



中华人民共和国国家标准

GB/T 38447—2020

微机电系统(MEMS)技术 MEMS 结构共振疲劳试验方法

Micro-electromechanical system technology—Fatigue testing method of
MEMS structure using resonant vibration

2020-03-06 发布

2020-07-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国微机电技术标准化技术委员会(SAC/TC 336)提出并归口。

本标准起草单位:北京大学、中机生产力促进中心、北京智芯传感科技有限公司、沈阳国仪检测技术有限公司、浙江博亚精密机械有限公司、中北大学、北京必创科技股份有限公司。

本标准主要起草人:张威、张亚婷、于振毅、陆学贵、朱悦、石云波、李海斌、程逸轩、周浩楠、陈得民。



微机电系统(MEMS)技术

MEMS 结构共振疲劳试验方法

1 范围

本标准规定了 MEMS 结构共振疲劳试验的试验方法,包括设备、试验环境、样品要求、试验条件和试验步骤。

本标准适用于 MEMS 结构的共振疲劳试验。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 2298 机械振动、冲击与状态监测 词汇

GB/T 10623 金属材料 力学性能试验术语

GB/T 26111 微机电系统(MEMS)技术 术语

3 术语和定义

GB/T 2298、GB/T 10623、GB/T 26111 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

载荷比 load ratio

周期加载中最大值和最小值的代数比。

3.2

瞬时破坏强度 instantaneous failure strength

静态试验或共振振动试验在快速幅值增长过程中的破坏强度。

3.3

参考强度 reference strength

静态强度或瞬时破坏强度。

4 试验方法

4.1 总则

通过对样品施加预期振动幅值的共振振动进行疲劳试验。当样品失效或达到预定的试验时间或次数时,试验结束。

4.2 试验设备

4.2.1 概述

试验设备能够对试验结构产生恒定振幅和稳定频率的振动。试验系统由激振器、拾振传感器(以下

简称传感器)、控制器和记录仪器组成。试验系统框图如图 1 所示。

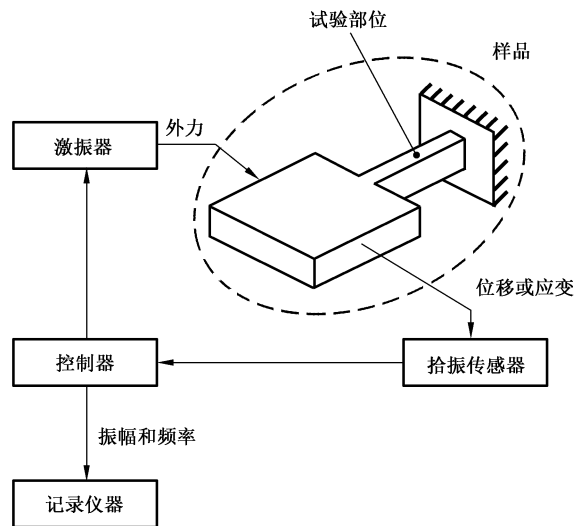


图 1 试验系统框图

4.2.2 激振器

激振器能在所需方向上对样品施加一定振幅和频率的振荡力。可使用不同种类的激振器,例如,静电、压电、热和电磁激振器等。激振器也可安装在样品中。

4.2.3 拾振传感器

拾振传感器能够测量样品的运动以确定样品试验部位的振幅。

4.2.4 控制器

控制器可控制激振器产生振荡力,以保持恒定振幅共振振动。根据样品的振动特性,采用下列方法:

- a) 闭合回路法——根据传感器测量信号的变化确定试验部位的共振频率,通过闭环电路维持共振频率。
- b) 开环控制法——通过激励试验部位,在预定的共振频率和振荡信号幅度下试验。

在整个试验中,频率和幅度的稳定性应保持在所需值的 $\pm 3\%$ 内。

4.2.5 记录仪器

记录仪器用于监测和采集试验数据或波形曲线。

4.3 试验环境

温度: $15\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$;
相对湿度: $20\% \sim 80\%$;
大气压力: $86\text{ kPa} \sim 106\text{ kPa}$ 。

