

形状记忆合金在非含能分离连接装置中的应用进展

武晓娟, 陈文龙, 张小兵, 刘丽娟, 陈小松, 索亮

陕西应用物理化学研究所, 西安 710061

摘要 综述了形状记忆合金(SMA)的特性、种类、制备工艺、性能调控等方面研究进展及其在非含能解锁分离装置中的优势和应用现状。总结了形状记忆合金工作的基本原理, 并对比分析了当前常用合金系列的特点和应用前景; 介绍了形状记忆合金的主要制备工艺, 特别是喷射铸造、粉末冶金, 以及增材制造等工艺在高性能SMA制备中的研究现状; 分析了合金化组分设计、热处理和塑性加工等典型工艺的对SMA力学和形状记忆性能的影响规律, 总结了SMA性能调控研究现状; 特别介绍了形状记忆合金在非含能解锁分离装置中应用现状, 并从推广应用角度展望了SMA材料和机构研究急需解决的关键问题。

关键词 形状记忆合金; 非含能分离连接装置; 制备工艺; 性能优化

形状记忆合金(shape memory alloys, SMA), 是一种能够在温度和应力作用下发生相变的新型功能材料, 具有独特的形状记忆效应^[1-2], 1932年Olander^[3]在金镉合金中首次观察到了形状记忆效应。经过近100年的发展, 研究人员相继又在Au-Cu^[4]、Ni-Al^[5]、Fe-Mn^[6]、Ti-Ni^[7]等合金系统中发现了形状记忆效应。自1969年SMA开始逐渐应用在工业领域, 首先是美国在某种喷气式战斗机的油压系统中使用了Ti-Ni形状记忆合金接头, 成功实现了油路系统的高可靠快速连接, 同时“阿波罗”11号登月舱也采用形状记忆合金成功实现了天线装置的折

叠和展开^[8]。随着记忆合金变形机制研究的深入、合金体系的逐渐丰富、性能调控手段的多元化, 形状记忆合金开始在多个领域得到了广泛应用, 如航空航天、汽车工业、医疗器械、建筑材料等。

分离连接装置是兼有连接、解锁和分离功能的机构, 广泛应用于火箭、导弹和航天器等^[8], 分离连接装置按规定程序完成解锁和分离动作, 将已完成工作使命的部件(如助推器、火箭的下面级、运载器和航天器的整流罩等)抛掉, 当前常用的分离连接装置多采用火工品提供驱动力, 如爆炸螺栓、爆炸索等^[9-10]。火工分离连接装置存在冲击大, 爆破过

收稿日期: 2022-07-01; 修回日期: 2022-08-11

作者简介: 武晓娟, 工程师, 研究方向为航空航天分离解锁装置, 电子信箱: wuxiaojuan@163.com

引用格式: 武晓娟, 陈文龙, 张小兵, 等. 形状记忆合金在非含能分离连接装置中的应用进展[J]. 科技导报, 2023, 41(13): 89-99; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.13.009

程中产生破片和烟尘等缺点,对于精密仪器原部件、光敏器件等存在潜在的损伤危险^[11]。同时火工品为一次性触发装置,不同批次产品质量差异会导致触发稳定性无法保证。新型航天器高精密设备对低冲击、无污染、可重复使用分离连接的需求,使得非含能分离连接装置成为新的研究热点。形状记忆合金由于具有承载力大、释放快、功耗低、冲击低、可复位、无污染的技术特点,是理想的非含能分离装置材料^[12]。本研究对形状记忆合金工作原理、分类、制造工艺、性能调控及其在非含能分离连接装置中的应用进行分析,并就现阶段基于形状记忆合金的非含能分离连接装置研究中亟待解决的关键问题进行讨论。

1 形状记忆合金原理和分类

1.1 形状记忆合金形状记忆原理

形状记忆效用的本质是SMA的无扩散固相马氏体相变,具有体心立方结构的奥氏体(austenite)和面心立方结构的马氏体(martensite)在应力或温度作用下相互转化过程,这种转化称为“马氏体热塑性转化”^[13]。马氏体晶体结构是通过施加机械载荷或降低温度从奥氏体中获得,这种转变称为正相变。马氏体相具有非孪晶马氏体和孪晶马氏体2种变体,其中孪晶马氏体可由奥氏体在零应力状态下直接降温形成。相反地,通过加热或减少载荷恢复奥氏体相,即为逆相变。奥氏体、孪晶马氏体和非孪晶马氏体三相之间转换关系如图1^[14]所示。

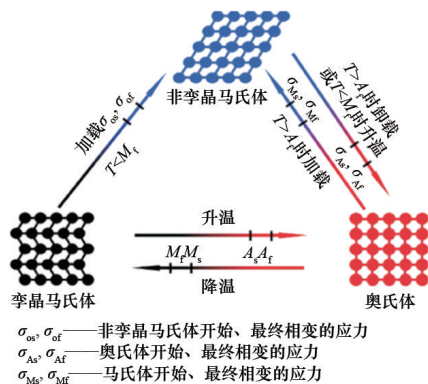


图1 奥氏体、孪晶马氏体和非孪晶马氏体三相之间转换关系

图1中 M_s 、 M_f 、 A_s 、 A_f 分别为马氏体、奥氏体在无应力条件下开始、最终相变临界温度。对于多数SMA, $M_f < M_s < A_s < A_f$ 。无应力条件下冷却时, SMA将从100%奥氏体的单相成分(温度等于或大于 A_f 且奥氏体含量 $\xi=0$)开始,达到马氏体和奥氏体以不同比例共存的状态,最终形成100%马氏体相(温度等于或低于 M_f 且 $\xi=1$),加热时发生相反过程。而对于有应力状态下晶体结构转变需要更多能量,上述临界温度会相应增加。基于上述相变导致的SMA材料的宏观力学行为可以分为以下2类。

