

NiTi 合金带智能复合构件 疲劳裂纹扩展特性研究*

石家庄铁道学院

杜彦良**

北京航空航天大学

聂景旭 张学仁

【摘要】 根据所研制的 NiTi 合金带的优异性能, 提出了将其复合于铝合金板内, 并与微机控制系统相配合, 形成 NiTi 合金带智能复合构件。利用所建立的探测和控制裂纹扩展的微机控制系统和制作的 NiTi 合金带平板智能复合构件进行了控制裂纹扩展的疲劳性能试验研究。结果表明, 该设计方案合理, 效果显著。

主题词: 形状记忆合金 金属带 复合物 疲劳裂纹

分类号: V231.95 V287

1 引 言

将 NiTi 合金丝或带分别复合于本体材料内, 并与微处理器相配合, 可形成 NiTi 合金丝智能复合构件和 NiTi 合金带智能复合构件。近年来, 我们首先对 NiTi 合金丝智能复合构件的复合工艺、材料特性、设计分析和试验测试进行了研究。结果表明, 该智能复合构件不但具有自身感知和作动功能, 而且可使构件的疲劳寿命大大提高^[1,2]。根据金属基智能复合构件的复合工艺及其界面强度要求等特点, 近期我们与北京科技大学合作, 采用非晶态快速凝固的方法, 进行了 NiTi 合金薄带的研制。根据 NiTi 合金薄带的特点, 提出了将 NiTi 合金薄带复合于构件内, 组成 NiTi 合金薄带智能复合构件。由于 NiTi 合金带厚度薄、性能好、强度高(经试验测度, NiTi 合金薄带的破断强度和所产生的回复力要比 NiTi 合金丝大 3 倍), 易满足粘接层厚度要求。所以界面粘接质量和结合强度容易保证, 并且便于金属基体与 NiTi 合金之间的绝缘处理。所以认为 NiTi 合金带智能复合构件是较为理想的一种控制裂纹扩展的智能复合构件。本文根据上述思想, 以 NiTi 合金薄带—铝合金板复合的智能复合构件为研究对象, 利用所建立的主动探测和控制裂纹扩展的微机系统与疲劳试验器相配合, 对 NiTi 合金薄带智能复合构件的疲劳裂纹扩展特性进行了试验研究。

2 智能复合构件的制作

2.1 智能复合构件的特点

对于用 NiTi 合金薄带与本体材料组合而成的主动探测和控制裂纹扩展的智能复合构件的基本要求是: (1) 将 NiTi 合金带复合于构件内部, 既起到传感作用和对损伤的控制作用, 又起到对构件的增强作用, 所以其强度、性能和疲劳强度等均应高于本体材料, 在此基础上制作

的智能复合构件的控制效果才能明显; (2) 应将 NiTi 合金带主要分布于构件易产生裂纹或损伤的薄弱区域或应力集中较大的部位, 从而达到使用较少材料, 却使构件的整体寿命提高的目的; (3) NiTi 合金带与本体材料的结合强度高、绝缘性和疲劳性能好; (4) 位于裂纹处的 NiTi 合金对裂纹扩展反应灵敏, 控制效果好。

根据以上要求及特点, 本文选择 LY-11 铝合金为本体材料, 其破断强度为 360 MPa, 而 NiTi 合金带的破断强度为 2070 MPa。另外, 由于 NiTi 合金带的电阻率大、对应变敏感, 而且厚度薄, 易进行本体材料与 NiTi 合金带的绝缘处理, 所以粘接强度易保证。

2.2 对 NiTi 合金的处理

根据 NiTi 合金的特殊性能^[3], 在一定变形范围内, NiTi 合金的回复力与其变形量的大小和加热温度有关。由此特性, 可将位于构件裂纹区域的 NiTi 合金薄带事先给予预变形处理, 然后再将其复合在本体材料内, 这样当利用 NiTi 合金的形状记忆效应进行裂纹的控制时, 可使作用于裂纹表面的回复力增大, 图 1 所示。而利用 NiTi 合金的拟弹性性能对裂纹扩展进行控制时, 则裂纹表面将始终存在一收缩力来阻止裂纹的张开(图 1)。为便于与无预变形 NiTi 合金智能复合构件相比较, 将 NiTi 合金带事先进行预变形处理以后, 再复合形成的智能复合构件的制作方法叫预变形复合法。