4.4 样品要求

4.4.1 共振特性

样品在共振频率下,没有其他接近于试验的共振模式。

4.4.2 试验部位

当达到一定应力时,样品有一个试验部位会引起其失效。

4.4.3 样品制备

样品制备方法应与用于评估目标的制造方法相同,且两者的形状、尺寸和结构也相同。

样品应能将一个恒定的、高量级的振幅通过共振施加到试验部位上。

样品中可集成一个机械结构,用于激振或检测样品的振幅。附录 A 的 A.1 给出了一种用于激振和检测振幅的样品;附录 B 的 B.1 给出了一种仅用于检测振幅的样品。

4.5 试验条件

4.5.1 试验振幅

试验振幅根据样品的参考强度确定。参考强度通过 4.6.1 的方法确定。在试验过程中,可用下列方法之一确定试验振幅:

- a) 100%参考强度的恒定振幅:在一定振幅下评估疲劳寿命;
- b) 从一个高量级的振幅逐渐降低:在很短的时间内获得 S-N 曲线;
- c) 当样品的数量有限,为获得 S-N 曲线时,从一个低量级的振幅逐渐增加。

注:硅结构的疲劳试验理论和分析参见附录 C,附录 D。金属材料试验的详细信息参见 GB/T 24176。

在 b)和 c)中,试验振幅降低或增加的步距宜优先选择接近于测量参考强度时振幅的标准偏差。

4.5.2 载荷比

试验方法的载荷比为-1。

4.5.3 振动频率

振动频率为试验部位在共振模式下的频率,或接近它的频率。

4.5.4 波形

在不考虑实际波形的情况下,样品的位移波形和试验部位的应力、应变的波形可视为正弦波。

4.5.5 试验时间

试验时间为规定时间或样品的失效时间。

根据振动频率,可通过试验循环次数确定试验时间。对于寿命与频率无关的材料,如硅,选择试验循环次数作为实际器件的应力循环,参见附录 C。

4.6 试验步骤

4.6.1 测量参考强度

用于测量参考强度的样品采用与试验部位相同的材料和工艺制成。如果使用不同形状的样品时,样品表现出与试验部位相同的失效模式,并考虑测量强度的尺寸效应。

可用下列试验之一确定参考强度:

- a) 静态试验——静态试验中,测量的破坏强度即为参考强度。
 - b) 瞬时疲劳试验——瞬时疲劳试验中,最大振幅时的强度为参考强度;当很难使用一个不同形状
- 的样品或难以施加静态负载时,可使用瞬时疲劳试验方法施加共振频率的振幅,并使振幅迅速

上升至样品失效。

- c) 模拟或理论分析——当用试验的方法难以确定参考强度时,可使用模拟或理论分析确定参考强度,样品达到断裂强度时最大应力下的强度为参考强度。

鉴于脆性材料(如单晶硅)的强度变化大,使用试验的方法测量参考强度时,宜获得不少于 10 件样品的强度数据,并采用统计学处理方法得到参考强度及其标准偏差。

4.6.2 测量样品的共振特性

通过频率响应试验测量共振特性。通过控制器控制激振器产生振荡力,并在期望的共振特性周围扫频以找到实际的共振频率。在该响应试验中施加的负载应足够小,以确保疲劳试验不受影响。如果该影响不能被忽略,宜将此响应试验中施加的负载循环次数添加到疲劳试验数据中。

当样品和控制器之间需要调节时,共振特性会发生变化,宜测量所有样品的共振特性。

4.6.3 规定幅值增长率

按 4.5.1 的方法选择初始施加载荷并规定幅值增长率。

4.6.4 设置参数和过程监测

设置共振频率、初始施加载荷以及幅值增长率进行试验。

在试验过程中可通过连续监测样品的振动状态(振动频率和/或振幅)检测样品的失效。在系统没有监测功能时,可通过在一定的时间间隔停止疲劳试验并进行频率响应试验进行监测。

4.6.5 试验结束判定

当样品失效或预定的加载时间已完成,则试验结束。

出现以下情况之一,即应视为样品失效:

- a) 试验部位断裂;
- b) 振幅变化超过规定的百分比;
- c) 振动频率变化超过规定的百分比。

4.6.6 数据记录

应记录试验环境的温度、相对湿度、大气压力、样品在试验过程中特定时间间隔测量的振动幅值和频率以及样品失效时间。

4.7 试验报告

试验报告包括但不限于以下信息:

- a) 执行标准;
- b) 样品材料;
- c) 样品制作方法和细节;
- d) 样品的形状和尺寸;
- e) 试验环境;
- f) 试验设备;
- g) 试验条件;
- h) 试验结果。



附录 A
(资料性附录)

