

HB

中华人民共和国航空行业标准

FL 6200

HB 6660-2011
代替 HB 6660-1992

金属板材热疲劳试验方法

Test method for thermal fatigue of metals
with rectangular plate specimen

2011-07-19 发布

2011-10-01 实施

国家国防科技工业局 发布

前 言

本标准代替 HB 6660-1992《金属板材热疲劳试验方法》。

本标准与 HB 6660-1992 相比主要有如下变化：

- a) 试样厚度由“小于 3 mm”改为“不大于 2mm”；
- b) 增加了“热循环”、“循环周期”、“上限温度”、“下限温度”、“试样温度”、“热变形”、“增宽值”、“热变形率”等术语的定义；
- c) 增加了采用测表面裂纹得到最终裂纹长度的规定，并进一步完善和细化了表面裂纹的测量方法；
- d) 增加了用“单组试样法”测定 $a-N$ 曲线；
- e) 增加了金属热变形的测量方法。

本标准由中国航空工业集团公司提出。

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：中国航空工业集团公司北京航空材料研究院、410 厂、170 厂。

本标准主要起草人：韩增祥、卫广龙、韦廷立、金磊、王亮、郭秀芬。

本标准于 1992 年 10 月首次发布。

金属板材热疲劳试验方法

1 范围

本标准规定了金属板材热疲劳试验的试样、试验设备、试验程序、试验结果处理和试验报告。

本标准适用于测定厚度不大于 2mm 的金属板材和加工成板状试样的其他金属制品在上、下限温度循环作用下的热疲劳性能；厚度大于 2mm 的金属板材的热疲劳性能的测定也可参照本标准进行。

2 术语、定义及符号

2.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

2.1.1

热循环 thermal cycle

在金属板材的热疲劳试验中，试样上的温度随时间周期性变化的过程。热循环波形图参见图 1。

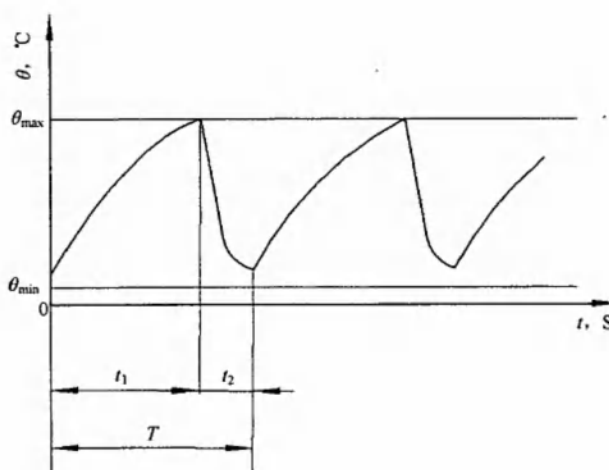


图 1 热循环波形示意图

2.1.2

循环周期 cycle period

一个循环的总时间 T ，即加热时间 t_1 和冷却时间 t_2 之和。

2.1.3

热应力 thermal stress

金属材料在循环变化的温度作用下，热胀冷缩受到约束时产生的内应力。

2.1.4

热疲劳 thermal fatigue

金属材料在热应力多次循环作用下产生损伤的现象。

2.1.5

热疲劳抗力 thermal fatigue resistibility

金属材料在热应力循环作用下抵抗破坏的能力。可表示为规定热循环次数产生的裂纹长度，也可表

示为规定裂纹长度的热循环次数。

2.1.6

上限温度 maximum temperature

试样在热循环过程中的最高温度。

2.1.7

下限温度 minimum temperature

试验对冷却介质的规定温度。

2.1.8

试样温度 temperature of specimen

从测温试样规定位置测出的温度，即试样在试验过程中所达到的实际温度。

2.1.9

热变形 thermal deformation

金属材料在热应力循环作用下产生的不可逆塑性变形的积累。本标准采用试样的增宽值表示热变形量。

2.1.10

增宽值 increased width

试样经过若干次热循环后，其工作端宽度的增加值。其表达式见公式(1)：

$$\Delta W_n = W_n - W_0 \dots\dots\dots (1)$$

2.1.11

热变形率 thermal deformation ratio

经过若干次热循环后，试样的增宽值与原始宽度之比，用百分数表示。其表达式见公式(2)：

$$\delta_n = \frac{\Delta W_n}{W_0} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

2.2 符号

本标准使用的符号、名称和单位见表1。

表1 符号、名称和单位

符号	名称	单位
B	试样厚度	mm
W	试样宽度	mm
W_0	试样原始宽度	mm
W_n	n 次热循环后的试样宽度	mm
ΔW_n	n 次热循环后的增宽值	mm
ΔW	增宽值	mm
δ	热变形率	—
δ_n	n 次热循环后的热变形率	—
θ_{max}	上限温度	℃
θ_{min}	下限温度	℃
t_1	加热时间	s
t_2	冷却时间	s
T	循环周期	s
a	裂纹长度	mm

表 1 (续)

