

文章编号: 1004 - 0609(2003) 03 - 0727 - 04

金属材料无负载条件下尺寸稳定性的热循环在线检测^①

王秀芳, 武高辉, 李晓玲, 孙东立
(哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 提出了对金属材料在无负载条件下进行尺寸稳定性评定的热循环在线检测法。实验证明: 这种方法能对试样在热循环过程中的尺寸变化进行实时检测, 可同时获得材料在每次热循环之后的尺寸变化规律和多次循环之后的尺寸变化总量, 用它来评价不同材料或同一材料经不同工艺处理之后的尺寸稳定性非常直观和方便, 具有测试周期短、精度高的特点。

关键词: 尺寸稳定性; 热循环; 实时检测

中图分类号: TG 132

文献标识码: A

金属材料的尺寸不稳定性对精密仪器、仪表的精度和可靠性具有重大的影响, 许多精密零件在加工及存放过程中精度的丧失均直接或间接地由材料的尺寸不稳定性所造成, 因此提高材料的尺寸稳定性是材料科学工作者和仪器、仪表设计与制造人员所关注的热点问题之一^[1~9], 对材料尺寸稳定性的评价方法也因此备受关注。

目前有关材料尺寸稳定性的评价方法可分为两大类: 一是负载条件下尺寸稳定性的评价; 二是无负载条件下尺寸稳定性的评价。主要有以下几种方法:

1) 采用短时负载作用下的微屈服强度来表征材料的尺寸稳定性, 它反映材料微塑性变形抗力的本质, 但在不稳定的组织与相状态下, 微屈服强度不足以表征制件在使用条件下(在应力松弛或微蠕变时)的尺寸稳定性^[10]。

2) 采用长期负载作用下微塑性变形抗力指标—应力松弛极限或微蠕变抗力来表征材料的尺寸稳定性, 该方法更具有实际意义, 但测试周期较长, 数据波动较大, 很难精确测定^[10]。

3) 用 X 射线测试宏观残余应力, 应用该方法需假设材料弹性各向同性, 且表面应力为平面应力状态。而实际上, 很多材料表面, 尤其是机械加工表面层中往往是三维应力状态, 另外很多材料都不同程度地存在织构, 织构材料不能满足各向同性的假设, 这些都给 X 射线应力测试带来极大的困难。

4) 采用测量棒状试样尺寸随时间变化的评价

方法^[11], 该法可以直观地反应材料的尺寸稳定性, 但也存在许多不足, 如测试周期更长, 需 1 年以上的时间才能得出令人信服的结果, 另外棒状试样长度变化一般在 $(1 \sim 2) \times 10^{-6}$ 数量级, 要比较出不同尺寸稳定化处理工艺的差别极为困难, 因此该法的可操作性较差。

5) 武高辉等提出的圆环开口法^[12], 试样的形状和尺寸如图 1 所示。该方法通过精确测量圆环开口后的即时尺寸变化量, 来比较材料中宏观残余应力水平的高低。与棒状试样测量方法相比, 这种方法更好地模拟了实际零件的情况, 同时由于试样形状的原因, 放大了尺寸的变化范围, 因此对判定材料的尺寸稳定性极为有利和有效。实践证明, 这是

