

形状记忆聚合物及其在结构损伤模拟实验中的应用^{*}

杨永春 王永岗

(中国海洋大学工程学院,青岛 266071)

摘要 形状记忆聚合物(SMP)是一类具有“记忆”初始形状功能的高分子材料,兼具塑料和橡胶的特性。描述了其形状记忆机理,提出利用SMP的弹性模量随温度升高而降低的特性,用其制作刚度可控构件的新思路,并在模型试验中成功地进行了验证,结果表明该损伤模拟方法简单可靠,有实际应用的价值。

关键词 形状记忆聚合物 损伤识别 刚度可控构件 损伤模拟

形状记忆聚合物(SMP)是继形状记忆合金(SMA)之后于20世纪70年代末兴起的一类新型功能高分子材料,运用SMP材料制成的具有初始形状的制品(交联或具有多相结构)经形变固定后,通过外部刺激手段(如加热、光照等)能够恢复初始形状,即表现出形状记忆特性。

目前已成功地开发出一系列SMP,如聚氨酯、聚降冰片烯、反式1,4-聚异戊二烯、(苯乙烯/丁二烯)嵌段共聚物等。这些SMP材料同时具备塑料和橡胶的特性:常温具有塑料的性质,即硬性、形状稳定恢复性,而在一定温度(形状记忆温度)下,则表现出橡胶的特性,即材料的可变形性和形变恢复性,表现出记忆功能。它们在土木建筑、电子通讯、机械制造、印刷包装、医疗器械等领域和行业得到广泛应用。

在土木结构工程领域中,对于一个多自由度结构系统,其动力学方程可描述为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t) \quad (1)$$

忽略阻尼的影响,振动特征值方程为:

$$(K - w^2 \cdot M) \cdot \phi = 0 \quad (2)$$

式中: M ——整体质量矩阵;

C ——整体阻尼矩阵;

K ——整体刚度矩阵;

x ——位移;

$f(t)$ ——外加激励;

w ——结构固有频率;

ϕ ——正则化振型。

结构的损伤必然会引起 K 和 M 的改变,由式(1)和式(2)可知, w 和 ϕ 也会相应地产生一个小的改变。而对大型工程结构,损伤常常会明显地降低其刚度,对质量分布则无明显影响。故目前在检验各种损伤识别方法的有效性过程中,常采用降低结

构某部位刚度的方式进行损伤模拟,如有限元数值分析中的单元刚度折减法和1993年3月美国新墨西哥州立大学利用I-40桥进行实验时的制造裂缝法。这些方式所模拟的损伤过程是以一种突变的形式出现的,而且具体实验过程中需停止外加环境因素(如风、浪、流等)来拆除构件或制造裂缝,导致检验过程不连续,对识别方法有效性的检验实际上演变为对识别方法在损伤前后有效性的检验,这也与实际结构的损伤过程有相当差异。

笔者提出利用SMP的弹性模量(E)随温度(T)的升高而降低的特性,制作刚度可控构件的新思路,以解决进行损伤识别方法有效性检验时,无法模拟结构损伤形成和积累过程的不足,将其应用于损伤模拟实验中,取得了满意的效果。

1 形状记忆效应

1.1 形状记忆机理

形状记忆效应与材料的结构有关,通过对已发现的SMP的结构进行分析研究,发现这类聚合物均具有两相结构,即由记忆原始形状的固定相和随温度变化而发生软化-硬化可逆变化的可逆相组成。固定相和可逆相具有不同的软化温度(分别标记为 T_h 和 T_s)。一次成型过程中,将SMP加热到 T_h 以上,固定相和可逆相均处于软化状态,塑性变形后将其冷却至 T_s 以下,固定相和可逆相先后硬化,材料成型。将成型材料加热至可逆相的软化温度($T_s < T < T_h$),可逆相软化可做成任意的第二种形状,保持应力并冷却固定就得到二次成型制品。如果加热至适当的温度,使可逆相软化,固定相在回复应力作用下,将使制品恢复到初始形状,即完成形状记忆过程。

^{*} 国家863计划资助项目(2001AA602023-1)

收稿日期:2003-09-05

1.2 SMP 的 $E-T$ 特性

SMP 的形状记忆效应的基本原理和过程可以用弹性模量-温度($E-T$)关系曲线来描述,笔者设计了基本的力学试验,测定 SMP 材料的 $E-T$ 关系曲线。

选用某种 SMP 板材,按照 GB/T 1040-1992 的规定制成 II 型标准拉伸试样。对该试样进行室温和变温状态下的力学拉伸实验,用拉伸试验机加载,采用标距为 50 mm 的电子引伸计测定其变形,记录载荷和试样变形量的对应值,根据材料力学公式计算出 SMP 的 E 值,每种工况下测定 5 组数据,取其平均值。对实验数据处理得 $\lg E-T$ 的变化曲线,见图 1。

