

ICS 77.040.10

CCS H 22



团体标准

T/CSTM 00831—2023

金属材料 十字形面内双轴疲劳试验方法

Metallic materials — Testing method for in-plane cruciform biaxial fatigue

2023-07-21 发布

2023-10-21 实施

中关村材料试验技术联盟

发布

目 次

前言.....	3
引言.....	4
1 范围.....	5
2 规范性引用文件.....	5
3 术语和定义.....	5
4 符号和说明.....	6
5 试验原理.....	8
6 仪器和设备.....	8
6.1 一般要求.....	8
6.2 试验机.....	8
6.3 应变传感器.....	11
6.4 加热与温度测量系统.....	12
6.5 数据采集系统.....	13
7 试样.....	13
7.1 几何尺寸.....	13
7.2 试样的制备.....	17
8 试验程序.....	18
8.1 试验环境.....	18
8.2 检查和校准.....	18
8.3 试样安装.....	18
8.4 控制模式.....	19
8.5 控制波形.....	19
8.6 加载相位.....	19
8.7 试验开始.....	20
8.8 监测试验.....	20
8.9 数据记录.....	20
8.10 试验停止.....	21
8.11 试样失效判定.....	21
9 数据的处理与分析.....	22
9.1 弹塑性载荷条件下两轴向的应力-应变关系曲线.....	21
9.2 两轴向等效应力/应变幅值与疲劳寿命的关系.....	21
9.3 裂纹扩展速率与能量释放率的关系.....	21
10 试验报告.....	22
附录 A (资料性) 双轴试验机的类型和主要形式.....	23
附录 B (资料性) 基于有限元分析的十字形试样改进案例.....	23
附录 C (规范性) 推荐的十字型试样尺寸.....	23
附录 D (资料性) 不同相位差下的加载路径.....	23

附录 E (资料性) 数据处理公式.....	32
附录 F (资料性) 起草单位和主要起草人.....	35
参考文献.....	36

CSTM标准发布使用

前 言

本文件参照 GB/T 1.1—2020 《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》，GB/T 20001.4 《标准编写规则 第4部分：试验方法标准》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国材料与试验标准化委员会钢铁材料标准化领域委员会（CSTM/FC01）提出。

本文件由中国材料与试验标准化委员会钢铁材料标准化领域委员会（CSTM/FC01）归口。

CSTM标准发布使用

引 言

金属板材在实际服役条件下会受到平面多轴疲劳载荷的作用,在多轴载荷的作用下金属板材常产生非比例附加强化效应并导致疲劳寿命缩短。由于单轴试验简单且成本低,目前对工程构件的疲劳寿命评价大多基于单轴试验数据,但是将材料特性的评估局限于单轴测试可能会导致对工程结构中材料行为的描述出现偏差。因此在一些工业领域(如核电、航空、化工等),研究金属板材的多轴疲劳性能对工程技术的发展和应⽤十分重要。

十字形面内双轴疲劳试验具有应变场均匀可测,不同加载轴之间的应力比、应变率、相位差等参量均易于控制调节等优点,已成为研究金属平板多轴力学性能的一种常用方法,被广泛用于平面双轴载荷下平板材料的低周、高周疲劳试验。

金属材料 十字形面内双轴疲劳试验方法

重要提示：使用本文件的人员应有正规实验室工作的实践经验。本文件并未指出所有可能的安全问题。使用者有责任采取适当的安全和健康措施，并保证符合国家有关法规规定的条件。

1 范围

本文件规定了金属材料十字形面内双轴疲劳试验方法的术语和定义、符号和说明、试验原理、试验设备、试样、试验程序、试验结果表达及试验报告等。

本文件适用于金属材料在室温或高温下采用十字形试样在各加载轴施加幅值恒定的加载波形，以实现比例或非比例加载路径以及路径变换的双轴疲劳试验。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，标注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 6398	金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法
GB/T 12160	金属材料 单轴试验用引伸计系统的标定
GB/T 13992	金属粘贴式电阻应变计
GB/T 16825.1	静力单轴试验机的检验 第1部分：拉力和（或）力试验机测力系统的检验与校准
GB/T 25917.1	单轴疲劳试验系统 第1部分：动态力校准
GB/T 31054	机械产品计算机辅助工程 有限元数值计算 术语
GB/T 33582	机械产品结构有限元力学分析通用规则
GB/T 34104	金属材料 试验机加载同轴度的检验
GB/T 36024	金属材料 薄板和薄带 十字形试样双向拉伸试验方法
GB/T 38719	金属材料 管 测定双轴应力-应变曲线的液压胀形试验方法
GB/Z 40387	金属材料 多轴疲劳试验设计准则
GB/T 40410	金属材料 多轴疲劳试验 轴向-扭转应变控制方法
JJF 1637	廉金属热电偶校准规范
JJG 141	工作用贵金属热电偶检定规程
JJG 556	轴向加力疲劳试验机检定规程

3 术语和定义

GB/T 36024、GB/T 38719和GB/Z 40387界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

双轴疲劳试验 **biaxial fatigue test**

十字形试样在加载过程中两个轴向施加的应力或应变载荷随时间有规律变化的疲劳试验。

3.2

双轴拉伸试验 **biaxial tensile testing**

采用十字形试样并在两轴向同时施加速率恒定的单调应力或应变载荷的拉伸试验。

3.3

比例加载 **proportional loading**

在相同频率下，两轴向的加载波形之间相位差为零的加载方式。

3.4

非比例加载 **non-proportional loading**

在相同频率下，两轴向的加载波形之间存在相位差的加载方式。

注：在非比例加载中主应力或主应变的方向会随时间的改变而发生变化。

3.5

加载路径 **loading path**

对试样施加的载荷在应力或应变空间中的轨迹。

3.6

原位加载 **in-situ loading**

在任何加载模式和变形阶段下，试样的中心位置均保持不变的加载方式。

3.7

屈服强度 **yield stress**

双轴拉伸试验中先发生屈服的加载轴向上的屈服应力。

3.8

多轴疲劳性能 **multiaxial fatigue property**

十字形试样测量区域在多轴比例或非比例加载下失效之前所经历的循环周数。

4 符号和说明

表1给出的符号和说明适用于本文件。

表 1 符号和说明

符号	说明	单位
a	裂纹长度	mm
a_n	预制裂纹缺口的长度	mm
a_p	预制裂纹的长度	mm
b	疲劳强度指数	-
c	疲劳延性指数	-
C	材料系数	-
d	宽度方向上的螺栓孔中心间距	mm
e	螺栓孔中心与拉伸臂的间距	mm
e_x	x轴向的工程应变	-
e_y	y轴向的工程应变	-
E	等效应力-应变曲线的弹性模量	GPa
E_x	x轴向的弹性模量	GPa
E_y	y轴向的弹性模量	GPa
f	螺栓孔直径	mm
f_c	减薄区中心小孔直径	mm
F_x	x轴向施加的载荷	N
F_y	y轴向施加的载荷	N
G	能量释放率	-
h	预制裂纹缺口的宽度	mm
H	试样总长度	mm
i	测量区域厚度	mm
I	试样厚度	mm
K_I	I型裂纹的应力强度因子	-
K_{II}	II型裂纹的应力强度因子	-
l	拉伸臂宽度	mm
l_0	特征长度	mm
L	开缝长度	mm
L_x	测量区域x方向的边长	mm
L_y	测量区域y方向的边长	mm
m	材料指数	-
N	开缝条数	-
N_f	失效时的循环数（疲劳寿命）	-
O_x	测量区域外圆角圆心距x方向中心线距离	mm
O_y	测量区域外圆角圆心距y方向中心线距离	mm
P	长度方向上的螺栓孔中心间距	mm
r_s	每条开缝顶部的圆角半径	mm
R	测量区域外圆角半径	mm
R_e	测量区域过渡圆弧半径	mm
R_i	测量区域内圆角半径	mm
S_x	x轴向的工程应力	MPa
S_y	y轴向的工程应力	MPa

s_x	面内检测传感器x方向的应变读数	-
s_y	面内检测传感器y方向的应变读数	-
t	开缝顶部与减薄区的距离	mm
T	加载波形的周期	-
w	每条开缝中心线之间的距离	mm
w_e	拉伸臂边缘与最外侧开缝中心线之间的距离	mm
w_s	开缝宽度	mm
W	夹持端长度	mm
ε_{eq}	等效应变	-
ε_x	x轴向的真应变	-
ε_y	y轴向的真应变	-
ε_{xp}	x轴向的真塑性应变	-
ε_{yp}	y轴向的真塑性应变	-
$\Delta\varepsilon_{eq}$	等效应变范围	-
ε'_f	疲劳延性系数	-
θ	裂纹扩展角度	°
σ_{eq}	等效应力	MPa
σ_x	x轴向的真应力	MPa
σ_y	y轴向的真应力	MPa
$\Delta\sigma_{eq}$	等效应力范围	MPa
σ'_f	疲劳强度系数	MPa
Φ	相位差	-

5 试验原理

在室温或高温环境下,采用应力或应变控制方式对十字形试样的两组拉伸臂分别施加相同或不同的加载波形,测定十字形试样测量区域的多轴比例或非比例疲劳性能。

6 仪器和设备

6.1 一般要求

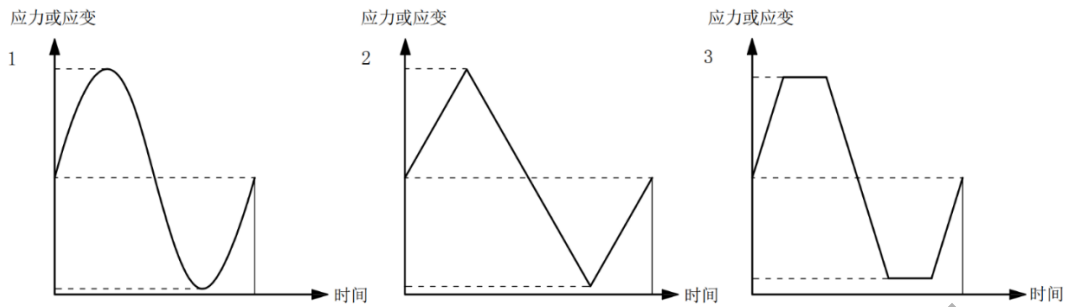
十字形面内双轴疲劳试验设备一般包括双轴疲劳试验机、接触式或非接触式的应变测量系统、加热和温度测量系统。