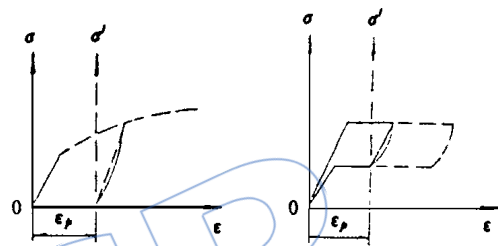


图 1 预变形后的应力—应变曲线

2.3 NiTi 合金带智能复合构件的制作

由于对裂纹扩展控制是依靠对位于构件裂纹处的 NiTi 合金加热(通电)使其收缩而产生回复力来驱动裂纹闭合的。因此, 根据 NiTi 合金带智能复合构件的特殊要求, 首先对本体材料与 NiTi 合金接触表面采用一定的措施进行特殊处理。然后在复合之前, 还应在 NiTi 合金带与本体材料之间用中间介质隔开, 最后再将其复合在构件易产生裂纹或损伤的部位。NiTi 合金带的复合量应根据构件的受力状态、环境条件和工作要求来决定。

3 对裂纹扩展进行控制的技术方案

3.1 裂纹扩展主动控制

当构件某处的裂纹处在外载荷作用下试图张开时, 首先位于构件裂纹处的 NiTi 合金利用自身材料特性阻止裂纹扩展, 从而起到桥接作用。当裂纹扩展达到所要求的控制范围时, 经微机系统自动发出控制信号, 将位于构件裂纹处的 NiTi 合金加热(通电), 根据记忆合金的回复效应, NiTi 合金开始收缩, 力图回复原始状态, 并产生相应的回复力来驱使裂纹闭合或使裂纹张开位移减小, 从而对裂纹扩展起到一定控制作用。

3.2 裂纹扩展的被动控制

针对工程实际应用情况, 有些构件可以利用微机

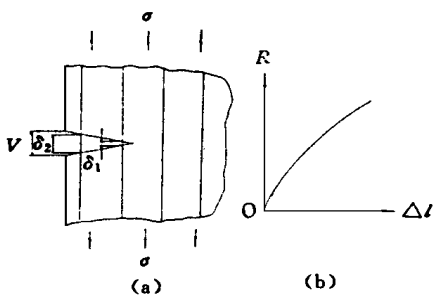


图 2 裂纹探测的基本原理

控制系统实现构件的自动监测和控制,但有些构件由于受环境条件和结构设计等影响,不易加装监控系统,在此种情况下,对裂纹扩展的控制可以利用 NiTi 合金的拟弹性性能来实现。例如,复合构件之前,首先将位于裂纹区域的 NiTi 合金进行预变形处理,然后再将其复合于本体材料内,这样在裂纹表面将始终存在一驱使裂纹闭合的作用力,用于阻止裂纹的张开。

4 控制裂纹扩展的疲劳特性试验

4.1 试验系统

利用 NiTi 合金对裂纹扩展进行主动控制必须具备两个条件,一是要具有感知和作动功能的 NiTi 合金复合构件,二是应具有微机控制下的自动监控系统,该系统主要由监测、控制和微机三大部分组成^[4,5]。整个试验过程中的工作参数和 $\Delta a-\Delta N$ 曲线均显示在屏幕上,并且可将试验结果打印出来。

4.2 疲劳裂纹扩展试验及其结果

图 3 所表示的为 NiTi 合金带智能复合构件的形状和尺寸示意图,NiTi 合金带复合构件试验参数和试验条件如表 1 所示,试验的全部过程均由微机监测和控制系统完成。为了进行相互比较,全部试验均在相同的载荷和预制裂纹长度下进行。

表 2 所表示的是几种复合构件的试验结果。由试验结果表明,当利用 NiTi 合金带的拟弹性性能来阻止裂纹扩展时,其起裂寿命比无 NiTi 合金构件大 2.3 倍;而当利用 NiTi 合金带的形状记忆效应来阻止裂纹的扩展时,其起裂寿命比无 NiTi 合金构件大

