

Cu 基形状记忆合金的应用进展

黄海友¹, 王伟丽¹, 刘记立², 谢建新^{1,2}

(1. 北京科技大学 现代交通金属材料与加工技术北京实验室, 北京 100083)

(2. 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)



谢建新

摘要: 形状记忆合金作为一种智能型功能材料, 自1962年首次获得应用以来, 在众多相关领域得到了越来越多的关注和应用。Cu基形状记忆合金以其良好的形状记忆性能、优秀的导电导热性能、相变温度可调范围宽以及价格低廉等诸多优点, 成为具有重要发展潜力的一类形状记忆合金。近几年, 智能系统的迅速发展和高性能Cu基形状记忆合金的开发较大的推动了Cu基形状记忆合金的应用。综述了近5年Cu基形状记忆合金在交通运输、机械制造、土木建筑、生物医疗等方面的最新应用实例, 并对其未来发展方向进行了展望。

关键词: 综述; Cu基形状记忆合金; 超弹性; 马氏体相变; 应用

中图分类号: TG139.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2016)12-0919-08

Progress on the Applications of Cu-Based Shape Memory Alloys

HUANG Haiyou¹, WANG Weili¹, LIU Jili², XIE Jianxin^{1,2}

(1. Beijing Laboratory of Metallic Materials and Processing for Modern Transportation, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Shape memory alloys (SMAs), as a kind of intelligent functional materials combining with perception and driving function, are more attention to and widely used in various fields since the first application in 1962. Cu-based SMAs are the most potential ones for large-scale industrial applications because of their good shape memory properties, high electrical and thermal conductivities, wide-range transformation temperature and low cost, etc. In recent years, the applications of Cu-based SMAs are booming with the rapid developments of the intelligent system and high performance Cu-based SMAs. This paper reviewed the typical applications of Cu-based SMAs in recent five years in transportation, machinery, civil construction, biomedical devices, etc. Finally, the future development for Cu-based SMAs was also discussed.

Key words: review; shape memory alloy; superelasticity; martensitic transformation; application

1 前言

1963年, 美国海军武器实验室的Buehler等^[1]开发出具有应用价值的Ni-Ti形状记忆合金, 开启了形状记忆合金的实用阶段。从此, 形状记忆合金开始广泛应用

于航空航天、电子通信、医疗卫生、机械制造、能源化工、土木建筑以及日常生活等众多领域^[2,3], 有关形状记忆合金研究的科技成果逐年递增。进入21世纪后, 随着智能材料、智能机构研究的兴起, 将形状记忆合金的应用推向了更广泛的领域^[4], 相关的基础理论研究、新材料开发及应用的论文、专利等呈爆发式增长^[5]。图1是对1960~2013年全球所发表的形状记忆合金相关论文和美国申请专利的统计(数据来源: SCOPUS和USPTO数据库), 预期2010~2019这10年间, 相关论文和专利数量将是上一个10年(2000~2009)的3倍^[6]。科学技术的发展推动了形状记忆合金产业的飞速发展, 记忆合金材料全球市场贸易额在2010年已达到196亿美元, 预计到

收稿日期: 2015-10-19

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0700505); 国家自然科学基金项目(51574027); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-14-089A2)

第一作者: 黄海友, 男, 1979年生, 副研究员

通讯作者: 谢建新, 男, 1958年生, 中国工程院院士, 博士生导师, Email: jxxie@mater.ustb.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.12.06

2016 年会达到 400 亿美元, 年增长率将达到 12.8%^[5]。

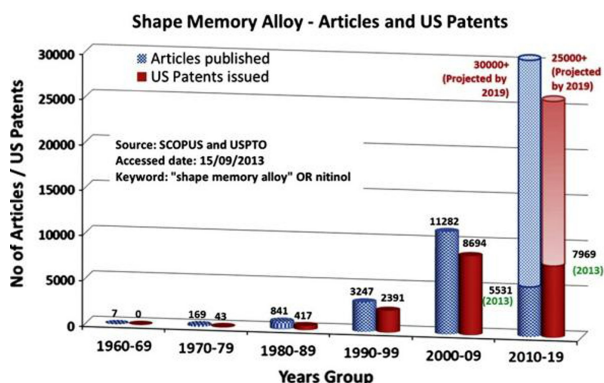


图1 形状记忆合金相关论文和美国专利统计和预测^[6]

Fig. 1 Number of “Shape Memory Alloy” articles and patents by years-group^[6]

在目前已得到实际应用的 Ni-Ti、Cu 基和 Fe 基形状记忆合金 3 大体系中, Ni-Ti 形状记忆合金形状记忆性能优异, 强度、韧性和耐蚀性好, 实际应用也最多, 但其原料成本和制备加工成本高昂, 限制了其作为普通产品的大规模应用。Fe 基形状记忆合金的价格虽然低, 合金强度也很高, 但其相变温度可调范围窄, 形状记忆性能稳定性差, 生产过程也较复杂, 虽然也具有应用前景, 但目前仍停留在实验室阶段。

