



中华人民共和国国家军用标准

FL 6200

GJB 6213-2008

金属材料热机械疲劳试验方法

Testing method for thermal-mechanical fatigue of metallic materials

2008-03-17 发布

2008-10-01 实施

国防科学技术工业委员会 发布

前 言

本标准的附录 A 和附录 B 均为资料性附录。

本标准由中国航空工业第二集团公司提出。

本标准由中国航空综合技术研究所、北京航空材料研究院归口。

本标准起草单位：中国航空工业第一集团公司北京航空材料研究院、608 所、606 所、中科院金属所。

本标准主要起草人：何玉怀、张国栋、鲁 原、金 磊、韩增祥、杨治国、蔚夺魁、温井龙。

金属材料热机械疲劳试验方法

1 范围

本标准规定了金属材料热机械疲劳试验的装置、试样、试验程序、试验结果处理和试验报告。

本标准适用于测定 1200℃以下的温度循环范围内, 应变与应力控制下金属材料轴向加载的热机械疲劳性能。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件, 其随后所有的修改单(不包含勘误的内容)或修订版均不适用于本标准, 然而, 鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件, 其最新版本适用于本标准。

GB/T 10623 金属力学性能试验术语

GB/T 15248-1994 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法

3 术语、定义和符号

3.1 术语和定义

GB/T 10623 确立的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1.1

热机械疲劳 thermal-mechanical fatigue (TMF)

同时存在机械应变(或应力)循环和温度循环的疲劳行为。

3.1.2

热应变 thermal strain

由于温度变化产生的自由变形所对应的应变。

3.1.3

机械应变 mechanical strain

机械载荷单独作用下所对应的应变。

3.1.4

同相位 in phase

在相同频率下, 温度循环与机械循环(应变或应力)相位差为 0°的相位关系。

3.1.5

反相位 out of phase

在相同频率下, 温度循环与机械循环(应变或应力)相位差为 180°的相位关系。

3.2 符号

表 1 中规定的符号适用于本标准。

表 1 符号、名称及单位

符号 ^a	名称	单位 ^b
F	力、载荷	N
S	应力	MPa
ϵ_t	总应变(即机械应变与热应变的代数和)	mm/mm, %

GJB 6213-2008

表 1 (续)

符号 ^a	名称	单位 ^b
ε_{th}	热应变	mm/mm, %
ε_m	机械应变	mm/mm, %
ε_e	弹性应变	mm/mm, %
ε_{in}	非弹性应变	mm/mm, %
E	弹性模量	GPa
R	应力比	—
R_e	应变比	—
N	循环数	周, cycle
N_f	失效循环数	周, cycle
$2N_f$	失效反向数	反向数
L	标距长度(即引伸计测量点之间瞬时的试样长度)	mm
L_0	原始标距长度(即在室温零应变下引伸计测量点之间的试样长度)	mm
d	试样直径	mm
D	试样夹持部分直径	mm
T	温度	℃

^a 在一些标准和手册中载荷的符号用 P 表示; 应力的符号用 σ 表示。
^b 导出单位均可适用。

4 试验装置

4.1 试验机

- 4.1.1 试验机应满足 GB/T 15248-1994 中低周疲劳试验要求。
- 4.1.2 试验机载荷按 GB/T 15248-1994 中试验机载荷的要求进行校正。
- 4.1.3 应变或应力控制稳定性的要求按 GB/T 15248-1994 执行。

4.2 夹具

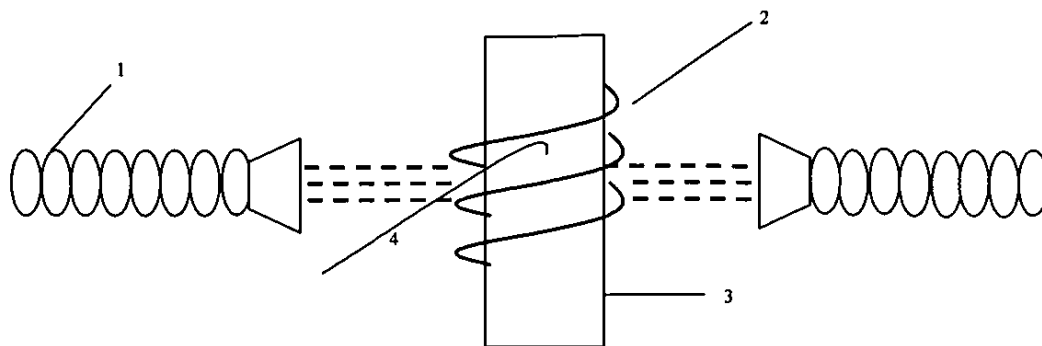
- 4.2.1 可采用满足试验要求的任何连接方式, 如液压夹头或螺纹等。但试验时试样与夹具和试验机的连接应固紧, 以免载荷换向时试样与夹具松动或造成间隙。
- 4.2.2 同轴度应符合 GB/T 15248-1994 的要求。
- 4.2.3 由在整个试验条件范围内满足试验要求的材料加工而成。

