

形状记忆聚合物基复合材料在航空航天领域的应用

Applications for Shape-Memory Polymer Composites in Aerospace

哈尔滨工业大学 冷劲松 刘立武 吕海宝 刘彦菊

20 世纪 80 年代以来,形状记忆聚合物及其复合材料在航空航天领域的应用已得到广泛的研究。这些前景光明的智能材料正在空间展开结构、变形结构、智能轴、光学反射镜以及智能纺织面料等特殊领域中得以开发和验证。

形状记忆聚合物(SMPs)某些特定的宏观性能(如形状)可以对外部刺激予以响应,其基本分子结构是一种具有活性运动的高分子网络。SMPs 由 2 段组成,一段具有高弹性,另一段在特定刺激下可降低刚度,后者可以是一种分子开关或是刺激敏感型区域。当 SMPs 被暴露在特定刺激环境时,开关或相转变被激发,储存在临时形状中的应变能被释放出来,导致形状恢复。

SMPs 在外部刺激(包括热、电、光、磁、湿度甚至是 pH 值的改变)作用下会发生较大的宏观形变。热响应 SMPs 最为常见,在宏观层面(见图 1),热响应 SMP 的典型热力学循环由以下几步组成:制备 SMP 初始形状;加热 SMP 至热转变温度(玻璃化转变温度 T_g 或熔融温度 T_m)以上,施加外力使 SMP 变形,冷却至热转变温度以下,消除临时预变形的约束;需要时,加热临时变形的 SMP 至热转变温度以上, SMP 恢复到初始形状。

除了热响应 SMPs,电诱导 SMPs 也已得到发展,其重要性在未来将得到显现。如图 2 所示, SMP/ 碳黑复合材料中的碳纳米管可以在电诱导

情况下取向成链段,而且这种导电性 SMP 复合材料可以在很低的电量下被激活。图 2 中右图给出了样品 C 的尺寸和试验装置。

空间展开结构

传统的空间展开装置在轨道中的结构形状变化需要通过铰链来实

现,铰链中储存有能量单元或马达驱动工具。这些传统设备有其自身缺点,如装配工序复杂、体积庞大以及展开过程中存在副效应。相反,采用 SMPs 及其复合材料制备的展开设备可以克服上述某些缺点。

利用形状记忆聚合物基复合材料(SMPC)设计的铰链,可以驱动太

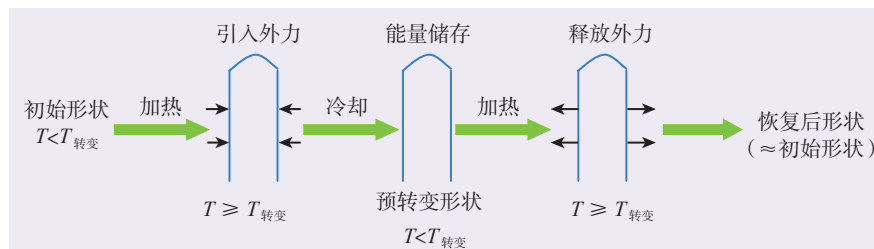
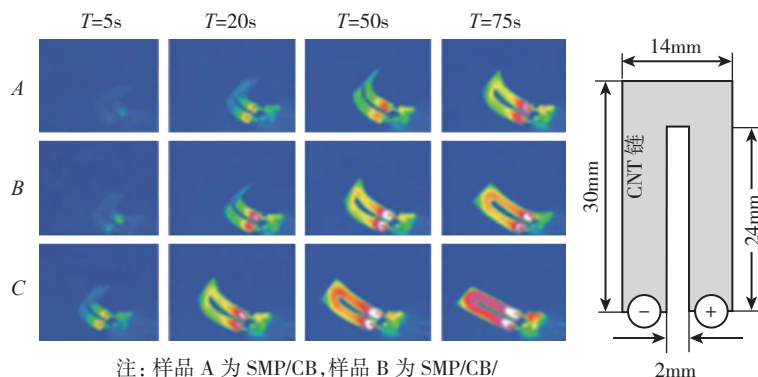


图1 形状记忆聚合物的典型热力学循环变化过程



注: 样品 A 为 SMP/CB, 样品 B 为 SMP/CB/CNT (随机), 样品 C 为 SMP/CB/CNT (链接)。

图2 SMP复合材料展开和温度分布

阳能帆板阵列,此连接由 2 个曲面的 SMPC 圆壳组成。每个 SMPC 复合材料的重量远低于传统设备。SMPC 铰链的展开过程如图 3 所示。

图 4 为采用 SPMC 铰链驱动的太阳能帆板阵列的展开过程。施加电压加热至 SMPC 的 T_g 以上,在相对较软的状态下将 SMPC 铰链在外

耗及机动性)的飞行形状,可改善飞行器飞行效率和飞行包络线。因此,寻找不同特定情况下的合适的蒙皮非常重要,而 SMPs 的弹性模量可以通过外部刺激进行可控改变,在这方面的应用具有更多优势。