Cu 基形状记忆合金是已发现的形状记忆合金材料中种类最多的一类, 主要可分为 Cu-Al 系和 Cu-Zn 系, 其中最具实用价值的是 Cu-Zn-Al、Cu-Al-Ni 和 Cu-Al-Mn 3 大类。Cu 基形状记忆合金具有形状记忆性能优良, 价格低廉(只有 Ni-Ti 合金的 1/10)、导电和导热性能良好、相变温度可调范围宽等诸多优点^[3]。目前, 除了长期植入型医疗器件应用和部分反复使用次数高或使用条件苛刻领域的工业应用只能依靠 Ni-Ti 合金来完成, 其他领域的应用, Cu 基形状记忆合金均可完成。另外, Cu 基形状记忆合金由于成本低廉、易加工、导热导电性能和阻尼性能良好等优点, 在电子通信、机械制造、土木建筑及日常生活等应用领域具有一定的优势, 例如由于对热敏感性高, 相变温度可控范围广, 使用 Cu 基形状记忆合金制造的温控器件结构简单、灵敏度高、可靠性好^[7], 已广泛应用于温室天窗开闭器^[8]、恒温自动控制器、控温水阀^[9]、电加热水壶控制器、百叶窗或遮阳张合装置^[10]、空调风向调节器、散热器阀门、化学反应温度自动控制器、对流电子炉中气流调节器和冰箱冷柜自动开关等。本文主要综述了近 5 年来 Cu 基形状记忆合金在交通运输、机械制造、土木建筑、生物医疗等领域的典型应用实例。

2 交通运输

在现代交通运输中, 出于对安全、舒适和性能的需求,

传感器和驱动器的应用越来越多。新兴的线驱动技术为形状记忆合金驱动器在汽车制造业中替代电磁驱动器提供了广泛的应用机遇^[11, 12]。表 1 所列为近 5 年来形状记忆合金在交通运输领域中的代表性应用。形状记忆合金制成的器件相比传统的机电控制器件具有更简便、重量和价格更低的优点, 如汽车中的加油口盖, 采用热弹性的形状记忆合金丝进行驱动相比电机驱动, 更快捷、无噪音、质量更小、安装所需的空间更小^[13]。从表 1 中可以看出, 除了如散热器、离合器、阀门和转子等作为传感器和驱动器应用外, 还可利用形状记忆合金的超弹性可吸收大量能量以及高应变恢复的特性, 用于门、保险杠和机翼等抗冲击和碰撞结构器件, 如用形状记忆合金制作的飞机翼鳍^[14, 15]可降低飞机在气流中所受的振动。图 2 所示为形状记忆合金制成的可变形飞机机翼, 可以根据飞行条件改变驱动形状记忆合金弹簧, 改变机翼形状, 使飞机飞行更安全, 平稳, 同时降低油耗。

表 1 形状记忆合金在汽车、航空航天领域中的存在和潜在应用

Table 1 The existing and potential applications of SMAs in automotive and aerospace

Application fields	Parts	References
Automotive applications	Clutch	[17, 18]
	Locking mechanism	[20]
	Fuel door	[13]
	Valves	[22]
	Battery	[25]
	Drivetrain	[28]
	Panels	[31]
	Wiper	[33, 34]
	Sunroof/Sunshade	[10]
	Piston rings	[37, 38]
Aerospace applications	Seats	[16]
	Grill/Louver	[19]
	Airbags	[21]
	Aerostructure/Composite body	[23, 24]
	Wing/Fin/Stabilizer	[14, 26, 27]
	Rotor	[29, 30]
	Landing gear	[32]
	Hydraulic lines	[35]
	Flap edge	[36]
	Refueling hose	[39, 40]

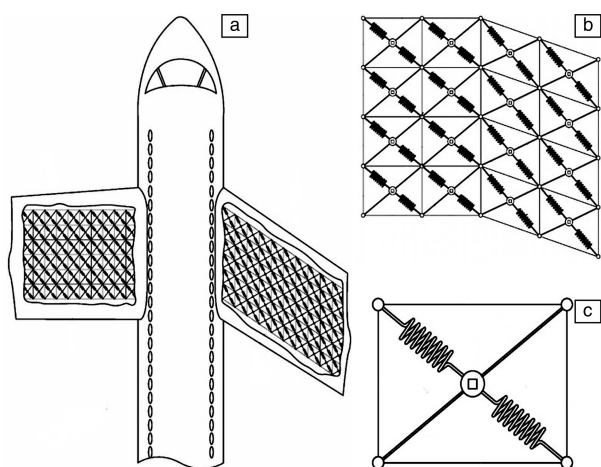


图 2 形状记忆合金制成的可变形飞机机翼^[27]: (a) 可变形机翼整体示意图; (b) 驱动机翼变形的可伸缩栅格阵列; (c) 一个可伸缩栅格

Fig. 2 The aircraft's wing makes from SMA^[27]: (a) schematic view of an aircraft having wings constructed using morphing grid; (b) a morphing grid including a plurality of coupled morphing units and (c) a SMA morphing unit