集成激振和检测结构静电器件的试验示例

A.1 样品

样品由柔性梁试验结构和干法刻蚀单晶硅制作的扇形质量块组成,如图 A.1 所示。柔性梁的一端固定在质量块上,另一端固定在衬底上。静电梳齿激振器连接在质量块上,柔性梁可发生面内的弯曲。和质量块连接的梳齿电极可输出与位移成比例的信号,并且质量块的偏移标度可通过显微镜读出。由于试验材料用于静电驱动和传感器,试验材料为导电材料。

样品的共振频率由质量块的惯性矩和柔性梁的抗挠刚度决定。由于样品结构厚度的不均匀,试验部位的面内振动基本共振频率在 38.75 kHz~39.71 kHz 之间。基于位移响应测量,当外部信号加载至激振器时,共振器在大气环境中的 Q 值约为 370。为了增加共振器的 Q 值,用刻蚀的工艺去除了共振器衬底的最底层。除了一阶面内振动之外,在附近的频率范围内没有检测到其他的谐振峰。试验在面内振动模式下的固有频率进行。

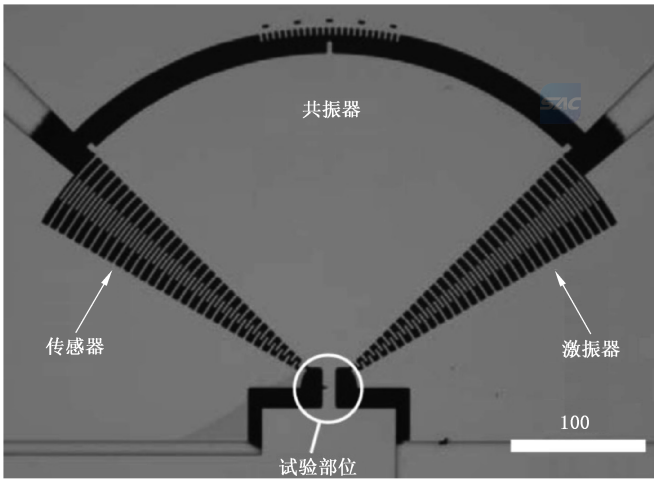


图 A.1 样品的显微图像

试验部位由含有宽度 10 μm ,长度 30 μm ,宽度 5 μm SOI 有源层的单晶硅组成,通过表面边缘刻蚀加工而成。当面内弯曲变形时,侧壁表面的应力可能会导致失效。为了消除侧壁表面不平整造成的影响,通过光刻和刻蚀步骤进行侧壁平整化。由于引起失效的应力不会仅仅加载至带有梁结构的试验部位中,在试验部位一侧的中间引入一个 4 μm 深的槽。槽的顶端是一个半径为 0.5 μm 的半圆,并且用有限元手段估计了应力集中点。

A.2 试验设备

由于激振和检测结构被集成在样品中,为样品施加共振的设备仅由电路组成,试验设备的框图如图 A.2 所示,样品由自振模式被激振。

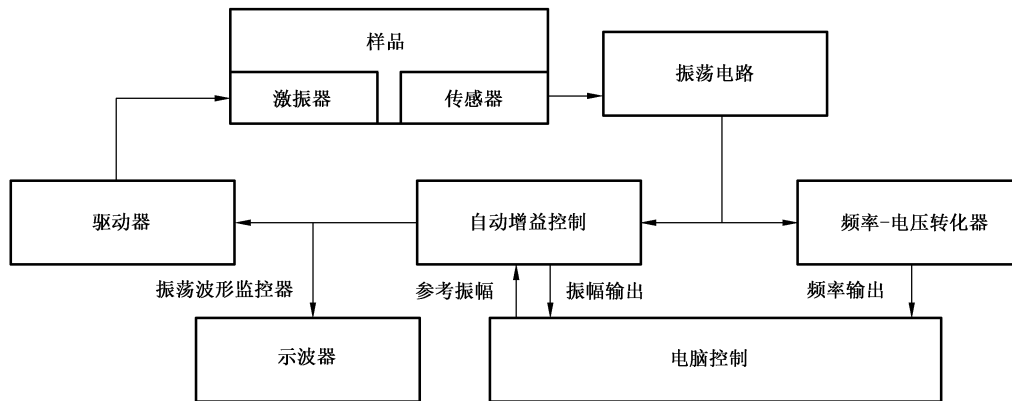


图 A.2 试验设备框图

为了并行工作,可制作多套试验设备。当电源和电路板接入时,电干扰会影响稳定的振荡。然而,在进行并行试验时,电耦合会由于稍有不同频率的样品选择性地减小。

通过位移信号调整驱动信号的振幅和相位实现反馈振荡的模式。驱动信号被高压偏置放大器放大后加载至静电梳齿激振器。稳定振荡时驱动信号的电压在 $V_{pp}=20\text{ V}\sim V_{pp}=40\text{ V}$ 。