1) 形状记忆效应。发生马氏体相变的合金形变后,被加热到最终温度以上,使低温的马氏体逆变为高温母相而恢复到形变前固有形状,或在随后的冷却过程中通过内部弹性能的释放又返回到马氏体形状的现象^[15],马氏体相变不仅由温度引起,也可以由应力引起,这种由应力引起的马氏体相变称为应力诱发马氏体相变,且相变温度同应力呈线性关系。

2) 伪弹性效应。当形状记忆合金在高温相奥氏体状态下受到外力发生较大变形,去除外力后, SMA变形过程中应力应变曲线并不是线性的,会产生耗散能,但是大应变仍旧可以通过滞后环完全恢复(可恢复应变可达6%~8%),其本质仍是相变引发的形状回复,因此又被称为伪弹性^[14]。

1.2 形状记忆合金分类

最早发现形状记忆效应的Au-Cd合金,以及之后出现的Ag-Cd合金,都采用了大量的贵金属元素,高成本制约了SMA的推广应用。随着低成本Cu基、Fe基、TiNi基等形状记忆合金的出现,针对SMA的制备技术和应用研究得到了快速发展。常见的SMA可以简单划分为以下系列。

1) TiNi基合金。TiNi基合金由于性价比高、形状记忆特性好、强度高、生物相容性好等优点适用领域广泛,是当前应用最广泛的SMA材料。

2) Cu基合金。包括Cu-Zn系, Cu-Al系合金等。与TiNi基合金相比, Cu基SMA加工性更好,且成本更低,但也存在晶粒粗大、热稳定性差及记忆性能易衰退等缺点。

3) Fe基合金。包括Fe-Pt、Fe-Ni-Co、Fe-Mn-

Si、不锈钢等合金系列。Fe基SMA的价格低于TiNi基合金,同时比Cu基合金的记忆性能更好,因此是非常有应用前景的低成本、高性能SMA材料。

4) 其他系合金。早期的Au-Cd、Ag-Cd系可

以满足某些特殊功用,如Ti-Pd、Ti-Pt等高温SMA材料等。

表1给出了部分SMA材料的特性。

表1 部分SMA材料的特性

合金系列	成分	$A_s/^\circ\text{C}$	$A_f/^\circ\text{C}$	$M_s/^\circ\text{C}$	$M_f/^\circ\text{C}$	$A_f-M_s/^\circ\text{C}$	强度/MPa	可恢复应变/%	文献
TiNi基	Ti-52Ni	12	26	2	-26	24	1350(T)	6	[16]
	Ni50Ti35Zr15	52.8	95.9	42.6	-18.6	53.3	640(T)	2.79	[13]
	Ni50.7Ti29.3Hf20	113	137	111	91	26	>1500(P)	2	[17]
	Ti50Ni33.5Cu12.5Pd4	38.7	42.2	37.7	34.2	4.5	—	4.9	[18]
	Cu15Ni35Ti25Hf12.5Zr12.5	95.6	169.3	92.7	108.6	76.7	1670(P)	4.4	[19]
Cu基	Cu50Zr50	259	280	85	81	195	—	5.92	[20]
	Cu13Al4Ni0.2Nd	168	194	189	165	5	787(P)	6.8	[21]
	Cu87.59Al11.99Be0.42	54	68	56	31	12	398.93(T)	—	[22]
	Cu-12.5Al-5.8Mn-4.1Cr	-41.8	-29.7	-51.9	-68.2	22.2	1283(P)	2.8	[23]
	Cu87.7-Al11.7-Be0.45-Zr0.12	75	84	59	48	25	643(T)	—	[24]
Fe基	Fe-28Mn-6Si-5Cr	123.8	141.5	4.2	-11.8	137.3	760(T)	7.6	[6]
	Fe-30Mn-6Si-0.41Ta	154.7	188.8	-4.5	-70.1	193.3	>600(T)	~4	[25]
	Fe-21Mn-8.5Cr-4.8Ni	—	—	<0	—	—	1030(P)	3.6	[26]
	Fe-17.2Mn-5.3Si-9.8Cr-4.6Ni	382	401	271	—	130	—	6.4	[27]
	Fe-18.5Mn-5.7Si-8.9Cr-4.5Ni	100	153	9	—	144	—	7.7	[28]

注: A_f-M_s 为相变温度滞后;T表示抗拉;P表示抗压。

2 形状记忆合金的制备工艺研究现状

实现SMA低成本、高性能的制备对其推广应用具有重要意义。SMA最初制备工艺多采用常规的熔铸法,但随着对合金化元素、微观组织等特性与形状记忆效应之间映射关系研究的深入,SMA制备过程中对元素组分精确控制、熔炼气氛、微观组织调控等要求不断提高,真空熔铸、快速凝固、定向凝固等技术被引入SMA的制备中。近年来,形性一体化制造技术的发展,特别是增材制造技术的发展,给材料加工制造工艺带来了颠覆性的影响,增材制造SMA也得到了快速发展。本节从铸造、粉末冶金和增材制造3个方向分析SMA的制备工艺的特点和发展趋势。

2.1 铸造法制备SMA

铸造法是最早采用的SMA制备技术。由于合金化元素对SMA的性能有极大影响,因此SMA的铸造多采用真空熔炼法,同时尽量保证铸锭成分的

均匀化。常规铸造SMA中等轴多晶结构具有很大脆性,通过定向凝固控制晶体生长的择优取向,在SMA中产生不同的机械性能和形状记忆效应。Callaway等^[29]在对Ni-Mn-Ga双程形状记忆特性的研究中发现等轴多晶的双程形状记忆效应远小于柱状晶。魏佳欣等^[30]采用定向凝固技术制备了Ni-Mn-Ga合金,当提拉速度为10 $\mu\text{m/s}$ 时得到取向性较好的多晶,此时合金具有相较于固溶合金更好的双程形状记忆效应,且经过形状记忆循环训练后,可以将双程可逆应变提升至3.8%,即使200次热循环后,合金的双程形状记忆效应仍能稳定在3.0%。