6.2 试验机

6.2.1 十字形面内双轴疲劳试验采用的双轴疲劳试验机应符合 GB/Z 40387 的要求。可以是电液伺服式或电机驱动式,试验机的形式可参见附录 A。双轴疲劳试验机具有两个相互垂直的加载轴,在任意轴向上夹持传统单轴哑铃形平板试样进行单轴疲劳试验,或在两轴向上夹持十字形试样进行双轴疲劳试验。在加载过程中试验机应保证对称加载,从而保证被加载试件的中心位置不变。

6.2.2 双轴疲劳试验机的每个加载轴都应能够实现应变或应力控制下的闭环控制,执行正弦波、三角波或梯形波等加载波形的循环试验,如图 1 所示。当两轴向加载频率相同时,通过调整两轴向上的加载波形和相位差,可以实现比例加载与非比例加载。各轴向的位移控制精度不低于 $\pm 0.1\%$,最高动态频率不

低于 10 Hz，控制器的闭环控制频率不低于 10 kHz。



标引序号说明：

- 1——正弦波；
- 2——三角波；
- 3——梯形波。

图 1 循环加载波形

6.2.3 测力系统

测力系统在双轴疲劳试验中应具有足够大的平面内和平面外刚度。载荷传感器精度应不低于量程的 $\pm 1\%$ ，精度范围宜在量程的 $1\% \sim 100\%$ 内，且最大测量范围应满足试验需要。

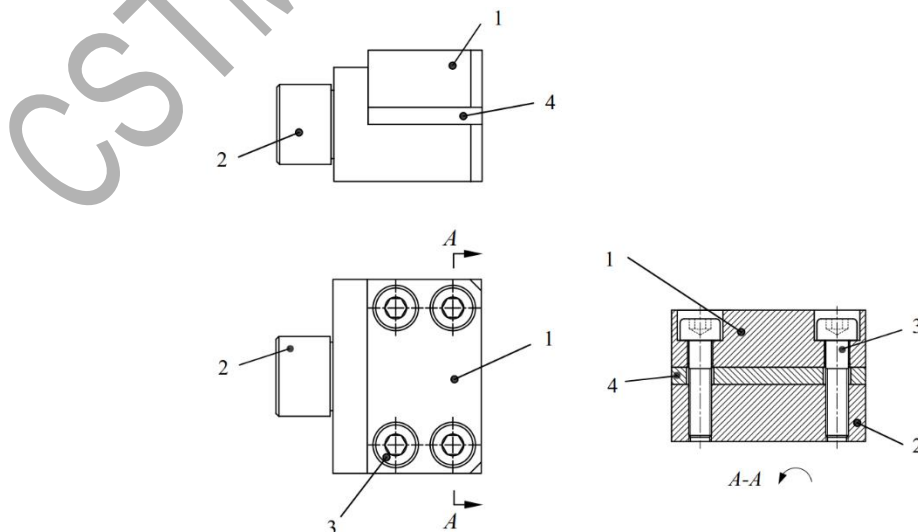
6.2.4 夹具及对中和共面检查

6.2.4.1 一般要求

夹具应能够有效固定十字形试样并将循环载荷平稳传递至试样轴线上。为避免在长时间循环加载过程中试样从夹具滑脱，夹具应能够通过螺栓固定试样。夹具的偏心率应不大于 2% 以保证加载轴对中良好，每个夹具的垂直度宜控制在 $\pm 0.05^\circ$ 范围内。轴向夹具的对中应根据 GB/T 34104 的规定检测并达到或优于 2 级要求。所有夹具与试样的配合面应保持在同一高度上以避免在试验中对试样施加弯矩，夹具的共面检查应采用符合本文件规定的夹具共面检测方法。

6.2.4.2 室温试验使用夹具

室温试验宜采用平板夹具。在上下夹具与试样的配合面上都应加工防滑纹以避免试样滑脱。夹具材料硬度应高于被测试样。图 2 为室温夹具结构的示意图。



标引序号说明：

1——上夹具；

3——螺栓；

2——下夹具；

4——试样。

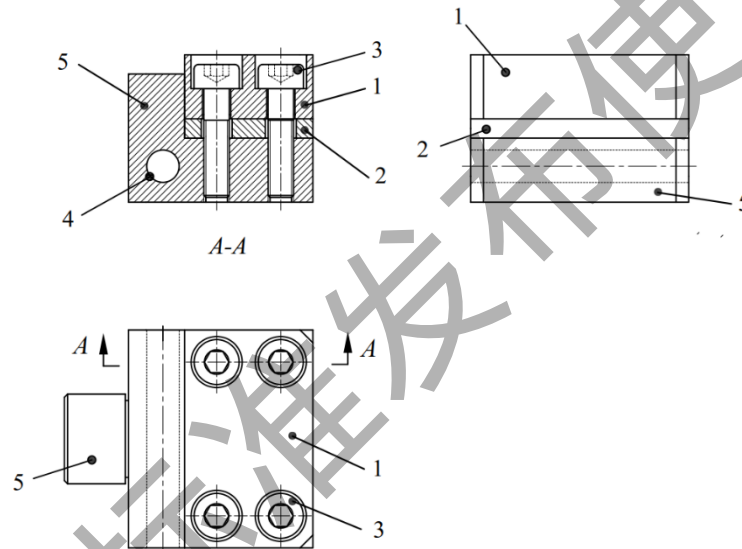
图 2 室温试验使用的平板夹具

6.2.4.3 高温试验使用夹具

6.2.4.3.1 当试验温度在 500℃以下时，可以采用带有冷却水循环通道的平板夹具。图 3 为推荐的高温平板夹具结构的示意图。在长时间高温双轴试验进行时，通过水管将所有夹具串联对夹具降温，避免温度过高影响传感器的正常工作。可以采用 GH4169 或更高强度的高温合金作为高温夹具的材料。

6.2.4.3.2 当试验温度高于 500℃时，为了保证试样装夹的可靠性，推荐采用台阶式夹具。图 4 为推荐的挂式夹具结构示意图。使用台阶式夹具时，夹具与传感器之间的连接部件应有足够的长度，以避免高温影响传感器的正常工作。高温夹具应采用在试验温度下具有足够强度的高温合金。可以采用 DZ422 或更高强度的高温合金作为高温夹具的材料。

6.2.4.3.3 在使用台阶式夹具时，试样夹持端应增加宽度以与台阶式夹具配合。



标引序号说明：

1——上夹具；

2——试样；

3——螺栓；

4——冷却水通路；

5——下夹具。

图 3 高温试验使用的平板夹具

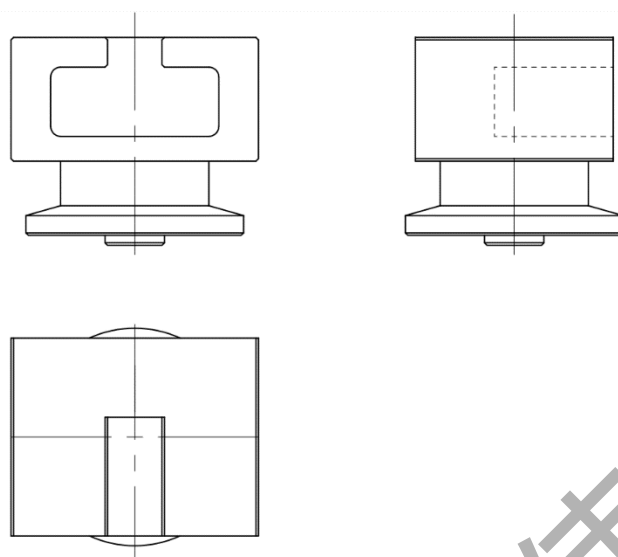


图 4 高温试验使用的台阶式夹具

6.2.4.4 共面检测传感器

四个夹具与试样配合面共面与否应通过共面检测传感器检查。共面检测传感器的形式应按照 GB/T 36024 进行设计和加工。对中传感器的总长度应与实际试样相同。在对中检查过程中与实际试样采用相同的夹持方式，避免使用二次夹具。应在十字形对中传感器中心布置 1 个双轴电阻应变计或 2 个单轴电阻应变计，应变计的位置如图 5 所示。

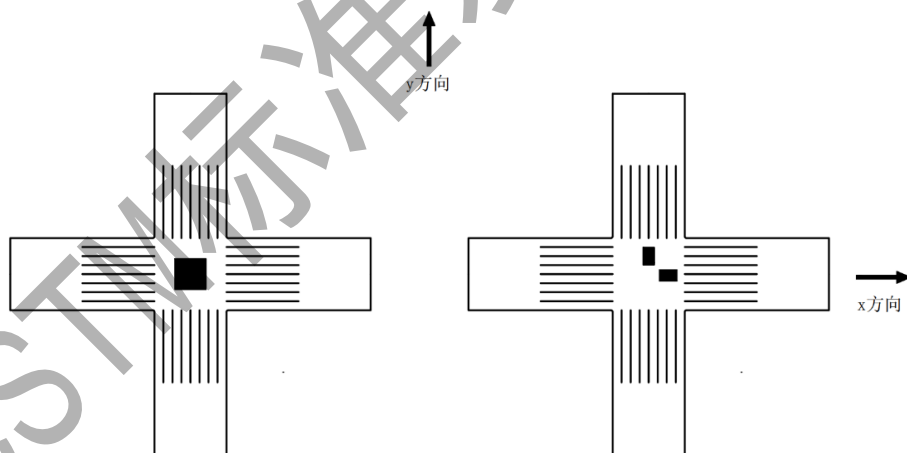


图 5 共面检测传感器上的电阻应变计位置

6.2.4.5 共面检查

将共面检测传感器两个方向的应变片读数清零，然后将传感器安装在双轴疲劳试验机上，锁紧夹具，分别读取 x 方向和 y 方向上的应变值 e_x 和 e_y 。各轴向上的应变值应不超过 0.001，否则应对各夹具的高度进行调整。应至少每年进行一次检查以保证所有夹具与试样的配合面共面。