通过测量梳齿电极电容得到样品的位移振幅。使用电荷放大器和与角度位移信号成比例的电信号测量梳齿电容。振幅可近似由显微镜读出偏移标度得到,这样能够校准电信号。

用现有方法不能测出加载至试验部位的力,不过基于已测的质量块位移角度,用有限元分析的方法可估计出加载至试验部位的力。

通过加载自激振荡电路,样品在共振频率下振动。为使样品的位移在恒定水平,自动增益控制(AGC)设备在振荡电路中建立。样品的振幅可由软件控制,AGC的参考电压可由电脑模拟输出控制。

如果振动控制电路 AGC 的振幅设置值迅速增加,由于高 Q 值导致机械谐振的延迟可能会破坏振荡的状态。非稳态振动在几十毫秒后开始,并且几毫秒后试验部位会由于振幅过大失效。为防止上述现象,可设置 AGC 振幅在计算机的控制下超过 10 s 线性增长。这种方式导致稳态振动的振幅增大,并且设置值不会超过过冲量。振幅上升所需的时间与疲劳时间相比非常短,所以对试验结果没有明显的影响。

使用这种试验方法,电位移信号是被测得的输出值。由于这一信号是稳定的正弦,样品可被假设是稳定振动而不会失效。当试验部位失效时,信号会有一个正弦波的忽然中断。位移信号的波形在很短的时间内可被示波器观测到,而长期的位移信号可在一定的间隔内由 AGC 检测到的振幅记录下来。同时,测量并记录温度和湿度。

为了确定是否发生失效,已测振幅信号和频率信号通过模数电路每秒记录一次。在一些试验中,在失效瞬间的位移信号可被数字示波器记录下来(记录由位移信号的突变触发)。

A.3 试验条件

由于难以测量静态强度,在试验系统中,样品的参考振幅通过初步的疲劳试验确定。在显微镜下观察振幅,两边的位移是相同的。

振动频率通过频率-电压转换器测量。频率试验过程中,频率变化高于分辨率(约 200 Hz)的点不被记录。试验时间为 168 h。试验过程中,将样品放置于温湿度可控的箱内,温度 $23.0\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 49%~51%。

A.4 初测

初始测量是测量样品的共振频率。测量过程中,振动的振幅保持在寿命试验的最低振幅点以下,因此可认为不影响试验结果。在初测期间,测试所有样品的共振频率,没有出现样品振动的失效。



附录 B

(资料性附录)

外部驱动和集成应变结构(检测位移)器件的试验示例

B.1 样品

样品由体微机械工艺制造,材料为单晶硅片,结构如图 B.1 所示。在这个系统中,质量块被 2 个或 4 个梁支撑,架空并平行于衬底表面上方。在梁上制作 4 个压敏电阻,并组成惠斯通电桥。梁的形变会导致压敏电阻的改变,然后通过惠斯通电桥输出端电压变化检测位移的变化。

