

热-机械疲劳影响因素的试验研究

北京航空材料研究所 郭秀芬 王海清

本文对影响 GH500、GH33A、DZ-22、DZ-4、GH37、GH132、GH36 等高温合金和石墨铸铁的热-机械疲劳寿命的某些主要因素（温度、频率、保持时间、载荷波形、同相位和反相位、恒应力和恒应变）进行了试验研究。

Research on Testing the Effect Factor of Thermal-Mechanical Fatigue

Guo Xiufen Wang Haiqing
(Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

This paper studies some main factor (temperature, frequency, hold time, load-wave form, the same phase and opposite phase, constant stress and constant strain) which effect the life of thermal-mechanical fatigue through the study of high temperature alloy such as: GH500, GH33A, DZ-22, DZ-4, GH37, GH132, GH36, etc, and graphite iron casting.

我们在 10t 热-机械疲劳试验机上对影响某些高温合金和石墨铸铁的热-机械疲劳寿命的一些主要因素进行了试验研究，并初步摸索到一些规律。

一、试验温度的影响

在热-机械疲劳和低周疲劳试验中，温度是重要的影响因素。在恒温低周疲劳试验中，疲劳寿命随着试验温度的提高而降低。如图 1、2 所示，GH33A 和 GH36 高温合金低周疲劳寿命随着温度的升高而显著下降。这是由于材料强度降低变形抗力下降的结果。这种影响在有保载时间的梯形波试验中更加严重。

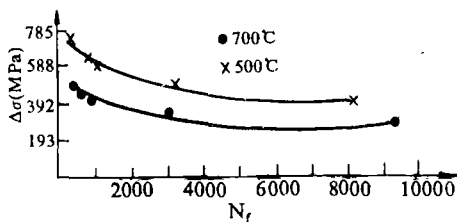


图 1 GH33A 合金在不同温度下的疲劳试验曲线

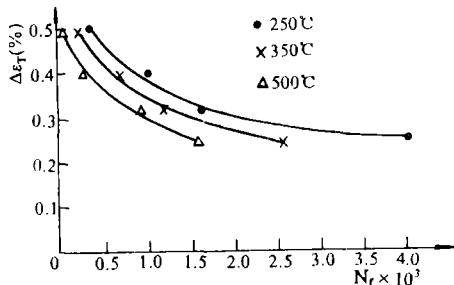


图 2 GH36 合金在不同温度下的疲劳试验结果曲线

在热-机械疲劳试验中，试样除受交变的机械载荷作用外，还受交变温度循环的作用。其中，温度差决定热应

力的大小，上限温度和平均温度都将影响断裂行为。热疲劳属于大应变疲劳，温度变化产生的热应力往往超过材料的屈服强度，引起较大的局部塑性变形。这种不可逆循环累积塑性变形（热棘轮现象），最后导致裂纹形成。从试验中观察到，当由应力控制转换为应变控制时，由于温度交变产生的热胀冷缩变形所受到的约束热应力达几百兆帕。有一种缺口小试样，在这种热应力作用下，只经过几个循环就发生断裂。由此看出，在热-机械疲劳试验中，试样除了受到交变的机械载荷作用外，还要受到很大的交变热应力的叠加作用。因此热-机械疲劳试验寿命要比低周疲劳寿命低，如图 3、4 所示。

