70 h左右已进入加速蠕变阶段,而稳态蠕变速率量级在 10^{-7} s^{-1} 以下,表明该合金在高温下具有良好的蠕变抗力。

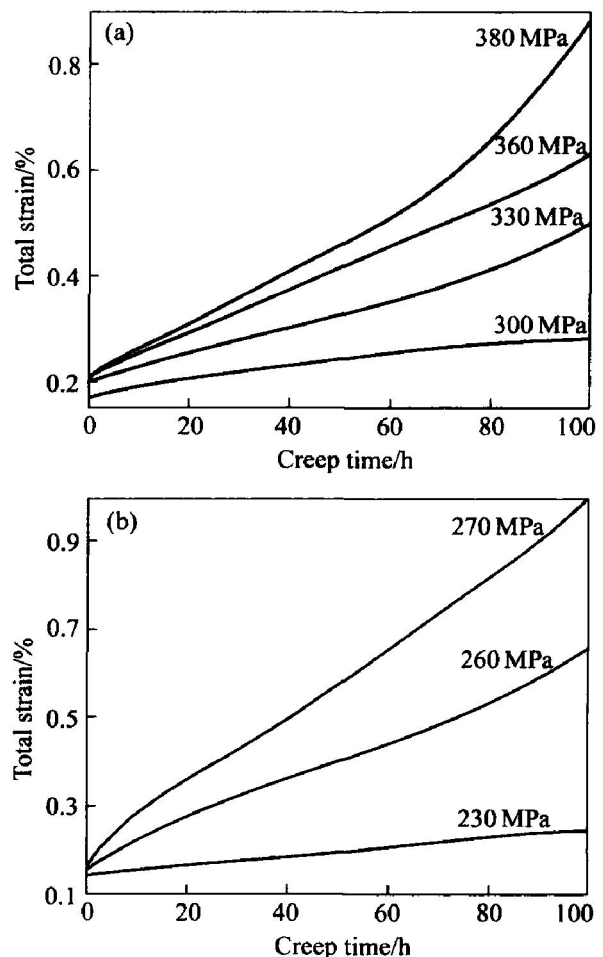


图2 GH4049合金的蠕变曲线

Fig. 2 Creep curves of GH4049 superalloy
(a) —800 ℃; (b) —850 ℃

在蠕变温度范围内, 卸载后蠕变第 1 阶段的变形会部分得到恢复。对于高温循环加载条件, 高温应变恢复是一个重要的考虑因素, 因而有必要对 GH4049 合金的高温应变恢复进行适当研究。图 3(a) 和 3(b) 所示为 GH4049 合金在 800 ℃与 850 ℃蠕变 100 h, 卸载后的高温应变恢复曲线。可见在高温下, 卸载后的蠕变恢复较明显, 主要集中于恢复过程中的前 1 h, 之后逐渐趋于稳定。蠕变恢复量最大者达总变形量的 6.97%, 因而在高温循环加载下是不容忽略的。

