

文章编号:1005-0523(2018)04-0138-05

形状记忆合金智能沥青路面的变形特性研究

闫国杰

(上海浦东路桥建设股份有限公司,上海 201210)

摘要:利用形状记忆合金的形状记忆效应,制备具有自修复功能的沥青混合料。采用热分析、力学测试仪对形状记忆合金丝材的相变行为与形状恢复性能进行表征,用车辙变形恢复试验验证沥青混合料的自修复性能。结果表明形状记忆合金丝材显示出 B2-R-B19' 两步马氏体相变,记忆合金丝材在预拉伸应变为 10% 时显示出约 7.8% 的可恢复应变。将形状记忆合金丝材与沥青混合料复合能够显著提高车辙试样的变形恢复率,沥青混合料的形状恢复率还受形状记忆合金丝材的铺设方式影响,其中铺设双层相互垂直形状记忆合金丝材的车辙试样平均变形恢复率高于铺设单层形状记忆合金丝材的车辙试样变形恢复率。

关键词:智能沥青公路;形状记忆合金;自修复;变形特性;马氏体相变

中图分类号: TU512.9

文献标志码: A

公路由于长期承受振动载荷且受自然风化的影响,在使用一段时间后会 出现裂缝,导致交通安全事故的发生。重新铺设路面不仅成本高昂,工期长,还造成了很大的资源浪费。发展具有自修复功能的智能道路对于节约成本,提高公路维护效率具有重要意义^[1-2]。

针对结构的损伤和产生的裂缝,可以选用形状记忆合金进行修复。形状记忆合金是一种新型的智能金属材料,它在应力场或者温度场的作用下通过可逆的热弹性马氏体相变实现超弹性或形状记忆效应和变形恢复功能^[3-4]。形状记忆合金目前已经在古建筑修复、防震减噪土木构件等领域应用^[5-7]。崔迪,等^[8]将形状记忆合金绞线作为主筋埋入混凝土梁中,发现这种梁比普通钢筋混凝土梁在开裂后能承担更大的力,且形状记忆合金绞线对混凝土梁的残余变形和残余裂缝有一定的修复功效。日本 Yuji Sakai 等^[9]将直径 2 mm 的超弹性形状记忆合金预埋 在砂浆梁中,发现形状记忆合金提高了梁的变形能力,卸载后,形状记忆合金梁的变形几乎全部恢复。

虽然形状记忆合金对混凝土材料的自修复有着良好效果,但形状记忆合金应用于沥青基材料的自修复较少报道。在我国的公路材料使用上,沥青路面占据了整个公路材料的半壁江山甚至更高的比例,沥青材料的改性也是路面材料研究领域的一大热点,刘少鹏,等^[10]研究了纤维改性对橡胶沥青混合料疲劳性能的影响,发现木质素纤维、聚酯纤维等材料对沥青混合料的疲劳寿命均有不同程度的提高。刘靖,等^[11]比较了 SBS 改性沥青,橡胶沥青, TB 沥青, TB 复合改性沥青, ESSO70# 基质沥青 5 种热沥青在钢-沥青混凝土界面, 沥青混凝土-沥青混凝土界面,水泥混凝土-沥青混凝土界面间的层间粘结性能,发现 SBS 改性沥青的粘结强度最佳。荷兰代尔夫特理工大学 Erik Schlangen 教授^[12-13]采用导电钢丝棉与沥青混合,制备了热自愈沥青混合料,材料在感应加热后具有一定的自修复效果,但是钢丝棉主要通过弹性变形产生可恢复应变,其可恢复应变在 1% 以下,而形状记忆合金的可恢复应变则可达 8% 以上^[4]。因此采用形状记忆合金与沥青材料复合有望取得更为优异的自修复效果。本研究期望借鉴形状记忆合金材料的变形恢复功能,将其应用于沥青