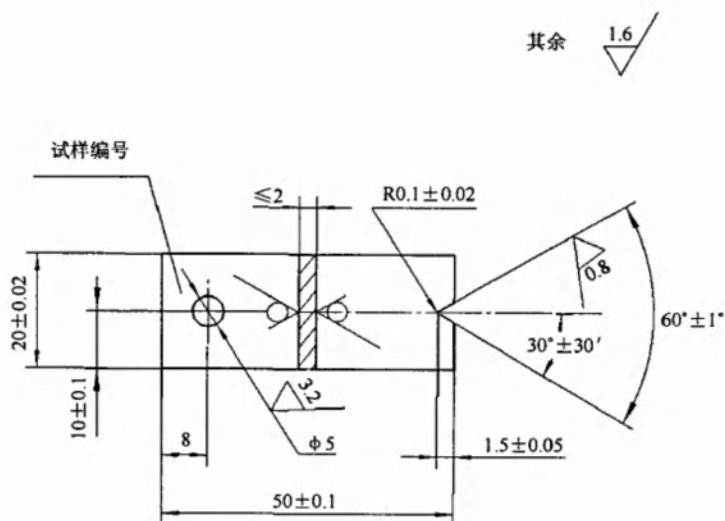
符号	名称	单位
a_f	断口裂纹长度	mm
N	热循环次数	cycle
N_a	裂纹长度为 a 的热循环次数	cycle

3 试样

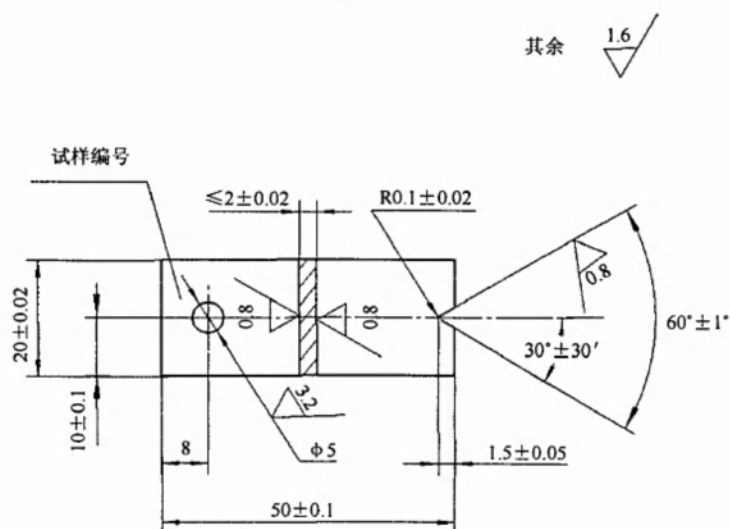
3.1 试样的形状与尺寸

3.1.1 板材热疲劳试样的形状与尺寸见图 2。

3.1.2 热变形试样可采用与热疲劳试样相同的缺口试样,也可采用除不开缺口外,其余部分与热疲劳试样相同的无缺口试样。



a) 板材加工的热疲劳试样形状与尺寸



b) 其他金属制品加工的热疲劳试样形状与尺寸

图 2 热疲劳试样的形状与尺寸

3.2 试样的制备和保存

3.2.1 试样应从均质原材料或毛坯上切取，切取方向根据试验目的而定；板材焊接件试样的取样如图3所示，焊缝与缺口的相对位置根据热影响区确定。

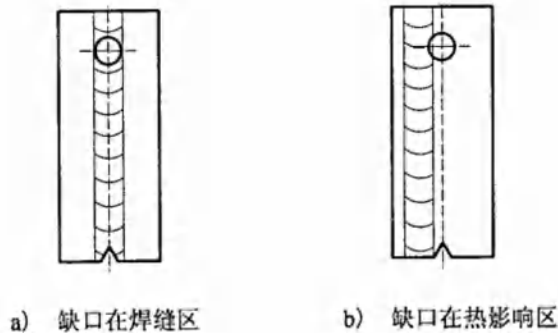


图3 板材焊接件试样取样示意图

3.2.2 试样需经热处理后试验时，则先热处理再加工；若热处理后硬度过高，可先进行粗加工，热处理后再精加工和开缺口。

3.2.3 试样在整个加工过程中，不应使金属产生冷作硬化或出现过热。

3.2.4 用金属板材加工试样时，应保留原表面；用其他金属制品加工试样时，表面采用磨削加工；板材焊接试样应将焊缝凸起部分磨平至母材的厚度，磨平部分的粗糙度 R_a 值不大于 $0.8\mu\text{m}$ 。