4.68 倍。在相同的试验条件和裂纹扩展长度下,具有预变形的 NiTi 合金智能复合构件的疲

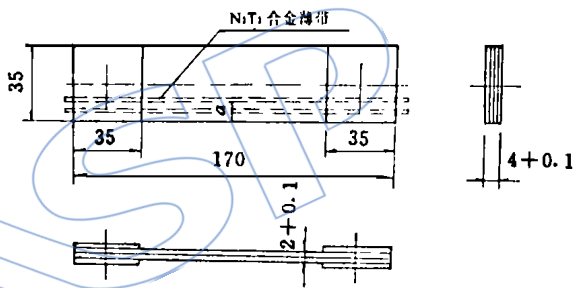


图 3 形状记忆合金薄带智能复合材料构件

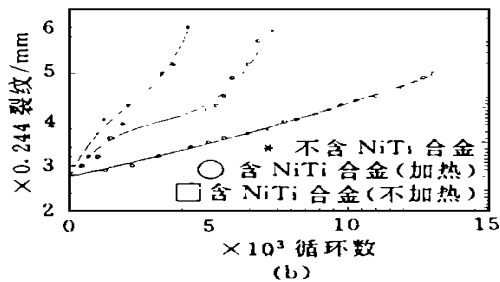
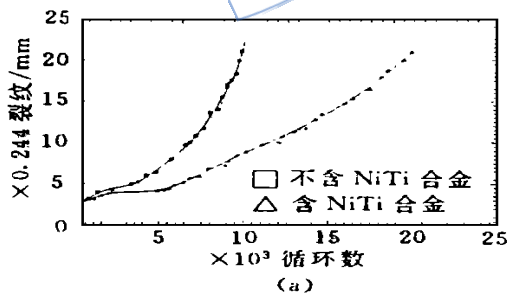


图 4 $\Delta a-\Delta N$ 曲线

劳寿命比无 NiTi 合金构件大近 4 倍,将几种试验件的 $\Delta a-\Delta N$ 曲线绘制于图 4 中(图中(a)利用弹性性能对裂纹扩展的阻止作用(b)利用形状记忆效应对裂纹扩展的阻止作用),由图中各曲线可以看出,利用 NiTi 合金带的特殊性能对裂纹扩展的阻止作用是非常显著的。如果通过合理设计,当 NiTi 合金作用于构件裂纹处的阻止力和回复力接近外加载荷作用于裂纹表面上的应力时,则裂纹扩展将会得到完全阻止。

表 1 疲劳裂纹扩展试验试件的测试条件和内容

	无 NiTi 合金构件	NiTi 合金智能复合构件	
试件代号	C01.X	C21.X	C31.X
裂纹区域 NiTi 合金的变形量		$\epsilon=0.025$	$\epsilon=0.025$
NiTi 合金对裂纹的控制作用		拟弹性性能	形状记忆效应
试验温度条件(℃)	30℃	30℃	对 NiTi 合金加热至 100℃
测试内容	裂纹萌生寿命、裂纹扩展速率、裂纹疲劳寿命 距裂尖 1 mm 处的应力随裂纹扩展情况		
裂纹扩展		用位于裂纹处 NiTi 合金为传感器、计算机处理	
监测手段	用断裂丝片为传感器、计算机处理、体式显微镜直读		
试验载荷	裂纹萌生阶段: $\sigma=68\text{ MPa}$; 裂纹扩展阶段: $\sigma=54.4\text{ MPa}$		

注: 载荷谱为脉动载荷, 频率为 0.5 Hz。

表 2 疲劳试验结果

试验参数		无 NiTi 合金构件	NiTi 合金智能复合构件	
试件代号		C01.X	C21.X	C31.X
裂纹区域 NiTi 合金的作用			拟弹性性能	形状记忆效应
裂纹萌	循环数	1750	4014	8200
生寿命	提高倍数		2.3	4.68
循环寿命(裂纹从 0.68~1.22 mm)	循环数	3300	6041	13019
	提高倍数		1.83	3.95

5 结 论

首先提出了 NiTi 合金带智能复合构件的制作方法和对裂纹扩展进行控制的方案,并在所建立的微机控制系统下,对 NiTi 合金带智能复合构件进行了控制裂纹扩展的疲劳试验,结果表明,该设计方案合理,效果显著,特别是利用形状记忆合金带的形状记忆效应对裂纹扩展的控制效果更为显著,如果将其应用于工程实际,则构件的工作可靠性和安全性将会大大提高。

参 考 文 献

1 YanLiang Du, Jing Xu Nie, Changzhan Zhao·Study for Crack - Detecting and Active Cpntrl·A PCS- 91, International Academic Publishers, 1990: 1500- 1560

2 杜彦良, 聂景旭. 主动控制裂纹扩展的一种新型复合材料构件的研究. 复合材料学报, 1992, 19(3)

3 杜彦良. 自动控制裂纹和主动控制裂纹扩展的智能材料结构研究: [学位论文]. 北京航空航天大学, 1993

4 李善引编. 计算机测量与控制. 北京航空航天大学出版社, 1989

5 于风仙编. 自动控制原理. 北京航空航天大学出版社, 1990

(责任编辑 魏星禄)