收稿日期:2018-01-22

作者简介:闫国杰(1972—),男,高级工程师,工学博士,研究方向为道路、建筑领域的材料研究与应用。

道路,达到自动修复路面裂缝的效果。

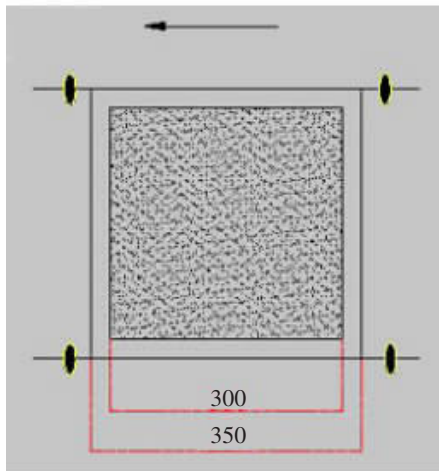
1 实验

1.1 原材料

选用钛镍二元形状记忆合金丝材,合金成分为 Ti-50.8Ni (at. %),丝材直径为 0.15 mm,丝材在 700 °C 固溶 20 min 后淬入水中,再在 250 °C 气氛管式炉中时效 24 h。丝材最后剪切成长度为 20~30 cm 的试样,沥青混合料选用密集配沥青混凝土,集料的最大粒径为 13 mm(AC-13)。

1.2 形状记忆合金/沥青混合料的复合工艺

在 160 °C 条件下将热集料与热沥青搅拌混合约 6 min 待用,再将沥青混合料与形状记忆合金丝材填入尺寸为 300 mm×300 mm×50 mm 的模具中,模具如图 1(a)所示,样品成形温度为 160 °C。本项研究共设置 3 组样品,第 1 组为不加形状记忆合金丝材的空白对照组,样品编号为 SP-0。第 2 组为单方向铺设单层形状记忆合金丝材的样品,样品编号为 SP-1;铺设方法是先铺设 1 层沥青混合料,再在该层沥青混合料上沿同一方向均匀铺设 1 层形状记忆合金丝材,记忆合金丝材在混合料中的总掺量在 8‰ 质量比左右,之后再在合金丝材上铺设 1 层沥青混合料,将样品在 160 °C 左右条件下振动压紧成型并保温 10 min 左右,之后将样品冷却到室温 24 h 后从模具中取出。第 3 组为沿相互垂直方向铺设双层形状记忆合金丝材的样品,样品编号为 SP-2。铺设方法为先铺设 1 层沥青混合料,再沿同一方向铺设第 1 层形状记忆合金丝材,再在丝材上铺设 1 层沥青混合料,之后沿与第 1 层形状记忆合金丝材垂直的方向铺设第 2 层形状记忆合金丝材,最后再铺设 1 层沥青混合料,之后按与第 2 组样品相同的工艺对样品压紧保温。第 3 组样品形状记忆合金丝材的用量也在 16‰ 质量比左右。所制备的样品实物如图 1(b)所示。



(a) 模具尺寸图



(b) 实物图

图 1 车辙试样的模具尺寸与实物图

Fig.1 The size of the mold and the sample for the track experiment

1.3 性能测试和微观分析

使用 PE 公司的 Diamond 差热扫描量热仪(DSC)测试初始形状记忆合金丝材的相变温度,升降温速率为 10 °C/min。采用 Zwick(Z-20)力学实验机表征丝材的超弹性与形状记忆效应。在车辙模具中测量形状记忆合金/沥青混合料样品的自修复性能,在室温下(≈ 15 °C)进行车辙试验,车辙试验完成后在室温放置 24 h,测量轮迹正中间的变形深度,每隔 40 mm 测一个点,统计 7 个点的变形。测出变形后将样品放入车辙仪中于 80 °C 保温 5 h,再取出放入室温条件 24 h,测量变形恢复深度。