4.3 引伸计及应变测量系统

- 4.3.1 引伸计测量精度应在量程的 $\pm 1\%$ 之内。
- 4.3.2 引伸计应可直接测量试样标距长度 L 上的轴向变形量。
- 4.3.3 引伸计的传感器部分不应由于热波动而引起漂移。推荐对引伸计的传感器部分实行强制冷却。
- 4.3.4 接触式引伸计不应引起引伸计接触点或刀口的滑动。

4.4 加热与冷却系统

- 4.4.1 一般采用感应加热装置, 也可采用其他加热装置, 加热速率可调, 一般在 $1^\circ\text{C/s} \sim 50^\circ\text{C/s}$ 范围内。
- 4.4.2 一般采用压缩空气吹冷, 根据具体要求也可采用其他冷却方式, 冷却速率可调, 一般在 $1^\circ\text{C/s} \sim 30^\circ\text{C/s}$ 范围内。
- 4.4.3 推荐的加热与冷却系统的示意图见图 1。



1—风管；2—感应线圈；3—试样；4—热电偶

图1 加热与冷却系统示意图

4.4.4 试验过程中可使用热电偶、光学高温计或其他温度测量装置测量试样温度。精度应满足相关标准要求。

4.5 力传感器

按 GB/T 15248-1994 中对力传感器的要求执行。

4.6 记录装置

推荐采用能进行采集和处理力、变形、温度和循环记数的计算机系统，采样频率应保证每个滞后回线数据点不少于 200 个。也可选择能够测量数据点的模拟系统，但其应包括：用于记录力、变形和温度滞后环的 X-Y-Y 记录仪，力、变形和温度的分解图记录仪，每一信号的峰值探测器，循环计数器等。