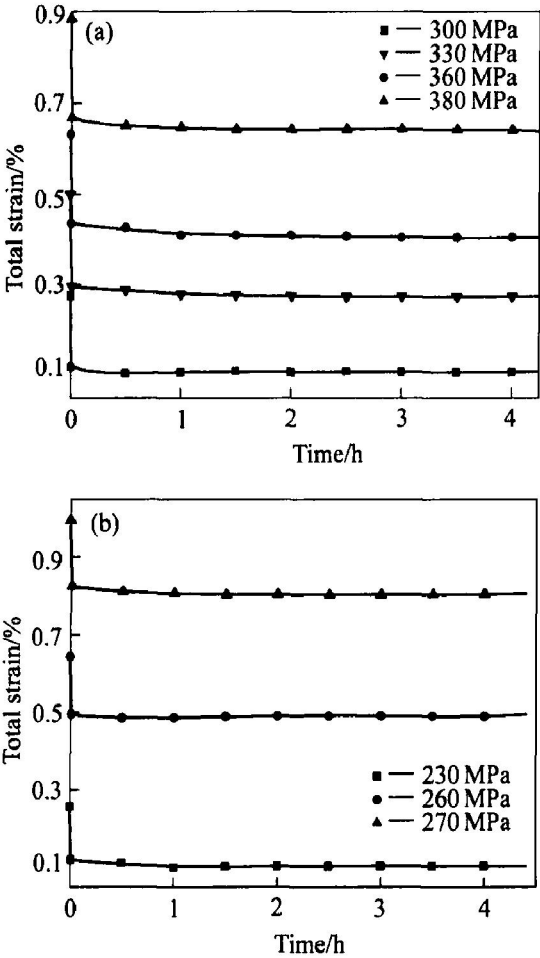


图 3 GH4049 高温应变恢复曲线

Fig. 3 Strain recovery after tensile creep of GH4049 superalloy
(a) -800 ℃; (b) -850 ℃

2.2 稳态蠕变速率

由 GH4049 合金蠕变曲线的线性段可得到稳态蠕变速率, 见表 2。

在蠕变恢复温度范围内, 当应力不太大时, 可观测到明显的稳态蠕变阶段。稳态蠕变速率可用宏观唯象公式表示为^[6-11]

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A \sigma_a^n \exp[-Q/(RT)] \tag{1}$$

式中 A 为材料常数; $\dot{\epsilon}_{ss}$ 为稳态蠕变速率; σ_a 为施

表 2 GH4049 合金拉伸蠕变的稳态蠕变速率

Table 2 Steady state creep rate of GH4049 superalloy

Temperature/ ℃	Stress/ MPa	Steady state creep rate/ 10 ⁻⁷ h ⁻¹
700	400	2.36
	500	5.12
	550	24.49
	580	29.26
	600	53.43
800	250	27.40
	294 ^[11]	49.50
	300	111.00
	330	225.00
	360	399.00
	380	507.00
850	230	201.00
	245	376.00
	260	447.00
	270	791.00
900	137	33.02
	150	125.00
	157 ^[11]	207.00
	177 ^[11]	255.00
	200	915.00

加的应力; R 为普适气体常数; Q 为稳态蠕变激活能; T 为绝对温度; n 为应力指数。

对于某一给定的温度有

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A' \sigma_a^n \tag{2}$$

式中 A' 为温度相关常数。

各温度下的 $\dot{\epsilon}$ 与 σ_a 在双对数坐标下呈线性关系(图 4)。各温度下应力指数分别为: 7.817 0(900 ℃), 7.801 7(850 ℃), 7.465 7(800 ℃), 7.655 8(700 ℃), 平均值为 7.685 1。各温度下线性拟合结果应力指数相近。

对式(1)两端分别取自然对数有

$$\ln \dot{\epsilon}_{ss} = \ln A + n \ln \sigma_a - Q/(RT) \tag{3}$$

参照文献[12]、[13], 作者在实验过程中以温度作为参数进行实验, 稳态蠕变激活能可以由参数优化估计求得, 而实验应力不受其他限制, 只要能够得到稳态蠕变速率即可。

由式(3)可知, $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$ 与 $[n \ln \sigma_a - Q/(RT)]$ 应有线性关系, 且斜率为 1。据此, 可做参数优化估计, 从而求得稳态蠕变激活能 Q 的最优值。优化目标

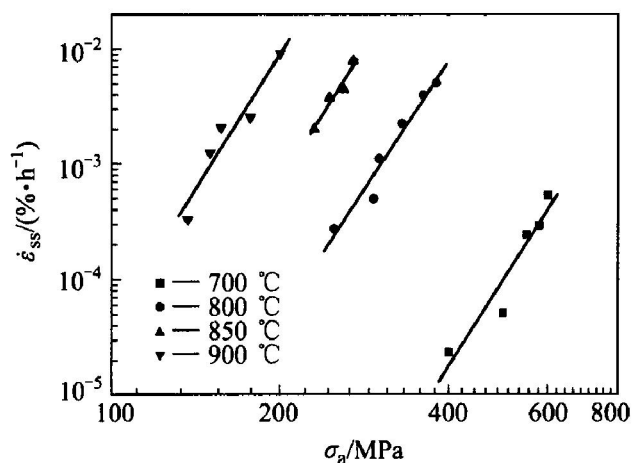


图4 稳态蠕变率与应力的双对数线性关系

Fig. 4 Relationship between steady-state creep rate and applied stress in logarithmic coordinate system

