

# GH4738 高温合金的应力松弛影响因素

朱 擎, 董建新, 张麦仓, 姚志浩

(北京科技大学, 北京 100083)

**摘 要:** 详细研究了紧固件用高温合金 GH4738 在不同温度和初应力, 及不同热处理制度下的应力松弛行为。研究表明: 应力松弛的两个阶段之间存在一个槛应力  $\sigma'_0$ , 低于此槛应力  $\sigma'_0$  时, 塑性应变速率快速下降。随着温度的升高, GH4738 合金的松弛稳定性下降, 应力松弛速率加快, 松弛极限降低。随着初应力的提高, 松弛第 1 阶段松弛速率加快, 松弛极限有所增大。不同的固溶温度和稳定化热处理工艺主要影响了合金松弛过程的第 2 阶段, 对其槛应力及松弛稳定性均无明显影响。

**关键词:** GH4738; 应力松弛; 温度; 初应力; 热处理制度

**中图分类号:** TG146.1<sup>+</sup>5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2017)09-2546-07

紧固件是把两个或者多个构件连接成一个整体的机械零件, 在制造业中应用广泛。航空航天工业中紧固件的工作温度高、工作环境恶劣, 所以通常采用具有优良耐腐蚀性能和强塑性配合良好的高温合金作为紧固件制作材料。对于紧固件来说, 松脱和松动是一种主要的失效形式, 因此紧固件材料的松弛性能相对持久强度更能反映材料的特性<sup>[1]</sup>。

常见的紧固件用高温合金主要有 GH2132、GH4169、GH4738 等。本研究的 GH4738 是一种 Ni-Cr-Co 基沉淀硬化型变形高温合金, 在 760~870 °C 具有较高的屈服强度和抗疲劳性能; 在 870 °C 以下的燃气涡轮氛围中具有较好的抗氧化和抗腐蚀性能; 加工塑性好、组织性能稳定。对 GH4738 合金的高温拉伸性能、蠕变性能、裂纹扩展速率及其组织关联性已经开展了大量研究<sup>[2,3]</sup>, 但是关于合金的应力松弛性能及机理相关方面的研究目前仍然较少。因此本工作针对 GH4738 在不同温度和初应力, 以及不同热处理条件对应力松弛行为的影响规律进行研究, 旨在探索该合金应力松弛的宏观规律和微观机理, 为使用该合金制造的紧固件服役过程中的工作条件选择及合金松弛规律提供实验依据。

## 1 实 验

试验所用 GH4738 合金经真空感应熔炼(VIM)+真空自耗重熔(VAR)双联工艺冶炼后热加工获得。其化学成分如表 1。

表 1 GH4738 合金化学成分

Table 1 Chemical composition of alloy GH4738 (wt%)									
C	Ti	Al	Mo	Co	Cr	B	Zr	Ni	
0.03	3.13	1.53	4.44	13.35	18.74	0.004	0.070	Bal.	

为了研究热处理制度对 GH4738 合金应力松弛行为的影响, 按照表 2 所列的工艺条件对合金进行了热处理。

试验采取 GB10120 规定的高温拉伸应力松弛试验方法, 试验设备为 RMT-D5SC 电子式高温应力松弛试验机。为了研究温度以及初应力对应力松弛行为的影响, 从使用 a 制度处理后的合金棒材上取样加工成标准试样, 分别进行 600, 700, 800 °C 下初应力为 510 MPa 的应力松弛试验以及 700 °C 下不同初应力 410, 510, 610 MPa 的应力松弛试验。为了对比不同热处理制度对 GH4738 合金应力松弛行为的影响, 又从使用 b 制度处理后的合金棒材上取样加工成标准试样, 进行了 700 °C 下 610 MPa 的应力松弛试验。

松弛试验完成后, 对采集到的实验数据整理为  $\sigma-t$  曲线, 之后对曲线进行拟合。为了更加明显的体现应

表 2 GH4738 的热处理工艺

Table 2 Heat treatment processes of alloy GH4738			
No.	Solution treatment	Stabilizing treatment	Aging treatment
a	1020 °C, 4 h, AC	845 °C, 4 h, AC	760 °C, 16 h, AC
b	1080 °C, 4 h, AC	845 °C, 24 h, AC	760 °C, 16 h, AC

收稿日期: 2016-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(51371023)

作者简介: 朱 擎, 男, 1990 年生, 硕士生, 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083, 电话: 010-62332884, E-mail: zhuqing9097@163.com