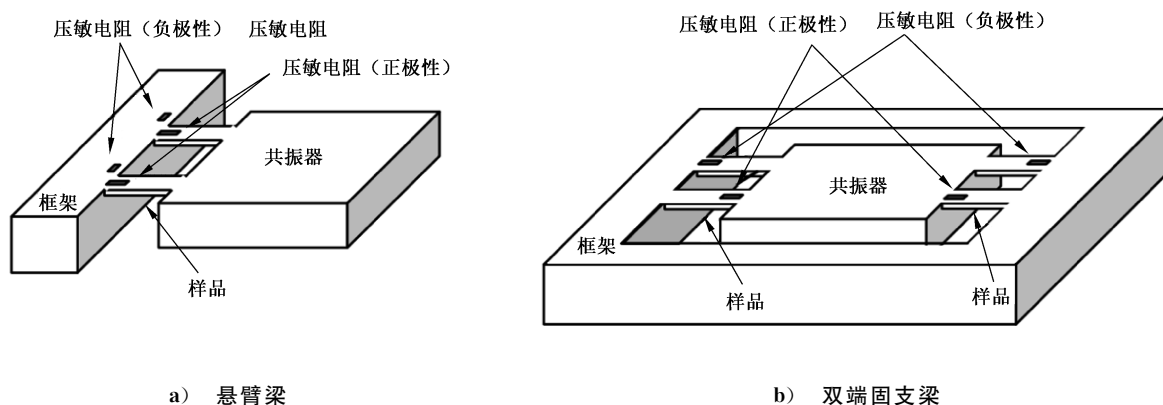


图 B.1 样品的结构

试验部位由单晶硅各向异性湿法刻蚀形成。压敏电阻制作在样品表面,用于检测样品振幅。通过有限元分析样品上最大应力和质量块平面位移之间的关系预先校准样品上的最大应力。通过惠斯通电桥输出的电压估算最大应力。

以单晶硅材料共振器作为一个示例,质量块宽度 1 mm,长度 1.5 mm,厚度 0.5 mm,4 个支撑梁均为长 500 μm ,宽 200 μm ,厚 20 μm 。测量样品的共振频率为 8.5 kHz~8.9 kHz。

B.2 试验设备

试验设备系统框图如图 B.2 所示。传感器集成在样品上,如图 B.1 所示,一个多层压电激振器作为激振器。样品用金属外壳封装并固定在压电激振器上。用振动计监测加载在共振器上的加速度大小。

驱动电路控制器通过位移信号的输入,输出驱动信号,从而产生共振振动。驱动信号由锁相环电路(PLL)控制。通过自动增益控制电路得到稳定振幅,并由计算机记录。计算机可用于监测由控制电路得到的幅值与与频率成比例的电压输出。8 套这样的系统并行使用注意样品的安装,因为振动特性会因为安装状态而发生变化。

为了判定样品是否失效,计算机每 1 s 记录一次位移信号以及频率转化信号。当振幅偏离设定值的 20%,试验部位可被判定并记录已失效。

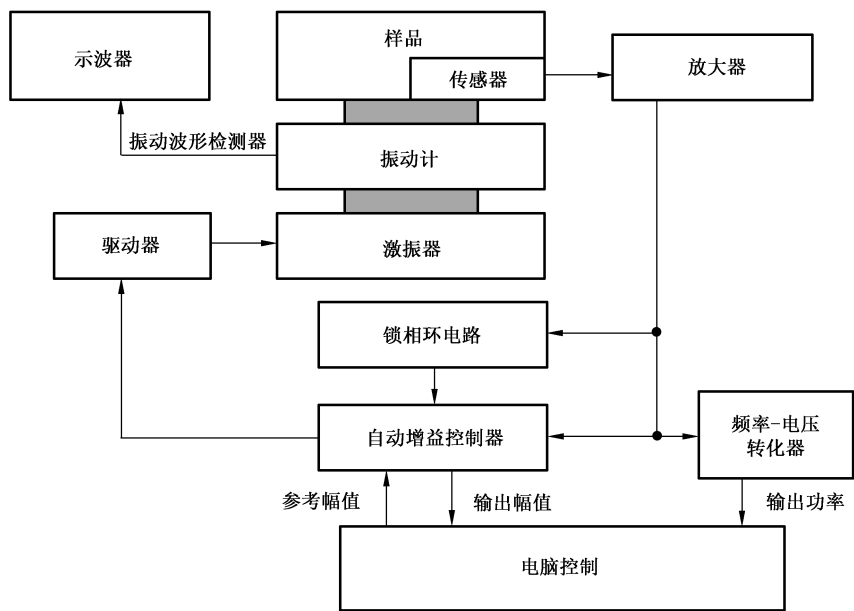


图 B.2 试验设备方框图

B.3 试验条件

试验在 60%~95% 的参考振幅范围内进行。

在固有频率下进行疲劳特性试验。在某些情况下,较大的振幅内发生非线性振动,试验也以略低于共振频率的频率进行。

试验时间为 35 h(约 10^9 循环次数)。

样品被放置在温湿度可控的洁净室内[温度 $23.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $(50 \pm 1)\%$],或放置在密闭容器中。试验时的条件为:

- a) 使用干燥剂达到低湿度空气[干燥的空气,温度 $23.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $(50 \pm 1)\%$];
- b) 氮气流[低湿度氮气:温度 $23.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $(50 \pm 1)\%$];
- c) 通过蒸馏水的氮气流[温度 $23.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 $(50 \pm 1)\%$]。