4.7 设备的检定或校准

应根据相关检定规程或校准规范对所有设备和传感装置进行定期检定或校准。

5 试样

5.1 试样的形状和尺寸

5.1.1 概述

推荐采用圆柱试样或圆管试样，试样的形状和尺寸见图 2 和图 3，根据具体情况，也可采用其他形状的试样进行试验，但应在试验报告中说明：

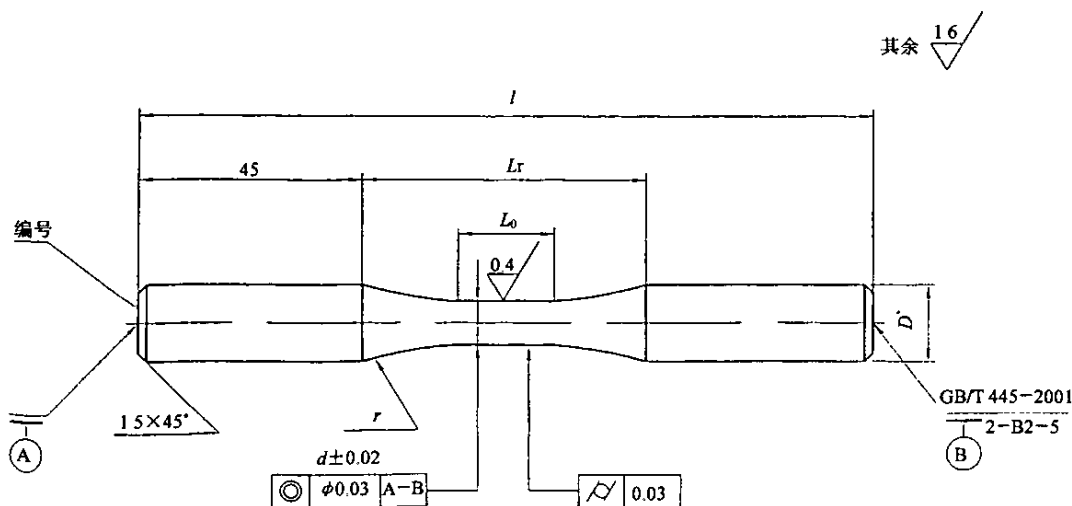


图2 圆柱试样

GJB 6213-2008

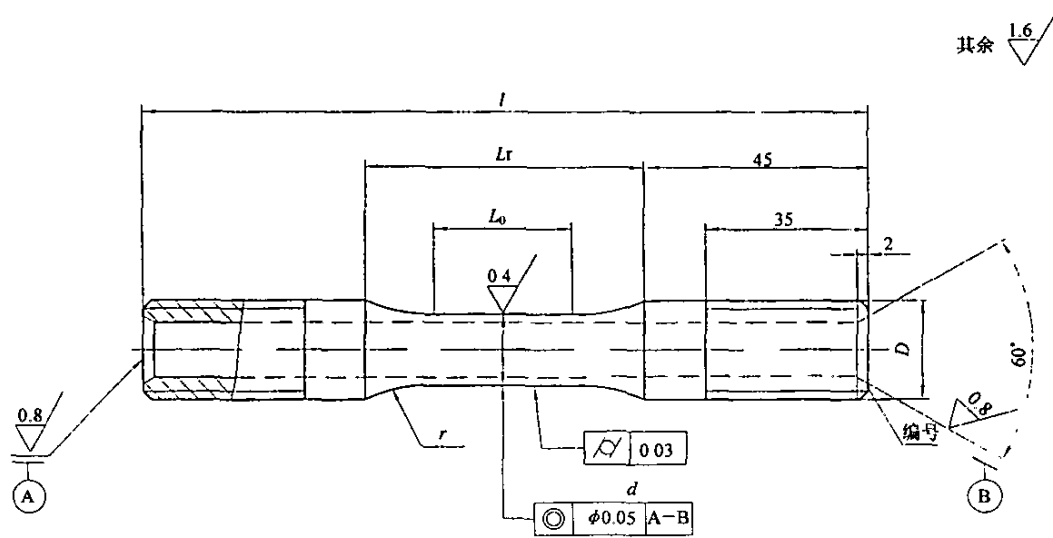


图3 圆管试样

5.1.2 圆柱试样

5.1.2.1 过渡圆弧半径 r 一般为标距部分直径 d 的 2.5 倍。

5.1.2.2 夹持部分直径 D 一般为标距部分直径 d 的 2 倍。

5.1.2.3 夹持部分之间的距离一般要小于标距部分直径 d 的 8 倍。

5.1.3 圆管试样

5.1.3.1 过渡圆弧半径 r 一般为标距部分直径 d 的 2 倍。

5.1.3.2 夹持部分直径 D 一般为标距部分直径 d 的 2 倍。

5.1.3.3 夹持部分之间的距离一般应小于标距部分直径 d 的 8 倍。

5.1.3.4 壁厚一般取 2mm。

5.1.3.5 壁厚的变化允许在名义厚度的 1% 以内。

5.2 试样制备与贮存

5.2.1 试样一般从原材料或毛坯上切取，根据试验目的也可从构件上切取。

5.2.2 取样时应详细记录取样位置、取样方向、编号等。

5.2.3 试样加工过程中应避免产生残余应力，应采用逐步减小加工余量的加工工序，尤其是在最终的抛光阶段。对于较硬材料，推荐使用研磨加工方式。加工完成后应无垂直于加载方向的划痕，加工方法可参照 GB/T 15248-1994 中附录 D 提供的机加工方法。

5.2.4 一般应在热处理后进行试样最终的成形加工。热处理制度应在试验报告中注明。

5.2.5 在机加工完成后，应采用不改变试样表面状态的方法测量试样尺寸。

5.2.6 试样加工完成后，应清洗、防护，防止试样变形、表面损伤和腐蚀。

6 试验程序

6.1 试样尺寸测量

在标距长度内至少两个不同位置测量直径，测量仪器的读数精度应不低于 0.01mm。

6.2 温度控制装置检查

对温度控制装置进行检查，应保证在整个试验过程中温度循环保持稳定，最高温度的波动应在设定温度的 $\pm 3\%$ 之内。

6.3 试样安装

在零载荷状态下安装试样。进行应变控制试验时，应在标距部分安装引伸计，但引伸计的安装不应対试样表面造成损伤。

6.4 热变形测量

测量和记录整个 TMF 循环温度范围的热变形。应在单纯温度循环条件下达到温度循环稳定时，测量试样的热变形。

6.5 热应变补偿

在应变控制试验中，对由于温度产生的热应变进行补偿得到需要的机械应变。补偿方法参见附录 A。热应变补偿的精确度应在 TMF 试验开始前进行检查，方法是在载荷控制模式下监测试样在载荷下的热变形。