3 机械制造

随着现代工业,特别是微型机器人和计算机技术的飞速发展,人们对微观领域的探索不断加深,研究发展适于微型区域的驱动元件日渐重要,对体积小、重量轻、高功率密度电机的需求与日俱增。传统电磁式电机由于存在电磁干扰以及重量、体积等方面的局限性,很难满足这些特殊的需要。为此,人们研制了利用功能材料构成的各类新型电机,如形状记忆合金电机、压电效应电机、电致伸缩电机和磁致伸缩电机等。其中压电、电致伸缩和磁致伸缩电机反应速度较快,但输出位移小,使用受到了一些限制。比较而言,形状记忆合金电机输出时,在相变驱动力作用下,相变产生的体积变化导致的位移大,同时有较高的功率-质量比,具有广阔的应用前景,如表 2 所示。

形状记忆合金电机通常由驱动元件和执行机构两部分组成。驱动元件即形状记忆合金材料,多为丝材、片材或管材,可根据需要做不同形状、规格的驱动元件,常使用的有直线张力金属丝型、螺旋压缩弹簧型、螺旋

表 2 不同类型驱动器的性能比较^[6, 41, 42]

Table 2 Comparison of actuator performance^[6, 41, 42]

Actuator type	Stress (MPa)	Strain (%)	Efficiency (%)	Bandwidth (Hz)	Work per Volume (J/cm ³)	Power per Volume (W/cm ³)
Cu-based SMAs	50 ~ 300	2 ~ 16	3	3	10	30
Piezoceramic	35	0.2	50	5000	0.035	175
Single crystal piezoelectric	300	1.7	90	5800	2.55	15,000
Human Muscle	0.007~0.8	1~100	35	2~173	0.035	0.35
Hydraulic	20	50	80	4	5	20
Pneumatic	0.7	50	90	20	0.175	3.5

拉伸弹簧型、悬臂弹簧型、盘状弹簧型、螺旋扭转弹簧型、扭转金属丝型和扭转金属管型^[43]。传统的形状记忆合金电机结构比较简单,有单向型和双向型两种。多数形状记忆合金电机利用了形状记忆合金的单程形状记忆效应,即温度升高时产生形状回复,温度降低时无形状变化。若要电机产生双程往复运动,需要借助偏动或差动装置重新进行预变形,双向型形状记忆合金电机如图 3 所示。由安装在同一支架上的形状记忆合金弹簧和不锈钢弹簧组成。在加热过程中形状记忆合金弹簧推动不锈钢弹簧,在冷却过程中的形状记忆合金弹簧回缩,而不锈钢弹簧输出回复力,同时带动机构,如此反复便可向实现电机双轴向运动^[44]。

与传统基于电磁原理的电机相比,形状记忆合金电机具有以下优点:①输出功率/重量比大、质量越小,优势越

明显,适宜制造微型机械;②机构简单,形状记忆合金电机可以通过合金的热弹性马氏体相变直接输出力和位移,不需要任何减速机构;③无污染和噪音,由于采用形状记忆合金驱动不需要减速齿轮这样的摩擦机械,使电机可以在不产生磨屑和噪音的状态下工作;④传感功能,利用形状记忆合金自身物理参数的变化,可以监测到温度的变化和相变的发展过程,并可以进一步获悉输出力的大小,由于将驱动与传感功能集于一身,形状记忆合金不需要附加力和温度传感器就可实现反馈控制;⑤低压驱动,可采用 5 V 以下电源加热驱动形状记忆合金,这比压电和静电电机的电源电压要低得多,这样控制与驱动电路可以采用同一个低压电源。形状记忆合金电机具有独特的优点及良好的性能,随着对其设计理论及控制的研究不断的深入,形状记忆合金电机得到了快速的发展,应用领域日益广泛。

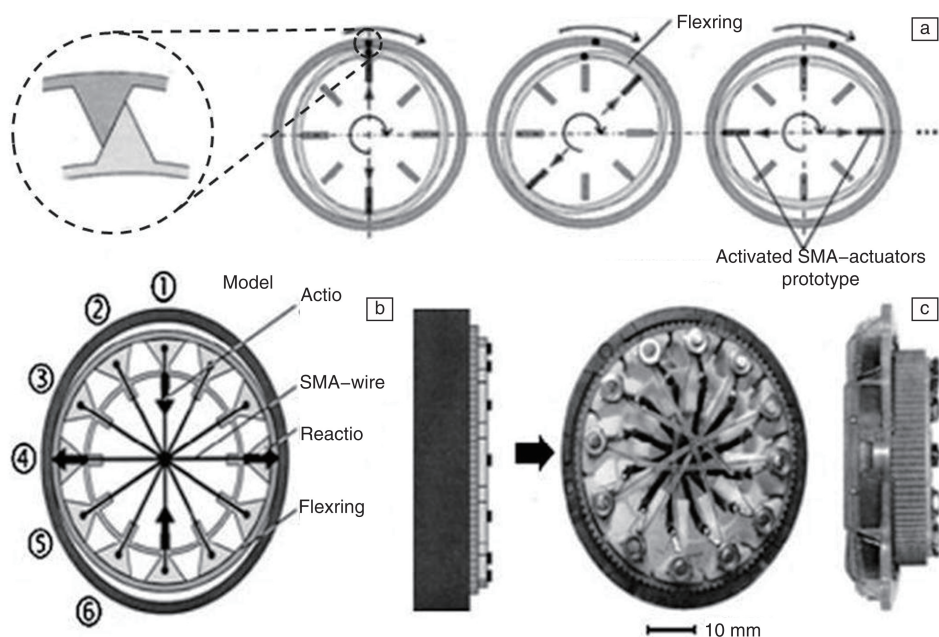


图 3 双向形状记忆合金电机的功能原理和原型^[44]: (a) 原理示意图, (b) 结构示意图, (c) 实物照片

Fig. 3 Functional principle (a), structure model (b) and prototype (c) of the SMA drive system

