

# 热作模具钢在高温热机械应力循环下的疲劳断裂行为

High Temperature Fatigue and Fracture Behavior of Hot Work Die Steel under Mechanical and Thermo-mechanical Cyclic Loads

方健儒, 姜启川 (吉林大学材料科学与工程学院, 长春 130025;  
韩增祥, 王海清 (北京航空材料研究院, 北京 100095)

FANG Jian-ru, JIANG Qi-chuan (Department of Materials  
Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

HAN Zeng-xiang, WANG Hai-qing  
(Institute of Aeronautical of Materials, Beijing 100095, China)

**摘要:** 研究了热作模具钢在应力控制下的等温疲劳和同相热机械疲劳寿命, 发现在相同的应力幅下, 同相热机械疲劳寿命低于上限温度的等温疲劳寿命。通过研究疲劳过程中的循环应变响应和疲劳断口特征时发现, 等温疲劳条件下, 滞后环朝压缩方向发展, 疲劳裂纹主要为穿晶萌生与扩展; 在热机械疲劳条件下, 滞后环朝拉伸方向发展, 疲劳裂纹主要沿晶萌生与扩展。这是导致同相热机械疲劳寿命低于等温疲劳的主要原因。

**关键词:** 热作模具钢; 热机械疲劳; 等温疲劳; 温度循环; 应力控制

**中图分类号:** TG113.26+1; TG113.26+2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4381 (2002) 10-0011-04

**Abstract:** The fatigue lives of in-phase thermo-mechanical fatigue (TMF) and isothermal fatigue (IF) were carried out in cast hot work die steel in stress control in this paper. At the same stress amplitude, the lives obtained under in-phase thermo-mechanical fatigue conditions are lower than those obtained under isothermal fatigue conditions at the maximum temperature. In TMF tests, the hysteresis loops move in the tensile direction and the path of the crack initiation and growth is mainly intergranular. In IF tests, the hysteresis loops move in the compressive direction and the path of the crack growth is transgranular.

**Key words:** cast hot work die steel; thermo-mechanical fatigue; isothermal fatigue; temperature cycle; stress control

当把炽热的锻件放入到热作模具型腔时, 模具表面急剧升温, 表面的热膨胀由于受到温度较低的次表面层的约束而受到压应力和产生压应变; 反之, 当锻件取出时, 模具表面由于急剧降温 (通常采用喷水或喷雾冷却) 而受到拉应力和拉应变; 另外, 热作模具还受到周期性的机械载荷的作用, 通过有限元分析发现, 型腔的尖角或凹槽等应力集中部位常因循环的塑性变形而萌生裂纹<sup>[1,2]</sup>。因此, 热作模具的失效往往是热循环和机械循环的共同作用, 即热机械疲劳失效<sup>[3,4]</sup>。正确认识热作模具钢的热机械疲劳本质, 对于其正确的成分设计、热处理、选材和模具设计以及提高使用寿命具有重要的指导意义。

热机械疲劳是部件疲劳损伤中最为复杂的课题, 它涉及到载荷循环、温度循环、蠕变和环境效应等多种因素。由于热机械疲劳需要昂贵的设备, 而且周期

长, 人们往往以等温疲劳性能来代替热机械疲劳性能。很多材料的热机械疲劳 (TMF) 寿命高于最高温度下的等温疲劳 (IF) 寿命, 因此, 人们常用最高温度下等温疲劳寿命来代替热机械疲劳寿命, 希望得到可靠的结果。而本研究的新 Cr-Ni-Mo 铸造热作模具钢却出现了相反的结果, 热机械疲劳 (TMF) 寿命低于最高温度下的等温疲劳 (IF) 寿命, 而此时用最高温度下等温疲劳寿命来代替热机械疲劳寿命, 将得不到安全的结果。本工作通过研究疲劳过程中的循环应变响应和疲劳断裂发现, 同相热机械疲劳产生的沿拉伸方向的循环蠕变和沿晶开裂是导致其寿命低于等温疲劳的主要原因。