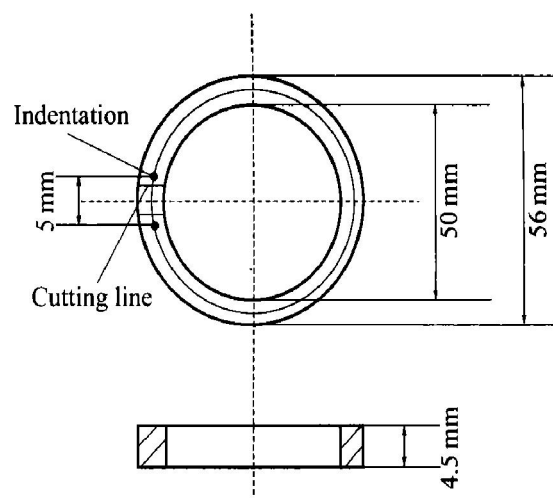


图 1 圆环试样的形状和尺寸

Fig. 1 Shape and size of ring specimen

① 收稿日期: 2002 - 06 - 29; 修订日期: 2002 - 09 - 28

作者简介: 王秀芳(1973 -), 女, 博士研究生。

通讯联系人: 王秀芳, 博士; 电话: 0451 - 6412164, E-mail: xiufang_wang@sina.com

一种反应灵敏度高、行之有效的方法,但属于一次破坏性的测试,只能测量最终结果而不能反映试样尺寸随环境变化的全过程,成本也较高。

针对上述几种方法的不足,本文作者提出了一种新的评定材料无负载条件下尺寸稳定性的方法—热循环在线检测法。

1 热循环在线检测的条件

在无负载条件下,金属材料的尺寸稳定性与相稳定、组织稳定及应力稳定等有关,因此,热循环试验对于金属材料的尺寸稳定性有明显的影 响。通过对金属材料在热循环实验中进行实时检测,可以有效地评价其尺寸稳定性。热循环检测装置是在德国耐驰公司生产的 DIL402 型热效应自动分析仪上开发的,测试在无负载条件下进行,测试装置结构示意图如图 2 所示。设备的温度测试范围可以达到 $-180\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$,加热和冷却速度在 $0.1\sim 99\text{ K/min}$ 范围内可调,保温时间为 $0\sim 99\text{ h}$ 。位移传感器采用的材料是因瓦合金(Invar),其分辨率可达到 $0.125\text{ }\mu\text{m}$,并能够保证测试过程中的重复性和准确性: Al_2O_3 标样在同一温度下的两次测量差值不超过 10^{-7} ,测试精度可以达到 10^{-8} 。顶杆所用材料为二氧化硅,它的热膨胀系数很低,但在测试过程中,顶杆也会随着温度的升高和降低而发生一定的热胀冷缩,系统会通过软件来对测试结果进行修正,将顶杆的变形量扣除,因此对测试的结果没有影响。

为保证测试精度,需注意以下几点:1) 保证试验所用圆柱试样的端面与装卡试样的顶杆轴线相互垂直,同时保证样品的轴线与顶杆的轴线重合,这些条件要靠提高试样的加工精度来保障;2) 采用

导热系数高的气氛气体,以保证热交换良好;3) 尽量使测试环境保持恒温,尽可能减少噪声和振动。

2 热循环在线检测实例

所用的试样是 $d\ 6\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 的圆柱,热循环的温度范围是 $20\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$,升降温速率均为 $8\text{ }^{\circ}\text{C/min}$,热循环次数为 15 次,每次热循环之前先将试样在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 25 min ,使试样的尺寸保持稳定,在该温度下数据处理误差在 $10^{-7}\sim 10^{-6}$ 之间。测试过程中所选用的气氛为氦气。

在测试程中,设备可以对试样在热循环过程中轴向尺寸的变化进行实时检测,自动绘出温度—时间和应变—时间曲线。图 3 所示为 $\text{SiC}_p/2024\text{Al}$ 复合材料的热循环曲线,其中图 3(a)所示为温度—时间曲线,图 3(b)所示为应变—时间曲线。从图 3(b)可以看出:在热循环过程中,试样不仅随温度的变化而自然产生可逆性的热胀冷缩,而且还存在一种不可恢复的尺寸变化,即随着循环次数的增加,试样的尺寸在长度方向上产生不可逆收缩,收缩量的大小可直接反映出材料的尺寸稳定性的高低。

为了方便地评价材料的尺寸稳定性,可根据图 3(b)重新作图,将每次热循环后试样在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的尺寸与热循环的起始测试点($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)的尺寸相减,可以得到圆柱试样轴向单位尺寸的变化与热循环次数的关系,如图 4 所示。由图 4 可见:在每次热循环过程中,试样轴向尺寸都有一定程度的减小,轴向尺寸变化总量随热循环次数的增加而增加。由以上观察可知,通过热循环曲线,既可以得到试样尺寸随热循环次数的变化规律,又可以得到热循环 15 次后的尺寸变化总量,因而可以方便地对不同材料或同一材料经不同工艺处理之后的尺寸稳定性进行评价。