6.3 应变传感器

6.3.1 一般要求

应变传感器应具备同时测量两个轴向上应变的能力。可采用接触式电阻应变计或非接触式视频引伸计测量十字形试样测量区域的应变。应变传感器应符合 0.5 级精度的要求。

6.3.2 电阻应变计

电阻应变计的粘贴位置应在十字试样的测量区域内，使用的电阻应变计宜符合 GB/T 13992 中的要求。电阻应变计在测量区域内的粘贴位置宜符合 GB/T 36024 的要求。若采用专用的双轴电阻应变计测量应变，应变计的大小应小于测量区域的大小，应变计的粘贴位置应位于试样测量区域的正中。电阻应变计适合在较低循环周次试验中使用，测量的应变值应小于其量程。

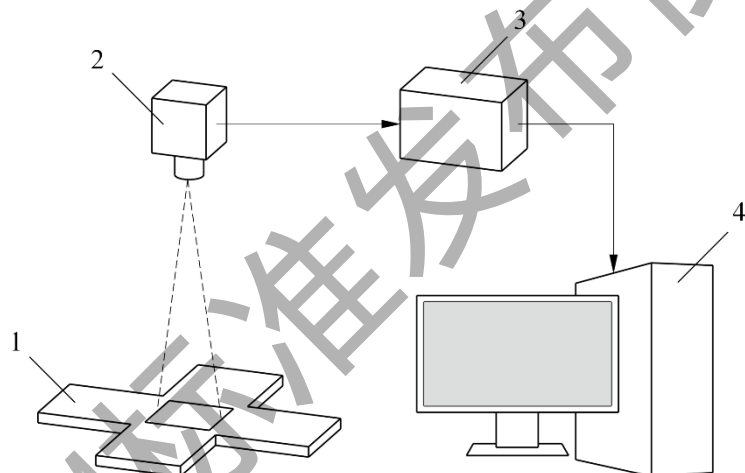
6.3.3 非接触视频应变传感器

6.3.3.1 非接触视频应变传感器如图 6 所示，建议在较高循环周次试验中使用，可测量较大的动态应变值，可以最大限度地降低信号漂移、滑动和机械滞后造成的影响。在双轴疲劳试验中使用的非接触视频应变传感器应能同时测量两个轴向上的动态应变值。

6.3.3.2 使用非接触视频应变传感器测量应变前，应在测量区域喷涂均匀的散斑，散斑的喷涂应符合 GB/T 38719 中的要求。

6.3.3.3 若在高温下使用非接触视频应变传感器，喷涂的散斑应使用耐高温涂料。同时应保证镜头与试样之间保持 100mm 以上的距离，防止镜头被高温损坏。

6.3.3.4 在高温下应保证试样和镜头之间处于真空或均匀气流环境，以避免影响非接触视频应变传感器的图像采集。



标引序号说明：

1——十字形试样；

2——CCD 相机；

3——非接触视频应变传感器；

4——试验机控制电脑。

图 6 非接触视频应变传感器

6.4 加热与温度测量系统

6.4.1 加热系统

可采用的加热方法包括：电阻丝加热、辐射炉加热、电磁感应加热或加热棒加热。建议优先采用电阻丝或加热棒对测量区域范围进行加热。

6.4.2 温度测量系统

6.4.2.1 通常采用热电偶或其它测温仪对试样温度进行测量。推荐采用非接触式温度测量装置对测量区域的温度场进行测量，应事先验证其测温精度在试验温度点不低于热电偶。

6.4.2.2 在不影响试验结果的前提下（例如，应避免裂纹的萌生出现在热电偶与试样的连接处），试样应与热电偶直接接触。固定热电偶的通常方法推荐点焊。当使用电阻炉加热时，热电偶焊点应避免直接辐射。

6.4.2.3 当采用电阻丝或加热棒加热时，热电偶不应固定在加热装置所在的试样一侧。

6.4.2.4 应保证至少有一个独立于控制通道的传感器用于测量试验温度。

6.4.2.5 贵金属热电偶择优选用 S 型或 R 型，建议使用温度大于 500℃。

6.4.2.6 廉金属热电偶建议用于 500℃ 以下试验；如试验温度超过 500℃，廉金属热电偶使用时间不宜超过 500 h。

6.5 数据采集系统

6.5.1 试验数据采集软件应包括以下功能：

- a) 能够同时记录两轴向上的应力-应变滞后回线；
- b) 能够记录温度在试验中的变化情况；
- c) 能够同时监测两轴向上加载波形的峰谷值。

6.5.2 每个轴向上的力-应变数据通道的采样速率应尽量高以便正确的再现滞后回线，特别是反向应变的区域。温度、位移和时间数据通道的采样频率也应足够高。力-应变数据通道每个循环至少需要采集 200 个数据点用于再现滞后回线。其它传感器通道（如温度），每个循环也需要采集相应数量的附加数据点。

7 试样

7.1 几何尺寸

7.1.1 概述

十字形试样的几何结构与尺寸对最终试验结果有很大的影响。因此在实验前应根据试验目的和试验条件（如试验机、夹具等）设计试样。推荐基于有限元分析的分析设计手段，具体设计案例见附录 B。采用的试样包括带有开缝结构和预制裂纹区的双轴裂纹扩展十字形试样和无开缝结构的双轴疲劳十字形试样两种，试样的形式见 7.1.2 和 7.1.3，试样的推荐尺寸见附录 C。

7.1.2 双轴疲劳十字形试样

7.1.2.1 推荐形式

双轴疲劳十字形试样的推荐形式见图 7。

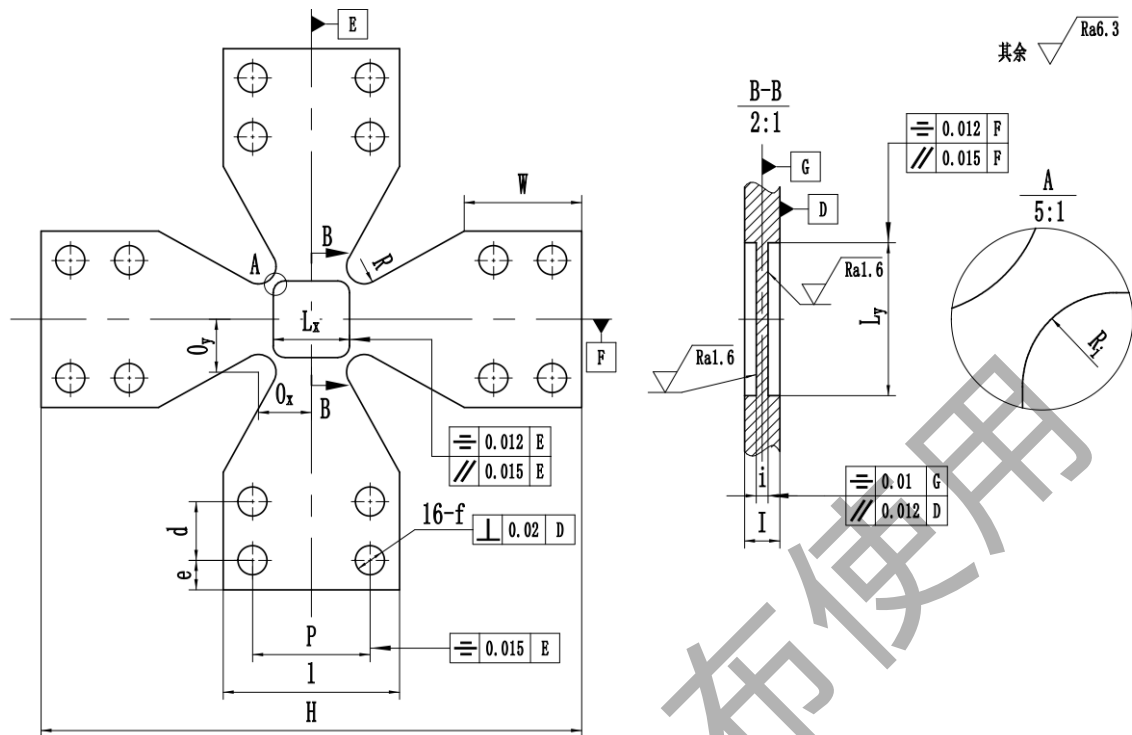


图 7 双轴疲劳十字形试样示意图

7.1.2.2 几何尺寸

双轴疲劳十字形试样推荐几何尺寸见表 2。

表 2 推荐的几何尺寸

名称	单位	尺寸要求
试样总长度 H	mm	$H \geq 80$
拉伸臂宽度 l	mm	$l \geq 26$
夹持端长度 W	mm	$W \geq 18$
长度方向上的螺栓孔中心间距 P	mm	$P \geq 17$
宽度方向上的螺栓孔中心间距 d	mm	$d \geq 8$
螺栓孔中心与拉伸臂的间距 e	mm	$e \geq 4$
测量区域外圆角圆心距 x 方向中心线距离 O_x	mm	$O_x = 0.3l$
测量区域外圆角圆心距 y 方向中心线距离 O_y	mm	$O_y = 0.3l$
测量区域 x 方向的边长 L_x	mm	$L_x \geq 0.4l$
测量区域 y 方向的边长 L_y	mm	$L_y \geq 0.4l$
测量区域外圆角半径 R	mm	$R \geq 0.1l$
测量区域内圆角半径 R_i	mm	$R_i \geq 0.1l$
试样厚度 I	mm	$I \leq 0.03H$
测量区域厚度 i	mm	$i \geq 0.3I$
螺栓孔直径 f	mm	$f \geq 5$