3.2.5 试样的缺口用光学曲线磨床加工，缺口处不允许有毛刺，边缘毛刺应去除，不允许打磨出圆弧。

3.2.6 试样的缺口形状和底部尺寸应用不低于 50 倍的投影仪或相应仪器检验。

3.2.7 在缺口端 20mm 内，表面不允许有明显缺陷、划伤和加工痕迹。

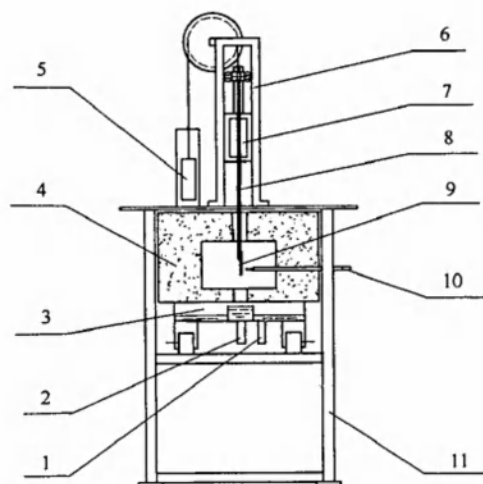
3.2.8 对于易氧化的材料，试样加工后应涂防锈油，以防止试样表面氧化腐蚀。

3.3 试样数量

每组试样一般为 3~5 片。

4 试验设备

4.1 试验机



1-排水管；2-进水管；3-冷却装置(水槽)；4-加热装置(电炉)；5-配重；
6-机架；7-升降机构；8-试样夹具；9-试样；10-控温热电偶；11-支架

图4 热疲劳试验机示意图

试验可在不同类型的金属板材热疲劳试验机上进行，图 4 为热疲劳试验机示意图。试验机应满足如下要求：

- a) 加热系统的加热功率能满足试验加热要求。
- b) 恒定时的炉温波动和热循环过程中达到设定温度时的炉温波动符合表 2 的规定。

表 2 炉温波动要求

设定炉温 ℃	恒定时的炉温波动 ℃	温度循环过程中达到设定 温度时的炉温波动 ℃
<900	±2	±3
≥900~1200	±3	±4

注：炉温波动是指炉温的实测值与设定值之差。

- c) 水槽内冷却水的温度(即下限温度)保持在 20℃±5℃。
- d) 试验机的升降机构和夹具能保证试样在工作端在加热时处于炉膛的均温区，冷却时的淬水深度为 5mm~6mm，且淬水深度调节方便。在试验过程中试样的加热位置和冷却位置保持不变。
- e) 加热时间和冷却时间可调。
- f) 有准确的计数和计时装置。