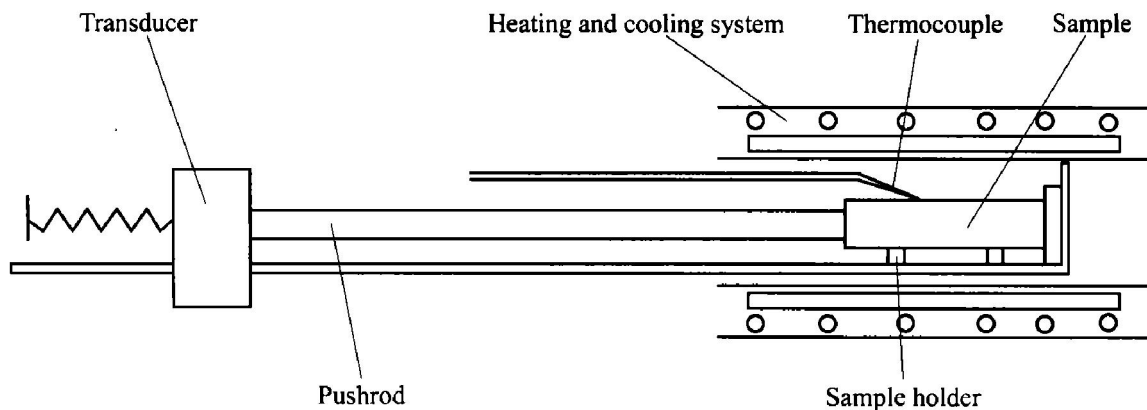


图 2 测试装置结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of facility

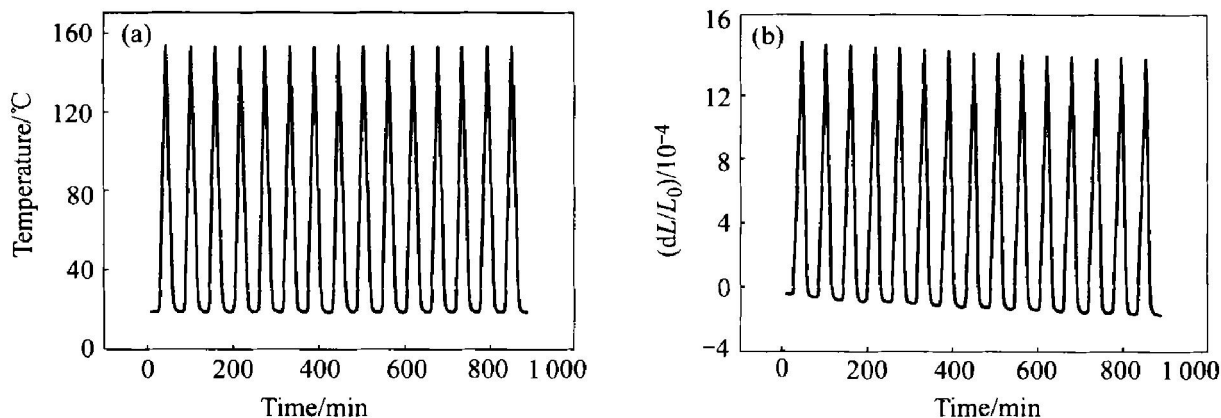


图 3 SiC_p/2024Al 复合材料热循环测试的温度—时间(a)和应变—时间曲线(b)

Fig. 3 Thermal cycling curves of SiC_p/2024Al composite

(a) —Curve of temperature vs time; (b) —Curve of strain vs time

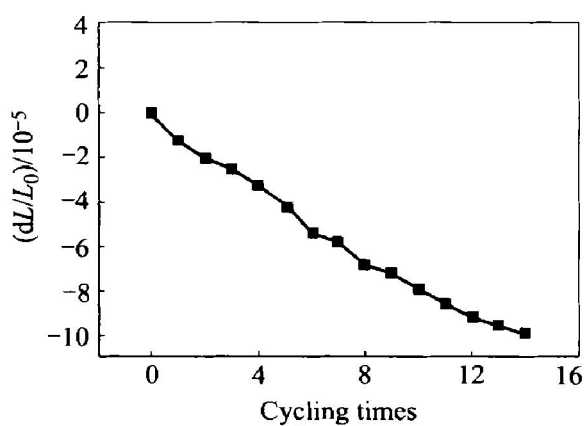


图 4 SiC_p/2024Al 复合材料在 20~150 °C 之间循环时轴向单位尺寸的变化

Fig. 4 Axial unit dimensional variation for SiC_p/2024Al treated by thermal cycling from 20 °C to 150 °C

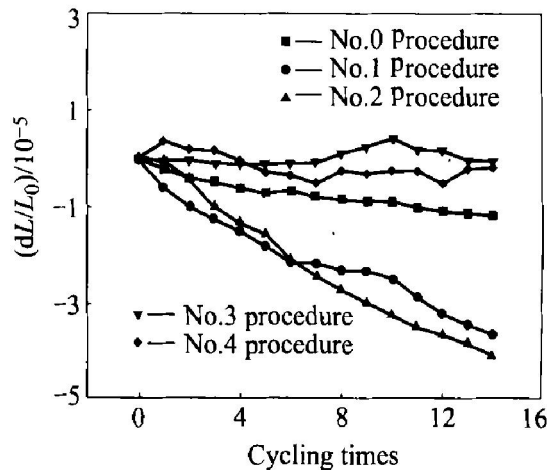


图 5 稳定化工艺处理后 SiC_p/2024Al 在 20~150 °C 之间循环时轴向单位尺寸的变化

Fig. 5 Axial unit dimensional variation for SiC_p/2024Al treated by thermal cycling of different procedures from 20 °C to 150 °C

3 热循环在线检测法的应用

我们在 SiC_p/2024Al 复合材料尺寸稳定化处理工艺的研究中应用并验证了这种方法。图 5 给出了经几种稳定化工艺处理之后的 SiC_p/2024Al 复合材料在 20~150 °C 之间循环时轴向单位尺寸变化的测试结果。