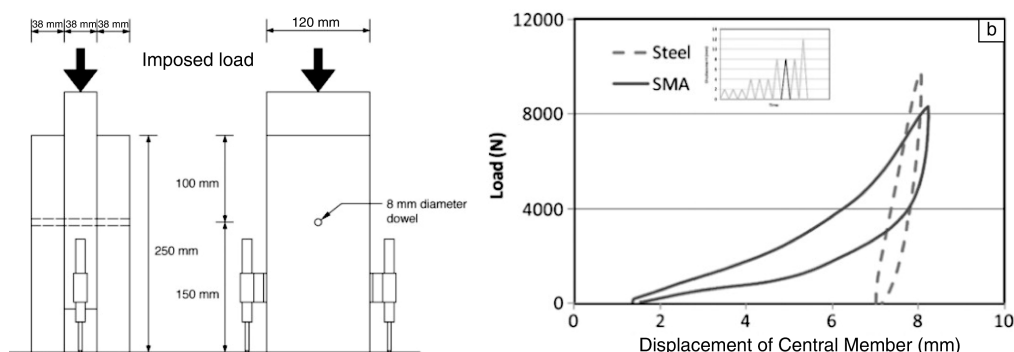
除了利用形状记忆合金的驱动感知特性外, 利用其高阻尼性能, 可以对机械设备进行维稳。Araki Y 等^[45]利用 Cu-Al-Mn 形状记忆合金具有 8% 的恢复应变大小和 17% 以上的断裂应变, 设计了包含 Cu-Al-Mn 形状记忆合金棒材固定和连接的结构件, 并将 Cu-Al-Mn 形状记忆合金替换为钢索, 进行了对比实验。结果表明, 相比一般的钢索固定, 带超弹性 Cu-Al-Mn 合金固定的结构件在大的震动中具有更高的对中稳定能力以及震动后不会出现残余变形^[46], 而传统钢索固定的结构件发生了钢索断裂和倾斜。在精密仪器的设计中, 保证精密仪器在使用过程中的稳定性是确保仪器性能和测量精度的重要设计要求, 通常采用复杂的机电器件制成的稳定装置 (如阻尼器、减震器等)。如果将形状记忆合金应用于这些稳定装置的设计中, 可设计出具有不同功能的结构功能一体化器件。本文作者课题组发明的一种可用于精密仪器的各向异性减震装置^[47], 这种装置利用各项异性的柱状晶组织 Cu-Al-Mn 形状记忆合金作为减震元件, 将其高超弹性的方向缓冲精密仪器的上下颠簸, 而将其高强度的方向 (垂直或斜向于高超弹性方向) 维持水平或斜向的稳定。

4 土木建筑

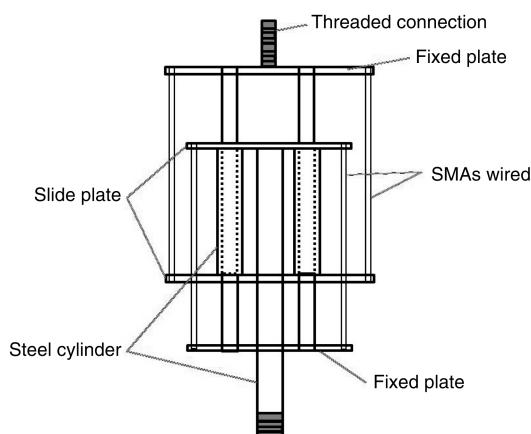
地震、台风和海啸等自然灾害对人类生命和财产安全构成巨大威胁, 其中建筑物的破坏和倒塌是造成灾难的主要原因之一, 而道路桥梁的破坏切断了灾区交通生命线, 造成救灾工作的巨大困难, 进一步使灾情加剧。

在土木建筑中, 当钢筋混凝土结构遭到一定应力冲击时, 有时即使不发生断裂或坍塌, 也会在大范围内产生裂纹, 使得修复变得十分困难和不经济。目前, 在建筑物的抗震减震设计中, 常把对地震作用的“硬抗”变为“疏导”来隔离和消耗地震能量, 可以避免传统结构加固方式仅靠自身塑性变形吸收能量的缺点, 使得建筑物上部结构在强震动中只发生刚体摇晃而基本不发生变形, 从而保证建筑物自身的安全。如果将形状记忆合金置于土木建筑结构中, 不仅能在结构受到外界振动影响而出现变形、裂纹、损伤时, 较大部分的能量都可被形状记忆合金吸收并耗散掉, 而且还可以利用形状记忆合金的功能特性, 实现对结构的自我诊断, 因此显著增加了结构的安全可靠性。在工程实践中, 最常见的是将形状记忆合金安置于结构层间、底部或建筑物四角等受地震力作用较大的部位, 实现对地震能量的吸收和消耗^[48]。有关研究结果显示, 耗能器安装形状记忆合金结构后, 耗能器可吸收约为三分之二的地震能量, 并显著抑制结构的位移^[49]。为此越来越多的形状记忆合金减震吸能装置应用于建筑物和桥梁的设计中^[2, 45, 50-52]。