力松弛试验的阶段性的,对曲线进行数据转换之后得到  $\ln(d\varepsilon_p/dt) - \ln \sigma$  曲线,进一步分析合金松弛行为各阶段的规律。

将完成松弛试验之后的试样切取  $\Phi 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的组织分析样品。样品经过机械打磨抛光,并进行电解侵蚀之后使用场发射扫描电子显微镜 FESEM 观察析出相  $\gamma'$  和晶界碳化物  $M_{23}C_6$ 。电解侵蚀方法:将试样放于 150 mL 磷酸+10 mL 硫酸+15 g 铬酐的混合溶液中电解侵蚀 5~8 s,直流电压为 3~5 V,然后使用乙醇在超声波清洗器内清洗 10 min。

### 2 结果与讨论

应力松弛现象可通过应力松弛曲线来表征。松弛曲线通过应力松弛试验测定是在规定温度下,对试样施加载荷,保持初始变形量恒定,测定试样上的应力随时间变化而得到的曲线(图 1)。图中  $\sigma_0$  为初始应力,在任一时间试样上所保持的应力称为剩余应力  $\sigma_{sh}$ ;试样上所减少的应力,即初始应力与剩余应力之差称为松弛应力  $\sigma_{so}$ 。

根据  $\sigma-t$  应力松弛曲线可将松弛曲线分为 2 个阶段:开始时,随时间延长,试样上的应力下降很快,称为松弛第 1 阶段;此后应力下降逐渐减缓,称为松弛第 2 阶段;因为应力的下降有一个限度,曲线最后趋向于与时间轴平行,此时的应力称为松弛极限  $\sigma_r$ ,它表示在一定的初始应力和温度下,不再继续发生松弛的剩余应力。并且应力松弛的两个阶段中间存在一个槛应力  $\sigma'_0$ 。金属材料抵抗应力松弛的性能称为松弛稳定性。松弛稳定性可以由  $S_0 = \frac{\sigma'_0}{\sigma_0}$  表示,  $S_0$  称为晶间稳定系数;  $S_0$  值越大表明松弛稳定性越高。不同阶段内的应力松弛速率  $v_r$  由  $v_r = \frac{\Delta\sigma}{\Delta t}$  表示。应力松弛现象通常可以用松弛极限,松弛速率以及松弛稳定性进行表征。

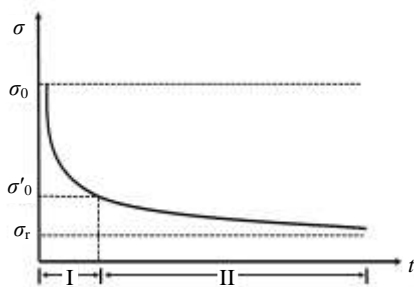


图 1 应力松弛曲线示意图

Fig.1 Schematic diagram of stress relaxation curve

本实验通过应力松弛曲线来研究温度、初应力以及热处理制度各个影响因素对 GH4738 合金应力松弛性能的影响。

#### 2.1 温度对 GH4738 应力松弛的影响

初应力为 510 MPa 合金在 600、700 和 800 °C 不同温度的应力松弛曲线如图 2a,从图中可以看出,初应力相同但温度不同的应力松弛试验曲线均表现出明显的两个阶段。应力快速下降的第 1 阶段和应力下降缓慢的第 2 阶段,符合松弛曲线的一般规律。但是仍然存在 3 个不同点,即第 1 阶段的下降幅度不同,发生长时间松弛之后的松弛极限不同以及两个阶段的转折点也必然不同。

首先对第 1 阶段的快速下降进行说明。此阶段发生时间较短,一般在 1 h 以内。相比 600、700、800 下的应力下降的更加剧烈。图 2b 表明,50 min 松弛后的剩余应力随温度呈抛物线变化,温度越高,剩余应力越小,第 1 阶段内的应力下降更为剧烈。

为了确定不同温度长时间松弛后的松弛极限,采用三次延迟函数对松弛曲线进行拟合,并有良好的拟合效果,如图 3a。

通过拟合曲线可以外推出长时间松弛之后的剩余应力,并且得出该温度下松弛极限的参考值。拟合方程为:

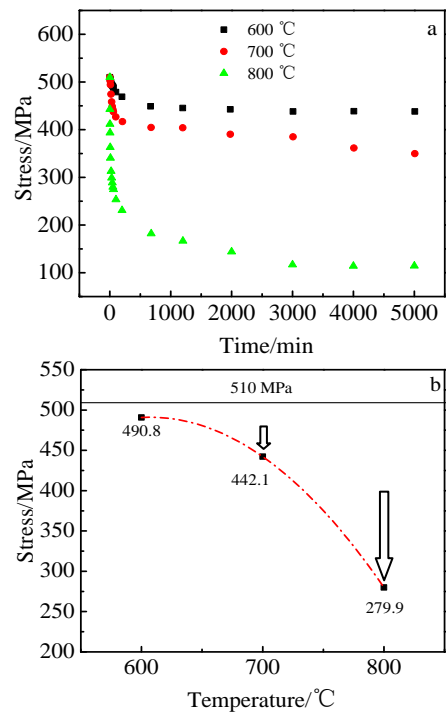


图 2 不同温度下的应力松弛曲线和 50 min 松弛后的剩余应力

Fig.2 Stress relaxation curve at different temperatures (a) and the residual stress after 50 min stress relaxation test (b)

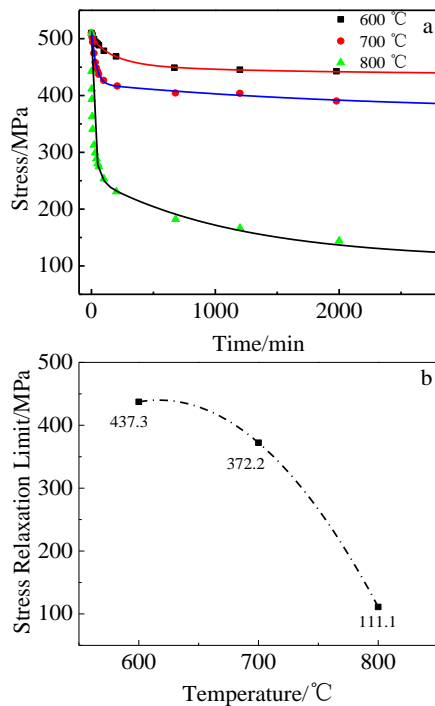


图 3 不同温度下松弛曲线的拟合和应力松弛极限

Fig.3 Fitting curves of stress relaxation (a) and the stress relaxation limit (b) at different temperatures

$$\sigma = \sigma_r + A_1 \exp\left(-\frac{t}{a}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{t}{b}\right) + A_3 \exp\left(-\frac{t}{c}\right)$$

式中,  $\sigma$  为瞬时应力;  $\sigma_r$  代表松弛极限,  $t$  为时间。而其余参数  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $a$ 、 $b$ 、 $c$  决定了曲线的形状, 取决于材料的特性及相关的实验条件。具体参数数值见表 3。

不同温度下的松弛极限如图 3b, 各个温度下拟合后的松弛极限都与实际试验 5000 min 松弛之后的剩余应力大小非常接近, 说明 5000 min 松弛后的应力几乎不再下降。而松弛极限随着温度的升高而呈抛物线型下降, 温度越高, 松弛极限也就越小。

为了找出松弛不同阶段的转折点, 对已有数据进行转换。在应力松弛试验中, 总变形量是保持恒定的, 而弹性变形逐渐转变为塑性变形。如果将总应变分为弹性应变以及塑性应变两部分。即:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_p + \varepsilon_{el} \quad (1)$$

表 3 应力松弛曲线的拟合参数

Table 3 Parameters of the fitting stress relaxation curves

$T/^\circ\text{C}$	$\sigma_r/\text{MPa}$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$a$	$b$	$c$
600	437.3	44.3	16.7	11.9	200.3	1525.9	27.8
700	372.2	46.7	46.7	48.2	36.2	36.2	2222.6
800	111.1	117.1	143.3	176.7	37.0	1164.5	1.8

$$\text{对时间求导: } \frac{d\varepsilon_t}{dt} = \frac{d\varepsilon_p}{dt} + \frac{d\varepsilon_{el}}{dt} \quad (2)$$

$$\text{总应变量不变, 则: } \frac{d\varepsilon_t}{dt} = 0, \quad \frac{d\varepsilon_p}{dt} = -\frac{d\varepsilon_{el}}{dt} \quad (3)$$

$$\text{又因为: } \frac{d\varepsilon_{el}}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (4)$$

$$\text{得到: } \frac{d\varepsilon_p}{dt} = -\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (5)$$

其中:  $\varepsilon_t$ 、 $\varepsilon_{el}$ 、 $\varepsilon_p$ 、 $E$  分别为总应变、弹性应变、塑性应变、弹性模量。由式(5)可以得到  $\ln(d\varepsilon_p/dt)-\ln\sigma$  曲线(图 4)。