试样厚度应根据试验材料确定，建议试样厚度不超过 10mm，以免对载荷测量和试样装夹造成影响。

螺栓孔直径不宜超过夹具采用的螺栓直径 2mm 以上。

在保证实验中试样不会滑脱的前提下，可以不加工螺栓孔。

7.1.2.3 试样的公差

7.1.2.3.1 试样的测量区域外轮廓的公差应满足以下要求，这些值的表述与对称轴或基准面相关：

——平行度： $f \leq 0.015$ ；

——对称度： $i \leq 0.012$ 。

7.1.2.3.2 试样的测量区域内表面的公差应满足以下要求，这些值的表述与对称轴或基准面相关：

——平行度： $f \leq 0.012$ ；

——对称度： $i \leq 0.01$ 。

7.1.2.3.3 测量区域的表面粗糙度应满足 $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$ ，而试样表面的粗糙度应满足 $Ra \leq 6.3 \mu\text{m}$ 。

7.1.2.4 螺栓孔的公差

试样的螺栓孔公差应满足以下要求，这些值的表述与对称轴或基准面相关：

——垂直度： $b \leq 0.02$ ；

——对称度： $i \leq 0.015$ 。

7.1.3 双轴裂纹扩展十字形试样

7.1.3.1 推荐形式

双轴裂纹扩展十字形试样的推荐形式见图8。

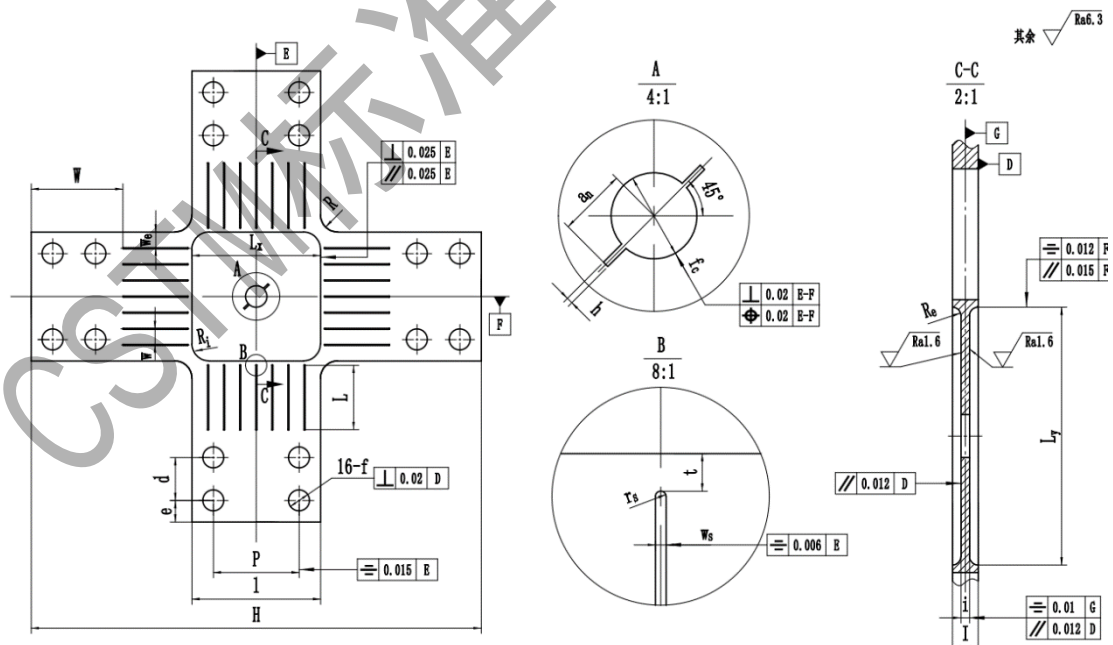


图 8 双轴裂纹扩展十字形试样示意图

7.1.3.2 几何尺寸

双轴裂纹扩展十字形试样推荐几何尺寸见表 3。

表 3 推荐的几何尺寸

名称	单位	尺寸要求
试样总长度 H	mm	$H \geq 75$
拉伸臂宽度 l	mm	$l \geq 0.25H$
测量区域 x 方向的边长 L_x	mm	$L_x = l$
测量区域 y 方向的边长 L_y	mm	$L_y = l$
测量区域外圆角半径 R	mm	$R \geq 0.1l$
测量区域内圆角半径 R_i	mm	$R_i \geq 0.1l$
长度方向上的螺栓孔中心间距 P	mm	$P \geq 13$
宽度方向上的螺栓孔中心间距 d	mm	$d \geq 7$
螺栓孔中心与拉伸臂的间距 e	mm	$e \geq 4$
开缝长度 L	mm	$L \leq W$
夹持端长度 W	mm	$W \geq 15$
拉伸臂边缘与最外侧开缝中心线之间的距离 w_e	mm	$w_e \geq w$
试样厚度 I	mm	$I \leq 0.03H$
测量区域厚度 i	mm	$i \geq 0.3I$
测量区域过渡圆弧半径 R_e	mm	$R_e = (a-b)/2$
开缝宽度 w_s	mm	$w_s \leq 3$
每条开缝中心线之间的距离 w	mm	$w = (l - 2w_e)/(N-1)$, $w \leq 3$
每条开缝顶部的圆角半径 r_s	mm	$r_s = 0.5w_s$
开缝顶部与减薄区的距离 t	mm	$t \geq 1$
螺栓孔直径 f	mm	$f \geq 5$
开缝条数 N	-	$N \leq 7$
减薄区中心小孔直径 f_c	mm	$f_c \leq 0.15l$, $f_c \geq a$
预制裂纹缺口的宽度 h	mm	$h \leq 0.5$
预制裂纹缺口的长度 a_n	mm	$0.1l \leq a_n \leq 0.2l$

在保证实验中试样不会滑脱的前提下，可以不加工螺栓孔。

7.1.3.3 试样的公差

7.1.3.3.1 试样的测量区域外轮廓的公差应满足以下要求，这些值的表述与对称轴或基准面相关：

——平行度： $f \leq 0.015$ ；

——对称度： $i \leq 0.012$ 。

7.1.3.3.2 试样的测量区域内表面的公差应满足以下要求，这些值的表述与对称轴或基准面相关：

——平行度： $f \leq 0.012$ ；

——对称度： $i \leq 0.01$ 。

7.1.3.3.3 测量区域的表面粗糙度应满足 $Ra \leq 1.6 \mu m$ ，而试样表面的粗糙度应满足 $Ra \leq 6.3 \mu m$ 。

7.1.3.4 试样开缝和中心小孔的公差

试样开缝和中心小孔的公差应满足以下要求，这些值的表述与对称轴或基准面相关：

——垂直度： $\perp \leq 0.02$ ；

——位置度： $j \leq 0.02$ ；

——对称度： $i \leq 0.006$ 。

7.2 试样的制备

应按第7章的规定进行试样制备。如试验存在标准规定范围之外的目的（如在线原位微观表征），可不符合7.2.2~7.2.6的要求，但应在试验报告中加以注明。

7.2.1 取样及标记

7.2.1.1 在取样前，应根据相关产品标准或与材料供应方的协议，对待取样的材料或半成品进行检验，内容包括材料的化学成分、生产方式和显微组织形态等信息。

7.2.1.2 应在试验报告附上清晰的取样图，取样图应包括：

- a) 每件试样在原材料或半成品上的取样部位；
- b) 试样的加工方向（如轧制方向、挤压方向等）；
- c) 每件试样的标记。

7.2.1.3 在每一批试样的加工过程中每个试样应有唯一的编号。可用任何标记方法在试样不会被加工掉的区域进行标记，标记不应影响试验质量。

7.2.1.4 应在每个试样的拉伸臂上标记加工方向（如轧制方向、挤压方向等），以便在试验中被识别出来。

7.2.2 加工

7.2.2.1 试样的轮廓和开缝

为了保证十字形试样的形状和尺寸要素的相对精度，试样的轮廓和开缝的位置和尺寸信息宜提前通过计算机绘图并采用高精度激光切割加工，激光切口的宽度应根据试样尺寸进行调整。不同材料的熔点不同，需要根据不同材料参考激光切割机厂商提供的资料调整切割参数，以免影响加工精度或对材料的显微组织产生影响。加工应满足以下条件：

- a) 开缝：所有用于开缝的激光切入点应位于靠近夹持端的一侧，成品在激光切入点处的直径不得大于开缝宽度；
- b) 试样轮廓：与成品尺寸的偏差应在 0.3mm 以内。

注1：凝固的金属液滴：这一现象是由切割过程中切割参数调整不当导致的，过多的凝固金属液滴会填满开缝改变试样结构，需注意防范。

注2：当开缝宽度大于 1 mm，可以采用钻孔和线切割的方式加工开缝。需防止线切割冷却液污染劣化开缝处的材料。

7.2.2.2 试样的测量区域

测量区域应采用铣削加工，铣削过程中应保证试样平面平行于加工平面，在铣削中单次进给深度应不超过规定的表面粗糙度避免在减薄区表面留下明显铣痕。为保证中心小孔的形位公差，宜采用钻孔加工，不宜采用激光切割加工。在铣削加工中应避免切削冷却液中的某些元素或化合物劣化材料的机械性能，在加工后应及时清除测量区域表面的污染物。

7.2.3 试样的表面状态

试样的表面状态应符合以下要求：

- a) 测量区域：平均表面粗糙度 R_a 小于 $1.6 \mu\text{m}$ ，不得存在明显的加工痕迹。如果需要对试样进行热处理，为了避免测量区域发生严重氧化，应在测量区域加工前对半成品进行热处理或在真空环境或惰性气体保护条件下进行热处理；
- b) 试样表面：平均表面粗糙度 R_a 小于 $6.3 \mu\text{m}$ ，若原始材料表面质量较高，则只需进行简单抛光，去除表面污染物，使表面粗糙度达标即可；