4.2 试验夹具

可根据不同类型的试验机自行设计夹具，推荐图 5 所示夹具。试样在夹具上的安装示意图见图 6。试验夹具应满足以下要求：

- a) 具有良好的耐热性和抗氧化性；
- b) 能调节试样工作端的淬水深度。

单位为毫米

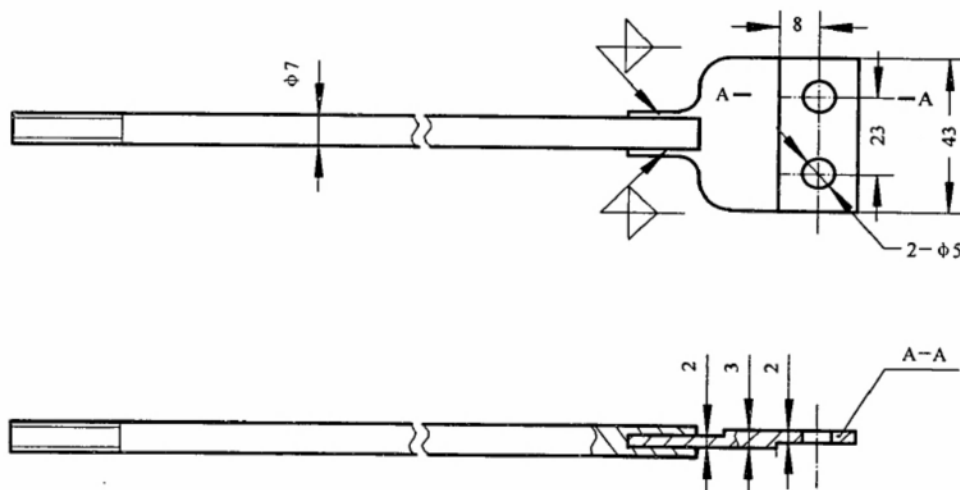


图 5 试验夹具示意图

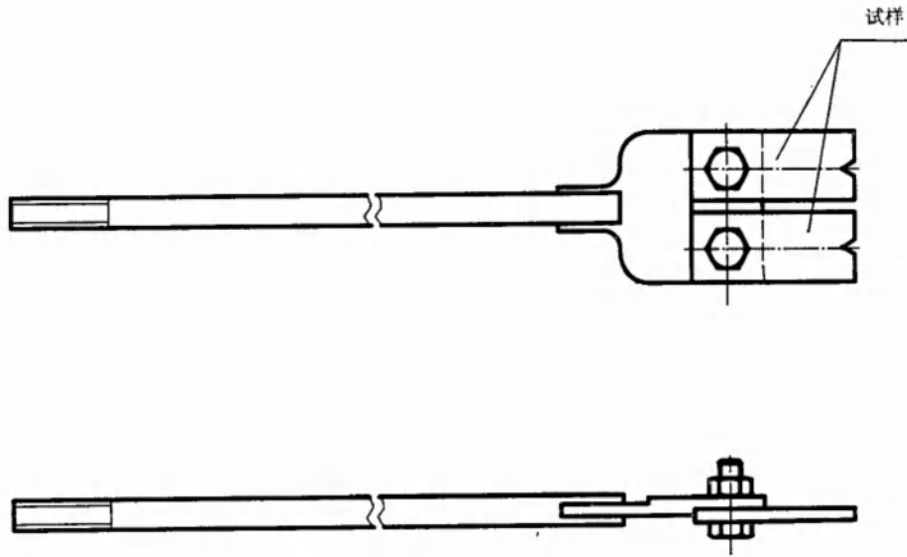
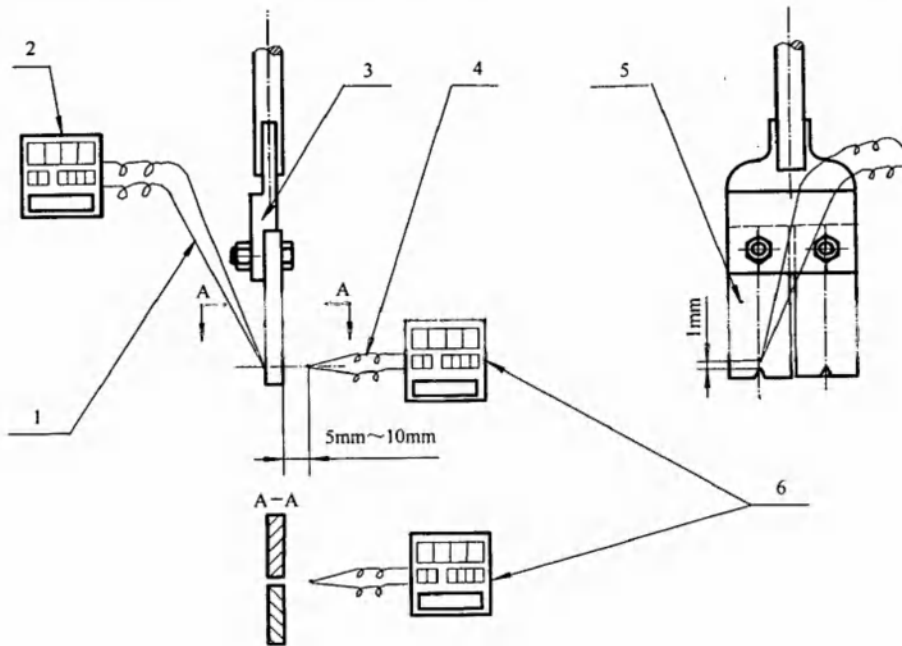


图 6 试样在夹具上的安装示意图

4.3 测温装置

4.3.1 测温装置由测温热电偶、测温仪表、测温试样及装卡试样的夹具组成。测温热电偶的热端焊在测温试样缺口上端 1mm 处(参见图 7)，进入炉膛部分的热电偶应与夹具绑在一起，冷端接测温仪表。



1-测温热电偶；2-测温仪表；3-夹具；4-控温热电偶；5-测温试样；6-控温仪表

图 7 测温装置与温度测量示意图

4.3.2 测温装置应满足如下要求：

- a) 测温试样的材料与试验试样的材料相同或接近，其形状、尺寸与试验用试样相同。为了延长测温试样的使用寿命，测温试样可采用无缺口试样。
- b) 测温热电偶在满足测温范围的条件下，应选用直径较小者。
- c) 测温仪表的精度应不低于 0.2 级，采样速率应不低于 10 次/s。

d) 测温仪表和热电偶均应按有关规定进行周期检定,并在有效期内使用。

4.4 断口裂纹测量夹具

断口裂纹测量夹具可自行设计。夹具应使试样装夹方便,且在裂纹测量过程中确保试样在夹具中的位置不发生改变。推荐采用图 8 所示的断口裂纹测量夹具。

单位为毫米

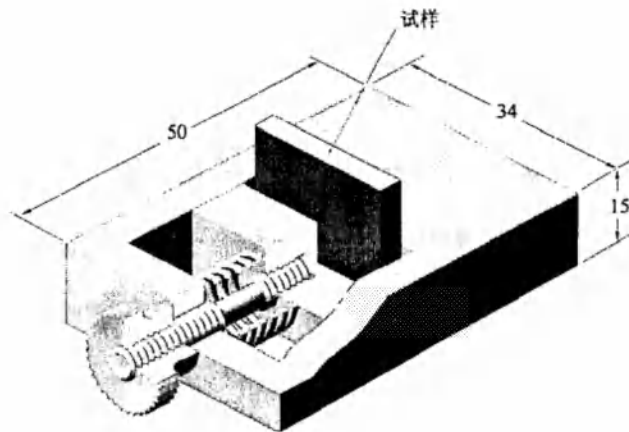


图 8 试样断口裂纹测量夹具示意图

4.5 裂纹测量装置与量具

4.5.1 裂纹测量采用工具显微镜或测量显微镜,其分辨率应不低于 0.01mm。显微镜应具备两种或两种以上的放大倍数,低倍放大倍数为 25~30,高倍放大倍数不低于 100。