$\ln(d\varepsilon_p/dt)-\ln\sigma$  曲线很好的印证了松弛过程的阶段性。在应力相对较高的区域, 对应松弛第 1 阶段, 此时的应变速率较高, 但是下降较慢。随着应力下降, 进入松弛第 2 阶段, 应变速率快速下降。两个阶段的应变速率基本呈不同斜率的线性变化, 可以用直线进行表征。

可以看出在此过程中存在一个阈应力  $\sigma'_0$ 。低于此阈应力  $\sigma'_0$  时, 塑性应变速率快速下降。把此阈应力  $\sigma'_0$  作为松弛第 1 阶段和第 2 阶段的分界点。从图 4 上可以发现, 600 和 700 °C 曲线相对应阶段的斜率基本相同, 说明在这两个温度下的塑性应变速率的变化速度一致。温度升高到 800 °C 之后, 曲线第 1 阶段的斜率变大, 说明应变速率下降变得更快。同时, 阈应力也随温度的升高而减小。

通过阈应力  $\sigma'_0$  可以计算应力松弛各个阶段的松弛速率(图 5)。600, 700 °C 时, 两个阶段松弛速率都比较接近, 而 800 °C 的松弛速率明显加快。总体来说, 应力松弛的各阶段松弛速率随着温度增加而变大。

一般认为, 应力松弛第 1 阶段主要发生在晶粒间, 由于应力在各晶粒间分布不均匀, 促使晶界扩散产生塑性变形导致应力下降。第 2 阶段主要发生在晶粒内部, 由亚晶的转动和移动引起应力的继续降低<sup>[4]</sup>。松弛稳定性可以用第 1 阶段的晶间稳定系数  $S_0$  表示。 $S_0$  由阈应

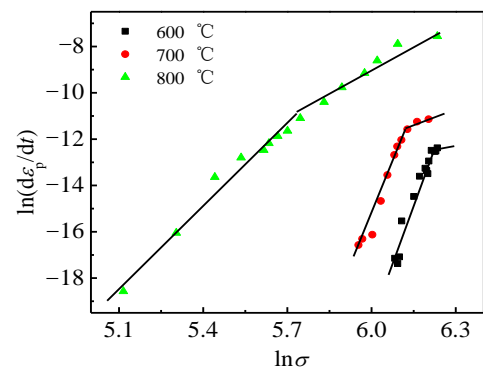


图 4 不同温度下的  $\ln(d\varepsilon_p/dt)-\ln\sigma$  曲线

Fig.4  $\ln(d\varepsilon_p/dt)-\ln\sigma$  curve at different temperatures

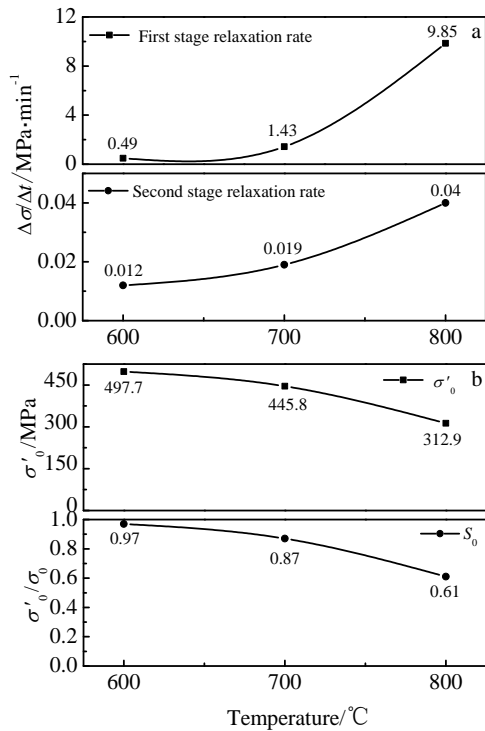


图 5 不同温度下各阶段松弛速率和槛应力  $\sigma'_0$  及晶间稳定系数  $S_0$

Fig.5 Relaxation rate of two stages (a) and the threshold stress  $\sigma'_0$  and grain stability coefficient  $S_0$  (b) at different temperatures

力  $\sigma'_0$  与初应力  $\sigma_0$  进行计算(图 5b)。晶间稳定系数  $S_0$  随着温度升高而降低,说明松弛稳定性随着温度下降。实际上,对比松弛试验前后的微观组织(图 6)可以发现,松弛试验前后的 GH4738 合金的  $\gamma'$  强化相形貌没有发生明显变化。并且不同温度的松弛试验对  $\gamma'$  强化相形貌也无明显影响。因为应力松弛和蠕变紧密联系,应力松弛的机理往往也采用蠕变理论进行解释。一般认为,松弛的第 1 阶段和第 2 阶段分别对应过渡蠕变和稳态蠕变<sup>[5]</sup>。蠕变速率与应力、温度的关系满足蠕变的本构方程。即式(6):