可以有2种不同的选择方法: ①使 $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$ 与 $[n \ln \sigma_a - Q/(RT)]$ 的线性拟合直线斜率最接近1; ②数据点的分散带最小^[12, 13], 即子样标准差最小。适当的选择 Q 值, 即可达到优化目标。当实验数据较为理想时, 目标①与②理论上可同时达到最优值。

参数优化估计结果: 采用优化目标①时, 平均稳态蠕变激活能为 543.6 kJ/mol, 拟合直线斜率为 0.999 9, A 为 0.075 4, 子样标准差 0.296 3, 相关系数为 0.984 (图 5); 采用优化目标②时, 平均稳态蠕变激活能为 548.7 kJ/mol, 拟合直线斜率 0.982 8, A 为 0.098 8, 子样标准差 0.293 7, 相关系数为 0.985, 两种方法计算结果吻合。

由文献[6]可知, 在高温下, 纯 Ni 的应力指数接近 5, 位错攀移是其高温蠕变的主要控制机制之一。抗蠕变合金 GH4049 是复杂合金, 由于弥散分布的 γ' 强化相的存在, 其应力指数高达 8 左右, 从而所得的稳态蠕变激活能也远大于镍的自扩散激活能(约 285 kJ/mol^[5])。

文献[14]中铸态 ZA27 合金数据中存在明显笔误数据: 20 °C下, 100 MPa 时的稳态蠕变速率应为 8.67×10^{-8} , 应力指数平均值为 3.86。用本文所提出的优化目标①进行参数优化估计得: 平均稳态蠕变激活能为 83.3 kJ/mol, 拟合直线斜率为 0.999 9, 子样标准差为 0.537 5, 相关系数为 0.993。同时子样标准差也达到了最小值, 两个优化目标同时实现, 可见该组数据较为理想(图 6), 所得结果与文献[14]中的实验结果相符。

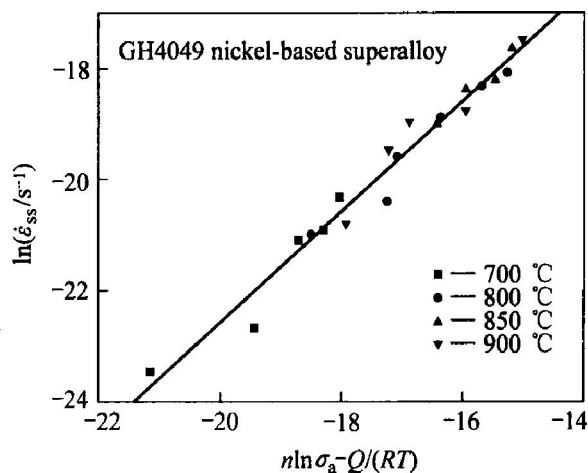


图5 Q 为 543.6 kJ/mol 时 $\dot{\epsilon}_{ss}$ 与 $[n \ln \sigma_a - Q/(RT)]$ 的关系

Fig. 5 Relation of $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$ vs $[n \ln \sigma_a - Q/(RT)]$ with Q of 543.6 kJ/mol

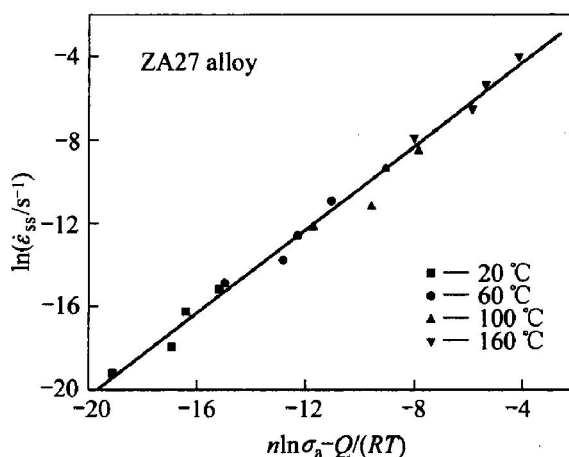


图6 Q 为 83.3 kJ/mol 时 $\dot{\epsilon}_{ss}$ 与 $[n \ln \sigma_a - Q/(RT)]$ 的关系

Fig. 6 Relation of $\ln \dot{\epsilon}_{ss}$ vs $[n \ln \sigma_a - Q/(RT)]$ with Q of 83.3 kJ/mol