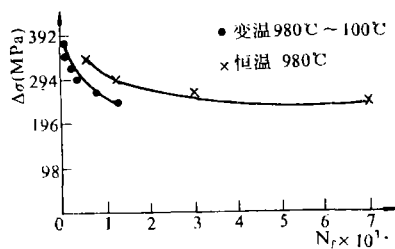


图 3 DZ-22 合金恒温 and 变温疲劳试验结果曲线

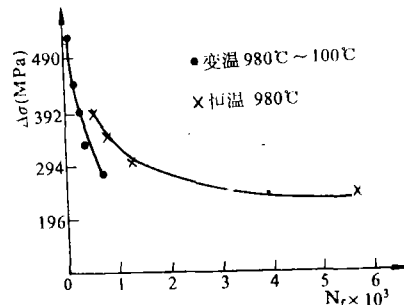


图 4 DZ-4 合金恒温 and 变温疲劳试验的比较

有人曾设想，在恒温下用简单的低周疲劳试验代替复

杂的热-机械疲劳试验，即在同样塑性应变范围内，找到产生破坏的同样循环次数，这个温度叫等效温度 T_e 。等效温度可能因材料、温度循环不同而不同。当 $\Delta\epsilon_p$ （塑性应变范围）/ $\Delta\epsilon_T$ （总应变范围）较大时，等效温度可取平均温度（ $T_e \approx T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}$ ），当 $\Delta\epsilon_p / \Delta\epsilon_T$ 比较小时，等效温度取上限温度（ T_2 ），才能使热-机械疲劳与低周疲劳两者的 $\Delta\epsilon-N_f$ 曲线相一致。有人指出，即使取上限温度作为等效温度，低周疲劳寿命仍高于热疲劳寿命，这是由温度循环造成材料脆化和氧化所致。可见温度循环所起的作用相当大，对材料寿命的影响极为严重。

二、试验频率的影响

在热-机械疲劳试验中，频率也是重要的影响因素，直接影响到断裂寿命。我们用 GH36 和 GH132 合金在不同频率下进行了比较试验，结果见图 5 和表 1。从结果看出，在试验的频率范围内，疲劳寿命随着频率的降低而减少。原因是，当频率较高时，循环速率快，循环周期短，材料以疲劳损伤为主；当频率较慢时，循环速率慢，循环周期长，在循环过程中，材料有充分时间产生变形，试样除了受到疲劳损伤作用外，还受到蠕变损伤的作用，试样在拉伸期间产生的蠕变损伤不能完全被压载时产生的压蠕变愈合，造成循环蠕变累积损伤，使疲劳寿命下降。在高温热-机械疲劳中，频率都比较低，一般两分钟一个循环或者更慢，所以蠕变起重要作用。蠕变抗力高的材料热疲劳性能也好。

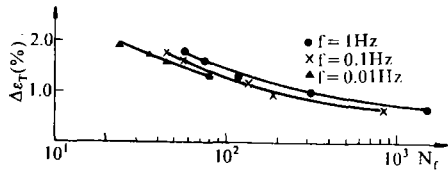


图 5 GH36 合金在不同频率下的疲劳试验曲线

表 1 GH132 合金在不同频率下的疲劳试验结果

试验温度 (℃)	应力范围 (MPa)	频率 (Hz)	断裂次数 (N _f)
600	± 490	1.0	700
		0.2	493
		0.08	360
		0.04	360
		0.02	239
		0.01	151
		0.005	113

三、保持时间的影响

在热-机械疲劳试验中，增加保持时间产生的影响与降低频率相似，因为频率与时间相关。用两种波形进行试验比较。一种在高温下没有保持时间（三角波），一种有保持时间（梯形波），并改变在最大应力（或应变）下的保持时间，其试验结果见表 2。从结果可看出，没保持时

间的比有保持时间的疲劳寿命高，保持时间短的比保持时间长的寿命高。总的趋势是：疲劳寿命随着保持时间的增长而降低。这种影响在应力控制的试验中比在应变控制的试验中影响更大。因为在应力控制试验中，每个循环周期应力保持恒定，不出现应力松弛现象，因而造成较大的损伤。这种损伤包括循环温度引起的热应变、交变机械载荷引起的疲劳应变损伤及在高温应力作用下与时间有关的蠕变应变损伤。这种蠕变 / 疲劳 / 热疲劳交互作用的结果，导致材料寿命降低。