2 实验结果与讨论

2.1 初始形状记忆合金丝材的性能

图2显示了形状记忆合金丝材的DSC热分析曲线。记忆合金丝材在降温过程显示出2个放热峰,峰位分别为 $38.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-56.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在升温过程出现2个吸热峰,峰位分别为 $-7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $42.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从图中可以看出热分析曲线对应的第一个峰的热滞非常小,在 $4\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,对应于B2-R相变,这个特征已有很多研究报道^[4]。此外,第二个相变峰对应着R→B19'相变。 $R_s=42.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R_f=35.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 分别为R相变开始温度与相变结束温度。 $M_s=-48.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $M_f=-69.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 分别为B19'马氏体相变开始温度与结束温度。镍钛形状记忆合金中类似的多步相变行为在文献[15-18]中都有报导,其机制认为是与合金中成分以及结构的不均匀性有关。时效处理容易引入Ni₄Ti₃析出并造成局部应力场的存在,而这种应力场有利于R相的形核与生长,在继续降温的过程中,R相将继续向B19'相转变。此外,晶界与晶内的析出物密度差异还会使镍钛形状记忆合金显示出3步甚至4步马氏体相变。根据合金的相变行为,可以知道合金在室温下为R相,此外,由于合金的B19'→R相变结束温度 A_f 也在室温附近($15\text{ }^{\circ}\text{C}$),因此,合金丝材中还可能存在部分B19'相。

图3为钛镍合金丝材在室温加载与卸载过程中的应力-应变曲线。合金在加载过程中表现出三步变形行为:弹性变形区域,应力平台区域,单变体马氏体的弹性变形区域。在第一步变形区域,合金在约0.2%的应变时出现了一个拐点,这可能与R相的去孪生有关。而合金的应力平台区域主要与应力诱发R→B19'相变有关。记忆合金丝材在拉伸到应变为10%时卸载,合金丝材的剩余应变为6.1%左右,由于合金的B19'→R相变结束温度 A_f 在室温附近($15\text{ }^{\circ}\text{C}$),因此,单变体的B19'相在卸载后不能完全转变成B2相或者R相,当对丝材进一步加热到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,B19'马氏体以及R相通过马氏体逆相变转变为B2相使丝材的形状恢复,通过加热导致的可恢复应变约为4%,合金在预拉伸应变为10%时总的可恢复应变约为7.8%。

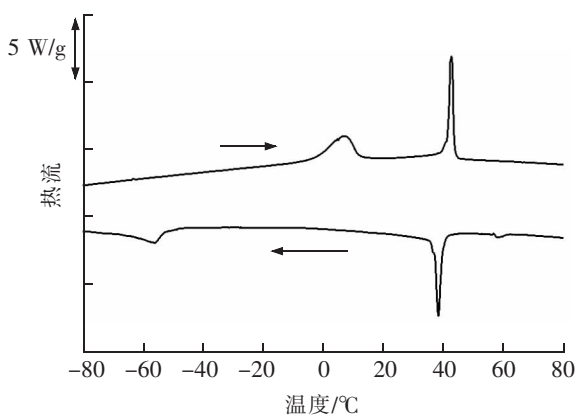


图2 形状记忆合金丝材的差示扫描热分析曲线
Fig.2 Differential scanning calorimetry curve of the shape memory alloy wire

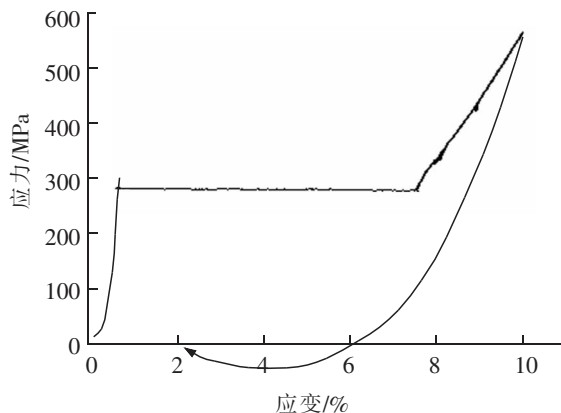


图3 形状记忆合金丝材的应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curve of the shape memory alloy wires