## 1 实验材料与实验方法

实验用新型 Cr-Ni-Mo 铸造热作模具钢的化学成

分为(质量分数/%) C 0.18, Cr 3.0, Ni 2.0, V 0.3, Si 0.4, Mn 0.4, P, S< 0.03。采用中频感应电炉不氧化法炼钢工艺熔炼,浇注成 Y 型试样。热处理工艺为: 1020 ×1h 油淬, 450 ×2h 回火<sup>[5]</sup>。组织主要由马氏体、贝氏体和残余奥氏体组成, 大量的 Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 和 V<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 等碳化物分布在晶界与相界<sup>[6, 7]</sup>。

热机械疲劳实验由机械循环和温度循环叠加构成。机械循环由电液伺服疲劳试验机实现, 试样由高频感应加热, 压缩空气通过感应圈内的小孔来吹冷试样。温度的测量采用 Raytek 红外固定式非接触测温仪测温, 应变的检测是由高精度高温应变引伸计来实现, 引伸计上的两根头部为楔形的石英棒穿过高频感应圈的间隙, 夹持在试样的楔形槽内。温度控制和应力控制为两个闭环控制系统。热机械疲劳试样采用直径为 6mm, 标距为 20mm 的拉压柱形试样。为了防止表面加工划痕的影响, 在试样标距范围内进行了抛光处理。

实验采用应力控制的疲劳实验, 选取了 1400, 1500, 1600 和 1800 MPa 四种应力范围, 应力比  $R = -1$ , 最低温度为 250 , 最高温度为 550 。由于热

作模具的疲劳裂纹常常在型腔的尖角或凹槽等应力集中处萌生, 该处在锻造过程中往往受到的是拉应力和拉应变。所以, 本实验选用同相位和频率的温度和应力循环, 即最大拉伸应力对应最高温度, 最大压缩应力对应最低温度, 温度波形和载荷波形均为三角波。实验过程中, 所有设备均由计算机自动控制完成, 所有的实验数据也被自动记录, 并通过 JSM -5600LV 扫描电镜来进行断口分析。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 疲劳寿命

表 1 和表 2 是新型铸造热作模具钢在不同应力幅度下的热机械疲劳寿命(最高温度 550 , 最低温度 250 ) 和等温疲劳寿命(温度 550 )。比较表 1 和表 2 可以看出, 在相同的应力幅度下, 等温疲劳的寿命明显高于同相热机械疲劳的寿命。这表明在相同的应力幅下, 热机械疲劳比等温疲劳产生更严重的损伤。在应力控制的钼基合金和一些铁基合金的热机械疲劳和等温疲劳实验中也发现了相同的规律<sup>[8, 9]</sup>。因此, 可以认为, 传统的以最高温度的等温疲劳的数据来设计具有变温情况的工程构件, 并不一定能得到保守的寿

表 1 同相位热机械疲劳试验的主要结果 (250~ 550 )  
Table 1 Main results of in-phase TMF tests (250 ~ 550 )

试样号	载荷幅度 /kg	应力幅度 /MPa	第一循环的应变幅度/ %	循环 1/2 寿命的应变幅度/ %	断裂前的应变幅度/ %	疲劳寿命 (cycles)
01	3500	700	< 0.01	0.067	0.176	1093
02	3750	750	< 0.01	0.090	0.317	669
03	4000	800	< 0.01	0.110	0.342	505
04	4500	900	0.011	0.189	0.476	192

表 2 等温疲劳实验的主要结果 (550 )  
Table 2 Main results of IF tests at 550

试样号	载荷幅度 /kg	应力幅度 /MPa	第一循环的应变幅度/ %	循环 1/2 寿命的应变幅度/ %	断裂前的应变幅度/ %	疲劳寿命 (cycles)
05	3000	700	< 0.01	0.067	0.42	2599
06	4000	800	< 0.01	0.082	0.79	1450
07	4500	900	0.013	0.190	1.40	448

命预测, 该工程构件极有可能是不安全的。

### 2.2 应力-应变响应

从实验记录的数据中, 可以得到疲劳过程中应力-应变响应。无论是等温疲劳还是热机械疲劳, 在刚开始时只有很小的塑性应变存在(甚至小于 0.01%), 加载和卸载几乎是弹性的。随着循环的进行, 塑性应变