金属材料中存在显著的“细晶强化”效应,而对于记忆合金来说,随着基体强度的提高可以通过使合金变形更多由应力诱发马氏体承担,提高其形状记忆效应^[31]。铸造过程中晶粒细化主要通过添加变质剂或通过改进材料制备过程中的凝固速率实现,Yang等^[32]通过使用Cu51Zr14作为孕育剂,有效地细化了铸造CuAlMn合金的晶粒,淬火态合金的

平均晶粒尺寸由 $1050\ \mu\text{m}$ 细化至 $37\ \mu\text{m}$, 且 Cu- AlMn 合金的机械性能和阻尼能力明显上升。快速凝固可以通过增加金属熔体的过冷度提高形核数目细化晶粒。喷射成形也称为喷射铸造, 是一种典型的快速凝固工艺, 通过将金属熔体雾化到微米级液滴后沉积, 在金属中实现快速凝固^[33]。Cava 等^[34]通过喷射成形制备了 Cu 基 SMA 材料, 基本原理如图 2^[34]所示。金属熔体的冷却速率为 $10\sim 10^4\ \text{K/s}$, 沉积 SMA 中晶粒尺寸得到了显著细化, 且材料均匀性和孔隙率也得到了有效控制。

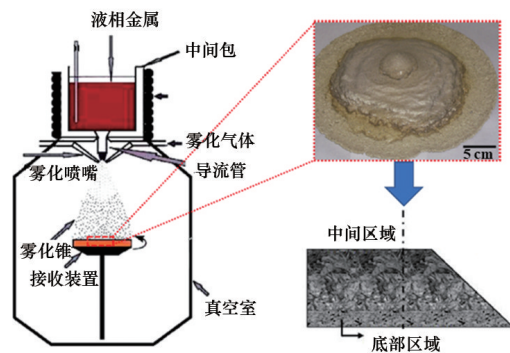


图2 喷射程序制备 SMA 原理及材料组织形貌

铸造法作为一种传统材料成形工艺具有成本低、设备简单、易于实现等特点, 通过合理的工艺规划设计仍然能够作为高性能 SMA 材料的制备工艺。

2.2 粉末冶金制备 SMA

传统形状记忆合金通过铸造、热加工和切削加工得到所需零件, 整个成形过程中材料利用率较低且铸造过程中容易造成材料组织性能不均匀。而粉末冶金通过预制坯和烧结 2 步工序, 可以实现零件的近净成形。Soba 等^[35]研究了热处理对粉末冶金 TiNi 形状记忆合金的组织 and 力学性能的影响, 粉末冶金 TiNi 合金表现出 $454\ \text{MPa}$ 的高平台应力, 热处理后合金在 8% 应变下实现了 96.4% 的形状恢复能力。Ibrahim 等^[36]采用微波烧结技术制备了 Ni-Ti 基医用形状记忆合金, 并通过显微组织、机械性能和生物腐蚀性能的研究优化了烧结参数。

粉末冶金技术在 SMA 领域另外一个重要应用是制备多孔型 SMA。多孔形状记忆合金在生物医用材料中有广泛的应用前景, 与普通材料相比, 多

孔材料既能仿生骨头、树木等多孔结构最优的强度、刚度和重量分布组合, 同时多孔 SMA 也具有更好的生物力学性能和生物相容性。图 3^[37]为一种采用电辅助粉末冶金方法制备的 NiTi 合金的原理图和成形多孔 SMA 的形貌图。其他多孔 SMA 材料如 Ti-Ta、Ti-Nb、Ti-Mo、Fe-Mn-Si 等都通过粉末冶金方法成功制得^[38-39]。

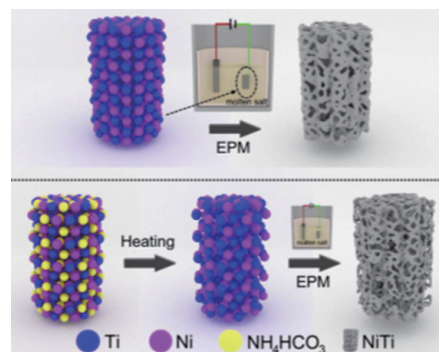


图3 SMA 应力-应变-温度响应关系

2.3 增材制造 SMA

增材制造技术是通过采用离散-堆积的原理, 通过逐层熔化选区粉末, 层层累加最终得到零件实体, 增材制造 SMA 的基本原理如图 4^[40-42]所示。增材制造无需刀具、模具等复杂工具, 能直接从计算机辅助设计中生产复杂几何形状样品, 在复杂零件的成形中具有极大优势。基于增材制造的上述特点, 采用该技术制备 SMA 可以通过调节工艺参数来