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (6)$$

式中,  $n$  为蠕变速率的应力指数,  $Q$  为形变激活能;  $R$  为气体常数;  $T$  为绝对温度。在松弛试验中,因为槛应力  $\sigma'_0$  的存在,将曲线分为应变速率下降慢的大应力区和应变速率下降快的小应力区,方程修正为式(7):

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A(\sigma - \sigma'_0)^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (7)$$

高温下的应力松弛往往是原子扩散和位错攀移、滑移,晶界和相界运动的复合机制的共同作用的结果。应力

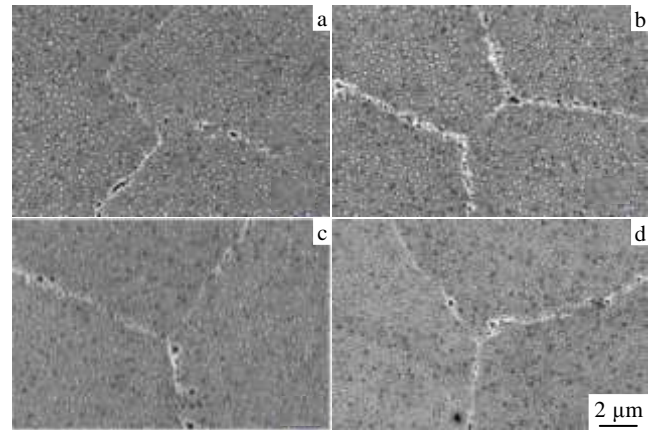


图 6 不同状态松弛前后的显微组织

Fig.6 SEM images of alloy GH4738 before and after stress relaxation: (a) before relaxation test; and relaxation tests under: (b) 600 °C/510 MPa; (c) 700 °C/510 MPa; (d) 800 °C/510 MPa

指数  $n$  可以为确定应力松弛机理提供参考。 $n=1\sim 2$  时是以扩散蠕变为主导的松弛过程<sup>[6,7]</sup>,而  $n=3\sim 9$  时以位错蠕变,即位错滑移以及攀移主要控制的松弛过程<sup>[8,9]</sup>。 $\ln(d\varepsilon_p/dt)-\ln\sigma$  曲线的斜率即对应于  $n$  值<sup>[10]</sup>。通过计算得到 600, 700, 800 °C 的应力松弛第 1 阶段  $n$  值分别为 4.5, 5.7, 6.5, 说明合金在 600~800 °C 时的应力松弛过程主要由位错运动主导。

另外,温度越高,其对应的槛应力越低,所需要的形变激活能更小,位错运动更容易进行,所以松弛更易发生,松弛极限也就越低。

综上所述,随着温度的升高,合金的松弛稳定性下降,应力松弛速率加快,松弛极限降低。

### 2.2 初应力对 GH4738 应力松弛的影响

图 7a 为 700 °C 下初应力分别为 410, 510, 610 MPa 的松弛曲线。曲线同样表现出虽然时间较短但是应力快速下降的第 1 阶段和随着时间延长应力继续缓慢下降的第 2 阶段。图 7b 表明,长时间松弛之后的松弛极限随着初应力的降低而降低,变化无线性关系。

使用与前节相同方法进行数据转换,得到不同初应力下的  $\ln(d\varepsilon_p/dt)-\ln\sigma$  曲线(图 8)。与温度情况相似的是,在应力相对较高的松弛第 1 阶段,此时拥有较高的应变速率,但是应变速率下降缓慢。随着应力下降,进入松弛第 2 阶段,应变速率快速下降。同样使用直线进行表征两个阶段的应变速率的下降趋势,与温度情况有所不同,不同初应力的曲线对应阶段斜率基本相同。说明在 410, 510, 610 MPa 的松弛过程中,对应阶段的应变速率变化的快慢基本相同。而槛应力随