增大, 滞后环面积增大, 在断裂前达到最大。在相同载荷幅度下, 等温疲劳的塑性应变增长速率大于热机械疲劳。等温疲劳的塑性应变范围大于热机械疲劳(见表 1)。在应力控制条件下, 塑性应变的增大表明该热作模具钢在疲劳过程中发生了循环软化。由此可见, 在等温疲劳和热机械疲劳实验中都发现了循环软

化特征，而且等温疲劳的软化速率大于热机械疲劳。  
在等温疲劳和热机械疲劳实验中都发现了滞后环的移动。值得注意的是，在热机疲劳条件下滞后环朝拉伸方向移动 (如图 1a 所示)，而在等温疲劳过程

中却发现滞后环朝压缩方向移动 (如图 1b 所示)。滞后环的移动表明热作模具钢在热机械疲劳条件下发生了拉伸循环蠕变 (或棘轮效应)，在等温疲劳条件下发生了压缩循环蠕变。

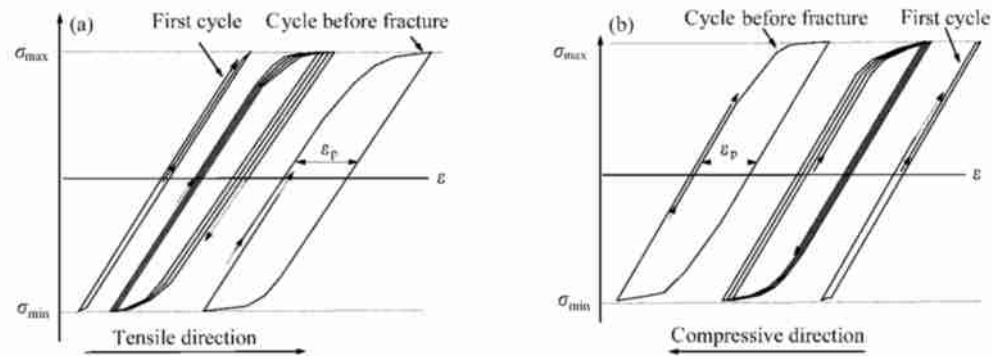


图 1 循环软化和循环蠕变示意图 (a) TMF; (b) IF  
Fig. 1 Schematic showing of the cyclic softening and creep phenomenon (a) TMF; (b) IF

2.3 断口特征

通过扫描电镜观察分析了不同实验条件下的断口特征。观察发现，试样断口没有明显的疲劳裂纹扩展区，只有疲劳裂纹萌生区和瞬断区。无论是等温疲劳还是热机械疲劳，其疲劳区与瞬断区相比都很小 (见图 2a)，这表明疲劳裂纹萌生占用了试样寿命的大

部分时间。观察还发现，在等温疲劳条件下，疲劳裂纹主要为穿晶萌生与扩展 (见图 2b)。而在热机械疲劳条件下，当应力幅度为 700MPa 时，疲劳裂纹主要沿晶萌生与扩展 (见图 2c)，随着应力幅度的增加，逐渐出现了穿晶扩展的特征，在应力幅度达到 900MPa 时，沿晶+ 穿晶类型的混合断裂已成为疲劳断裂的主