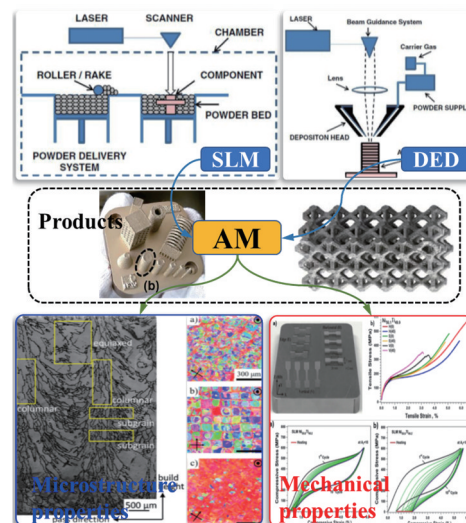


图4 增材制造 SMA: 原理、产品和组织性能

调控其组织性能,特别是能够实现成形零件不受构件复杂程度的影响,减少构件制造周期和成本。

Token 等^[43]研究了激光功率(100、250 W)对 NiTiHf 基 SMA 转变温度、应变和微观结构的影响。100 W 功率制造的样品显示出尖锐的转变峰、良好的形状记忆行为、1.67% 的可恢复应变和超弹性。余春风等^[44]采用激光选区熔化制备了 NiTi 基 SMA,在扫描间距为 77 μm 时成形的 SMA 块体试样的综合性能最佳,相对密度为 98.5%,抗压强度和抗拉强度分别为 3351、839 MPa,第 1 次压缩循环后的可回复应变为 5.99%。Gear 等^[45]研究和分析了选区激光熔化与传统粉末冶金法制备 Cu-Al-Ni-Mn-Zr 基 SMA 的显微组织特征和热稳定性差异。研究结果表明激光选区熔化样品具有可逆的马氏体相变 $T_0=171^\circ\text{C}$,而 PM 样品没有形状记忆效应。姚聪等^[26]通过激光熔覆制备了 Fe-Mn-Si 基 SMA,室温下名义屈服强度为 508 MPa,拉伸强度为 1030 MPa,伸长率达 31%,最大可回复变形量为 3.6%,其形状记忆性能优于传统固态变形加工 SMA。Gao 等^[46]研究了激光熔覆工艺参数对 NiTi 基 SMA 形状记忆效应和伪弹性的影响规律。除了制备大尺寸块材外,增材制造技术还被广泛应用于制备 SMA 涂层^[47]或 SMA 与其他功能材料复合的梯度功能机构等领域^[48]。

3 形状记忆合金性能调控研究现状

SMA 的推广应用很大程度上依赖于形状记忆恢复率,SMA 的形状记忆效应受母相的元素组成、合金析出相以及晶粒尺寸等因素影响较大。因此 SMA 性能调控的手段主要有优化母相元素组成、合理的热处理策略及对母材进行塑性加工达到细化晶粒的目的等。

3.1 合金化提高 SMA 性能

SMA 的合金化元素设计主要包括主要合金元素组分设计和微量元素添加 2 类(本研究中定义元素含量低于 1% 为微量元素)。主要合金元素组分对 SMA 性能影响方面,陈朝霞等^[49]研究了 Fe-30Ni-xCo-10.5Al-3Nb-0.05B 多晶合金中 Co 体

积分数对其组织和伪弹性的影响,结果表明 Co 体积分数为 9%~22% 的合金表现出伪弹性,其中 Co 体积分数为 18% 的合金伪弹性最佳,形状回复率达 84%,可回复应变达 5.25%。Jiang 等^[50]研究 Ga 对 Co-V-Si 高温形状记忆合金晶体结构、转变行为、热循环稳定性、微观结构演变、机械性能和形状记忆行为影响规律,结果表明虽然过量的 Ga 添加降低了力学性能,但能够显著提高 Co-V-Si 高温形状记忆合金的形状记忆效应。

微量元素添加对 SMA 性能影响方面,李维雅等^[51]研究了用少量 La 元素替代 Ti 元素形成的 $\text{Ni}_{50}\text{Ti}_{50-x}\text{La}_x$ ($x=0.1, 0.3, 0.5, 0.7$) 三元合金的力学性能,结果表明 SMA 的硬度、弹性模量、屈服强度和断后伸长率随 La 元素掺杂量的增加而减小,拉伸强度先增大后减小,在 La 掺杂量为 0.3% 体积分数时达到最大值。Guniputi 等^[52]研究了稀土元素 Gd 对 Cu-Al-Be ($\text{Cu}_{88.13}\text{Al}_{11.42}\text{Be}_{0.45}$, Gd 质量分数添加量为 0.05%~0.15% 质量分数) 多晶 SMA 微观结构、形态、延展性、晶体结构、相变温度和形状恢复率等影响规律。Gd 质量分数从 0 增加到 0.08%,晶粒大小从 463.45 μm 减小到 81.80 μm ,减少了 82.34%,拉伸强度从 398.93 MPa 增加到 581.42 MPa,延展性从 10.05% 提高到 23.72%。随着 Gd 质量分数的增加相变温度显著升高,SMA 的形状恢复率也从 97% 降低到 65%。

通过上述分析可知,不管是通过调整含量较大合金化元素组分还是添加微量元素都可能对 SMA 的相变温度、相变类型、形状记忆效应、超弹性和断裂强度等产生影响,因此通过合金化元素设计是 SMA 性能调控的重要手段之一。

3.2 热处理工艺提高 SMA 性能

热处理是金属材料进行组织调控的重要手段,对于 SMA 常用的热处理手段主要有时效和退火 2 种。叶俊杰等^[53]研究了时效温度和时间对 Ti-50.8Ni-0.1Zr 合金中 Ti_3Ni_4 析出相形貌以及合金强度、塑性和记忆行为的影响,300 $^\circ\text{C}$ 时效 1~50 h 和 400 $^\circ\text{C}$ 时效 1 h 后呈现良好的超弹性,400 $^\circ\text{C}$ 时效 5~50 h 和 500 $^\circ\text{C}$ 时效 1~50 h 的合金呈现良好的形状记忆效应。Li 等^[54]研究了 250~400 $^\circ\text{C}$ 时效处理对柱

状晶 Cu-Al-Mn 形状记忆合金微观组织和阻尼性能的影响及机制。如图 5^[54]所示随着时效温度和时间增加,贝氏体析出相体积分数由 0 增加到 80%, 研究表明贝氏体相析出增加后柱状晶 Cu-Al-Mn 形状记忆合金的阻尼能力呈现出先降低后增加又降低的规律。