3 结论

1) 提出了应用参数优化估计方法, 计算稳态蠕变激活能。可以适当减少对实验条件的限制和计算结果对实验数据的依赖性, 提高实验的可行性与经济性。

2) 对 GH4049 和 ZA27 合金应用参数优化估计方法进行了唯象经验公式中参数的计算。ZA27 合金参数优化估计方法的计算值与实验结果相符, 证实了参数优化估计方法的可行性。

REFERENCES

- [1] 北京航空材料研究所. 航空发动机设计用材料数据手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993. 613 - 614.
Institute of Aeronautical Materials. Material Data Handbook for Aero Engine Design[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1993. 613 - 614.
- [2] Stoffer D C, Papernik L, Bernstein H L. An experimental evaluation of the mechanical response characteristics of René 95 [R]. AFWAL-TR-80-4136, Cincinnati: University of Cincinnati, 1980.
- [3] 陈立佳. 两种镍基高温合金低周疲劳及疲劳-蠕变交互作用的研究[D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 1999.
CHEN Lijia. Low Cycle Fatigue and Fatigue-creep Interaction Behaviour of Two Nickel Base Superalloys [D]. Shenyang: Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, 1999.
- [4] 冯 端. 金属物理学(第 3 卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 575 - 578.
FENG Duan. Metal Physics(Vol. III)[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1999. 575 - 578.
- [5] 哈宽富. 金属力学性质的微观理论[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 508 - 509.
HA Kuangfu. Microscopic Theory of Mechanical Properties [M]. Beijing: Science and Technology Press, 1983. 508 - 509.
- [6] McLean D. Mechanical Properties of Metals[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1962. 308 - 311.
- [7] Tjong S C, Ma Z Y. Creep behaviour of precipitation hardened ferritic Fe-19Cr-4Ni-2Al alloy[J]. Materials Letters, 2002, 56(9): 59 - 64.
- [8] Hofmann H, Frommeyer G, Derder C. Creep mechanisms in particle strengthened-Titanium-Ti₂Co alloys[J]. Mat Sci and Eng, 1998, A245: 127 - 134.
- [9] Spigarelli S, Cabibbo M, Evangelista E, et al. Analysis of the creep behaviour of a thixoformed AZ91 magnesium alloy [J]. Mat Sci and Eng, 2000, A289: 172 - 181.
- [10] Cadek J, Kucharova K, Zhu S J. Creep behaviour of an Al-8.5Fe-1.3V-1.7Si-15SiC_p composite at temperatures ranging from 873 to 948 K[J]. Mat Sci and Eng, 2002, A328: 283 - 290.
- [11] Spigarelli S, Fancesconi L, Guardamagna C, et al. Creep characterization of a duplex Ti-Al base alloy at 700 and 750 °C[J]. Mat Sci and Eng A, 1997, 234 - 236: 378 - 381.
- [12] Miller A K. An inelastic constitutive model for monotonic, cyclic, and creep deformation(part I): Equations development and analytical procedures[J]. Asme J Eng Mat Tech, 1976, 98(4): 97 - 105.
- [13] Miller A K. An inelastic constitutive model for monotonic cyclic, and creep deformation(part II): Application to type 304 stainless steel[J]. Asme J Eng Mat Tech, 1976, 98(4): 106 - 113.
- [14] 魏晓伟, 沈保罗, 易 勇. 铸态 ZA27 合金的压蠕变行为[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(5): 1171 - 1174.
WEI Xiaowei, SHEN Baoluo, YI Yong. Compressive creep behavior of as-cast ZA27 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(5): 1171 - 1174.

(编辑 陈爱华)