- c) 材料微观组织的变化：热处理不应改变被研究材料的显微组织，热处理及机加工的细节应在试验报告中记录。
- d) 污染物的介入：应避免腐蚀性的无机物和有机化合物损坏试样的表面状态。

7.2.4 试样尺寸测量

应对测量区域两个加载轴方向长宽尺寸各进行至少 3 次测量（中间及两侧），对测量区域两个加载轴方向厚度各进行至少 3 次测量（中心及两侧）。用多次测量值的平均值计算试样尺寸，以确定试样控制参数和用于试验数据后处理。

7.2.5 存放及运输

制备好后的试样应保存以防止任何损伤（接触刮伤或氧化）。建议采用单独的盒子保存试样。在某些情况下，有必要将试样存放在真空器皿或放有硅胶的干燥器中。在运输中应避免对试样施加弯矩导致试样弯曲。

8 试验程序

8.1 试验环境

十字形面内双轴疲劳试验的环境应符合以下条件：

- a) 试验装置受到的外部机械扰动不能对加载及应变采集产生影响；
- b) 试验环境封闭，不受自然风的影响；
- c) 没有能够影响试验机控制和数据采集的外部电磁干扰；
- d) 大气中没有化学和粉尘污染；
- e) 室温环境的温度要求参见 GB/T 40410 的规定；
- f) 高温试验的温度一般不超过 800℃。

8.2 检查和校准

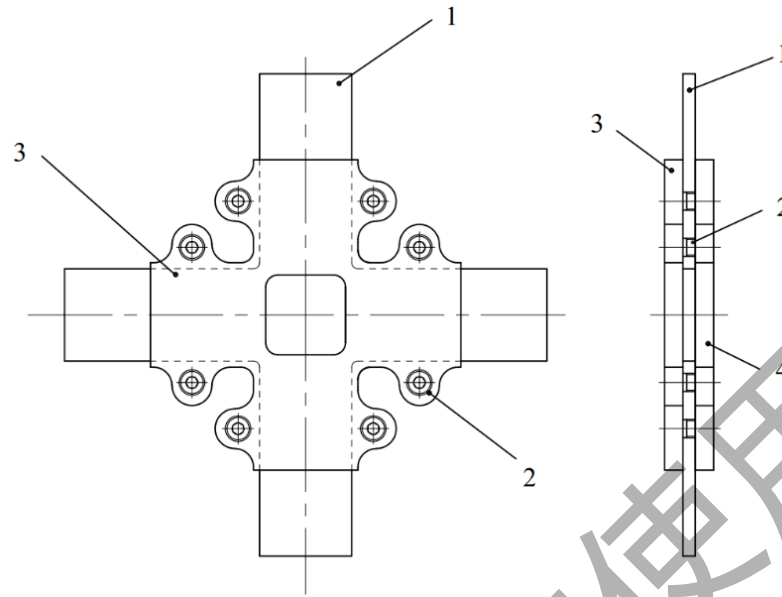
试验前应对传感器及其附属电子元件进行校准，并应符合以下要求：

- a) 测力系统按照 GB/T 16825.1、GB/T 25917.1 或 JJG 556 进行校准；
- b) 非接触视频应变传感器按照 GB/T 12160 进行校准；
- c) 电阻应变计可以通过调整控制器的放大系数，结合标准试样的应变读数来进行校准。
- d) 高温试验还应对热电偶或测温仪等温度传感器进行检查，其中热电偶按照 JJG 141 或 JJF 1637 进行校准。

8.3 试样安装

8.3.1 将试样安装在试验设备上，两个加载轴方向均不施加预载荷。在紧固螺栓时应采用对角拧紧的方式以避免夹持端受力不均。应采用带有扭力测量装置的工具紧固螺栓以保证所有的螺栓紧固程度相同，每个螺栓的拧紧力矩偏差不得超过 0.2 N·m。对于夹持端带有螺栓孔的试样，试样的安装对中通过螺栓定位完成。若采用台阶式夹具装卡，试样的安装对中可以通过夹持端与夹具的配合完成。对于没有螺栓孔的试样，在试样装夹前应在各夹持端画出相应轴线的垂线并在装夹前确保垂线与夹具下边缘对齐。

8.3.2 十字形面内双轴疲劳试验推荐使用屈曲约束夹具以减少试验过程中可能出现的失稳。屈曲约束夹具如图 9 所示，通过两个十字形板约束十字形试样沿加载平面垂直方向的变形。在屈曲约束夹具留有对测量区域的观测孔，通过数字图像相关技术(DIC)、视频引伸计和电阻应变计等技术，可以直接获得测量区域的应变状态。应尽量避免加载方向与各拉伸臂轴向之间的不对中。应在试样与屈曲约束夹具接触的区域使用润滑剂（如聚四氟乙烯薄膜）以降低摩擦力对试验结果的影响。



标引序号说明:

1——十字形试样;
2——螺栓;

3——上夹具;
4——下夹具;

图9 屈曲约束夹具

8.4 控制模式

面内双轴疲劳试验可以通过应力或应变控制模式开展。试验开始前应检查两应力或应变控制器通道是否分别控制正确的轴向。无论选择其中任何一种控制模式,试验开始前两轴向应同时处于零载荷状态,且应变传感器示数为0。各向异性明显的材料应采用应变控制以避免测量区域在单向变形主导下快速失效。

8.5 控制波形

8.5.1 控制波形可采用三角波、正弦波和梯形波等。通过调整两个轴向载荷波形的相位,可以实现圆形、菱形和方形等加载路径。对于同一系列的试验,应采用相同的加载速率或频率以保证疲劳寿命数据的可比性。

8.5.2 双轴加载条件下金属材料通常会产明显的强化现象,流动应力高于单轴。因此在试验开始前应进行双轴拉伸试验测得屈服强度、抗拉强度和各轴向的弹性模量及延伸率等数据,并以此确定控制波形的均值、幅值和加载比等参数。

8.6 加载相位

当两轴向加载频率和加载波形相同,各轴向的加载波形周期为 T ,相位差为 $\phi \neq 0$ 时,形成的典型非比例应力或应变路径如下,图例见附录D:

- 当各轴向的加载波形为三角波且 $0 < \phi < T/4$ 或 $T/4 < \phi < T/2$,应力或应变路径为斜45°矩形;
- 当各轴向的加载波形为正弦波且 $0 < \phi < T/4$ 或 $T/4 < \phi < T/2$,应力或应变路径为斜45°椭圆;
- 当各轴向的加载波形为梯形波且 $0 < \phi < T/4$ 或 $T/4 < \phi < T/2$,应力或应变路径为六边形;
- 当各轴向的加载波形为三角波且 $\phi = T/4$,应力或应变路径为斜45°正方形;
- 当各轴向的加载波形为正弦波且 $\phi = T/4$,应力或应变路径为圆形;

- f) 当各轴向的加载波形为梯形波且 $\phi=T/4$ ，应力或应变路径为矩形；
- g) 当 $\phi=T/2$ 时，应力或应变路径为一条斜率为 -1 的直线。

8.7 试验开始

8.7.1 为了避免试样失稳，提高试验成功率，试验宜采用拉伸初始加载方向。同一系列的所有疲劳试验应该采用相同的初始加载方向（拉/压）。

8.7.2 为避免产生过冲，各轴向在试验开始后应在 10 个循环周次内达到目标加载幅值与相位差。

8.7.3 高温试验在升温过程中应通过试验机载荷伺服抵消试样热膨胀的影响。为了防止过冲或失控，升温速率不应超过 $6^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。为保证测量区域厚度方向温度的均匀性，在温控装置显示的温度到达试验温度后，应至少保温 2 分钟后方可开始试验。在整个试验期间应确保温控装置显示温度变化不超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 或试验温度 $\pm 1\%$ 中的较大值。

8.7.4 高温试验中测量区域面内温度的梯度不大于 3°C 或标称试验温度的 1% 两者中的较大值。温度场可利用红外测温设备直接获取。采用热电偶时，应在测量区域中心及对角线上靠近测量区域边缘的两端进行温度测量，如图 10 所示。对于裂纹扩展试样，热电偶应固定在中心小孔附近。

8.7.4 为了尽可能减少塑性影响区，从而使后续裂纹扩展试验不受加载历史影响，预制裂纹阶段采用的 G_{\max} 应小于裂纹扩展阶段。可以采用裂纹扩展阶段能量释放率的 $30\% \sim 80\%$ 作为初始 G_{\max} 。如图 11 所示，疲劳预制裂纹的长度 a_p 的最小值应满足 $a_p \geq 2a_n - 0.5f_c$ 或 $a_p \geq a_n + 1$ 中的较大值。为了试验的有效性，在双轴裂纹扩展试验的过程中应尽可能保持测量区域处于线弹性应力状态。

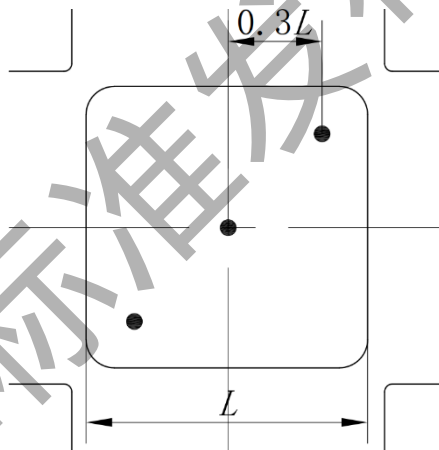


图 10 推荐的温度测量点示意图

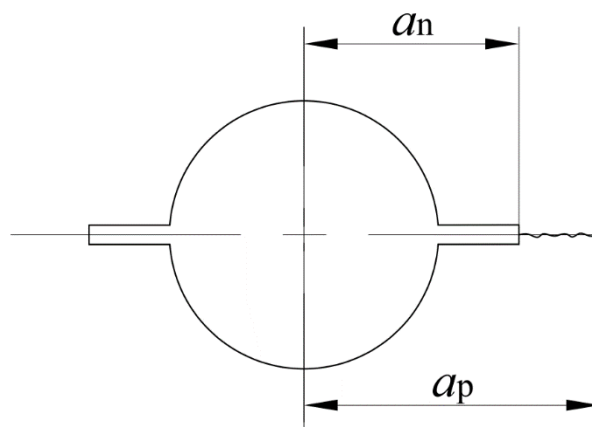


图 11 疲劳预制裂纹

8.8 监测试验

8.8.1 试验过程中需要监测各试验控制变量，包括应力、应变和控制波形。其中双轴 x 和 y 方向的应力和应变幅值变化量不应超过名义值的 1%。加载波形的相位差不应超过 3°。对于常温试验，若加载应变率或频率较高应注意监测测量区域的温度，试样温度升高不宜超过 5℃。