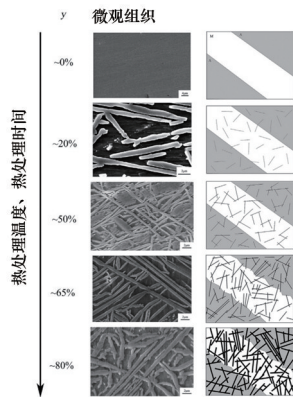


图5 时效处理对 Cu-Al-Mn 合金微观组织影响

退火处理是通过改变 SMA 的室温相组成及亚结构等,进而改变相变温度、力学特性和形状记忆特性。冯辉等^[55]研究了退火温度(T_a)对 Ti-51.1Ni 形状记忆合金超弹性的影响,结果表明 350~700°C 退火态的 Ti-51.1Ni 合金应力应变滞后回线面积 ϵ_r 减小,材料的超弹性显著提高。Haidar 等^[56]研究了退火温度对 Ti-20Zr-10Nb-5Al 合金显微组织、相变、力学性能和形状记忆效应的影响,退火处理在合金中会析出 γ_2 相,从而提高机械性能。

3.3 塑性加工技术提高 SMA 性能

晶粒细化可以显著提高多晶体合金的屈服应力。晶粒细化使晶界的比面积增大,能够抑制塑性滑移的引入,使应力诱发马氏体前端母相中的弹性应变能提高,增加马氏体的可逆性,从而提高形状记忆效应。通过塑性变形方法细化 SMA 晶粒尺寸的工艺主要包括冷轧、冷拔等。Kim 等^[57]研究了轧制和后续退火工艺对 FeMnSi 形状记忆合金恢复应力和恢复应变的影响,通过上述处理可以使 FeMnSi 形状记忆的晶粒尺寸由初始态 74.04 μm 细化到 1.45 μm 。研究结果同时表明,晶粒尺寸减小虽然不能提高 FeMnSi 合金的恢复应变,但能够提

高恢复应力。Babacan 等^[58]同时研究了轧制对 Ni₅₀Ti₃₀Hf₂₀ 高温形状记忆合金 (HTSMA) 形状记忆响应和热机械循环稳定性的影响。研究表明轧制过程导致的位错密度增加和马氏体组织转变会显著提高 SMA 的热滞性。通过塑性加工获得细晶效应,需要在 SMA 中施加足够的塑性变形量,但由于 SMA 的加工硬化速率极高,过高的塑性变形会降低合金表面质量,因此传统的冷轧、冷拔等变形方式均会导致形状记忆合金轧制或拉拔过程中形成微裂纹甚至断裂,具有一定的局限性^[59]。

喷丸强化是另外一种典型的能够细化金属晶粒的强化方法,喷丸强化的原理是通过高速弹丸冲击金属表面产生塑性变形,塑性变形一方面会细化金属表层晶粒,另一方面可以引入残余压应力从而大幅度提高金属结构的疲劳强度^[60]。Li 等^[61]通过超声喷丸处理和随后的低温 (523 K) 时效处理在 NiTi 基 SMA 中形成了表面纳米晶,超声喷丸强化的实验装置和工艺原理如图 6^[61]所示。研究表明在纳米晶粒和位错网络化的情况下,喷丸过程中产生的 Ni₄Ti₃ 纳米沉淀物能够显著强化基体材料,且在循环载荷作用下 SMA 的超弹性也得到了改善。Takeda^[62]的研究结果表明超声喷丸能够显著提高 TiNi 基 SMA 的疲劳寿命。Ye 等^[63]采用新型的激光喷丸也在 TiNi 基 SMA 表层产生了具有双峰晶粒的纳米结构,经激光喷丸处理后 SMA 的强度和延展性都得到了显著提升。Wang 等^[64]对 NiTi 形状记忆合金进行了飞秒激光冲击强化 (FLSP) 处理,在激光飞秒冲击后的 NiTi 合金表面晶粒显著细化,划痕测试表明 FLSP 工艺可以降低摩擦力和摩擦系数。

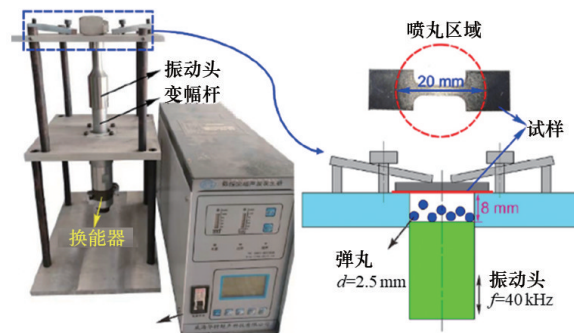


图6 SMA 喷丸表面细晶强化装置和原理

通过上述分析可知影响形状记忆合金的因素主要有合金元素组成和微观组织特性,其中微观组织调控当前常用的技术手段主要有热处理、塑性变形加工和表面强化工艺等。未来形状记忆合金性能调控研究趋势除了依据材料特性和应用场景开发新型的合金系列和热处理策略等,另外一个重要方向是将新型的后处理强化方法引入到形状记忆合金组织性能调控。

4 形状记忆合金在非含能解锁分离装置中应用现状

航天器上需要大量压紧释放装置实现可分离结构与固定结构的连接和分离,如火箭级间分离、太阳翼展开、天线压紧释放等。传统驱动机构主要是利用火工药剂爆炸或燃烧产生的爆轰波或高压燃气作为驱动力,由于作用过程中产生的爆炸冲击(又称火工品冲击)会对航天器中携带的精密电子元器件造成损伤,因此非含能解锁分离装置成为研究热点。形状记忆合金的形状记忆特性使其成为理想的非含能解锁分离装置材料。