Murakami S 等^[53]将 Cu-Al-Mn 记忆合金做成建筑用销钉, 不仅具有很好的对中能力 (Recenterable Effect) 和可修复能力, 而且使被连接物件在长期使用中或振动中具有很高的能量耗散能力, 如图 4 所示, 但这种记忆合金销钉的强度和硬度均相比钢钉要低, 需要提高记忆合金的强度和硬度以应用于高强度连接的需要。

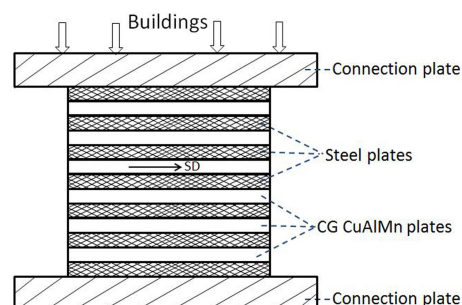
图 4 形状记忆合金销钉结构图 (a) 及其力-位移曲线 (b)^[53]Fig. 4 The schematic construction (a) and the load-displacement curve (b) of SMA dowel^[53]

国内王风华等^[54]利用形状记忆合金的超弹性滞回耗能特性,根据古塔的受力和主要突变特点设计提出一种适合古塔的新型形状记忆合金阻尼器,如图 5 所示,通过试验得出该阻尼器的双线性恢复力模型,数值分析某古塔模型原型结构和加形状记忆合金阻尼器结构的地震反应。结果表明:新型 SMA 阻尼器能有效降低古塔的地震反应,并对新型形状记忆合金阻尼器在古塔中布置的数量和位置进行了优化分析,为形状记忆合金阻尼器被动控制系统在古塔等类似古建筑结构中的实际应用和设计提供借鉴。

图 5 古塔用形状记忆合金阻尼器^[54]Fig. 5 SMA damper for protecting ancient tower^[54]

本文作者利用柱状晶组织 Cu-Al-Mn 高的超弹性各向异性,制备了各向异性器件应用于土木建筑中做减震吸能的同时,对上层建筑进行承重^[55, 56]。图 6 所示为一个简单的各向异性形状记忆合金的记忆合金隔震支座,由各向异性柱状晶 Cu-Al-Mn 板材(板材轧向沿高超弹性方向 SD)和钢板进行叠层构成。在铅垂方向上,利用 CG Cu-Al-Mn 板材厚度方向的较高强度来承受对建筑物重量的支撑作用,同时利用其较高的超弹性吸收纵向震

波的能量;在水平方向上,利用柱状晶 Cu-Al-Mn 板材沿 SD 方向的高超弹性来提供大的可恢复应变,以保证隔震支座水平方向的稳定性,且在经受较大幅度的水平摇摆后还能自动复位。

图 6 柱状晶组织 Cu-Al-Mn 形状记忆合金制备的各向异性建筑物隔震支座简图^[56]Fig. 6 Schematic diagram of isolation bearing in buildings including anisotropic CG Cu-Al-Mn plates^[56]

另外,形状记忆合金在工程应用中常与钢、铝等其它金属基体,聚合物基体、水泥基体以及其它增强纤维复合而成复合材料。在复合时,Cu 基形状记忆合金良好的可加工性能使其易于加工成丝状、带状、管状等各种形式。不同形式的记忆合金可以与结构有不同的连接方式。它既可以像玻纤或碳纤那样埋入基体材料,也可以离散地连接于结构上,还可以张贴于结构表面,可满足各种应用需求。

形状记忆合金及其复合材料除能够实现对结构振动的“被动疏导”,还能够通过其具有驱动特性,实现对结构的“主动控制”。如日本学者 Takazawa 和 Shrestha 等^[51, 52]将 Cu-Al-Mn 合金加入混凝土做成的房屋横梁、地基、隔离墙等,除可以在地震、台风或其他严重灾害中的起到抗震作用,而且能够对已发生开裂的结构实施

修复,如图 7 所示。相比钢筋增强横梁,在震动产生裂纹(5~6 mm 宽),再卸载后,钢筋增强横梁仅愈合了 0.5 mm,而添加有 Cu-Al-Mn 合金棒材的横梁则在卸载后愈合了 4.7 mm,恢复率高达 94%,表明在地震后形状

记忆超弹性合金增强横梁具有更强的裂纹愈合能力,能够抵挡和最大限度缓和地震对建筑物造成的损坏,从而减少对生命财产的损失,该项设计已应用于日本的建筑、桥梁材料(结构)设计中。