2.2 形状记忆合金丝材/沥青混合料复合样品的自修复性能

图4为沥青混合料/形状记忆合金丝材复合材料制备的车辙试样变形恢复特性。其中未复合形状记忆合金丝材的空白参照试样SP-0的变形恢复量与变形恢复率都很低,材料总的变形量为 1.23 mm 时,加热到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以后平均的变形恢复量小于 0.1 mm ,平均变形恢复率不到6%。铺设单层形状记忆合金丝材的SP-1样品变形恢复量与变形恢复率相较于SP-0样品得到显著的提高,SP-1样品在变形深度为 4 mm 的情况下,平均变形恢复量为 0.73 mm ,变形恢复率为18.3%。对于铺设双向双层形状记忆合金丝材的SP-3样品,其变形恢复量与变形恢复率进一步提高。SP-3样品初始平均车辙变形深度为 3.33 mm 。加热到 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后平均形状恢复量为 0.89 mm ,平均恢复率为26.7%。

图4中,SP-0为未复合形状记忆合金丝材的车辙试样,SP-1为铺设单层形状记忆合金丝材的车辙试样,SP-2为铺设双层相互垂直形状记忆合金丝材的车辙试样。

形状记忆合金/沥青混合料复合车辙样品的自修复特性与形状记忆合金丝材的形状记忆效应有关。从图4可知,形状记忆合金丝材在拉伸到10%时有3.9%的形变在卸载后得到恢复,加热到马氏体逆相变温度以上后进一步显示出约4%的形状记忆效应,将这种丝材与沥青混合料复合后,记忆合金一方面提高了车辙试样的承载能力,另一方面在车辙试样产生变形后形状记忆合金丝材通过马氏体逆相变对沥青混合料提供形状恢复的力,促进车辙试样的形状恢复。

上述实验证实形状记忆合金丝材能够显著提高沥青混合料的形状恢复率,但是车辙试样整体的形状恢复率仍然偏低,形状记忆合金丝材的形状记忆效应尚未得到充分的利用,进一步提高复合材料的形状恢复率可以从提高形状记忆合金丝材与沥青混合料的界面结合力方面进行改进。

3 结论

利用形状记忆合金丝材与沥青混合料复合制备了具有自修复功能的智能沥青路面,采用车辙变形恢复试验研究了形状记忆合金丝材用量及铺设方式对车辙试样变形恢复性能的影响。结果表明,形状记忆合金丝材在预拉伸应变为10%时通过可逆的马氏体相变显示出7.8%的可恢复应变,将这种形状记忆合金丝材与沥青混合料复合能够提高车辙试样的形状恢复率,形状记忆合金的铺设方式对试样的形状恢复率也有影响,其中铺设双层相互垂直形状记忆合金丝材的复合材料样品形状恢复率高于只铺设单层单向形状记忆合金丝材的复合材料的形状恢复率。

参考文献:

- [1] JANKE L, CZADERSKI C, MOTAVALLI M, et al. Applications of shape memory alloys in civil engineering structures—overview, limits and new ideas[J]. *Materials and Structures*, 2005, 38(5): 578–592.
- [2] HAN B, WANG Y, DONG S, et al. Smart concretes and structures: a review[J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 2015, 26(11): 1–43.
- [3] WAYMAN C. Shape memory alloys[J]. *MRS Bulletin*, 1993, 18(4): 49–56.
- [4] OTSUKA K, REN X. Physical metallurgy of ti ni-based shape memory alloys[J]. *Progress in Materials Science*, 2005, 50(5): 511–678.
- [5] 刘志强. SMA 智能混凝土梁损伤自监测与自修复研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 64–85.
- [6] SONG G, MO Y, OTERO K, et al. Health monitoring and rehabilitation of a concrete structure using intelligent materials[J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(2): 309–314.
- [7] MOHD KHAIRI N A, AB HAMID H, IBRAHIM A. Self-healing shape-memory alloy(SMA) in reinforced concrete structures: a review [C]/YUSOFF M, HAMID A N H, ARSHAD F M, et al. *Proceedings of the International Civil and Infrastructure Engineering Conference*, Singapore: Springer Singapore, 2016: 641–652.
- [8] 崔迪, 李宏男, 宋钢兵. 形状记忆合金混凝土梁力学性能试验研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(2): 117–123.