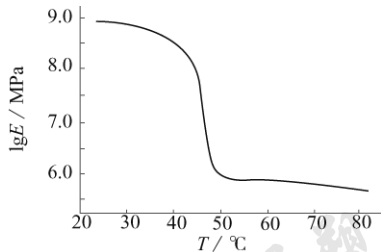


图 1 SMP 的 $E-T$ 关系曲线

由图 1 可知,若将 SMP 制成结构构件,通过升高温度可使其刚度逐步降低,从而有效地模拟构件损伤形成、积累的过程,将这种刚度可控构件用于实验中,可以对各种损伤识别方法的有效性进行检验。

2 刚度可控模型构件的制作

2.1 基本原理

损伤识别方法的有效性检验过程中,只要求模拟构件出现部分损伤的情况,故可以将 SMP 切成片状,并粘贴在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)模型构件的四周。构件整体刚度($E \cdot A$)由 SMP 的刚度 $E_1 \cdot A_1$ 和 PMMA 的刚度 $E_2 \cdot A_2$ 复合而成,即:

$$E \cdot A = E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2 \tag{3}$$

式中: E ——构件弹性模量;

A ——构件面积;

E_1 ——SMP 的弹性模量;

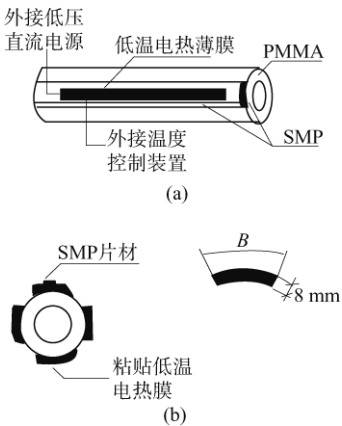
A_1 ——SMP 的面积;

E_2 ——PMMA 的弹性模量;

A_2 ——PMMA 的面积。

根据测得的 E_1 和要求模拟的损伤程度,可确定 A_1 。

温度控制采用电热膜加热的方式,在 SMP 片上粘贴低温电热膜,并连接温控装置,这样便制作成刚度可控构件,其形状示意图见图 2。



a—形状示意图; b—截面示意图
图 2 刚度可控构件示意图

2.2 刚度可控构件制作

由 SMP 的 $E-T$ 曲线可知,当 SMP 从常温升温至 50℃时, E 值降低 2~3 个数量级,此时可认为 SMP 的刚度完全丧失。本试验模型的构件为外径 30 mm、壁厚 5 mm 的 PMMA 管,要求制作损伤程度(k)分别为 5%、10%、20%、30% 的刚度可控构件。选用厚度 8 mm 的 SMP 材料,裁剪成宽为 B 的片状(共 4 块),则由两种材料的力学特性及几何关系可得:

$$\frac{E_1[(2B+R)^2-R^2]}{11.78E_2(R^2-r^2)} = \lambda \tag{4}$$

式中: E_1 ——常温下 SMP 的弹性模量,0.836 GPa;
 B ——SMP 的宽度;
 R ——PMMA 管的外径;
 E_2 ——常温下 PMMA 的弹性模量,2.311 GPa;
 r ——PMMA 管的内径;
 λ ——刚度折减比, $\lambda = k/(1-k)$, k 为刚度损伤程度。

将已知条件代入式(4),可得 SMP 的宽度 B ,如表 1 所示。

表 1 SMP 材料宽度 B 计算值

损伤程度 $k/\%$	5	10	20	30
SMP 宽度 B/mm	6.0	11.0	20.3	29.4

根据表 1 计算出的宽度值,将 SMP 加工成片状,并粘贴在 PMMA 表面,同时粘贴低温电热薄膜,安装温度控制装置,即制成刚度可控构件。

2.3 损伤模拟实验

在室温和通电加热 SMP 片使其升温至 50℃两种工况下,对每个试样进行拉伸力学试验,根据试验机的拉力和引伸计测得的变形,可以得到构件刚度

实测值,进而确定构件的损伤程度,测试结果如表 2 所示。

表 2 损伤模拟(刚度)实验结果分析

项 目		1	2	3	4
理论值	室温下刚度 /GPa·mm ²	1068	1202	1451	1694
	50℃下刚度 /GPa·mm ²	1015	1082	1160	1186
	损伤率/%	5	10	20	30
测量值	室温下刚度 /GPa·mm ²	1092	1254	1473	1721
	50℃下刚度 /GPa·mm ²	1034	1121	1173	1200
	损伤率/%	5.3	10.6	20.4	30.3