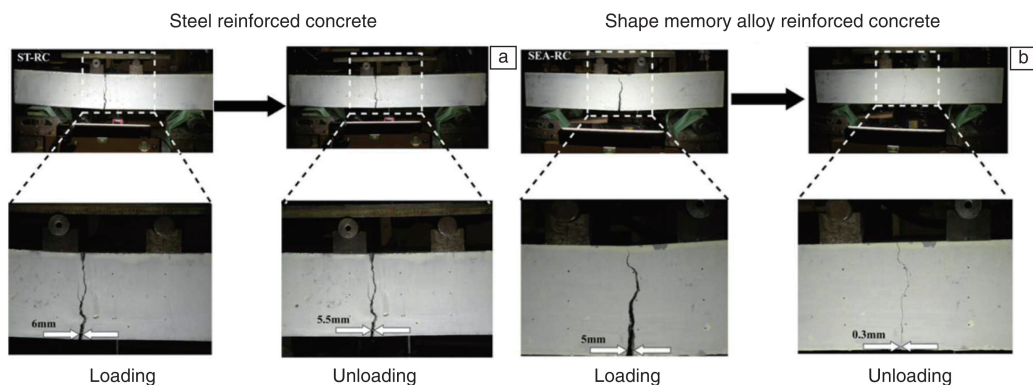


图 7 钢筋增强 (a) 和形状记忆合金增强 (b) 的混凝土结构在震动拉裂后的恢复情况对比^[51]

Fig. 7 Comparison of recovery of steel reinforced concrete (a) and SMA reinforced concrete (b)^[51]

5 生物医疗等其他应用

形状记忆合金在医学领域的应用极为广泛,例如外科医生对病人手术前要探测人体内的情况,如内窥镜检查。常规的内窥镜需要施加外力进入人体,病人很痛苦,操作技术要求高。而使用形状记忆合金电机制作的微型内窥镜可以很方便地进入体内进行诊断,甚至可以对体内的病变进行微创外科手术,病人痛苦小。目前,在生物医疗领域应用主要是 Ni-Ti 形状记忆合金,但近几年,以 Cu 基形状记忆合金为基体的复合材料在一些非长期植入性器件制造中逐渐显示出应用前景,并已有一些应用实例出现。如用 Cu 基形状记忆合金制作的指甲支撑片和牙齿矫正器^[57],在 Cu-Al-Mn 合金外面包裹生物活性树脂用于肠管等内窥镜或药物传输等的引导丝和引导管^[58, 59],以及血栓过滤器、结石收集器、临时支架、缝针、绷带、手术夹子、假肢等。

除了以上的应用外, Cu 基形状记忆合金还可用于光学领域,例如可制成色调记忆配件。Cu-Al-Ni 在热弹性马氏体相变中具有色调记忆功能,随着在 -200~400 °C 的温度范围或在不同应力作用下调节,合金发生相变产生色调变化和记忆,可用于开发温度指示器和交变应力下的指示器^[7]。另外,在微电子领域,利用超弹性相变循环过程中引起的温度变化而设计的形状记忆合金制冷系统,可用于对微型电子产品实施冷却^[60]。

6 结 语

如前所述,易发生晶界开裂、强度低和疲劳寿命短是严重阻碍 Cu 基形状记忆合金应用的主要问题。近年来,

有关前两个问题的研究获得了较大的突破,已能够制备出达到 Ni-Ti 形状记忆合金的超弹性和强度水平的(超弹性应变大于 5%, 马氏体相变临界应力大于 650 MPa)的高性能 Cu 基形状记忆合金。但对改善 Cu 基形状记忆合金疲劳性能的研究进展仍然较为缓慢。在超弹性循环过程中,马氏体-母相界面与各种组织缺陷(例如空位、晶界、位错等)之间的交互作用是造成合金产生疲劳行为和发生疲劳破坏的重要原因,其中尤以与晶界的交互作用为甚。通过对合金晶界形貌和类型进行合理设计,制备具有与相界面交互作用弱的平直晶界形貌和低能晶界类型特征的合金组织,可能是改善 Cu 基形状记忆合金疲劳性能的一个有效途径。作者等人采用定向凝固方法制备的晶界平直,以小角度晶界类型为主的柱状晶组织 Cu-Al-Mn 合金试样在 4% 应变下循环拉伸 1000 次后,不可恢复应变小于 0.4%,表现出优异的抗疲劳性能。但更深入、系统的工作仍有待进行。

图 8 是对形状记忆合金不同应用领域的论文和专利数量统计,其中生物医疗领域的应用占形状记忆合金总应用的 60% 以上,而目前这个领域几乎完全被 Ni-Ti 合金所垄断,导致目前生物医疗用形状记忆合金产品价格高昂。近年来,随着 Cu 基形状记忆合金性能的不断提升,已在非长期植入性医疗器件、手术器械等应用领域获得了突破,如第 5 小节所述,但形成产业规模仍需时日。生物相容性差是阻碍价格低廉、性能优异的 Cu 基形状记忆合金扩大其在生物医疗领域应用的最大障碍。通过制备复合材料的方法可以解决 Cu 基形状记忆合金的生物相容性问题,第 5 小节中所提到树脂包覆 Cu-Al-Mn 形状记忆合金复合材料制造医用引导丝和引导管就非常