表 2 GH132 合金不同保持时间的疲劳试验结果

试验温度 (℃)	应变范围 (%)	保持时间 (min)	断裂次数 (N _f)
600	1	1	361
600	1	5	195

四、同相位和反相位的影响

在热-机械疲劳试验中，温度和载荷都是变化的。按照温度和应力（或应变）的相位关系可分为两种。一种是同相位试验（升温时受拉载荷，降温时受压载荷），另一种是反相位试验（升温时受压载荷，降温时受拉载荷）。选择哪种相位的试验要由零件实际工作条件而定。例如轧辊和热作模具要求做反相位试验，而大多数高温零件要求做同相位试验。在试验中，把温度信号作为载荷信号来实现温度和载荷同步。

我们曾对 GH500、GH37 合金、片状石墨铸铁、模具钢等材料进行过同相位和反相位的对比试验，结果见表 3 和图 6。从结果看到，GH500、GH37 合金的同相位疲劳寿命比反相位的低得多，GH500 合金低 4 倍左右，GH37 合金低 7 倍左右。这是符合一般规律的。原因是，同相位试验，材料在高温下受拉，而反相位试验在高温下受压，一般材料在高温下拉伸强度低于压缩强度。另外在同相位试验中，如果温度足够高，载荷足够大，并有保持时间时，材料将受到蠕变 / 疲劳 / 热疲劳的交互作用，产生多种循环累积损伤，导致试样过早断裂。

表 3 GH500 和 GH37 合金同相位和反相位试验结果

材料	编号	试验温度 (℃)	载荷范围 (N)	相位	N _f
GH500	16-3	850±420	± 5884	反相位	551
	16-4				678
	16-5				604
	16-8				537
	16-6	850±420	± 5884	同相位	125
	16-7				173
GH37	1	850±420	± 5884	反相位	365
	2				354
	3	850±420	± 5884	同相位	65
	4				37

从图 6 还可看到一种特殊的现象，即石墨铸铁的同相位疲劳寿命反而比反相位寿命高。原因是，石墨铸铁的塑性是很低的，这对低周疲劳是不利的。但是石墨铸铁的塑性随着温度的升高而有增加趋势，对疲劳寿命极为有利。另一原因是，铸铁中的片状石墨很脆，成为基体中的先天

裂纹，产生严重的切口效应，造成应力集中。在同相位试验中，拉伸时处于高温，使切口钝化，切口效应减小，应力松弛，最大拉伸应力明显减少。切口效应减小，比高温下蠕变损伤效应大得多，所以同相位疲劳寿命高于反相位疲劳寿命。

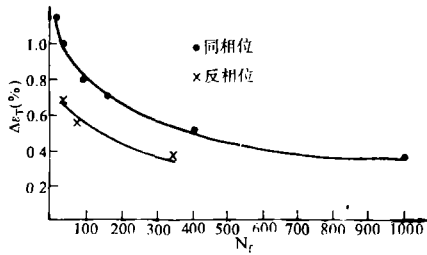


图6 石墨铸铁同相位和反相位疲劳试验曲线

五、恒应力和恒应变控制的关系

在热-机械疲劳试验中，有应力控制和应变控制两种。前者控制应力恒定，后者控制应变恒定。在两种不同的控制条件下，不同材料由于强度和塑性的不同，疲劳性能好坏的规律可能完全相反。从表4中可看到，在恒应力下，强度高的 GH33A 合金疲劳寿命最高，其次是 GH132，再次是 GH36 合金。而在恒应变下，塑性好的 GH36 合金疲劳寿命最高，其次是 GH132，再次是 GH33A 合金。可以看出，由于控制对象不同，其优劣规律完全相反。其原因是，在恒应力下，材料强度起主导作用，在恒应变下塑性起主导作用。这就是说，在相同应力下，高强度材料产生较小的应变，寿命就长，低强度高塑性材料产生较大的应变，寿命就短。而在恒应变下，强度高的材料要用较高的应力才能产生同样的应变，所以疲劳寿命就短，低强度高塑性材料需要较小的应力就可产生同样的应变，所以寿命就长。在选择控制对象时，应根据零件实际工作状态来确定控制对象更为合理，寿命预测更准确。

表4 恒应力和恒应变控制试验结果比较

材料	控制对象	应力范围	塑性应变范围	N_f
GH33A	恒应力	$\pm 490\text{MPa}$		5000
GH132				700
GH36				250
GH36	恒应变		0.6%	500
GH132				250
GH33A				100