根据图 5, 不仅可以观察出经各工艺处理之后的 SiC_p/2024Al 复合材料在循环次数增加时其轴向尺寸的变化规律, 而且还体现了固定循环次数时其尺寸变化的差别, 由此可以评价材料在不同热处理状态下的尺寸稳定性。由于热循环条件较恒温条件恶劣, 这等于加速和放大了尺寸的变化, 从而突出了各工艺之间的差别。由图 5 可见, 各工艺之间的差别是很显著的: 材料经 3 号和 4 号工艺处理之后尺寸稳定性较好, 圆柱试样在热循环过程中轴向单

位尺寸变化基本上在零线附近波动; 而材料经 0 号、1 号和 2 号工艺处理之后尺寸稳定性要相对差得多, 圆柱试样的轴向单位尺寸随循环次数的增加而减小, 发生不可逆收缩, 15 次循环之后轴向单位尺寸变化总量分别为 1.20×10^{-5} 、 3.69×10^{-5} 和 4.13×10^{-5} 。通过以上的分析可见, 热循环法在线检测法可以方便、准确地比较各工艺的优劣, 有效评价材料的尺寸稳定性。

REFERENCES

- [1] Marshall C W, Maringer R E. Dimensional Instability[M]. New York: Pergamon Press, 1977.
- [2] 钟景明, 孙本双, 付晓旭. 宇航精密仪表及零件用金

- 属材料的尺寸稳定性[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8 (S1): 229 - 233.
- ZHONG Jing-ming, SUN Ben-shuang, FU Xiao-xu. The dimensional stability of metal materials used for precise aerospace instruments and component[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(S1): 229 - 233.
- [3] 杜树芳. 金属材料的尺寸稳定性[J]. 机械工程师, 1984(6): 36 - 38.
- DU Shu-fang. The dimensional stability of metal materials [J]. Mechanical Engineer, 1984(6): 36 - 38.
- [4] Nite G, Mielke S. Thermal expansion and dimensional stability of alumina fiber reinforced aluminium alloys[J]. Materials Science and Engineering, 1991, A148: 85 - 92.
- [5] YANG Feng, WU Gao-hui, SUN Dong-li. A study on micro yield deformation behavior of 2024Al alloy[J]. Acta Metall Sinica, 2000, 13(2): 502 - 507.
- [6] FAN Zhang, SUN Peng-fei, LI Xiao-cui, et al. An experience study on deformation behavior below 0.2% offset yield stress in some SiC_p/Al composites and their unreinforced matrix alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2001, A300: 12 - 21.
- [7] Smagorinski M E, Tsantrizos P G, Grenier S, et al. The properties and microstructure of Al-based composites reinforced with ceramic particles[J]. Materials Science and Engineering, 1998, A244: 86 - 90.
- [8] Kim R Y, Gregory A S, Schoeppner G A. Dimensional stability of composite in a space thermal environment[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60: 2601 - 2608.
- [9] Hahn C, Bourke M A M, Daymond M R. A finite element analysis of the inelastic relaxation of thermal residual stress in continuous-fiber reinforced composites[J]. Materials Science and Engineering, 2001, 61: 1757 - 1772.
- [10] 亨金 M J, 洛克申 H X. 精密机械制造中金属与合金的尺寸稳定性[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- Kidin M L, Lokshin I H. The Dimensional Stability of Metal and Alloy in Precise Mechanical Fabrication[M]. Beijing: Science Press, 1981.
- [11] 史冬梅. LY12 铝合金尺寸稳定化处理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1987.
- SHI Dong-mei. A Study on the Treatment for Dimensional Stability of LY12 Alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1987.
- [12] 孙东立, 杨 峰, 武高辉. 尺寸稳定性评定的新方法——圆环开口法的初步尝试[J]. 理化检验(物理分册), 1999, 35(10): 447 - 448.
- SUN Dong-li, YANG Feng, WU Gao-hui. A new method for evaluating the dimensional stability—preliminary trial for notch ring[J]. Physicochemical Check (physical volume), 1999, 35(10): 447 - 448.

Thermal cycling on-line measuring method for evaluating dimensional stability of metal materials unloaded

WANG Xiu-fang, WU Gao-hui, LI Xiao-ling, SUN Dong-li

(School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Thermal cycling on-line measuring method was proposed to evaluate the dimensional stability of metal materials unloaded. The test results show that during thermal cycling, not only the dimension change of the samples can be measured at all time, but also the dimension change after every cycling and the sum of change after multiple cycling can be measured. So it is very convenient and visual to evaluate the dimensional stability of different materials or the same material treated by different procedures.

Key words: dimensional stability; thermal cycling; on-line measuring

(编辑 何学锋)