B.4 初测

参考强度的测量可有两种方法。第一种方法是静态试验,在静态试验下,硬度计压头压在质量块中心诱导失效。第二种方法是通过试验设备逐渐增加振幅,然后测出失效点下的强度。

在样品的频响试验中,来自驱动器的信号施加在激振器上并进行测量。所有样品的共振频率都被确定。此外,自振和稳定性在很短的时间内通过连接反馈电路的样品得到确认(约 1 min)。

附 录 C (资料性附录)

基于帕里斯(Paris)定律和韦伯(Weibull)分布的脆性材料疲劳寿命理论表达式

C.1 应力和疲劳寿命的关系

若材料缺陷可模型化为等效长度的裂缝,脆性材料的疲劳特性可通过使用 Paris 定律进行合理解释。通过使用 Paris 定律,所谓的等效疲劳裂纹扩展理论可写为以下公式。

注:载荷(应力)比对硅的疲劳特性的影响并未在下述分析当中被考虑。

Paris 定律如式(C.1)所示:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n = C' \left(\frac{\Delta K}{K_c} \right)^n \quad \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

- a —— 裂缝长度,单位为米(m);
- N —— 循环次数;
- C, C' 和 n —— 材料常数;
- ΔK —— 应力幅值对应的应力强度因数范围,单位为兆帕米开方(MPa \cdot m^{1/2});
- K_c —— 断裂韧性,单位为兆帕米开方(MPa \cdot m^{1/2})。

因此,相比于试验部位的尺寸,等效于损伤的裂缝长度可假设为很小,而且应力强度因数理论上可按式(C.2)计算:

$$K = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

- K —— 应力强度因数,单位为兆帕米开方(MPa \cdot m^{1/2});
- a —— 裂缝长度,单位为米(m);
- β —— 裂缝形状相关系数;
- π —— 3.141 592 6...;
- σ —— 施加的应力,单位为兆帕(MPa)。

如果裂缝长度相对于试验部位足够小,系数 β 等效于无限长物体的表面裂缝长度,因此可被认为是常数。通过对式(C.1)积分,疲劳寿命 N 和施加应力 σ 之间的关系可按式(C.3)计算。

$$N - 1 = \frac{a_{c0}}{C'} \frac{2}{2-n} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{c0}} \right)^{-2} \left[1 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_{c0}} \right)^{2-n} \right] \quad \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

- N —— 循环次数;
- a_{c0} —— 等效初始裂缝长度;
- σ_{c0} —— 静态强度,单位为兆帕(MPa);
- C' 和 n —— 材料常数;
- σ —— 施加的应力,单位为兆帕(MPa)。

如若这些变量代入到式(C.2)的右端,即可获得韧性对应的应力强度因数。

C.2 疲劳寿命分布

若疲劳寿命如式(C.3)所示,依据等效初始裂缝长度的变化,疲劳寿命的变化是可解释的。静态强

度的变化被假设为两参数的 Weibull 分布,如式(C.4)所示:

$$F = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad \dots\dots\dots (C.4)$$

式中:

F ——累积断裂可能性;

m ——Weibull 系数;

σ_0 ——尺度参数;

σ ——施加应力,单位为兆帕(MPa)。

当 Paris 定律应用于该分布时,假设韧性不变,用等效断裂分布替代应力,若应力施加了 N 次,累积断裂可能性可按式(C.5)计算:

$$F = 1 - \exp \left(- \left\{ a_c^{(2-n)/2} + C' (n-2) (\beta \sigma \pi^{0.5})^n (N-1) / (2K_c^n) \right\}^{2/(2-n)} / a_0 \right)^{-m/2} \quad \dots\dots\dots (C.5)$$

式中:

F ——累积断裂可能性;

a_0 ——初始裂缝长度的 Weibull 分布尺度参数[通过用式(C.4)中的 Weibull 尺度参数 σ_0 替代应力 σ 代入至式(C.2)得到的等效裂缝长度];

a_c ——应力 σ 下失效时的等效裂缝长度;

β ——裂纹形状对应系数;

m ——Weibull 系数;

σ ——施加的应力,单位为兆帕(MPa);

N ——循环次数;

C' 和 n ——材料常数;

K_c ——断裂韧性,单位为兆帕米开方(MPa \cdot m $^{1/2}$);

π ——3.141 592 6...