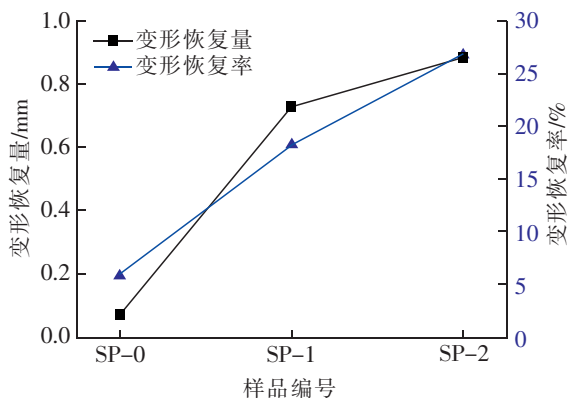


图4 沥青混合料/形状记忆合金丝材复合材料制备的车辙试样的变形恢复特性

Fig.4 Shape recovery properties of the wheel track samples made by bituminous mixture/ shape memory alloy wire composite

- [9] SAKAI Y, KITAGAWA Y, FUKUTA T, et al. Experimental study on enhancement of self-restoration of concrete beams using SMA wire[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2003, 5057: 178-186.
- [10] 刘少鹏, 黄卫东, 纪淑贞. 掺加纤维对橡胶沥青混合料疲劳性能的影响[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(5): 6-11.
- [11] 刘靖, 张劲泉, 郝庚任. 热沥青在不同界面间的层间粘结性能分析[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(3): 34-39.
- [12] LIU Q, SCHLANGEN E, GARCIA A, et al. Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete [J]. Construction & Building Materials, 2010, 24(7): 1207-1213.
- [13] LIU Q, GARCIA A, SCHLANGEN E, et al. Induction healing of asphalt mastic and porous asphalt concrete[J]. Construction & Building Materials, 2011, 25(9): 3746-3752.
- [14] WANG X, VERLINDEN B, HUMBEECK J. R-phase transformation in NiTi alloys[J]. Materials Science & Technology, 2014, 30(13): 1517-1529.
- [15] FAN G, CHEN W, YANG S, et al. Origin of abnormal multi-stage martensitic transformation behavior in aged ni-rich ti-ni shape memory alloys[J]. Acta Materialia, 2004, 52(14): 4351-4362.
- [16] KHALIL-ALLAFI J, DLOUHY A, EGgeler G. Ni₄Ti₃-precipitation during aging of NiTi shape memory alloys and its influence on martensitic phase transformations[J]. Acta Materialia, 2002, 50(17): 4255-4274.
- [17] RAVARI B K, NISHIDA M. In situ SEM studies of the transformation sequence of multistage martensitic transformations in aged Ti-50.8 at.% Ni alloys[J]. Philosophical Magazine, 2013, 93(18): 2279-2296.
- [18] RAVARI B K, FARJAMI S, NISHIDA M. Effects of Ni concentration and aging conditions on multistage martensitic transformation in aged Ni-rich Ti-Ni alloys[J]. Acta Materialia, 2014, 69(69): 17-29.

Deformation Characteristics of Smart Asphalt Pavement Embedded with Shape Memory Alloy Wires

Yan Guojie

(Shanghai Pudong Road and Bridge Construction Co., Ltd., Shanghai 201210, China)

Abstract: The asphalt mixtures with self-repairing function were developed by utilizing shape memory effect of shape memory alloys. The phase transformation behavior and shape recovery properties of the shape memory alloy wires were characterized by differential scanning calorimeter (DSC) and mechanical tester. The deformation recovery experiments were carried out on wheel track samples to verify the self-healing performance of the bitumen pavement material. The research results show that the shape memory alloy wires presents two-stage B2-R-B19 martensitic transformation and a recovered strain of 7.8% with 10% pre-strain. These shape memory alloy wires can improve the shape recovery rates of the wheel tracking samples significantly. The paving mode of the shape memory alloy wires also plays an important role in the shape recovery rate of the asphalt mixtures. Finally, the wheel tracking samples paved with bidirection and double-layer shape memory alloy wires show higher shape recovery rate than that of samples paved with one-direction and one layer shape memory alloy wires.

Key words: smart asphalt road; shape memory alloy; self-repairing; deformation characteristics; martensitic phase transformation