4.5.2 测量试样尺寸所用量具的分辨率应不低于 0.02mm;测量热变形时,试样原始宽度 W_0 和 n 次热循环后的试样宽度 W_n 的测量,所用量具的分辨率应不低于 0.01mm。

4.5.3 量具和显微镜均应按有关规定进行周期检定,并在有效期内使用。

4.6 抛光机

抛光机用于测表面裂纹前的试样抛光,抛光机应能满足抛光后试样表面的粗糙度 R_a 值不大于 $0.025\mu\text{m}$ 。

5 试验程序

5.1 试验前的准备

5.1.1 确定试验方案

5.1.1.1 测热疲劳抗力的试验方案

根据试验目的,从以下三种方案中选择:

- 规定循环次数,测达到规定循环次数的裂纹长度;
- 规定裂纹长度(一般为 0.5mm 或 1mm),测达到规定裂纹长度的循环次数;
- 采用“单组试样法”或“多组试样法”测裂纹长度与循环次数的关系曲线($a-N$ 曲线)。

5.1.1.2 测热变形的试验方案

测热变形的试样可采用缺口试样或无缺口试样。用缺口试样测热变形通常与测热疲劳抗力同时进行,即在测规定循环次数裂纹长度的同时测出热变形。用缺口试样所测得的热变形中含有裂纹宽度,单纯的热变形应采用无缺口试样测量。测热变形的试验方案可根据试验目的,从以下两种方案中选择:

- 规定循环次数,测达到规定循环次数的热变形;
- 测热变形与循环次数的关系曲线($\Delta W-N$ 或 $\delta-N$ 关系曲线)。

5.1.2 测量试样尺寸

5.1.2.1 清洁试样表面，检查试样有无试样编号。若无试样编号或试样编号不清晰，应在规定位置标出试样编号(见图2)。试样编号不应在试验中高温氧化而无法辨认。

5.1.2.2 用符合4.5.2规定的量具测量试样的厚度、长度、宽度等主要尺寸，其尺寸应符合图2要求；试验要求测热变形时，用符合4.5.2规定的量具测出试样工作端的原始宽度 W_0 (见图9)。记录试样号和与之相对应的试样厚度、原始宽度等相关尺寸。

5.1.3 升温

将炉温升至试验规定的上限温度，到温后，保温至少30min。炉温波动值应符合表2的规定。冷却水的温度(下限温度)保持在 $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

5.1.4 测温和控温

5.1.4.1 修正温度测量系统的误差

在进行温度测量之前，应对包括测温热电偶和测温仪表在内的测温系统误差进行修正，以保证试验温度的准确。

5.1.4.2 静态温度的测量和控制

将测温装置装入试验机，测温试样的位置应符合4.1 d)的要求。控温热电偶与测温试样在试验机中的相对位置如图7所示。待炉温稳定后，再保温3min~5min(视规定上限温度与试样厚度而定)，以此时测温仪表测出的温度作为加热装置的温度。若测温仪表测出的温度与所规定的上限温度不一致，则应调整控温仪表的设定温度，使测温仪表所测得的温度与所规定的上限温度相同。

5.1.4.3 测量热循环条件下的试样温度

5.1.4.3.1 设定热循环周期、加热时间和冷却时间。在试样厚度不大于2mm的范围内，热循环周期 T 均为60s，其中加热时间 t_1 为55s，冷却时间 t_2 为5s。

5.1.4.3.2 测量热循环条件下的试样温度。一般从开启试验开关后的第五个循环开始测量，在加热时间内，试样温度应升到试验规定的上限温度，其温度误差应不超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ；若在加热时间内试样温度达不到上限温度，可采用逐步提高炉温的方法，直到试样温度能连续5次以上在规定的加热时间内达到上限温度。测温试样的淬水深度应控制在5mm~6mm。

5.2 装夹试样

5.2.1 将试样固定在夹具上，同时装两片试样的夹具，试样的工作端应对齐(如图6所示)。

5.2.2 将试样装入试验机，试样的位置应符合4.1 d)的要求，试样与控温热电偶的相对位置应和图7中测温试样与控温热电偶的相对位置相同。待炉温稳定后，即可开始试验。