6.6 TMF 加载

6.6.1 控制变量要求

机械应变(或应力)在循环稳定时一般不偏离其设定值的 2%。在整个试验过程中，机械应变(或应力)和温度都应保持循环稳定。

6.6.2 温度循环与机械循环(应变或应力)的相位差要求

6.6.2.1 典型的温度循环与机械循环(应变或应力)的相位关系为同相位和反相位，示意图见图 4 和图 5，但也可为其他相位关系。

6.6.2.2 在 TMF 试验过程中，温度循环与机械循环(应变或应力)的相位差应保持不变。

6.6.3 监控变量

监控试验过程中试样温度、载荷或总应变等控制变量。

6.6.4 失效判定

6.6.4.1 试样开裂或断开时，认为试样失效。应记录失效位置。

6.6.4.2 在应变控制试验过程中，应力与稳定峰值应力相比下降 5%~50%时(依材料确定)也可作为失效的判据。

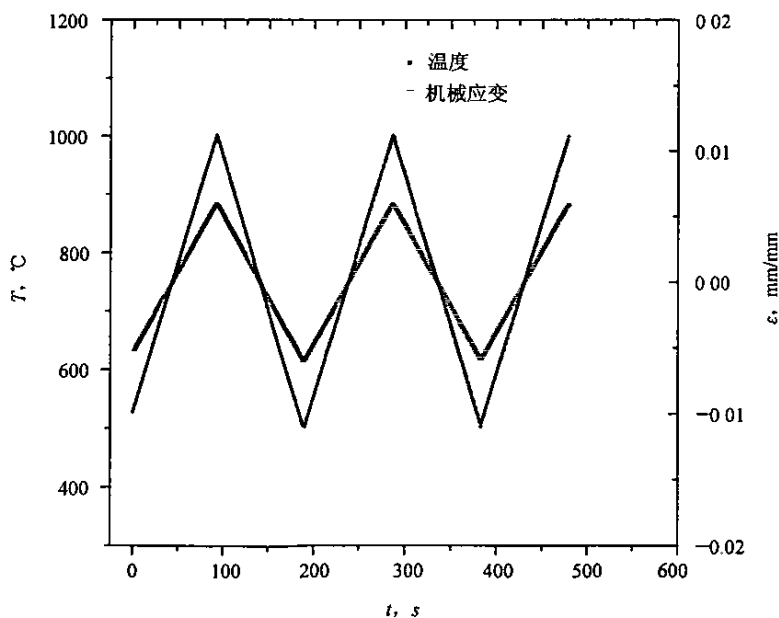


图 4 同相位加载波形图

GJB 6213-2008

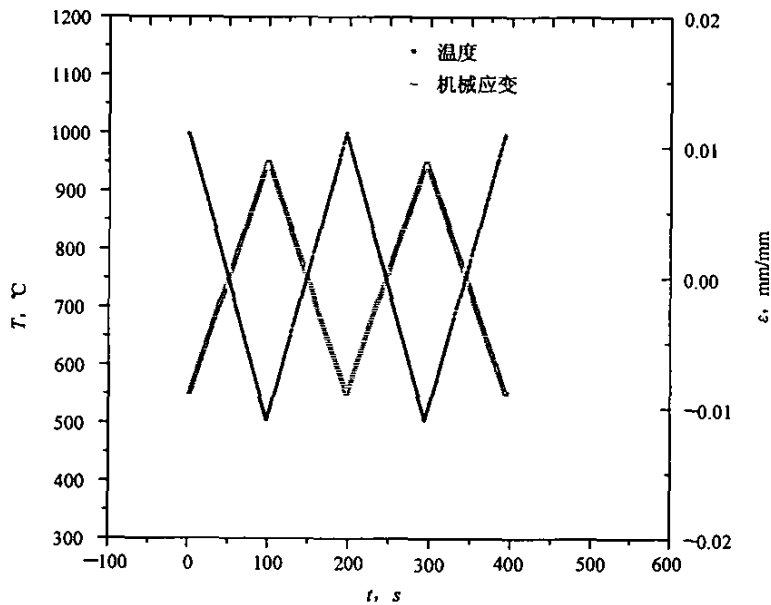


图5 反相位加载波形图

6.6.5 试验的终止

当满足选定的失效判定时终止试验，试验终止后立即关掉加热装置。若失效判据不是试样断开时，应确保在终止试验期间不过载。

6.7 试验中断处理

由于意外造成试验中断时，若温度、轴向力或机械应变没有明显的过冲，可保留原有数据继续试验。

7 试验结果处理

7.1 初始数据

用图表的形式表达每个试样热应变和温度的关系。针对应变控制试验，画出每个试样弹性模量与温度的关系曲线，弹性模量与温度关系的测定参见附录 B。

7.2 记录数据

绘制应力、机械应变和温度与时间的关系图以及机械应变与应力和温度的关系图。

7.3 数据处理

7.3.1 在应力控制试验中，绘制 $S-N$ 曲线，具体方法参照 HB 5287。

7.3.2 在应变控制试验中，计算弹性应变与非弹性应变，绘制 $\Delta\epsilon_e/2-2N_f$ 和 $\Delta\epsilon_{in}/2-2N_f$ 曲线，建议采用双对数坐标。具体方法参照 GB/T 15248-1994。

7.4 数据有效性的判定

7.4.1 试样开裂或断开时，裂纹起始在标距范围之内，试验数据有效。

7.4.2 当绘制热机械疲劳性能曲线时，有效试样数量一般不少于 6 个，且应分布于 4~5 级应变(应力)水平。

8 试验报告

试验报告一般应包括以下内容：

- 材料牌号和规范编号、生产厂、炉批、规格、热处理制度等；
- 试样取样位置和方向、试样形状、尺寸和表面状态等；
- 试验装置的基本信息；

- d) 试验控制变量：载荷 F 或机械应变最大、最小值和波形，应力比 R 或应变比 R_e ，温度最大、最小值和波形，温度循环-机械循环(应变或应力)的相位关系等；