具有代表性。可以预见,随着 Cu 基形状记忆合金复合材料研究的不断发展,其在生物医学领域的应用必将越来越广阔。

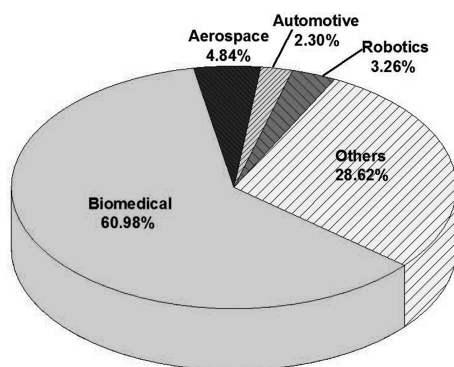


图 8 形状记忆合金专利涉及的应用领域统计^[6]

Fig. 8 Application areas of SMA^[6]

参考文献 References

- [1] Buehler W J, Gilfrich J V, Wiley R C. *Journal of Applied Physics* [J], 1963, 34(5): 1475-1477.
- [2] Yamauchi K. *Shape Memory and Superelastic Alloys: Technologies and Applications*[M]. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2011.
- [3] Otsuka K, Wayman C M. *Shape Memory Materials*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [4] Yang Dazhi (杨大智). *Smart Material and System (智能材料与智能系统)*[M]. Tianjin: Tianjin Press (天津出版社), 2000.
- [5] McWilliams A. *BCC Research Advanced Materials Report* [J], 2011: 161.
- [6] Mohd Jani J, Leary M, Subic A, et al. *Materials & Design* [J], 2013, 56: 1078-1113.
- [7] Li Zhou (李周), Wang Mingpu (汪明朴), Xu Genying (徐根应). *Cu-Based Shape Memory Alloy (铜基形状记忆合金材料)*[M]. Changsha: Zhongnan University Press (中南大学出版社), 2010: 203.
- [8] Lee S, Kim B. *Journal of Mechanical Science and Technology* [J], 2008, 22(1): 96-102.
- [9] Yu Yeqiu (余业球), Cai Lianshu (蔡莲淑), Yu Junhui (余峻辉), et al. *Journal of Guangdong University of Technology (广东工业大学学报)* [J], 2014(02): 117-120.
- [10] Alacqua S, Biasiotto M, Capretti G, et al. *Sunshade Device for Motor-Vehicles, with Shape Memory Actuator*[Z]. Google Patents, 2010.
- [11] Butera F, Coda A, Vergani G, et al. *Nanotec IT newsletter. Roma: AIRI/nanotec IT* [J], 2007: 12-16.
- [12] Butera F. *Advanced Materials & Processes* [J], 2008, 166(3): 37-40.
- [13] Neugebauer R, Bucht A E, Pagel K, et al. *Numerical Simulation of the Activation Behavior of Thermal Shape Memory Alloys*[Z]. International Society for Optics and Photonics, 201076450J.
- [14] Bil C, Massey K, Abdullah E J. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* [J], 2013, 24(7): 879-898.
- [15] Sofla A, Meguid S A, Tan K T, et al. *Materials & Design* [J], 2010, 31(3): 1284-1292.
- [16] Dankbaar F, Groenhage A. International, WO2015086088(A1)[P]. 2015-06-18. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20150618&CC=WO&NR=2015086088A1&KC=A1
- [17] Predki W, Bauer B. *Forschung im Ingenieurwesen* [J], 2010, 74(1): 41-47.
- [18] Mankame N D, Ulicny J C, Shivaram A C. USA, US2013270056(A1)[P]. 2013-10-17 https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20131017&CC=US&NR=2013270056A1&KC=A1
- [19] Toda H, Okai K, Ikeda T, et al. Japan, JP2015044560(A)[P]. 2015-03-12. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20150312&CC=JP&NR=2015044560A&KC=A
- [20] Alexander P W, Dallos Jr R, Culver R H, et al. USA, US2015052728(A1)[P]. 2015-02-26. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20150226&CC=US&NR=2015052728A1&KC=A1
- [21] Gheorghita V, G U Mpel P, Strittmatter J, et al. *Using Shape Memory Alloys in Automotive Safety Systems*[Z]. Springer, 2013: 909-917.
- [22] Waddell A M, Punch J, Stafford J, et al. *Applied Thermal Engineering* [J], 2015, 75(SI): 731-737.
- [23] Rotter D M, Nelson P E. USA, US2015123309(A1)[P]. 2015-05-07. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20150507&CC=US&NR=2015123309A1&KC=A1
- [24] Lyman W D, Koehler F B, Sanderson T M. USA, US2015108268(A1)[P]. 2015-04-23. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20150423&CC=US&NR=2015108268A1&KC=A1
- [25] Jones S D, Campbell J P, Janmey R M. *Battery Fluid Manager Using Shape Memory Alloy Components with Different Actuation Temperatures* [Z]. Google Patents, 2010.
- [26] Pitt D M, Eckstein N S. USA, US2015102161(A1)[P]. 2015-04-16. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20150416&CC=US&NR=2015102161A1&KC=A1
- [27] Gandhi U N. USA, US2015047337(A1)[P]. 2015-02-19. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20150219&CC=US&NR=2015047337A1&KC=A1
- [28] Mitteer D M. *Shifter with Actuator Incorporating Shape Memory Alloy* [Z]. Google Patents, 2010.
- [29] Hartl D J, Mooney J T, Lagoudas D C, et al. *Smart Materials and Structures* [J], 2010, 19(1): 15021.
- [30] Hartl D J, Lagoudas D C, Calkins F T, et al. *Smart Materials and Structures* [J], 2010, 19(1): 15020.
- [31] Browne A L, Johnson N L, Chernoff A B, et al. *Active Material Based*