5.3 测热疲劳抗力

5.3.1 测规定循环次数的裂纹长度

用一组试样，按规定的循环次数进行试验。当试验达到规定循环次数时，将试样取出，根据试验要求，测出试样的表面或断口裂纹长度。裂纹长度的测量按5.5进行。

5.3.2 测规定裂纹长度的循环次数

规定裂纹长度通常为试样的表面裂纹长度，用一组试样按以下步骤进行试验：

- 预估达到规定裂纹长度的循环次数，可参照相同或类似材料的试验数据。
- 取循环次数为预估循环次数的70%~80%进行试验，测出该循环次数时的表面裂纹长度。若裂纹尚未达到规定长度，则应根据已有的裂纹长度和循环次数，预估达到规定裂纹长度的剩余循环次数，继续试验，直至某一循环次数，试样的裂纹长度与规定裂纹长度相等或略长。
- 用内插法求出规定裂纹长度的循环次数。

5.3.3 测裂纹长度与循环次数的关系曲线($a-N$ 曲线)所需数据

5.3.3.1 概述

规定循环次数的最大裂纹长度一般应控制在不大于3.5mm。当裂纹长度大于3.5mm时，应停止试验。

5.3.3.2 单组试样法

用一组试样,按预定循环次数由低到高的顺序分成4个以上的测试点进行试验。首先测出最低循环次数时的表面裂纹长度,再重新装夹试样,按同样的方法依次测出剩余各循环次数时的表面裂纹长度。

5.3.3.3 多组试样法

用4~7组试样,按预定循环次数由低到高的顺序分成4~7个测试点,每组试样对应一个测试点,分别测出每组试样在相应循环次数时的断口裂纹长度。

5.4 测热变形

5.4.1 测规定循环次数的热变形

用一组试样,按规定的循环次数进行试验。当试验达到规定循环次数时,将试样取出,测出该循环次数时的试样宽度 W_n (见图9),测量工具应符合4.5.2的规定。然后按公式(1)和公式(2)计算出各规定循环次数时的 ΔW_n 和 δ_n 。

热变形的测量应在试样无明显翘曲变形的条件下进行。

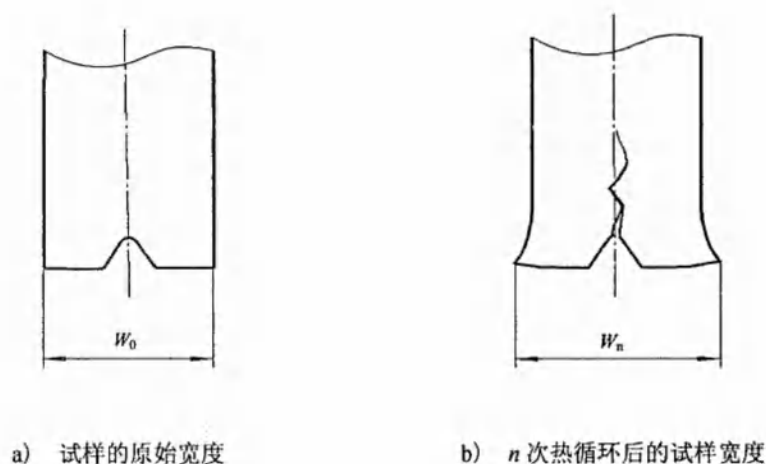


图9 增宽值的测量示意图

5.4.2 测热变形与循环次数的关系曲线($\Delta W-N$ 或 $\delta-N$ 关系曲线)所需数据

用一组试样,按预定循环次数由低到高的顺序分成4个以上的测试点进行试验。按5.4.1规定的方法,首先测出最低循环次数时的 ΔW_n 和 δ_n ,再重新装夹试样,按同样的方法依次测出剩余各循环次数时的 ΔW_n 和 δ_n 。

5.5 测量裂纹长度

5.5.1 概述

试样裂纹长度的测量方法分为测表面裂纹长度和测断口裂纹长度,二者均可用于裂纹长度的最终测量。试验过程中裂纹长度的测量采用测表面裂纹的方法。

5.5.2 测量表面裂纹长度

5.5.2.1 测量表面裂纹前,先用不同粒度的金相砂纸按由粗到细的顺序打磨试样表面,以清除其水垢和氧化层;然后进行抛光,以得到清晰的表面裂纹。应尽量减少打磨和抛光对试样厚度的影响。

5.5.2.2 采用放大倍数不低于100倍的显微镜测量表面裂纹。当裂纹较长时,在确定出裂纹末端的准确位置之后,也可用不低于25倍的显微镜测量。测量表面裂纹长度时,应取与试样缺口相连接的裂纹;若裂纹不止一条,则应取其中最长的。两个表面的裂纹都应测量,取两表面中最长一条裂纹的长度作为试样的表面裂纹长度。被测裂纹可根据其实际形状近似为一段或多段线段,其长度为全部线段之和。被测裂纹的长度应为连续裂纹长度,若裂纹末端有尚未连接上的裂纹,则未连接上的裂纹长度不应计入。若缺口或裂纹前缘呈较大面积的龟裂状,应取主裂纹的长度作为试样的表面裂纹长度。表面裂纹的测量