由表 2 可知,利用 SMP 可很好地进行构件损伤状况的模拟,且实测值与理论值吻合得较好。但实测值与理论值之间仍存在少许差异,这可能与以下因素有关:(1) SMP 片和电热膜的加工及粘贴工艺存在差异;(2) 温度升高后, SMP 的 *E* 值尽管很低但并不为零,且 PMMA 的 *E* 值有所降低。

3 结论

(1) 在现有试样表面粘贴 SMP,并以电热膜加热的方式控制 SMP 弹性模量的改变量,进而实现试样刚度变化的控制,可以模拟结构刚度逐步损伤及损伤形成积累的过程,并且试样可以循环利用,试验

结果表明损伤模拟的效果良好。

(2) 刚度可控损伤模拟技术大大缩短了损伤模拟实验的周期,降低了费用,将损伤以一种连续性的过程呈现出来,为检验损伤识别与健康诊断方法的有效性提供了可靠的实验平台。

(3) 本研究将材料科学中的最新研究成果应用于工程结构的物理模型实验中,开拓了新材料的应用领域,发展了模型实验新技术,必将会带动其它领域模型实验技术的发展。

参考文献

1 Li Fengkui, Zhu Wei, Zhang Xian. Shape memory effect of ethylene-vinyl acetate copolymers. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 71: 1063

2 Farrar C R, Jauregui D. Damage Detection Algorithms Applied to Experimental and Numerical Modal Datafrom the I-40 Bridge. Rep, No: LA-13074-MS. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87544.

3 胡宁,王翔.用模态实验数据进行结构损伤评估.工程力学(增刊),1998(1):246

4 Zhu Hongping. Detection of Structural Parameter Change by Using Modal Test Data, proc F6th Inter Sym on Structural Engineering, Kunming, 2000. 156

SHAPE MEMORY POLYMER AND ITS APPLICATION IN THE STRUCTURAL DAMAGE MODEL TEST

Yang Yongchun, Wang Yonggang

(College of Engineering, OceanUniversity of China, Qingdao 266071, China)

ABSTRACT Shape memory polymer(SMP) is a kind of polymer material memorizing its former shape, having the characters of plastics and rubbers. Its shape memory mechanism is discussed and a new thinking is put forward to use the character of the lowering of the elastic modulus with the increase of the temperature to make the stiffness-controlling test specimen. It is successfully tested and verified in the model experiment. The result shows it is simple and reliable and has the practical application value.

KEYWORDS shape memory polymer, damage identification, stiffness-controlling test specimen, damage simulation

我国已成为世界塑机制造大国

目前,我国已成为世界塑料机械产业发展最快的国家,将对世界塑机行业的发展和市场发挥举足轻重的作用。我国的塑料机械在国民经济中占有非常重要的地位,2002 年我国塑料机械总产值达 135 亿元,比 2001 年增长了 40% 以上。但是,进口塑料机械仍占了国内约一半的市场份额,因此我们必须加快提高产品技术含量,提高国产塑机的竞争力,并加强国内外的技术交流与合作,促进我国塑料机械产业的进一步发展。2002 年全球市场对注塑机的需求量是 5.3 万台,其中我国就达 2.6 万台,世界塑机业只有我国市场是唯一亮点。现在,我国已基本形成塑机制造业体系,并已成为世界塑机制造大国,且塑机在快速、低噪音、节能、安全、稳定可靠等方面已达到或接近国际先进水平。但是国内塑机业还存在着市场分布与需求不均,本土企业低端产品竞争过度,开发力量薄弱等问题,因而在波动中高速发展将成为

今后我国塑机业发展的主旋律。(王昕红)

庆华塑料片材挺进国际市场

河北冀州市庆华塑料厂抓住我国入世的机遇,积极开拓国际市场。首先从产品创新入手,增加花色品种,提高产品高附加值,满足不同用户的需要。为提高产品档次,建设了大型 PVC 压延生产线,并通过技术创新,使生产设备实现了温度、速度自动控制,产品精度高,拉伸强度提高了 50% 以上,并能生产出国际市场畅销的厚度 0.8 mm 以下产品。同时通过采用新工艺,实现了压延机冷却辊自动降温,解决了塑料片材生产过程中自行收缩的难题;通过电瓷阀自动温控技术改造,大大提高了片材的拉伸质量。这些新技术、新工艺不仅使产品的稳定性比同类产品提高 20% 以上,而且生产成本明显降低。目前,该厂生产的各种 PVC 吸塑片材、镀金片材、回瓷白片材、纯透明片材已先后出口到美国、俄罗斯、蒙古等国家,受到国外客商的青睐。(双林)