六、加载波形的影响

在大应变疲劳试验中，加载波形是个重要影响因素。我们用 GH36 合金在 600°C 下，选用了四种波形（PP、PC、CC、CP 型）进行了比较实验，结果见图7。从试验结果可看到，四种波形的疲劳寿命的优劣次序为 PP、PC、CC、CP。PP 加载波形试验，拉压均无保持时间，所以疲劳寿命最长。PC 加载波形在压缩时有保持时间，

产生压蠕变损伤，使疲劳寿命降低。CC 波形拉压均有保持时间，既承受拉蠕变损伤又承受压蠕变损伤，疲劳寿命比 PC 形又低些。CP 形加载寿命最低，原因是在拉伸时产生拉蠕变损伤，压缩时无保持时间，使拉蠕变一直累积下来，严重影响疲劳寿命。而 CC 波形中的压蠕变可使拉蠕变得到一些恢复，所以 CC 波形的寿命比 CP 的高些。

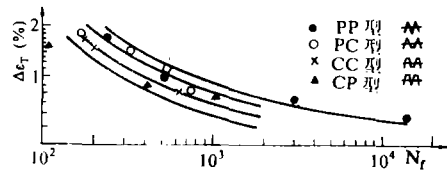


图7 GH36 合金在四种波形下低周疲劳性能的比较

这四种波形的试验结果表明，在加载过程中，有保持时间的比没保持时间的疲劳寿命低，在加载时的保持时间比压载时的保持时间影响更大。

七、频率和温度对循环硬化指数的影响

循环硬化指数 n' 是低周疲劳性能指标的一个重要参数，被定义为抵抗塑性变形的能力。对它的研究是实际选材和设计工作的需要，可提供抵抗塑性变形能力较强，具有较高循环硬化指数和较明显硬化效果的材料。

为了研究循环硬化指数与试验温度和试验频率的关系，我们用 GH33A 合金在同一频率（0.1Hz）不同温度（常温、 400°C 、 600°C 、 700°C ）和同一温度（ 700°C ）不同频率（0.5、0.1、0.02Hz）下进行了比较试验，结果见图8、9、10、11。从结果看出，GH33A 合金对所选用的试验温度和频率都是较敏感的，即循环硬化指数随着试验温度的降低和频率的提高而增加。在 600°C 以下，循环硬化指数变化更明显， n' 约是 n 的 2 倍。

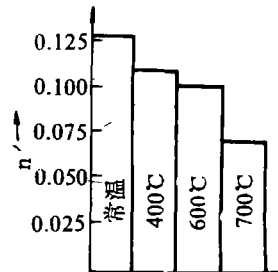


图8 GH33A 合金在不同温度下循环硬化指数的比较

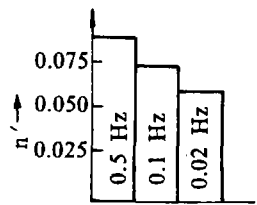


图9 GH33A 合金在不同频率下循环硬化指数的比较

众所周知，当试验温度提高后，材料强度降低，抵抗塑性变形的能力也降低。这种由于温度变化引起材料强度系数变化的结果，必然导致循环硬化指数的变化。所以温度提高，塑性变形抗力下降，使得硬化指数降低。当频率提高时，材料变形速率加快，会产生显著的硬化效果，当频率慢时，由于应力松弛而产生蠕变，使硬化程度显著降低。可见，降低频率和提高温度可以产生同样效果，反应

出应变速率和温度的影响是可以等效的。

钛中氢标准物质 变形铝合金化学标准样品

通过技术鉴定

由航空航天部北京航空材料研究所负责研制的“钛中氢标准物质”和“7050 变形铝合金化学标准样品”的技术审定会，于 1990 年 9 月 25 日~27 日在河北省承德市召开。来自科学院、冶金部、有色金属总公司、航空航天部所属研究院、所、高校、工厂等共 18 个单位 30 名代表参加了会议。会上，与会代表及专家对这两种标准物质进行了认真、严格的审定，并一致通过了技术鉴定书。