方法参见图 10。

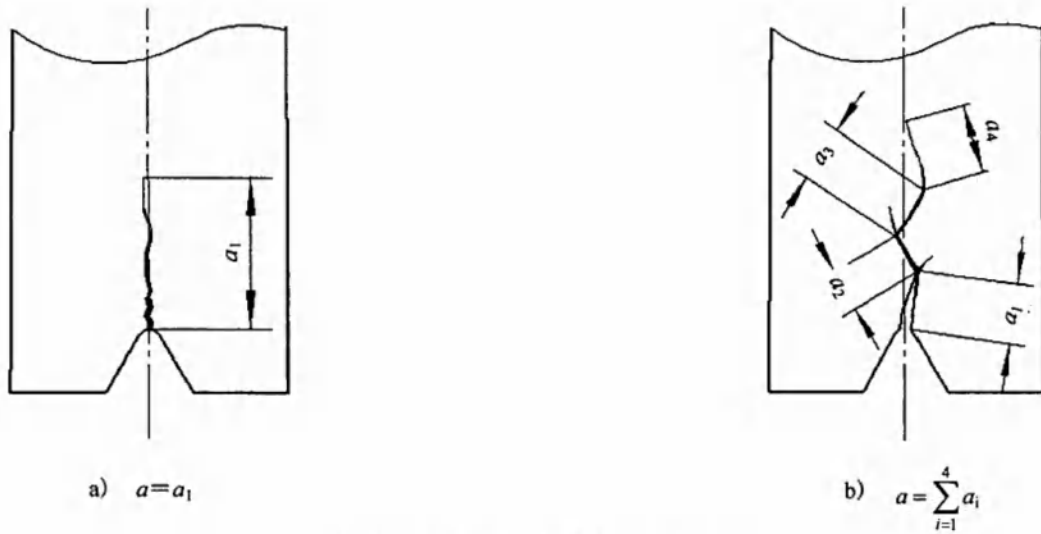


图 10 表面裂纹测量方法示意图

5.5.2.3 在测量过程中若发现异常情况(如试样表面有气孔、沙眼、疏松及夹层等),应详细记录其位置和大小,并在试验报告中注明。

5.5.3 测量断口裂纹长度

5.5.3.1 概述

断口裂纹长度的测量一般用于最终测量,但以下情况不宜用测断口裂纹的方法测定裂纹长度:

- a) 试样的表面裂纹呈横向或以横向为主;
- b) 试样的表面裂纹由纵向转为横向且横向裂纹较长;
- c) 试样的表面裂纹很长,而穿透裂纹很短。

5.5.3.2 试样断口的制备

将试样缺口端切下 5mm~10mm(视裂纹长度而定),然后沿缺口打开试样(参见图 11),试样断口表面不允许受任何损伤。

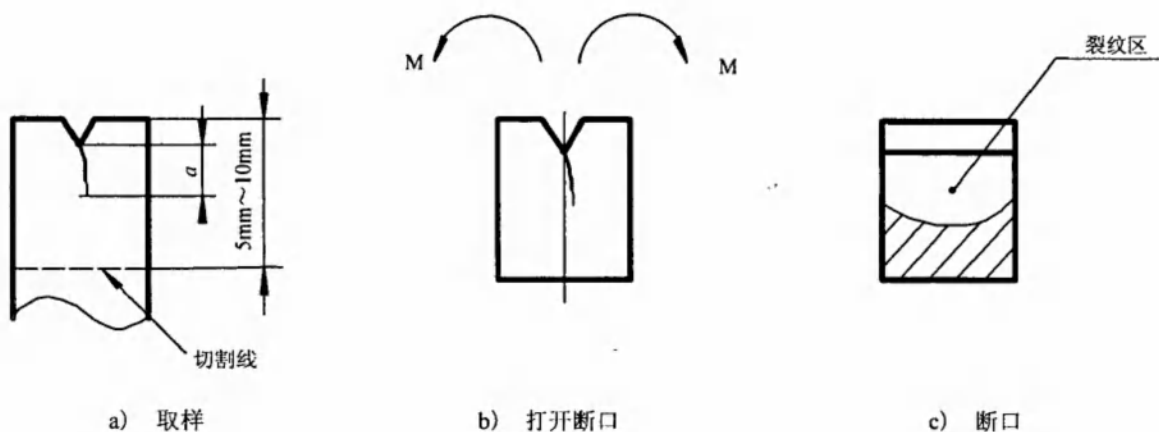


图 11 打开断口示意图

5.5.3.3 断口裂纹长度的测量

将被测断口试样夹在断口裂纹测量夹具(参见图 8)上,然后置于显微镜下观测。将在显微镜下观测到的断口裂纹,按图 12 所示分成四等分,测出五个位置的裂纹长度,取其平均值作为断口裂纹长度,

即断口裂纹长度 a_f 按公式(3)计算:

$$a_f = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 a_i \dots\dots\dots (3)$$