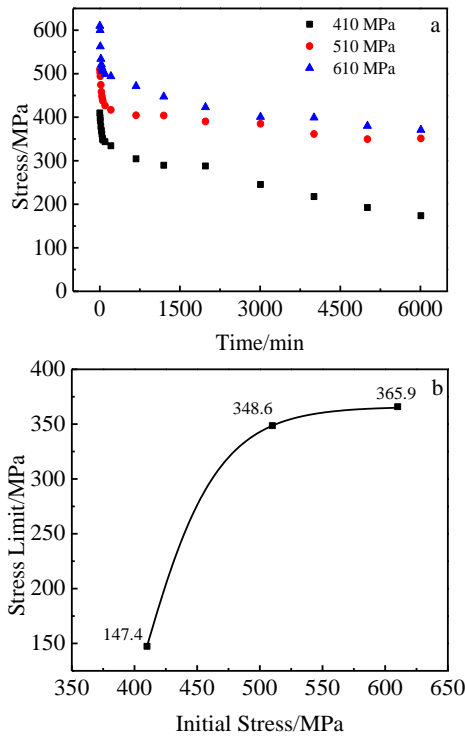


图 7 不同初应力下的松弛曲线和松弛极限

Fig.7 Stress relaxation curve (a) and the relaxation limit at different initial stress (b)

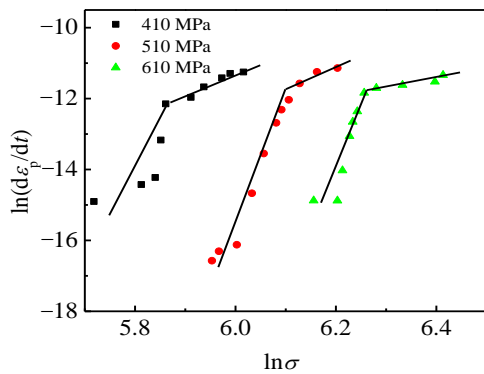


图 8 不同初应力下的  $\ln(d\epsilon_p/dt)-\ln\sigma$  曲线

Fig.8  $\ln(d\epsilon_p/dt)-\ln\sigma$  curve at different initial stress

着初应力的降低而降低。

通过阈应力  $\sigma'_0$  进行计算松弛速率和晶间稳定系数  $S_0$ ，如图 9a 和图 9b。不同初应力下的松弛第 1 阶段的松弛速率随着初应力的增加而变大。第 2 阶段的松弛速率都相对较小而接近。图 5b 表明，晶间稳定系数  $S_0$  随着温度升高而降低，说明松弛稳定性随着温度下降。但在图 9b 中，发现在同一温度下，晶间稳定系数几乎不随着应力变化而变化，说明与温度相比，初应力对材料松弛稳定性影响不大。

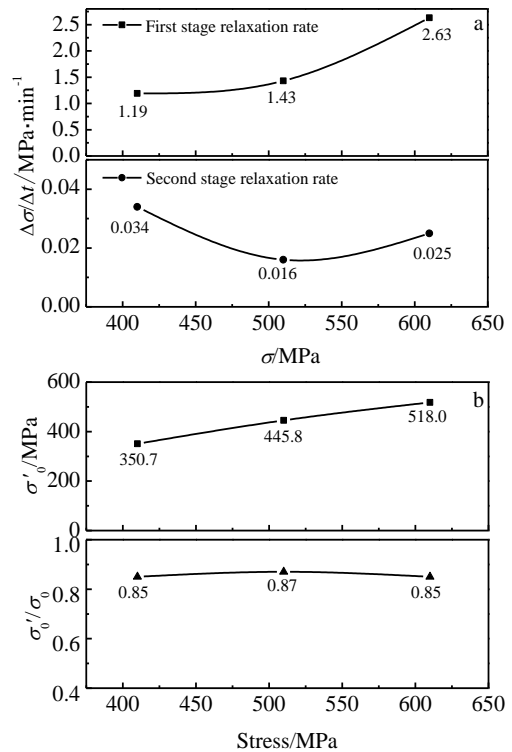


图 9 不同初应力下各阶段松弛速率和阈应力及晶间稳定系数  $S_0$

Fig.9 Relaxation rate of two stages (a) and the threshold stress  $\sigma'_0$  and grain stability coefficient  $S_0$  (b) at different initial stress

同样计算得到 410, 510, 610 MPa 下的应力指数分别为 5.9, 5.7, 4.2，说明在此应力范围内仍然属于位错运动为主导的松弛过程。初应力越大，其对应的阈应力越大，所需的形变激活能更大，位错运动不易进行，所以松弛抗性更大，松弛极限也就越高。