代表们确认：钛中氢标准物质采用先进的充氢工艺，严格控制充氢气氛、炉温和时间，所制备出的样品经过金相检验、定位取样测定、抽样分析，证明均匀度良好，工艺可行，可根据设计的氢含量范围制备出钛中氢标准物质。

本标准物质的定值，由六个单位采用不同分析方法、仪器及条件进行分析。测定数据用狄克逊和科克伦准则检验后进行定值。经过一年半时间的考核和国外实验分析验证证明：定值准确、稳定、可靠。并达到了美国国家标准局（NBS）同类标准物质水平，可提供市售样品。

本标准物质的研制成功对确保航空产品质量、提高检测水平，将发挥重要作用，为标准物质的研制立足国内、减少进口、满足科研、生产急需做出了贡献。

鉴定小组认为本标准物质研制的主要技术文件齐全、含量设计合理、已达到国家一级标准物质要求，建议申报。

由航材所研制的 7050 变形铝合金化学标准样品，熔炼成分设计合理、均匀度、粒度、稳定性等均完全符合国家技术监督局有关规定，协作分析单位提供的各元素的原始数据，都是严格按照国家规定，带用基准物质，采用两种以上不同分析原理的标准方法求得的。因而汇总数据的准确度、精密度良好，定值结果准确。

目前，国内尚无此类型牌号的标样，特别是该标样在研制过程中很好地解决了小于 0.01% 硅含量定值的难题，满足了国内用户的急需，具有一定的经济效益，适应了当代技术发展的需要，为标准样品的研制立足国内、减少引进作出了贡献。

鉴定小组认为该标样在技术质量上已达到国家级标准的要求，建议申报。

本次鉴定会是在航空航天部科技司主持下召开的，会议高度评价了这两种标准物质的研制工作。认为这是充分发挥了北京航空材料研究所的技术优势和各部门多方面支持、大力协同的结果。建议加紧推广，以满足各方面的需要。

（张克顺 李纪辰）

（参考文献 略）

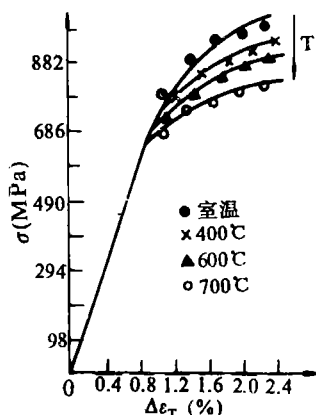


图 10 GH33A 合金在不同温度下的循环应力-应变曲线

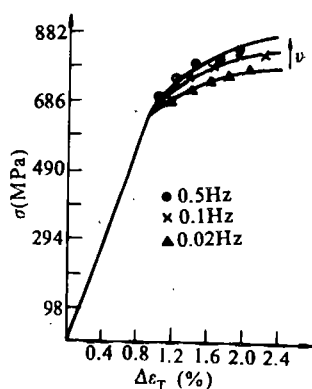


图 11 GH33A 合金在不同频率下的
循环应力-应变曲线

八、结 论

1. 恒温低周疲劳寿命随着试验温度的提高而降低。变温的热-机械疲劳寿命比恒温低周疲劳寿命低。用等效温度试验取代复杂的变温试验有待探讨。

2. 热-机械疲劳寿命随着试验频率的降低而减短。

3. 热-机械疲劳寿命随着保持时间的增加而减短。

4. 同相位热-机械疲劳寿命比反相位的寿命低（石墨铸铁例外）。

5. 不同强度和塑性的材料，在试验中采用不同的控制方法（应力控制或应变控制）时，其性能优劣规律可能完全相反。

6. 加载波形对疲劳寿命有很大影响。载荷波形上下限有保持时间时，都会使疲劳寿命降低。

7. 温度和频率对材料循环硬化指数有影响。循环硬化指数随温度的提高而降低，随频率的降低而降低。