

[补充信息]

添加气膜孔对于镍基单晶合金 DD6 蠕变寿命的影响

盛传德¹, 熊新红^{1,3,✉}, 朱超¹, 戴彭丹¹, 章桥新²

1 武汉理工大学, 物流工程学院, 武汉 430063;

2 武汉理工大学机电学院, 武汉 430070;

3 武汉理工大学港口物流技术与装备教育部工程研究中心, 武汉 430063

[Supplementary Information]

Effects of Cooling Hole Addition on Creep Lifetime of Nickel-based Single Crystal Superalloy DD6

SHENG Chuande¹, XIONG Xinhong^{1,3,✉}, ZHU Chao¹, DAI Pengdan¹, Zhang Qiaoxin²

1 School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063;

2 School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070;

3 Engineering Research Center of Port Logistics Technology and Equipment, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063

实验试剂与仪器

本实验中用到的镍基单晶试棒是由西北工业大学提供的, 在长条形蠕变试样的制备过程中, 使用的电火花数控线切割机床(型号: DK7732E)是由苏州中航长风有限公司生产制造的, 并使用精密数控电火花成型机床(型号: EDM350)在试样两端各加工一个 $\Phi 4$ mm的圆孔作为蠕变实验的夹持端, 气膜孔是采用 Libra-HE 飞秒激光器进行加工形成的。试样加工完成后, 将试样放在(RDJ50)机械式持久蠕变试验机中, 首先将试样加热到蠕变试验所要求的 1000 °C, 保温一段时间, 再施加 200 MPa 的应力载荷。

表面形貌测试采用的是 QUANTA400 扫描电子显微镜(试样断口形貌观察) QUANTA FEG450 场发射扫描电子显微镜(蠕变前合金的微观组织观察和断口附近表面微观组织观察), 采用的腐蚀溶液为 50 ml HCl + 40 ml H₂O + 20 g CuSO₄。抛光设备为 PG-2 金相试样抛光机。将试样进行机械减薄后, 试样的厚度由原先的 1.5 mm 变为现在的 70~80 um, 然后通过透射电镜样品冲样器冲出一个 $\Phi 3$ mm 的样品, 然后将样品放入电解双喷减薄仪(Struers TenuPol-5)中进行样品减薄, 最后将样品放入透射电子显微镜(JEM-2100FXII)中进行合金的微观组织及位错的特征观测。

γ' 相筏化方向转动原因

可以看出 B 处的 γ' 筏形组织还没有完全形成, 水平方向的 γ 基体也没有完全消失, 并且还存有少量的立方态的 γ' 相, 这是因为在单向拉伸过程中由于断口附近发生变形形成了缩颈区, 在正前方的 B 处所受单向应力要小于旁边 C、D 区所受的三向应力。局部应力与 γ' 相筏化速率有密切关系, 因此 B 处

的筏化不完全。而在 C、D 处可以看出 γ' 相已经完全筏化，两区域的变形程度相差不大， γ' 相的平均尺寸厚度都增加到 0.6 μm ， γ 基体通道的平均宽度增加到 0.3 μm ，在 C 处和 D 处， γ' 相筏化方向与应力轴分别成 65°和 80°。由于受到三向应力的作用，缩颈区内的晶格发生转动， γ' 筏化长条状结构也随之转动。

镍基单晶高温合金化学元素成分表

表 S1 镍基单晶高温合金 DD6 的化学元素成分比例

Table S1 Chemical composition of nickel-based single crystal superalloy DD6 (wt-%)

Al	Ti	Cr	Co	Mo	Hf	Ta	Re	Ni
5.7	6.5	4.3	7	2	0.1	7.5	2	Bal.

不同尺度下飞秒激光打孔形貌图

下图是气膜孔的局部放大形貌图，从图 S1(a)中可以看出孔的周围平整光滑，轮廓清晰，没有毛刺、变形和微裂纹的产生，图 S1(b)和图 S1(c)分别是在图 S1(a)中的 A 区域放大 500 倍和 2000 倍后的图像，图 S1(b)与图 S1(a)相似，气膜孔周围平整光滑。图 S1(c)的表面较为粗糙是由于条形试样在加工制造过程中的机器误差。因此可以认为不存在加工应变层。