综上所述，随着初应力的提高，合金的第一阶段松弛速率加快，松弛极限有所增大。但是松弛稳定性不随初应力变化而变化。

### 2.3 热处理制度对 GH4738 应力松弛的影响

姚志浩等人研究了固溶温度对 GH4738 合金  $\gamma'$  相析出规律的影响<sup>[2]</sup>。证明了 a 制度(1020 °C, 4 h, AC+845 °C, 4 h, AC+760 °C, 16 h, AC)热处理后的合金，具有较好的强塑性配合，尤其在塑性指标有明显的优势；而经 b 制度(1080 °C, 4 h, AC+845 °C, 24 h, AC+760 °C, 16 h, AC)热处理后的合金，具有优异的持久性能。但是研究未涉及  $\gamma'$  相对松弛性能的影响。

本试验经过两种热处理后的合金组织如图 10 所示，经 a 制度标准热处理后的合金，晶界碳化物呈现断续分布，而  $\gamma'$  强化相以两种尺寸状态存在于基体中。而经 b 制度标准热处理后的合金，晶界碳化物呈现连

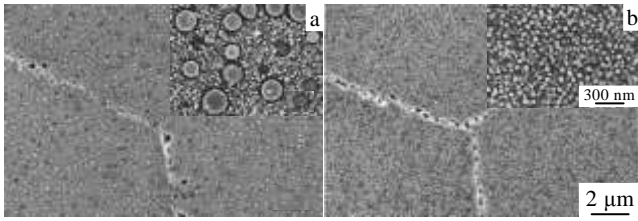


图 10 不同热处理制度后的 GH4738 显微组织

Fig.10 SEM image of alloy GH4738 under different heat treatment systems: (a) 1020 °C, 4 h, AC+845 °C, 4 h, AC+760 °C, 16 h, AC and (b) 1080 °C, 4 h, AC +845 °C, 24 h, AC+760 °C, 16 h, AC

续分布,而  $\gamma'$  强化相则以均一尺寸形式分布于基体中,与文献[2]描述一致。

图 11a 为经过两种制度热处理的 GH4738 在 700 °C 610 MPa 下的应力松弛曲线。两条曲线在松弛第 1 阶段几乎重合。而从松弛第 2 阶段开始, b 制度热处理的合金应力下降更为迅速,最终 6000 min 松弛之后的剩余应力也低于 a 制度热处理的 GH4738 合金。

使用与前节相同方法进行数据转换,得到不同热处理制度下的  $\ln(d\varepsilon_p/dt) - \ln\sigma$  曲线,如图 11b。同样使

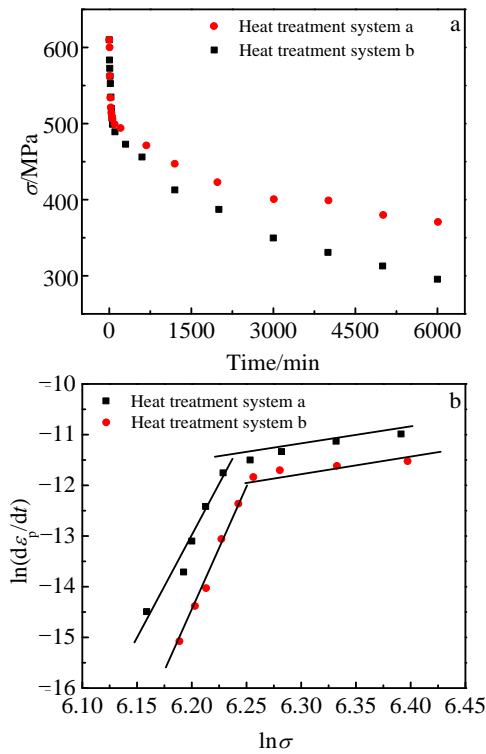


图 11 不同制度热处理之后的应力松弛曲线和  $\ln(d\varepsilon_p/dt) - \ln\sigma$  曲线

Fig.11 Stress relaxation curves (a) and the  $\ln(d\varepsilon_p/dt) - \ln\sigma$  curves (b) under different heat treatment systems

表 4 不同热处理制度下各阶段松弛速率

Table 4 Relaxation rate of two stages under different heat treatment systems

Heat treatment systems	Relaxation rate of first stage/MPa $\cdot$ min <sup>-1</sup>	Relaxation rate of second stage/MPa $\cdot$ min <sup>-1</sup>
a	2.63	0.025
b	2.63	0.036

用直线进行表征松弛两个阶段的应变速率的下降趋势。可以发现 a 制度和 b 制度的曲线形状一致,对应阶段的斜率相同,说明松弛过程中应变速率变化的快慢一致。而 b 制度的初始应变速率更大,所以相同应力下 b 制度的应变速率始终大于 a 制度的应变速率。并且两种制度的阈应力大小相等。