- e) 试验过程中不符合本标准的任何情况；
- f) 试验结果：应力 S 、总应变 ϵ_t 、温度 T 和热应变 ϵ_{th} 与时间的关系，典型循环的滞后回线，机械应变 ϵ_m 与应力和时间的关系；在应力控制试验中，通常包括 $S-N$ 曲线及相应的方程；在应变控制试验中，通常包括寿命与弹性应变范围和非弹性应变范围的关系图，还应包括每组材料弹性模量 E 与温度的关系图以及每个试样热应变与温度的关系图；失效判据或失效位置；
- g) 试验日期、试验者等。

GJB 6213-2008

附录 A
(资料性附录)
热应变补偿

A.1 概述

在应变控制 TMF 试验中,应对由温度引起的热应变进行补偿。补偿的方法随试验装置、控制软件而变。一般采用试样温度函数法或循环时间函数法。推荐采用试样温度函数法。

A.2 试样温度函数法

在试验开始前,记录在单纯温度循环下的变形量,将其作为试样温度的函数进行热应变补偿。在该方法中,单纯温度循环应与随后的 TMF 试样的温度循环相同。热应变补偿可拟合成适当的关于时间与温度的函数关系,通过函数关系式计算 TMF 试验时的补偿热应变,其关系式见公式(A 1):

$$\varepsilon_t = \varepsilon_m(t) + \varepsilon_{th}(T) \dots\dots\dots (A 1)$$

式中:

$\varepsilon_m(t)$ —— t 时刻的机械应变;

$\varepsilon_{th}(T)$ —— T 温度下的热应变。

A.3 循环时间函数法

在试验开始前,记录在单纯温度循环下的变形量,将其作为循环时间的函数进行热应变补偿。在该方法中,单纯温度循环应与随后的 TMF 试样的温度循环相同。热应变补偿可拟合成适当的关于时间的函数关系,通过函数关系式计算 TMF 试验时的补偿热应变,其关系式见公式(A 2):

$$\varepsilon_t = \varepsilon_m(t) + \varepsilon_{th}(t) \dots\dots\dots (A 2)$$

式中:

$\varepsilon_{th}(t)$ —— t 时刻的热应变。

附录 B
(资料性附录)

弹性模量与温度关系的测定

弹性模量与温度的关系应在 TMF 循环的整个温度范围内离散的温度点进行测量和记录。对试样在弹性范围施加拉压载荷, 经过一定的循环后, 再进行弹性模量的测定。在同一温度下应对应力应变幅进行多次测量。为了保证较高的分辨率, 应在最低、最高、平均温度以及不超过 $5\% \Delta T$ (循环温度范围) 的温度间隔下测量弹性模量值。建议通过比较室温下的拉伸和压缩模量来检查引伸计是否发生滑动和工作是否正常。

GJB 6213-2008

参考文献

- [1] HB 5287 金属材料轴向加载疲劳试验方法
-