C.3 初始负载效应

对于谐振试验,难以即时地设定幅值,但振动幅值在开始时逐渐增加。在这个章节,对初始负载过程的影响进行了评估。

假设幅度随着循环次数线性增长,见式(C.6):

$$\sigma = \alpha N \quad \dots\dots\dots (C.6)$$

式中:

σ ——施加的应力,单位为兆帕(MPa);

α ——增长率常数;

N ——循环次数。

通过将该式和式(C.2)代入式(C.1),并进行积分,即可获得式(C.7),用于表示幅值恒定增加试验。

$$N_f - \frac{1}{N_f^n} = \frac{a_{c0}}{C'} \frac{2(n+1)}{2-n} \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_{c0}} \right)^{-2} \left[1 - \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_{c0}} \right)^{2-n} \right] \quad \dots\dots\dots (C.7)$$

式中:

N_f ——在应力 σ_f 下使样品破裂的循环次数;

C' 和 n ——材料常数;

σ_f ——断裂应力,单位为兆帕(MPa);

a_{c0} ——等效初始裂缝长度;

σ_{c0} ——静态强度,单位为兆帕(MPa)。

通过比较式(C.7)和式(C.3),可推导得到关系式,见式(C.8):

$$N_f \approx (n+1)N \quad \dots\dots\dots (C.8)$$

式中:

N_f ——在应力 σ_f 下使样品破裂的循环次数;

n ——材料常数;

N ——循环次数。

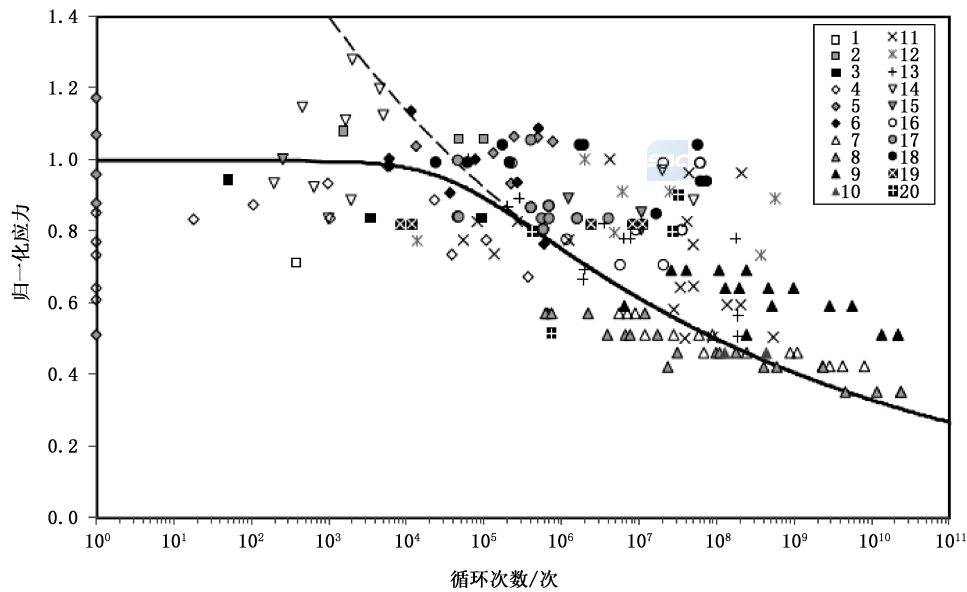
这意味着在初始负载期间应用的循环次数相当于,在 σ_f 下,恒定幅值疲劳试验的 $N_f/(n+1)$ 循环次数。假设共振频率为 10 kHz 和初始负载时间 1 s,当 $n=20$ 时,等效循环次数只有 500 次。

附录 D
(资料性附录)
分析示例

D.1 硅的疲劳试验结果

不像传统的宏观结构, MEMS 结构用许多种新材料制造。硅用于 MEMS 的主要结构材料之一, 在强度和疲劳寿命方面有很大的偏差, 因为硅结构是用湿法腐蚀和干法腐蚀工艺加工的。

图 D.1 显示了一条 S-N 曲线作为硅疲劳试验结果的示例。数据从多个组织机构获得并绘制成一张图表。纵轴表示归一化疲劳试验中的最大应力, 根据在单调递增负载下的平均失效力(静态强度)。横轴表示失效前的循环次数。



说明:

- | | |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1——单晶<100>10 Hz; | 11——单晶 23 ℃ 14 kHz~31 kHz; |
| 2——单晶<110>10 Hz; | 12——单晶 100 ℃ 14 kHz~31 kHz; |
| 3——单晶<111>10 Hz; | 13——单晶 300 ℃ 14 kHz~31 kHz; |
| 4——单晶<110>24.7 ℃~26.9 ℃ 相对湿度 85%~90% 40 Hz; | 14——单晶 25 ℃ 相对湿度 50%~60% 182 Hz~196 Hz; |
| 5——单晶<110>24.7 ℃~27.0 ℃ 相对湿度 25%~30% 40 Hz; | 15——单晶 25 ℃ 相对湿度 50%~60% 155 Hz~176 Hz; |
| 6——单晶<110>25.9 ℃~26.0 ℃ 相对湿度 55%~65% 40 Hz; | 16——多晶 22 ℃ 相对湿度 80% 100 Hz; |
| 7——单晶<110>23 ℃ 相对湿度 25% 39 kHz; | 17——多晶 22 ℃ 相对湿度 80% 250 Hz; |
| 8——单晶<110>23 ℃ 相对湿度 50% 39 kHz; | 18——多晶 22 ℃ 相对湿度 80% 500 Hz; |
| 9——单晶<110>23 ℃ 相对湿度 50% 36 kHz; | 19——单晶 ICP-RIE 22 ℃ 相对湿度 80% 100 Hz; |
| 10——单晶<110>23 ℃ 相对湿度 50% 39 kHz; | 20——单晶激光微型喷射器 22 ℃ 相对湿度 80% 250 Hz。 |

图 D.1 硅材料的疲劳试验结果示例

这些数据是通过不同的试验方法包括静态和动态负载获得的,试验在不同的载荷比下,包括完全反向和脉冲张应力。尽管在试验环境中不可避免的差别以及试验结果有较大的散布,在归一化后仍有可辨别的一般趋势。不像金属材料的情况,即使疲劳试验期间的应力在平均静态强度附近,大部分样品在 10^4 次循环后失效。这是硅疲劳特性的最重要特性之一,这可作为阻碍硅疲劳试验的最主要因素。

D.2 S-N 曲线拟合

式(C.3)与图 D.1 中的所有数据相对应。图 D.1 中的实线为 S-N 曲线,表示衰退参数 a_{c0}/C' 和 n 的拟合结果。实线的平滑区域表示初始强度,在达到 10^4 次循环前只存在一小部分的疲劳失效数据。这个结果表示 Paris 定律对于硅甚至于断裂强度附近的应力级同样有效,而此时金属材料则表现出全面屈服。因此,式(C.3)右边方括号中的第二项不能被忽略。如果这项被忽略,S-N 曲线则变为虚线,无法描述低疲劳循环区域中的特性。

D.3 多晶硅的疲劳寿命预测

图 D.2 展示了多晶硅拉应力疲劳试验的式(C.5)的拟合结果。此处常数 β 按 1.12 计算。在该 3D 图像中, z 轴表示累积断裂可能性, x 轴表示施加的应力, y 轴表示循环次数。连续实线的网格表示式(C.5)的计算值,黑点表示试验结果。绘制的试验结果从最短的到最长的等效初始裂缝长度进行排序。计算值和试验结果十分接近,证明疲劳寿命的变化与静态强度分布密切相关。

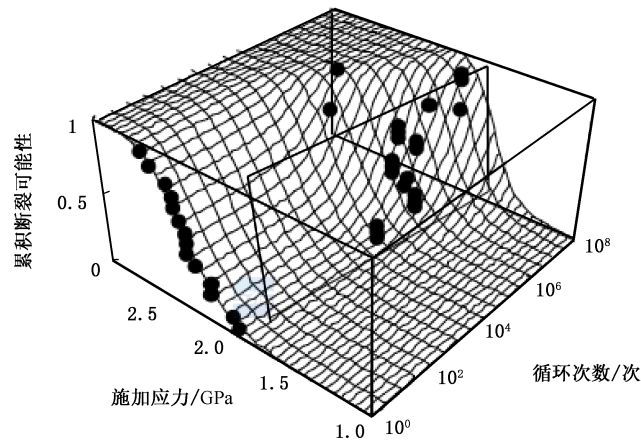


图 D.2 多晶硅静态强度和疲劳寿命 3D 图

参 考 文 献

- [1] GB/T 24176 金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法
-