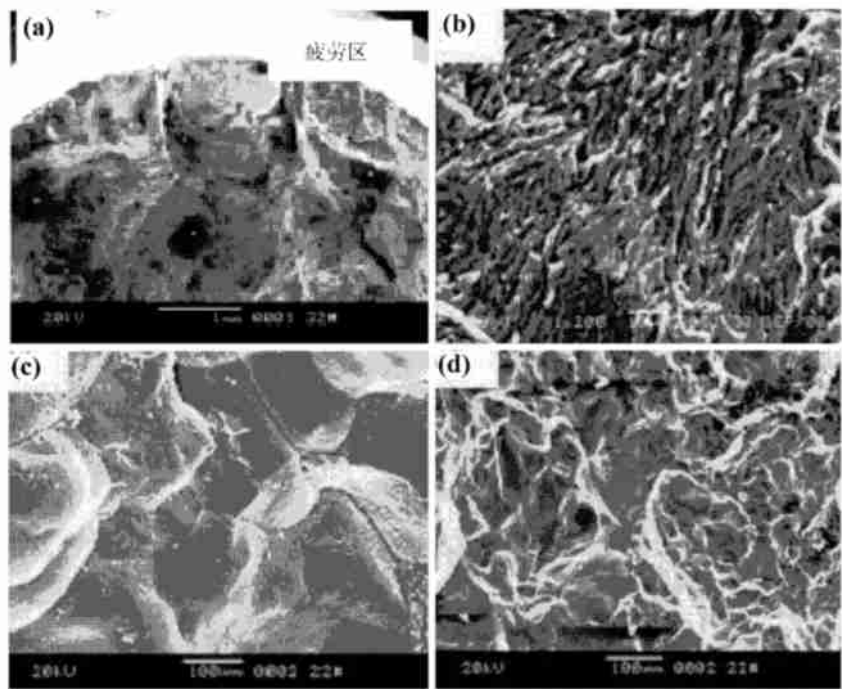


图 2 试样断口扫描图像 (a) TMF, 断口表面; (b) IF, 800MPa; (c) TMF, 700MPa; (d) TMF, 900MPa  
Fig. 2 SEM image on the fracture of the specimens  
(a) TMF, total fracture surface; (b) IF, 800MPa; (c) TMF, 700MPa; (d) TMF, 900MPa

要特征 (见图 2d)。

## 2.4 分析与讨论

在应力控制的低周疲劳中, 塑性变形的出现导致平均应力出现。而且, 塑性变形导致蠕变应变的产生, 累计的蠕变变形导致附加的损伤产生<sup>[10]</sup>。循环蠕变是一种复杂的行为, 与组织特征、平均应力、应力幅度、温度和载荷历史有关<sup>[11]</sup>。这种蠕变变形在平均载荷为零的条件下也能发生<sup>[12]</sup>。在拉-压对称同相 TMF 实验中, 由于高温弹性模量小于低温弹性模量, 每一循环的拉伸塑性变形大于压缩塑性变形, 因此产生了拉伸循环蠕变, 这一点是很容易理解的。在拉-压对称 IF 实验中, 产生压缩循环蠕变的原因虽然还不是很清楚, 但人们已经在铸铁、马氏体时效钢和大多数复合材料中也发现了相同的现象<sup>[13]</sup>。我们知道, 疲劳裂纹或缺陷在拉应力或拉应变下趋于张开, 裂纹尖端将是重要的应力集中点。当一拉伸方向的循环蠕变与交变载荷叠加时, 应力集中将起到重要的作用, 促进疲劳裂纹的萌生与扩展。因此, 在热机械疲劳实验条件下, 疲劳损伤在两个方向上得以加强。一方面, 由于循环软化, 塑性应变逐渐增大; 另一方面, 拉伸循环蠕变使平均应变达到材料的断裂延性<sup>[11]</sup>。而在等温疲劳中, 当一压缩方向的循环蠕变与交变载荷叠加时, 应力集中的作用将减少, 疲劳损伤减轻; 同时, 由于周围材料的限制, 压缩方向的循环蠕变不容易引起屈曲<sup>[11]</sup>, 这都有利于提高其疲劳寿命。该铸造热作模具钢由于成分偏析的影响在晶界处富集有大量的夹杂物和碳化物。在热机械疲劳过程中交变热应力能够加速碳化物的积聚与长大<sup>[14]</sup>。同时, 由于钢中夹杂物和碳化物粒子的热膨胀系数、导热系数与基体不同, 因而导致粒子与基体交接处产生较大的应力; 从微观组织来看, 大量位错在粒子周围塞积, 使粒子周围产生很大的弹性应力集中<sup>[14]</sup>, 这两类内应力均促使粒子与基体脱开, 所以在热机械疲劳过程中裂纹趋向于沿晶萌生。而在等温疲劳条件下没有交变热应力的影响, 疲劳裂纹趋向于穿晶萌生与扩展。应力幅度愈小, 寿命愈长, 冷热循环次数愈多, 沿晶愈明显。疲劳裂纹的沿晶萌生需要的能量比穿晶萌生小, 因此, 在相同的应力幅度下, 热机械疲劳的寿命比等温疲劳的寿命短。这将对该类热作模具钢的设计与选材产生深远的影响, 因为人们在进行高温部件的设计与选材时, 通常认为最高温度的等温疲劳将产生更大的损伤, 往往以该材料的高温疲劳数据作为参考以期得到更加可靠的设计。从本实验可知, 对于某些材料来说, 热机械疲劳将产生更大的损伤, 寿命比等温疲劳寿命短, 用等温疲劳的数据进行设计并不能得到可靠的设计结果。