式中:

a_i ——每个位置的裂纹长度, 单位为毫米(mm)。

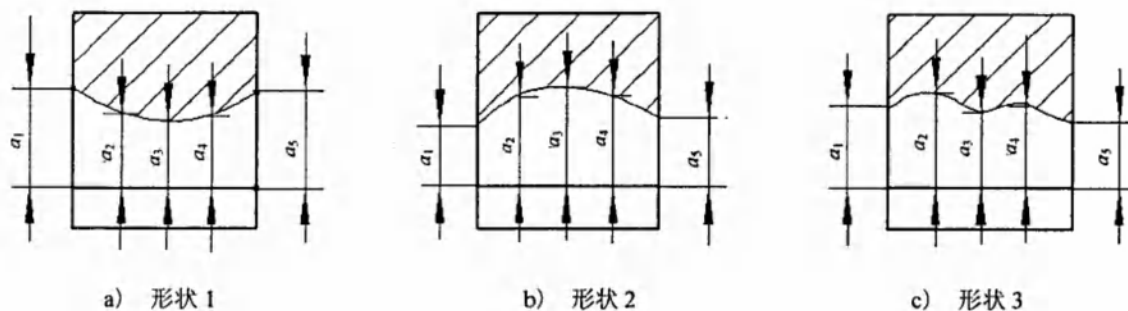


图 12 不同形状断口裂纹测量示意图

6 试验结果处理

6.1 绘制 $a-N$ 曲线

根据 5.3.3 所测得的试验数据, 在直角坐标上绘出 $a-N$ 散点图, 用回归分析的方法求出曲线方程, 按曲线方程拟合 $a-N$ 曲线(参见图 13)。

6.2 绘制 $\Delta W-N$ (或 $\delta-N$) 关系曲线

根据 5.4.2 所测得的试验数据, 在直角坐标上绘出 $\Delta W-N$ (或 $\delta-N$) 散点图, 用回归分析的方法求出曲线方程, 按曲线方程拟合 $\Delta W-N$ (或 $\delta-N$) 曲线(参见图 14)。

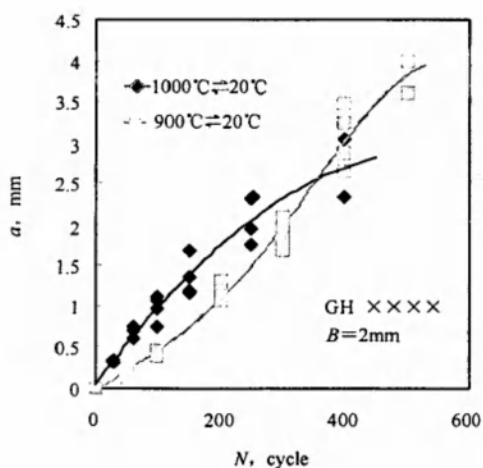


图 13 $a-N$ 曲线

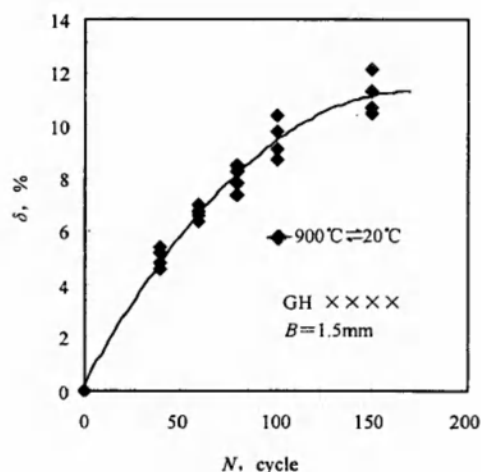


图 14 $\delta-N$ 曲线

7 试验报告

试验报告一般包括以下内容:

- a) 材料牌号、炉号、制品形式、规格、取样方位及热处理工艺;

- b) 试样尺寸、形状及表面状态;
 - c) 试验机型号及裂纹测量装置;
 - c) 试验参数: 包括上限温度 θ_{\max} 、下限温度 θ_{\min} 及加热时间 t_1 、冷却时间 t_2 ;
 - d) 试验结果: 规定循环次数的裂纹长度、规定裂纹长度的循环次数 N_a 或 $a-N$ 曲线, 规定循环次数的增宽值或 $\Delta W-N(\delta-N)$ 曲线;
 - e) 裂纹长度的测量方法;
 - f) 可能影响试验数据的现象;
 - h) 试验人员, 试验日期。
-

中华人民共和国航空行业标准
金属板材热疲劳试验方法

HB 6660—2011

*

中国航空综合技术研究所出版
(北京东外京顺路7号)

中国航空综合技术研究所印刷车间印刷

北京1665信箱发行

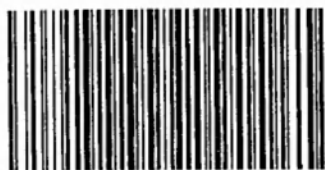
版权专有 不得翻印

*

开本 880×1230 1/16 印张 1¼ 字数 32千字
2011年10月第一版 2011年10月第一次印刷
印数 1—400

*

书号: 标 301.2587 定价 19.00元



H B 6 6 6 0 - 2 0 1 1