Yoo等^[65]开发了一种非爆炸性释放执行器以取代当前的火工释放装置,执行器通过使用SMA线,可以实现快速触发操作,能够为中型卫星的太阳能电池阵列提供高预载和低冲击非爆炸性释放执行器,可以替代目前使用的释放装置。根据性能测试结果,释放时间、预载能力、最大冲击水平分别为50 ms、15 kN、350g,大大增加了执行器的可靠性。Glücksberg等^[66]研制了圆柱管NiTi基SMA致动器,其外径和内径分别为12.7、7.8 mm,其基本原理如图7^[66]所示。制动器激活阶段之后气缸被压缩能够诱导马氏体相变(或重新定向现有的马氏体相),这主要是由于制动器在施加恒定位移条件下会产生时温度升高。在温度为120℃、载荷增量为35 kN(440 MPa)情况下,制动器表现出良好的装载—卸载—加热—冷却的重复循环性能,与传统火工驱动器相比能够有效避免振动和烟尘对系统的影响,同时能够重复使用。

Pan等^[67]研制了一种SMA驱动的新型非爆炸和

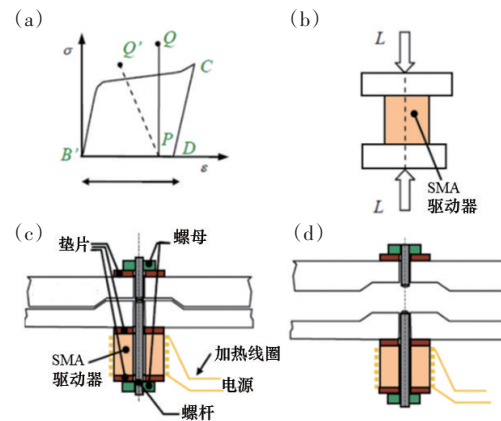


图7 圆柱管SMA致动器工作原理

可复位释放装置,其结构示意图和测试过程如图8^[67]所示。工作过程中偏置SMA执行器通过触发滑轮组件和多级杠杆来释放飞轮螺母。在螺钉预紧载荷的拉力作用下,飞轮螺母高速旋转使螺钉松开,从而松开目标适配器。同时分离后可使用复位工具快速复位设备,无需更换任何部件。性能测试结果表明,该装置可承受最大双向预紧力10 kN,平均解锁力为9.73 N。解锁时间随着驱动电压的增加而减少,平均解锁响应时间为342 ms(电压为9 V工况下)。此外,执行器使用寿命超过50次,实现了释放装置的重复使用。

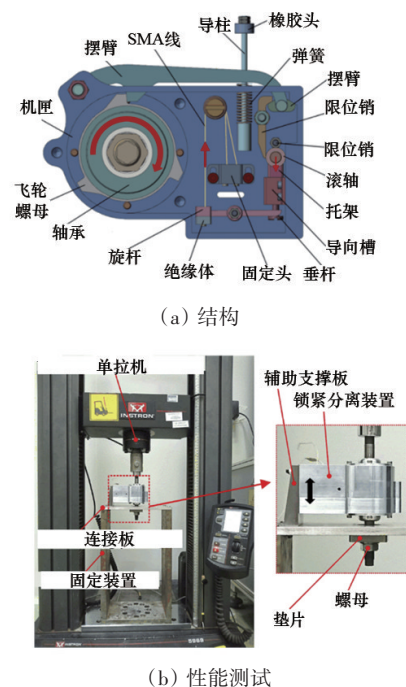


图8 SMA驱动的新型非爆炸和可复位释放装置

刘颖等^[68]研制了一种如图9所示的压紧释放装置,该装置利用分组滚棒减小释放阻力,采用微小间隙(≤ 0.05 mm)主动控制压紧面横向位移,由SMA丝作为装置驱动源。在预紧载荷 12000 N、供电电流 2 A、温度为 -15°C 的真空环境下,释放时间为 7.6 s。设计装置的释放时间与回复位移计算误差小于 5%,具有结构简单、功耗低、压紧面滑动微小等特点,适用于精密展开部件的压紧与释放。张小勇等^[6]在美国国家航空航天局(NASA)研究的基础上,提出了一种分段螺母形式的SMA空间释放装置的设计方案,并针对释放装置的核心部分即驱动单元制定了相应的设计方法。最后研制了样机并进行了功能和同步测试,结果表明在 6 V 直流供电下,该装置可在 0.3 s 内完成释放功能,且 2 台装置同时使用时几乎同时释放。2 种设备的释放持续时间差异小于 0.04 s。研制的空间释放装置具有体积小、释放持续时间短、复位同步容易、工程应用潜力大等优点。

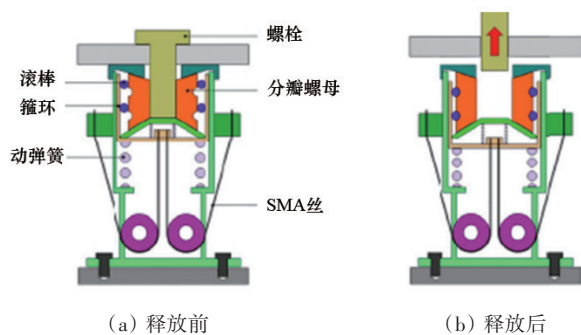


图9 SMA驱动压紧释放装置

5 结论

从形状记忆合金的工作原理与分类、典型制备工艺、性能调控和应用现状 4 个方面对形状记忆合金的研究和应用现状进行了综述。基于形状记忆合金的非火工执行装置在航空航天领域具有非常鲜明的技术优势和广阔的应用前景,并且近些年来国内研究人员也开发出了一部分装置并得到了一定的应用,但当前基于形状记忆合金的非火工执行装置仍未得到大规模应用,以下方面有待继续加强研究。

1) 当前 SMA 材料功能实现多依赖于马氏体相变,在加载、卸载过程中具有一定的迟滞性,影响了执行机构的精度,开发新型迟滞性小的 SMA 材料对促进其应用势在必行。同时,航空航天执行机构对轻量化、微型化和极端环境有较高要求,亟需开发具有轻量化、微型化特征,适用极端高温或极端低温条件的 SMA 执行机构。