可变弯度机翼的变形概念已提出,如图 5 所示。可变弯度机翼由柔

性 SMP 蒙皮、金属面板及蜂窝结构组成。金属板代替了传统的铰链,并且可以保持弯度变化过程中的表面光滑度。蜂窝结构在一个方向具有高应变能力,而在垂直于飞机轴向的方向没有尺寸变化,以支撑柔性蒙皮。柔性 SMP 机翼蒙皮可以形成光滑的气动表面。

智能芯轴

具有复杂结构的芯轴通常用于模压和纤维缠绕复合材料零件,传统的芯轴工艺多使用多块金属组合或水溶性芯轴材料,耗时切耗能。对于某些异形飞机结构件,如空气导管和瓶状零件,芯轴很难拔出。由于 SMPs 具有很大的可逆变形的特征,可以用于设计复杂形状的智能芯轴并便于芯轴取出。这种芯轴可以维持像传统芯轴相当的尺寸精度,并且可以快速脱模和重复使用,成本也较低。

将 SMP 空心芯轴加热到转变温度以上, SMP 变成柔性且可在金属模腔的限制下扩展成理想的芯轴形状;然后, SMP 再被冷却变回坚硬固态,以精确复制模腔。将纤维缠绕到 SMP 芯轴上制造复合材料零件,待复合材料固化后,将 SMP 芯轴重新加热到转变温度以上使芯轴恢复到初始形状利于芯轴拔出。

其他应用

作为一种新型智能材料, SMP 目前已广泛应用于从外太空到汽车工业的众多领域。除了上面提及的应用领域, SMPs 也应用于以下领域:吊杆、天线、吸盘、镜子、光学反射镜、血管内给药系统、罩/座位装配器、可调整汽车支架、生物医药产品、自修复型复合材料系统、智能纺织面料、形状记忆玩具以及汽车传感器等。

(翻译 王迎芳 责编 夏宛)

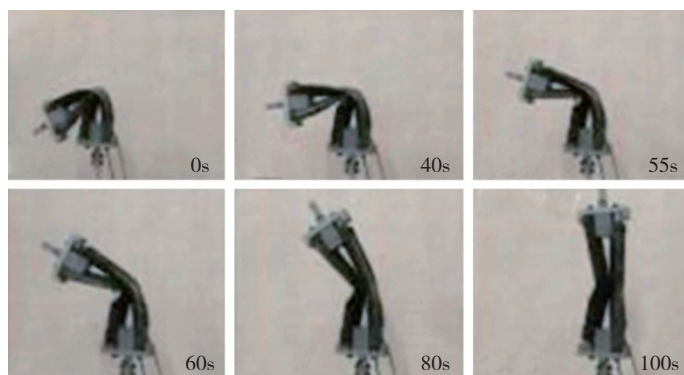


图3 SMPC铰链的展开过程

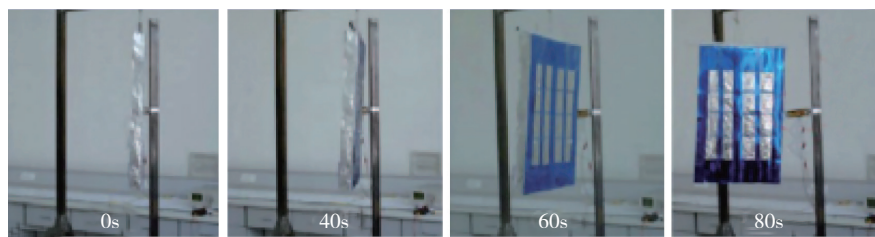


图4 采用SPMC铰链驱动的太阳能帆板阵列的展开过程

力作用下弯曲成初始存储角度(折叠状态),在室温下固定初始存储形状。当以相同的电压再次加热 SMPC 铰链时,由 SMPC 铰链驱动的太阳能帆板阵列从折叠状态展开,有利于太阳能阵列获得更多能量。

变形结构

将航空器设计成多功能型是为了使其在飞行中完成更多任务,如巡航效率更高,机动性更好。当航空器进入不同的飞行包络线时,其性能会快速恶化。为了解决这个问题,研究人员已经提出航空器在飞行过程中的形状实时变化系统。相应地,通过调整具有不同目标特征(如速度、能



(a) 原始配置(0°)



(b) 变形配置(15°)

图5 可变弯度机翼的原始和变形配置照片