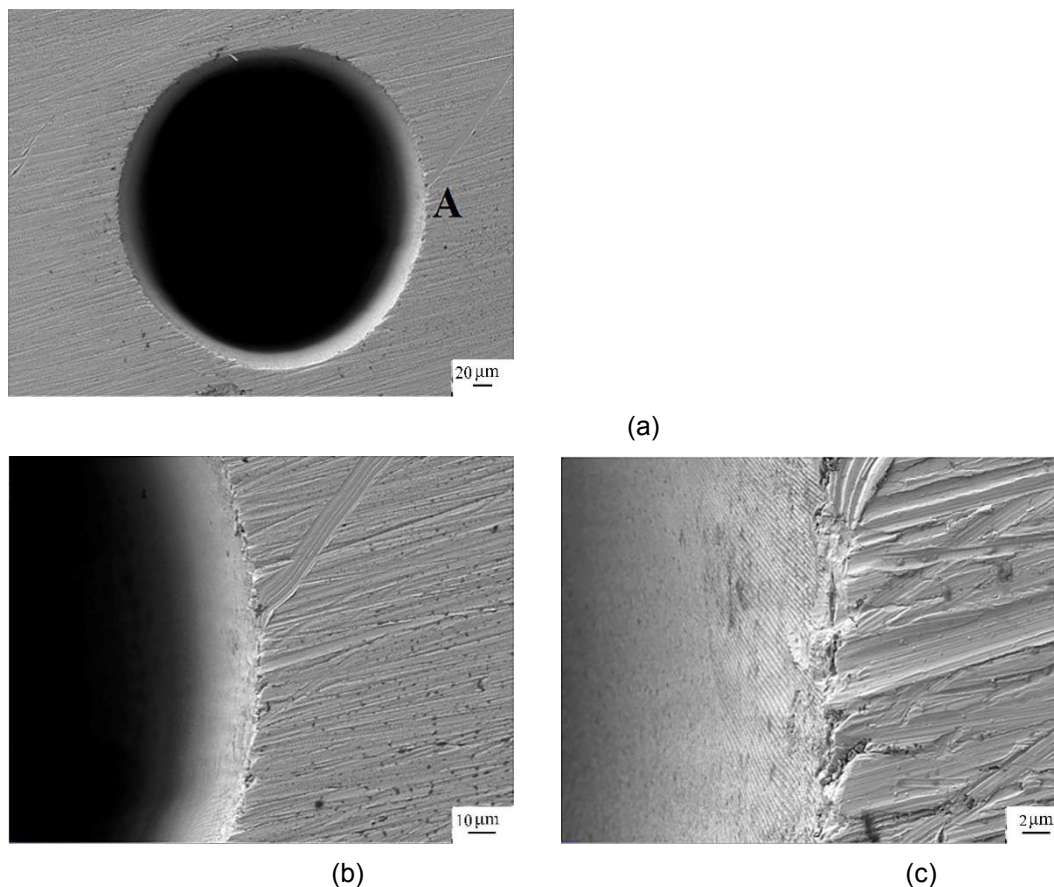


图 S1 不同倍数下的飞秒激光打孔形貌图：(a) 100 倍，(b) A 区域放大 500 倍，(c) A 区域放大 2000 倍

Fig.S1 The morphology diagram of drilling by Femtosecond Laser under different multiples: (a) $\times 100$, (b) zone A enlarged, $\times 500$, (c) zone A enlarged, $\times 2000$

加工试样尺寸示意图

图 S2 是此次蠕变实验的带气膜孔试样的加工尺寸示意图和进行蠕变实验后使用扫描电镜对试样进行观察的区域示意图，其中试样的加工尺寸是参照国标标准进行的。

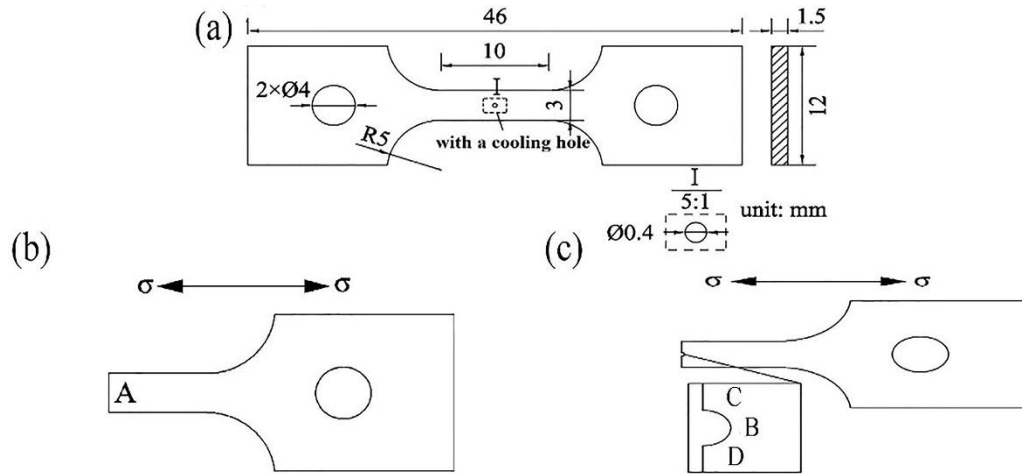


图 S2 试样加工尺寸示意图以及蠕变断裂后通过扫描电镜观察的区域示意图：(a)带气膜孔试样（试样 2）的尺寸示意图，(b) 不带气膜孔试样（试样 1）的观察区域 A，(c) 带气膜孔试样（试样 2）的观察区域 B, C, D
Fig. S2 Schematic illustration and observed region by SEM after crept up to rupture, respectively: (a) schematic illustration of sample 2 with a cooling hole, (b) region A of sample 1 without cooling hole, (c) regions B, C and D of sample 2 with a cooling hole