## 3 结论

(1) 在相同的应力幅度下, 等温疲劳的寿命明显高于同相热机械疲劳的寿命, 因此, 在温度变化的情况下用最高温度的等温疲劳数据进行设计并不一定得到保守的结果。

(2) 在等温疲劳和热机械疲劳实验中都发现了循环软化和循环蠕变特征。在热机械疲劳时, 滞后环朝拉伸方向发展; 等温疲劳时, 滞后环朝压缩方向发展。

(3) 在等温疲劳条件下, 疲劳裂纹主要为穿晶萌生与扩展。而在热机械疲劳条件下, 当应力幅度为 700MPa 时, 疲劳裂纹主要沿晶萌生与扩展, 随着应力幅度的增加, 逐渐出现了穿晶扩展的特征。

### 参考文献

- [1] Nagao Y, Knoer M, Altan T. *Journal of Materials Processing Technology*, 1994, 46: 73- 77.
- [2] Lange K, Hetting A, Knoerr M. *Journal of Materials Processing Technology*, 1992, 35: 495- 501.
- [3] Q C Jiang, J R Fang, Q F Guan. *Scripta Materialia*, 2001, 45: 199- 204.
- [4] J R Fang, Q C Jiang, Q F Guan. *Fatigue and fracture of Engineering Materials and Component*, 2001.
- [5] 姜启川, 方健儒, 赵宇光. *金属热处理*, 2000, 34: (1): 34- 35.
- [6] JIANG Qichuan, FANG Jianru, ZHAO Yuguang, et al. *Proceedings of 64th world foundry congress. Paris*, 2000. 9: CN-8.
- [7] JIANG Qichuan, FANG Jianru, ZHAO Yuguang, et al. *Proceedings of 1st ICDMT, Beijing*, 2000, 7: 368- 376.
- [8] Hui-Ji Shi, Christophe Korn, Guy Pluvineage. *Materials Science and Engineering*, 1998, A247: 180- 186.
- [9] Z Xia, D Kujawski, F Ellyin. *International Journal of Fatigue*, 1996, 18 (5): 335- 341.
- [10] G Bernhart, G Moulinier, O Brucelle, D Delagnes. *International Journal of Fatigue*, 1999, (21): 179- 186.
- [11] R P Skelton, H D Solomon, G R Halford, L R Kaisand, B N Leils. *Low Cycle Fatigue*, ASTM STP942, ASTM, Philadelphia, OPA, 1988: 209- 235.
- [12] S S Manson. *Thermal Stress and Low-Cycle Fatigue*, McGrawhill. New York, 1981, 187- 191.
- [13] Bela I. Sandor *Fundamentals of Cyclic Stress and Strain*, The University of Wisconsin Press, 1972.
- [14] 何世禹, 李瑛, 刘剑虹. *金属学报*, 1990, 26 (4): A 292- 295.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59771003); 国家计委产业化前期关键技术与成套设备研制开发项目 ([1999] 317)

收稿日期: 2001-05-27

作者简介: 方健儒 (1972-), 男, 博士, 从事钢铁材料热疲劳及热机械疲劳的研究, 发表论文 20 余篇, 联系地址: 长春市人民大街 142 号, 吉林大学南岭校区, 材料科学与工程学院 (130025)。