8.8.2 在双轴裂纹扩展试验中应通过长焦距（共焦）显微镜或 CCD 相机在线观测并记录疲劳裂纹的萌生和扩展过程。试验过程中的裂纹长度测量方法应满足 GB/T 6398 中的要求。

8.8.3 在高温试验中应注意对试样测量区域温度的监控，使温度稳定在预设值范围内。

8.9 数据记录

8.9.1 应记录双轴拉伸试验中的屈服强度、抗拉强度和各轴向的最大应变等数据。

8.9.2 应完整记录试验开始两轴向初始 10 个循环周次内的应力和应变，以描述材料的初始循环硬化/软化行为。在之后的疲劳试验过程中，应对上述数据采用对数间隔的方式进行记录。

8.9.3 在双轴裂纹扩展试验中应每隔一定循环周次 N 记录裂纹长度 a 的变化。为了反映关注的 ΔG 范围内 da/dN 的数据分布均匀，裂纹长度的测量间隔不宜超过 200 周。为了在裂纹扩展稳定阶段末期得到足够的裂纹长度数据，宜降低数据记录的间隔以更好地监测向失效阶段的转变。

8.10 试验停止

试验停止后应拆卸试样，并进行数据处理和试验报告的撰写。以下情况可以作为十字形面内双轴疲劳试验的停止判据：

- a) 几何结构破坏：十字形试样在外加载荷的作用下在测量区域内产生损伤，并导致测量区域破坏和试样结构分离；
- b) 载荷下降：十字形试样在测量区域内出现裂纹或表面损伤，导致任意轴向的流动应力出现突然下降且相较于峰值应力下降 5%。

8.11 试样失效判定

十字形面内双轴疲劳试验中试样的失效主要由试样的异常破坏和试验控制变量的偏差超出合理范围所导致。主要分为以下情况：

- a) 十字形试样的破坏发生在拉伸臂并导致试样发生分离，或十字形试样在拉伸臂出现裂纹或表面损伤导致该轴向的流动应力突然下降。试样失效后应重新检查夹具的对中与共面，并重新进行试验；
- b) 试验控制变量超差：当各试验控制变量在试验中监测值与名义值的偏差超过了规定的最大范围，则判定为试样失效。试样失效后应调整相关的控制参数并重新进行试验。

9 数据的处理与分析

9.1 弹塑性载荷条件下两轴向的应力-应变关系曲线

应通过双轴拉伸试验结果分别计算各轴向的真应力及真应变以描述各轴向的应力-应变关系。常用的应力和真应力/真应变数据处理公式见附录E。可通过各轴向的应力-应变关系分析材料的各向异性及硬化/软化行为。

9.2 两轴向等效应力/应变幅值与疲劳寿命的关系

应通过十字形双轴疲劳试验结果计算两轴向的等效应力和等效应变范围和幅值，并计算弹性模量。其中等效应变范围可以区分为弹性和塑性部分。应通过试验结果建立应力/应变幅值与疲劳寿命的关系。在同频同相的加载条件下，计算等效应力和应变的公式及描述等效应力或等效应变与疲劳寿命的关系函数参见附录E。

9.3 裂纹扩展速率与能量释放率的关系

在双轴载荷下可能同时存在I型和II型的裂纹扩展模式，因此需要同时包含应力强度因子 K_I 和 K_{II} 的能量释放率 G 来分析疲劳裂纹扩展的规律。应根据试验结果计算应力强度因子能量释放率，获得能量释放率与裂纹扩展速率之间的关系，并预测不同相位差下的裂纹扩展方向。计算应力强度因子、能量释放率的公式及描述裂纹扩展速率与能量释放率的函数见附录E。

10 试验报告

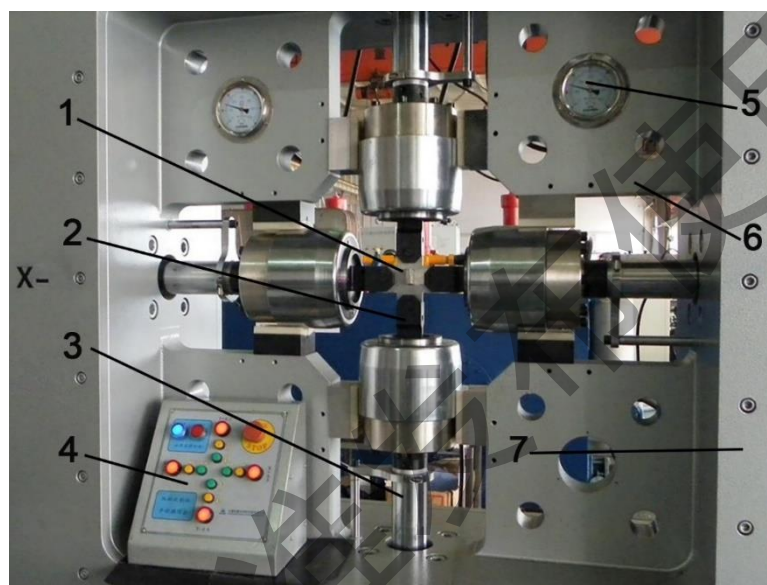
试验报告应包含下述信息：

- a) 本文件编号；
- b) 材料的名称、牌号、热处理方式、织构及晶粒尺寸。
- c) 试样形状、尺寸、加工工艺、表面粗糙度等；
- d) 试验设备基本信息；
- e) 试验参数设置，如测试温度、频率、加载波形、应变/应力速率、应变/应力比、应变/应力幅值、双轴应变/应力相位角等；
- f) 双轴方向的滞回曲线、峰谷值应力、导致试样失效的主裂纹取向、引伸计和试样接触位置处相关的裂纹信息、控制变量偏离规定值的差值；
- g) 试样结果分析；
- h) 试验中发生的不符合或者未在本规定中提及的可能影响试验结果的现象；
- i) 试验日期及操作人员。

附录 A
(资料性)
双轴试验机的类型与主要形式

A.1 液压伺服控制双轴试验机

A.1.1 图A.1为双轴四缸电液伺服试验机。该机为立式结构，具有良好的中心定位精度，可以实现原位加载。该系统适合应用于各向异性材料和薄板材料的单轴向和双轴向动静态力学性能试验。

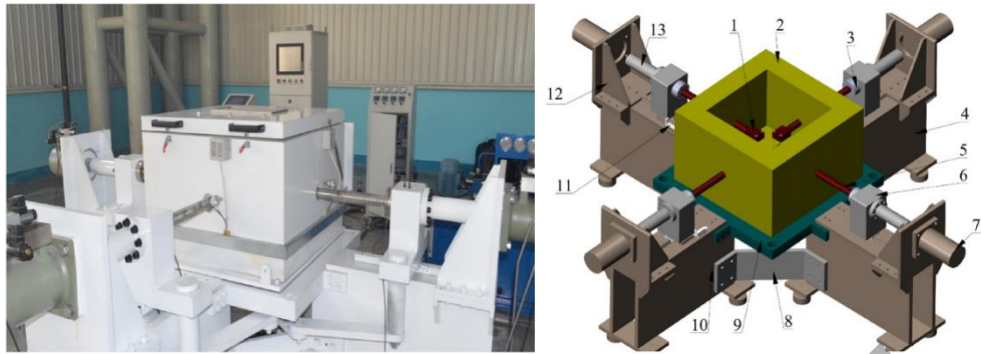


标引序号说明：

- | | |
|-----------|---------|
| 1——十字形试样； | 5——液压表； |
| 2——夹具； | 6——加强筋； |
| 3——拉伸杆； | 7——框架。 |
| 4——控制台； | |

图 A.1 双轴四缸电液伺服试验机

A.1.2 图A.2为包含四个液压伺服缸的高温双轴拉伸试验系统^[1]的设备结构。该装置通过独立的闭环比例控制实现对液压装置的控制，每个液压缸可以稳定提供0-100kN的载荷。各轴的最大位移为100mm。该设备包含加热装置，加热炉安装在双轴试验机的工作台上，可以提供室温到800℃的高温环境并保证周边设备温度在40℃及以下。在加热炉顶部的中心位置放置石英玻璃观察窗口，以允许对实验中的试样进行非接触式光学测量。



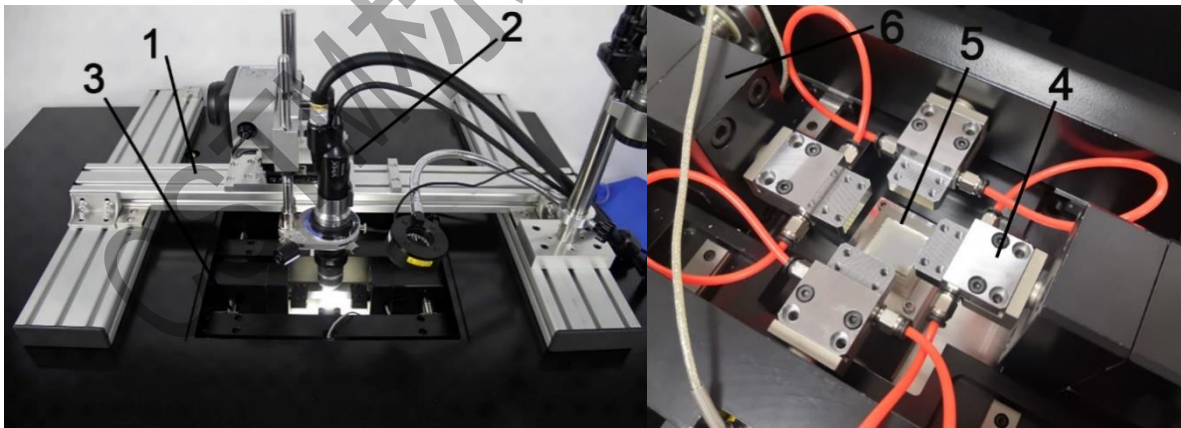
标引序号说明:

- | | |
|-----------|---------------|
| 1——夹具; | 8——加强筋; |
| 2——加热炉; | 9——工作台; |
| 3——载荷传感器; | 10——地基; |
| 4——侧支撑板; | 11——导轨和位移传感器; |
| 5——拉伸杆; | 12——支撑板; |
| 6——联轴器; | 13——连接杆。 |
| 7——液压缸; | |

图 A.2 高温双轴拉伸试验系统

A. 2 电动机驱动的双轴试验机

A. 2. 1 图A.3为面内双轴实验系统^[2], 该系统以电动机驱动, 采用丝杠作为传动部件, 可以保证两轴向上加载对称, 实现原位加载。每个加载轴可以相互独立控制, 实现包括双轴疲劳、拉伸、蠕变、松弛等面内双轴力学测试功能。加载装置上方安装显微观测装置, 可以实现微观变形机制的原位在线观测和裂纹长度测量。该设备还配有高温实验组件, 可以实现复杂环境下的多轴疲劳测试。

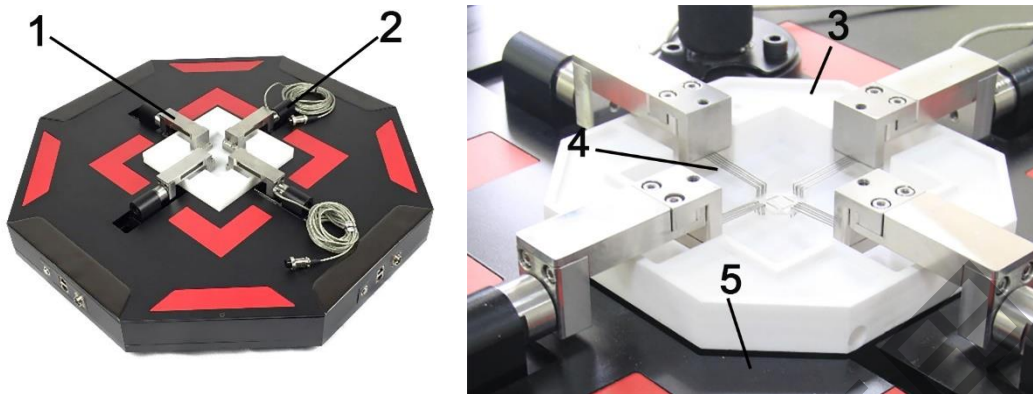


标引序号说明:

- | | |
|------------|----------|
| 1——导轨; | 4——水冷夹具; |
| 2——显微观测装置; | 5——加热装置; |
| 3——丝杠; | 6——拉伸部件。 |

图 A.3 面内双轴实验系统 (含显微观测装置和高温组件)

A.2.2 图A.4为小型面内双轴实验系统^[3]，该系统配有水浴装置和温控装置，可以实现复杂环境（如水浴、腐蚀环境）下生物材料和薄膜材料的双轴材料性能测试。



标引序号说明：

- 1——夹具；
- 2——载荷传感器；
- 3——水浴槽；

- 4——生物膜材料专用夹具；
- 5——机体。

图 A.4 小型面内双轴实验系统

CSTM标准发布使用

附录 B

(资料性)

基于有限元分析的十字形试样改进案例

B.1 概述

十字形试样的形式通常会随着实验类型的改变而调整。由于十字形试样结构较为复杂，调整后试样在实验中的应力应变分布情况难以预测。为了避免应力和应变集中、变形约束等问题的出现，本文件推荐通过有限元分析查找试样结构上的缺陷并进行改进。本附录提供了基于有限元分析的十字形试样改进案例。有限元分析的流程和术语应符合 GB/T 33582 和 GB/T 31054 的规定。

B.2 未改进十字形试样的有限元分析

图B.1给出了未改进的十字形试样的有限元分析结果。图B.1a)表明，十字形试样在双轴加载中会在两拉伸臂交叉处产生应力集中，从而导致试样中间部分应力分布不均匀，实际受力也非常小。而十字形试样的变形也主要集中在两拉伸臂交叉处，试样中部的实际变形量非常小，如图B.1b)所示。

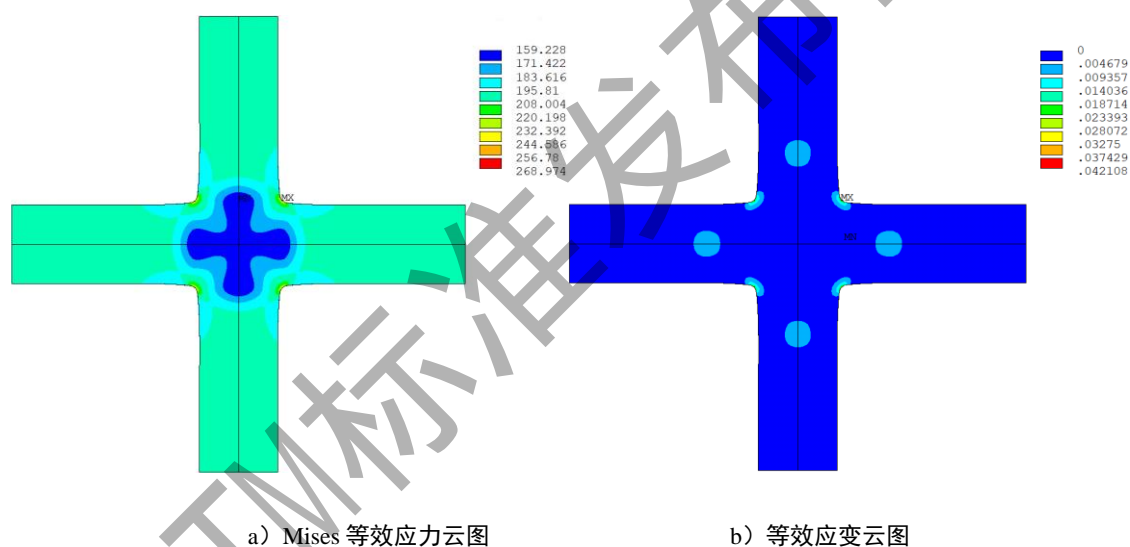


图 B.1 未改进前十字形试样设计图

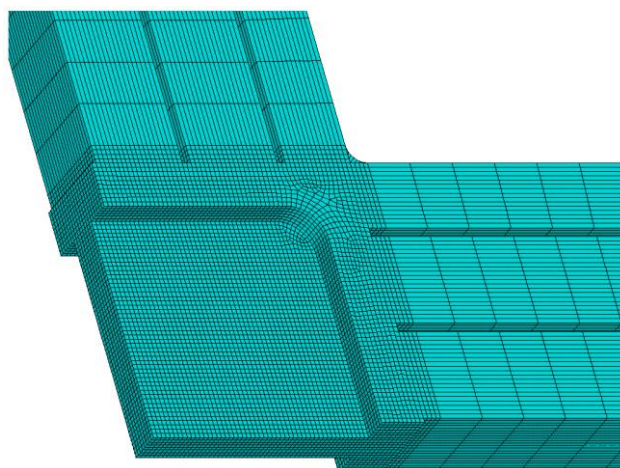
B.3 改进后的十字试样结构

针对在B.2中发现的问题，提出以下针对目前十字试样几何结构的改进方案：

a) 在拉伸臂与试样中部区域边缘位置之间增加5条细缝，以减小拉伸臂对试样中部变形的约束，避免在拉伸臂交叉处产生应变集中；

b) 在试样的中部区域增加减薄结构，这样可以使试样中部的应力分布更加均匀，减弱拉伸臂交叉处产生的应力集中，同时也可以减小因开缝对试样强度造成的影响；

为了验证对试样的改进方案是否达到了预期目标，针对改进后的十字试样也进行了有限元分析。改进后试样的1/4有限元模型如图B.2所示。

图 B.2 改进后十字试样的有限元模型^[4]

B.4 改进后的十字试样的有限元分析

图B.3给出了未改进的十字形试样的有限元分析结果。如图B.3a)所示，两拉伸臂交叉处产生应力集中已经完全消除，同时试样中间部分的减薄区域内的应力分布也变得十分均匀。改进后十字形试样的变形主要集中在试样中间的减薄区域内且分布均匀，变形能力也大大增加。两拉伸臂交叉处的应变集中也被消除。因此对原十字试样的改进达到了预期的目标。