通过阈应力  $\sigma'_0$  进行计算松弛速率(表 4)。制度 a 与制度的 b 的第一阶段松弛速率相同。b 制度的第二阶段松弛速率略大于 a 制度。由于阈应力大小相等,晶间稳定系数  $S_0$  必然相等,松弛稳定性没有差别。

不同的固溶温度和稳定化热处理工艺主要影响了合金松弛过程的第 2 阶段,对其阈应力及松弛稳定性均无明显影响。b 制度的第 2 阶段松弛速率较大,长时间松弛之后的松弛极限也相对较低。由于两种热处理后合金显微组织不同, a 制度下的松弛极限较高可能是  $\gamma'$  强化相和晶界上碳化物形貌及分布共同作用的结果。

综上所述, GH4738 制作紧固件或弹性元件,使用温度在 700 °C 以下时拥有较好的松弛性能。若采用提高初载荷或预紧力提高松弛极限,需要综合考虑持久强度和蠕变性能的影响。可以参考 1020 °C, 4 h, AC+845 °C, 24 h, AC+760 °C, 16 h, AC 的热处理制度进行样品加工获得较高的松弛抗性。

### 3 结 论

1) GH4738 合金在 700 °C 以下服役时松弛稳定性较高。随着温度升高,合金的松弛稳定性下降明显,各阶段松弛速率加快,松弛极限下降。随着初应力的提高,合金的第 1 阶段松弛速率加快,松弛极限有所增大。但是松弛稳定性不随初应力变化而变化。应力松弛曲线可以用三次延迟函数进行拟合。

2) GH4738 两种标准热处理工艺 a 和 b 主要影响了 GH4738 合金松弛过程的第 2 阶段,对其阈应力及松弛稳定性均无明显影响。其中低固溶温度的热处理制度 a 松弛极限更大。

3)  $\ln(d\varepsilon_p/dt) - \ln\sigma$  曲线很好的印证了松弛曲线的两个阶段,并且两个阶段的分界点存在一个阈应力

$\sigma'_0$ , 低于此槛应力时, 塑性应变速率快速下降。

#### 参考文献 References

- [1] Guo Jianting(郭建亭). *Materials Science and Engineering for Superalloys*(高温合金材料学, 下册)[M]. Beijing: Science Press, 2010: 821
- [2] Yao Zhihao(姚志浩), Dong Jianxin(董建新), Zhang Maicang(张麦仓) *et al. Transactions of Materials and Heat Treatment* (材料热处理学报)[J], 2011, 32(7): 44
- [3] Yao Zhihao(姚志浩), Dong Jianxin(董建新), Zhang Maicang(张麦仓) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2010, 39(9): 1565
- [4] Yang Wangyue(杨王玥), Qiang Wenjiang(强文江). *Mechanical Behavior of Materials*(材料力学行为)[M]. Beijing: Science Press, 2009: 173
- [5] Ping Xiuer(平修二). *High Temperature Strength Theory and Design in Metal Materials*(金属材料的高温强度理论设计)[M]. Beijing: Science Press, 1983: 162
- [6] Watanabe H, Mukai T, Kohzu M *et al. Acta Materialia*[J], 1999, 47(14): 3753
- [7] Ruano O A, Sherby O D. *Revue de Physique Appliquée*[J], 1988, 23(4): 625
- [8] Somekawa H, Hirai K, Watanabe H *et al. Materials Science and Engineering*[J], 2005, 407(1): 53
- [9] Watanabe H, Tsutsui H. *International Journal of Plasticity*[J], 2001, 17: 387
- [10] Chen J F, Jiang J T, Zhen L *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2014, 214(4): 775

## Stress Relaxation Behavior of GH4738 Superalloy

Zhu Qing, Dong Jianxin, Zhang Maicang, Yao Zhihao

(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The effects of the temperature, the initial stress and various heat treatment regimes on the stress relaxation in the superalloy GH4738 were investigated. The results indicate that a threshold stress is found between two stages. Below the threshold stress, the plastic strain rate falls fast. The relaxation stability of the alloy decreases with the increase of temperature; meanwhile, the stress relaxation rate rises and the relaxation limit declines. The stress relaxation rate of the first stage speeds up and the relaxation limit increases when the initial stress is improved. Different heat treatment systems mainly affect the second stage of the stress relaxation, whereas, no obvious influence is observed on the threshold stress and the relaxation stability.

**Key words:** GH4738; stress relaxation; temperature; initial stress; heat treatment systems

---

Corresponding author: Zhu Qing, Candidate for Master, School of Material Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-62332884, E-mail: zhuqing9097@163.com