2) SMA 材料多存在一定的损伤和缺陷,在使用过程中力学性能较差,相对与瞬间能够提供大冲击载荷的火工装置具有一定差距。同时 SMA 作为新型的功能材料,加工性能较差,而航空航天机构往往对加工质量要求较高且结构复杂。因此,开发新型高性能 SMA 材料,同时开发针对 SMA 的精确加工和复杂精密机构的制造技术势在必行。

3) 针对 SMA 材料执行器的降低成本要求,当前常用的 SMA 执行器从 SMA 材料本身和加工制备工艺成本相对较高,后续 SMA 执行机构的低成本化是影响其大规模推广应用的重要因素。

参考文献 (References)

- [1] Saedi S, Toker G P, Raji H, et al. Shape memory effect in quaternary NiTiHfPd shape memory alloys beyond 200°C [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, doi: 10.1007/s11665-022-06742-3.
- [2] 杨静宇, 唐健, 卢镜宇, 等. 功能梯度形状记忆合金梁的相变力学行为[J]. *西北工业大学学报*, 2021, 39(6): 1395-1403.
- [3] Olander A. An electrochemical investigation of cadmium-gold alloy[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1932, 54(10): 3819-3833.
- [4] Huang Y H, Hsieh W Z, Lee P T, et al. Reaction of Au/Pd/Cu and Au/Pd/Au/Cu multilayers with Sn-Ag-Cu alloy [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 358: 753-761.
- [5] Mohammed S S, Kok M, Qader I N, et al. Influence of Ta additive into Cu84-xAl13Ni3 (wt%) shape memory alloy produced by induction melting[J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 2020, 44 (4): 1167-1175.
- [6] Collazo A, Figueroa R, Mariño-Martínez C, et al. Microstructure and thermomechanical characterization of Fe-

- 28Mn-6Si-5Cr shape memory alloy[J]. *Metals*, 2021, 11(4): 649.
- [7] 许博, 王颖, 张萌, 等. Nb合金化对电弧增材制造NiTi基形状记忆合金的影响[J]. *焊接学报*, 2021, 42(8): 1-7.
- [8] 张小勇, 闫晓军, 杨巧龙. 形状记忆合金分瓣螺母空间解锁机构的设计与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(17): 145-150.
- [9] 汤林, 杨树涛, 林鑫, 等. 中小型航天器爆炸螺栓解锁冲击响应特性[J]. *兵工学报*, 2021, 42(增刊1): 40-45.
- [10] 杨传成, 马利, 王经东, 等. 运载火箭级间分离爆炸螺栓装配方法[J]. *质量与可靠性*, 2018(2): 13-15.
- [11] 陈炎, 金伟, 王用岩, 等. 爆炸螺栓分离对热防护系统冲击响应分析[J]. *装备环境工程*, 2018, 15(9): 21-25.
- [12] Karami M, Chen X. Nanomechanics of shape memory alloys[J]. *Materials Today Advances*, 2021, 10: 100141.
- [13] 李启泉, 马悦辉, 李岩. Ni-Ti-Zr合金组织、相变与形状记忆性能[J]. *铸造*, 2019, 68(11): 1204-1209.
- [14] 杨建楠, 黄彬, 谷小军, 等. 形状记忆合金力学行为与应用综述[J]. *固体力学学报*, 2021, 42(4): 345-375.
- [15] Mehrpouya M, Gisario A, Elahinia M. Laser welding of NiTi shape memory alloy: A review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 31: 162-186.
- [16] Elsayed A, Umeda J, Kondoh K. Effect of quenching media on the properties of TiNi shape memory alloys fabricated by powder metallurgy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 842: 155931.
- [17] Saghaian S M, Karaca H E, Tobe H, et al. Effects of Ni content on the shape memory properties and microstructure of Ni-rich NiTi-20Hf alloys[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(9): 95029.
- [18] Li H, Meng X, Cai W. Shape memory behaviors in a Ti50Ni33.5Cu12.5Pd4 alloy with near-zero thermal hysteresis[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 765: 166-170.
- [19] Chang S, Kao W, Hsiao K, et al. High-temperature shape memory properties of Cu15Ni35Ti25Hf12.5Zr12.5 high-entropy alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14: 1235-1242.
- [20] Gao W, Yi X, Sun B, et al. Microstructural evolution of martensite during deformation in Zr50Cu50 shape memory alloy[J]. *Acta Materialia*, 2017, 132: 405-415.
- [21] Zhang X, Cui T, Zhang X, et al. Effect of Nd addition on the microstructure, mechanical properties, shape memory effect and corrosion behaviour of Cu-Al-Ni high-temperature shape memory alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 858: 157685.
- [22] Guniputi B N, Murigendrappa S M. Influence of Gd on the microstructure, mechanical and shape memory properties of Cu-Al-Be polycrystalline shape memory alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 737: 245-252.
- [23] Yang S, Zhang F, Wu J, et al. Microstructure characterization, stress-strain behavior, superelasticity and shape memory effect of Cu-Al-Mn-Cr shape memory alloys[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(10): 5917-5927.
- [24] Singh R K, Murigendrappa S M, Kattimani S. Investigation on properties of shape memory alloy wire of Cu-Al-Be doped with zirconium[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, 29(11): 7260-7269.
- [25] Yang C, Lin H, Lin K. Improvement of shape memory effect in Fe-Mn-Si alloy by slight tantalum addition[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 518(1/2): 139-143.
- [26] 姚聪, 李瑞迪, 袁铁锤, 等. 激光送粉增材制造Fe-Mn-Si基形状记忆合金组织与性能[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(11): 3081-3087.
- [27] Wang G, Peng H, Sun P, et al. Effect of titanium addition on shape memory effect and recovery stress of training-free cast Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 657: 339-346.
- [28] Peng H, Yong L, Wang S, et al. Role of annealing in improving shape memory effect of as-cast Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2019, 50(7): 3070-3079.
- [29] Callaway J D, Hamilton R F, Sehitoğlu H, et al. Shape memory and martensite deformation response of Ni2Mn-Ga[J]. *Smart Materials and Structures*, 2007, 16: S108-S114.
- [30] 魏佳欣, 张欣. 定向凝固Ni-Mn-Ga-Gd高温记忆合金的双程形状记忆效应[J]. *天津理工大学学报*, 2020, 36(3): 49-52.
- [31] 杨军, 郭芝斌, 王垚, 等. 快速凝固对Fe-Mn-Si系合金形状记忆效应及耐腐蚀性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(8): 44-48.
- [32] Yang J, Wang Q Z, Yin F X, et al. Effects of grain refinement on the structure and properties of a CuAlMn shape memory alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 664: 215-220.
- [33] Kim W, Argento A, Mohanty P S. Damping characteristics of a spray-deposited shape memory alloy beam[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, 333(15): 3356-3366.