- Concealment Assemblies*[Z]. Google Patents, 2011.
- [32] Jean-Eric B, Etienne M. France, FR2961876(A1)[P]. 2011-12-30 https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20111230&CC=FR&NR=2961876A1&KC=A1
- [33] Tang Yijun(唐益君). China, CN201420059036. 2[P]. 2014-8-6.
- [34] Zheng Haibo(郑海波). China, CN201120125851. 0[P]. 2012-1-18.
- [35] Diaz C E, Gerstler W D, Storage M R. US2015083367(A1)[P]. 2015-03-26. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20150326&CC=CA&NR=2924101A1&KC=A1
- [36] Larssen J V, Calkins F T. *Deployable Flap Edge Fence*[Z]. Google Patents, 2013.
- [37] Cefai J J. USA, US2015051547(A1)[P]. 2015-02-19. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?FT=D&date=20150219&DB=&locale=en_EP&CC=US&NR=2015051547A1&KC=A1&ND=4
- [38] Masao I. Japan, JP2012154465(A)[P]. 2012-08-16 https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=6&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20120816&CC=JP&NR=2012154465A&KC=A
- [39] Jozsef L A, Cornelius van S M, Richard C J. USA, US2015096642(A1)[P]. 2015-04-09. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=2&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20150409&CC=US&NR=2015096642A1&KC=A1
- [40] Martin E S. USA, US2015203210(A1)[P]. 2015-07-23. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20150723&CC=US&NR=2015203210A1&KC=A1
- [41] Lederlé S. *Dissertation for Master* [D]. Cambridge, MA, USA; Massachusetts Institute of Technology, 2002. 19
- [42] Tadesse Y. Electroactive polymer and shape memory alloy actuators in biomimetics and humanoids[Z]. International Society for Optics and Photonics, 2013868709.
- [43] Zhou Qinyuan(周钦沅). *Micromotors*(微电机)[J], 2013(06): 83-86.
- [44] Nespoli A, Besseghini S, Pittaccio S, et al. *Sensors and Actuators A: Physical* [J], 2010, 158(1): 149-160.
- [45] Araki Y, Endo T, Omori T, et al. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* [J]. 2011, 40(1): 107-115.
- [46] Araki Y, Shrestha K C, Maekawa N, et al. *Cu-Al-Mn Super-elastic Alloy Bars as Dissipative Brace System in Structural Steel Frame* [J]. 2012.
- [47] Huang Haiyou(黄海友), Liu Jili(刘记立), Xie Jianxin(谢建新). China, 201510295877. 2[P]. 2015-10-29
- [48] Di Jun(邸军). *Technology Innovation and Application*(科技创新与应用)[J], 2015(10): 299.
- [49] Zhou Jianxia(周剑霞), Liu Dongmei(刘冬梅). *Technology and Business*[J], 2014(07): 216.
- [50] Miller D J, Fahnestock L A, Eatherton M R. *Engineering Structures* [J], 2012, 40(0): 288-298.
- [51] Shrestha K C, Araki Y, Nagae T, et al. *Smart Materials and Structures* [J], 2013, 22(0250252).
- [52] Shrestha K C, Araki Y, Nagae T, et al. *Eartquakes and Structures* [J], 2011, 2(3): 233-256.
- [53] Murakami S, Komatsu K, Araki Y, et al. *Wood and Fiber Science* [J], 2013, 45(2): 1-5.
- [54] Wang Fenghua(王风华), Huang Xiangyun(黄襄云), Zhou Fulin(周福霖). *Building Science Research of Sichuan*(四川建筑科学研究)[J], 2012(03): 188-192.
- [55] Huang Haiyou(黄海友), Liu Jili(刘记立), Xie Jianxin(谢建新). China, 201510296782. 2[P]. 2015-10-29
- [56] Liu J L, Huang H Y, Xie J X. *Materials & Design* [J], 2015, 85: 211-220.
- [57] Ishibashi M, Tabata N, Suetake T, et al. *Journal of Dermatological Treatment* [J], 2008, 19(5): 291-292.
- [58] Sutou Y, Omori T, Kainuma R, et al. *Materials Science and Technology* [J], 2008, 24(8): 896-901.
- [59] Sutou Y, Omori T, Furukawa A, et al. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials* [J], 2004, 69B(1): 64-69.
- [60] Beek van J, Birkelund M. USA, US2015354719(A1)[P]. 2015-12-10. https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20151210&CC=US&NR=2015354719A1&KC=A1

(本文为本刊约稿, 编辑 盖少飞)