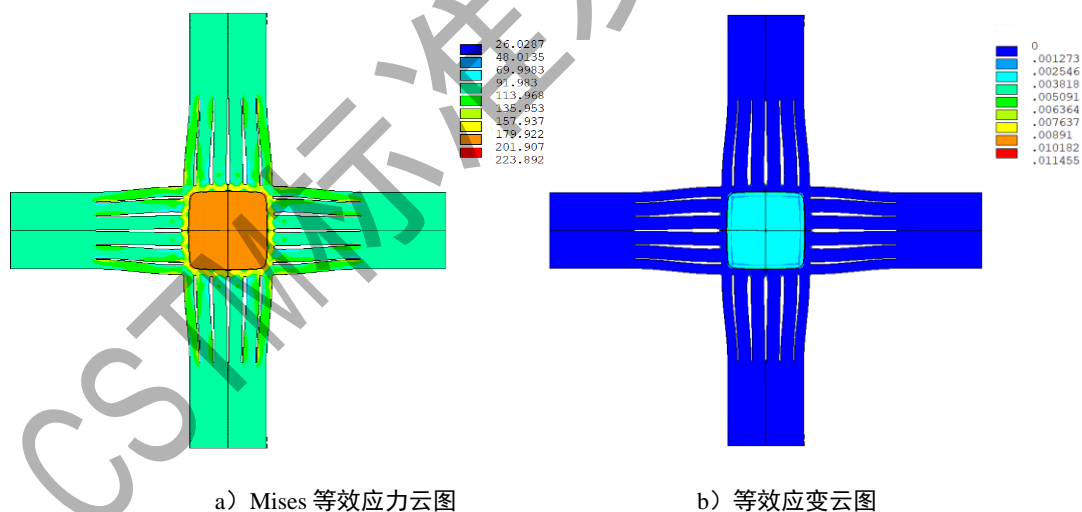


图 B.3 改进后的十字试样的有限元分析结果

附录 C
(资料性)
推荐的十字型试样尺寸

C.1 双轴疲劳十字形试样

双轴疲劳十字形试样的推荐尺寸见表 C.1。

表 C.1 双轴疲劳十字形试样的推荐尺寸

试样编号	H/mm	l/mm	W/mm	$L_x, L_y/mm$	R_i/mm	R/mm
1	80	26	18	12	2	3
2	150	50	33	22	3	7
3	250	80	54	35	4	12
4	300	90	65	42	5	18

C.2 双轴裂纹扩展十字形试样

双轴裂纹扩展十字形试样的推荐尺寸见表 C.2。

表 C.2 双轴裂纹扩展十字形试样的推荐尺寸

试样编号	H/mm	l/mm	W/mm	N	R_i/mm	R/mm
1	75	20	15	5	3	3
2	150	42	28	6	6	5
3	250	70	47	7	10	9
4	300	85	57	7	11	10

表 C.2 (续)

试样编号	L/mm	w/mm	f_c/mm	w_s/mm	t/mm	a_q/mm
1	11	3	3	0.2	1	2.5
2	21	6	6	0.5	2	4.5
3	35	8	11	1	3	8
4	42	10	13	2	4	10

当开缝宽度 w_s 小于 0.5mm 时，应采用激光切割加工。当 w_s 大于 1mm 时，应采用电火花加工或其它精度更高的机加工方式。

预制裂纹缺口推荐采用线切割或电火花加工，宽度 h 通常为 0.5mm。

附录 D

(资料性)

不同相位差下的加载路径

D.1 附录 D 给出了在两轴向加载频率和加载波形都相同的条件下，不同相位差形成的加载波形和典型非比例加载路径。

D.2 正弦波在不同相位差下的加载路径见表 D.1。

表 D.1 正弦波在不同相位差下的加载路径

相位差	加载波形	加载路径
$0 < \phi < T/4$		
$\phi = T/4$		
$T/4 < \phi < T/2$		
$\phi = T/2$		

D.3 三角波在不同相位差下的加载路径见表 D.2。

表 D.2 三角波在不同相位差下的加载路径

相位差	加载波形	加载路径
$0 < \phi < T/4$		
$\phi = T/4$		
$T/4 < \phi < T/2$		
$\phi = T/2$		

D.4 梯形波在不同相位差下的加载路径见表 D.3。

表 D.3 梯形波在不同相位差下的加载路径

相位差	加载波形	加载路径
$0 < \phi < T/4$	<p>应力或应变</p> <p>时间</p>	<p>y轴方向的应力或应变</p> <p>x轴方向的应力或应变</p>
$\phi = T/4$	<p>应力或应变</p> <p>时间</p>	<p>y轴方向的应力或应变</p> <p>x轴方向的应力或应变</p>
$T/4 < \phi < T/2$	<p>应力或应变</p> <p>时间</p>	<p>y轴方向的应力或应变</p> <p>x轴方向的应力或应变</p>
$\phi = T/2$	<p>应力或应变</p> <p>时间</p>	<p>y轴方向的应力或应变</p> <p>x轴方向的应力或应变</p>

附录 E
(资料性)
数据处理公式

E.1 各轴向应力-应变关系

E.1.1 x 轴和 y 轴的工程应力由公式 (E.1) 和公式 (E.2) 计算:

$$S_x = \frac{F_x}{L_x a} \dots\dots\dots (E.1)$$

$$S_y = \frac{F_y}{L_y a} \dots\dots\dots (E.2)$$

E.1.2 x 轴和 y 轴的真应变由公式 (E.3) 和公式 (E.4) 计算:

$$\varepsilon_x = \ln(1 + e_x) \dots\dots\dots (E.3)$$

$$\varepsilon_y = \ln(1 + e_y) \dots\dots\dots (E.4)$$

E.1.3 x 轴和 y 轴的真应力由公式 (E.5) 和公式 (E.6) 计算:

$$\sigma_x = S_x(1 + e_x) \dots\dots\dots (E.5)$$

$$\sigma_y = S_y(1 + e_y) \dots\dots\dots (E.6)$$

E.1.4 x 轴和 y 轴的真实塑性应变由公式 (E.7) 和公式 (E.8) 计算:

$$\varepsilon_{xp} = \varepsilon_x - \frac{\sigma_x}{E_x} \dots\dots\dots (E.7)$$

$$\varepsilon_{yp} = \varepsilon_y - \frac{\sigma_y}{E_y} \dots\dots\dots (E.8)$$

E.2 等效应力-应变关系

E.2.1 等效应力由公式 (E.9) 计算:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y} \dots\dots\dots (E.9)$$

E.2.2 等效应变由公式 (E.10) 计算:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 - \varepsilon_x \varepsilon_y} \dots\dots\dots (E.10)$$

E.3 等效应力-疲劳寿命关系

等效应力-疲劳寿命的关系可由 Basquin 公式 (E.11) 确定:

$$\frac{\Delta\sigma_{\text{eq}}}{2} = \sigma'_f(2N_f)^b \quad \dots\dots\dots (E.11)$$

E.4 等效应变-疲劳寿命关系

等效应力-疲劳寿命的关系可由 Manson-Coffin 公式 (E.12) 确定:

$$\frac{\Delta\varepsilon_{\text{eq}}}{2} = \frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b + \varepsilon'_f(2N_f)^c \quad \dots\dots\dots (E.12)$$

E.5 裂纹扩展速率-疲劳寿命关系

双轴加载下的等效应力-疲劳寿命的关系可由采用能量释放率修正的 Paris 公式 (E.13) 确定:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta G)^m \quad \dots\dots\dots (E.13)$$

E.6 双轴载荷下的能量释放率

包含应力强度因子 K_I 和 K_{II} 的能量释放率由公式 (E.14) 确定^[5]:

$$G = \frac{K_I^2}{E} + \frac{K_{II}^2}{E} \quad \dots\dots\dots (E.14)$$

应力强度因子 K_I 和 K_{II} 可由公式 (E.15)、公式 (E.16) 和公式 (E.17) 确定^[6]:

$$K_I = \frac{\sqrt{\pi f_c}}{4} \sqrt{\frac{l_0(l_0+2)^3}{(l_0+1)^3}} (\sigma_x + \sigma_y) \quad \dots\dots\dots (E.15)$$

$$K_{II} = \frac{\sqrt{\pi f_c}}{4} \sqrt{\frac{l_0(l_0+2)^3}{(l_0+1)^3}} (\sigma_x - \sigma_y) \quad \dots\dots\dots (E.16)$$

其中:

$$l_0 = \frac{2a}{f_c} \quad \dots\dots\dots (E.17)$$

注: 为了获得精确度更高的数据, 推荐通过有限元分析方法计算 K_I 和 K_{II} 。

E.7 裂纹扩展角度规律

裂纹扩展的角度可由公式 (E.18) 确定^[7]:

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{1 - \sqrt{1 + 8\left(\frac{K_{II}}{K_I}\right)^2}}{4\frac{K_{II}}{K_I}}\right) \dots\dots\dots (E.18)$$

CSTM标准发布使用

附 录 F

(资料性)

起草单位和主要起草人

本文件起草单位：天津大学、上海华龙测试仪器有限公司、力试（上海）科学仪器有限公司、凯尔测控技术（天津）有限公司、华东理工大学、冶金工业信息标准研究院。

本文件主要起草人：陈刚、张显程、付元杰、王磊、梁兴华、王斌、李兵兵、董莉、林强、卢丹、陈旭、王润梓、侯慧宁、王甜甜。

CSTM标准发布使用

参 考 文 献

- [1] Xiao R, Li X, Lang L, et al. Biaxial tensile testing of cruciform slim superalloy at elevated temperatures[J]. *Materials and Design*, 2016, 94: 286-294.
- [2] Cheng Y , Fu Y , Xin Y , et al. {10-12} twinning behavior under biaxial tension of Mg–3Al–1Zn plate[J]. *International Journal of Plasticity*, 2020, 132: 102754.
- [3] Lin Q, Shi S, Wang L, et al. In-plane biaxial cyclic mechanical behavior of proton exchange membranes[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 360: 495-503
- [4] Fu Y, Cheng Y, Cui Y, et al. Deformation mechanisms and differential work hardening behavior of AZ31 magnesium alloy during biaxial deformation[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, 10: 478-491.
- [5] Meng Y, Gao H, Yan Y, et al. Effects of phase difference and stress ratio on biaxial tension–tension fatigue crack propagation behavior of rolled ZK60 magnesium alloy[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 24(1):101159.
- [6] Mall S, Perel V Y. Crack Growth Behavior under Biaxial Fatigue with Phase Difference[J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 74(may):166-172.
- [7] Zhe Z, Hong L, Qiang L, et al. Mechanoresponsive luminogen (MRL)-based real-time and visible detection method for biaxial fatigue crack propagation [J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 164:107161.