- [34] Cava R D, Bolfarini C, Kiminami C S, et al. Spray forming of Cu-11.85Al-3.2Ni-3Mn (wt%) shape memory alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 615: S602-S606.
- [35] Soba S, Tanabe Y, Yonezawa T, et al. Effect of shape memory heat treatment on microstructures and mechanical properties of powder metallurgy TiNi shape memory alloy[J]. *Materials Transactions*, 2018, 59(5): 805-810.
- [36] Ibrahim M K, Hamzah E, Saud S N, et al. Powder metallurgy fabrication of porous 51(at.%)Ni-Ti shape memory alloys for biomedical applications[J]. *Shape Memory and Superelasticity*, 2018, 4(2): 327-336.
- [37] Ma X, Wang H, Xie H, et al. Engineering the porosity and superelastic behaviors of NiTi alloys prepared by an electro-assisted powder metallurgical route in molten salts[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 794: 455-464.
- [38] Ibrahim M K, Saud S N, Hamzah E, et al. Role of Ag addition on microstructure, mechanical properties, corrosion behavior and biocompatibility of porous Ti-30 at% Ta shape memory alloys[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(11): 3175-3187.
- [39] Pricop B, Söyler A U, özkal B, et al. Powder metallurgy: An alternative for FeMnSiCrNi shape memory alloys processing[J]. *Frontiers in Materials*, 2020, 7: 247.
- [40] Alagha A N, Hussain S, Zaki W. Additive manufacturing of shape memory alloys: A review with emphasis on powder bed systems[J]. *Materials & Design*, 2021, 204: 109654.
- [41] 邓怀波, 陈玉华, 李树寒, 等. NiTi 形状记忆合金激光增材制造研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(12): 4119-4130.
- [42] Babacan N, Pauly S, Gustmann T. Laser powder bed fusion of a superelastic Cu-Al-Mn shape memory alloy[J]. *Materials & Design*, 2021, 203: 109625.
- [43] Toker G P, Nematollahi M, Saghaian S E, et al. Shape memory behavior of NiTiHf alloys fabricated by selective laser melting[J]. *Scripta Materialia*, 2020, 178: 361-365.
- [44] 余春风, 胡永俊, 卢冰文, 等. 扫描间距对激光选区熔化 NiTi 形状记忆合金相变行为及力学性能的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1-10.
- [45] Gera D, Santos J, Kiminami C S, et al. Comparison of Cu-Al-Ni-Mn-Zr shape memory alloy prepared by selective laser melting and conventional powder metallurgy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 30(12): 3322-3332.
- [46] Gao S, Feng Y, Wang J, et al. Molten pool characteristics of a nickel-titanium shape memory alloy for direct energy deposition[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107215.
- [47] Zhang Q, Xu P, Zha G, et al. Numerical simulations of temperature and stress field of Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloy coating synthesized by laser cladding[J]. *Optik*, 2021, 242: 167079.
- [48] Liu C, Xu P, Pang C, et al. Phase transformation in Fe-Mn-Si SMA/WC composite coating developed by laser cladding[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, 267: 124595.
- [49] 陈朝霞, 彭文屹. Co 含量对 Fe-30Ni-xCo-10.5Al-3Nb-0.05B 形状记忆合金组织与伪弹性的影响[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(14): 107-110.
- [50] Jiang H, Wang C, Xu W, et al. Alloying effects of Ga on the Co-V-Si high-temperature shape memory alloys[J]. *Materials & Design*, 2017, 116: 300-308.
- [51] 李维雅, 赵春旺. La 掺杂对 Ni50Ti50 形状记忆合金力学性能的影响[J]. *内蒙古工业大学学报*, 2021, 40(3): 199-204.
- [52] Guniputi B N, Murigendrappa S M. Influence of Gd on the microstructure, mechanical and shape memory properties of Cu-Al-Be polycrystalline shape memory alloy [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 737: 245-252.
- [53] 叶俊杰, 贺志荣, 张坤刚, 等. 时效对 Ti-50.8Ni-0.1Zr 形状记忆合金显微组织、拉伸性能和记忆行为的影响[J]. *金属学报*, 2021, 57(6): 717-724.
- [54] Li M, Liu J, Yan S, et al. Effect of aging treatment on damping capacity in Cu-Al-Mn shape memory alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020, 821: 153213.
- [55] 冯辉, 贺志荣, 王芳, 等. 退火温度对 Ti-51.1Ni 形状记忆合金超弹性的影响[J]. *金属热处理*, 2019, 44(3): 120-123.
- [56] Haidar M A, Saud S N, Hamzah E. Microstructure, mechanical properties, and shape memory effect of annealed Cu-Al-Ni-xCo shape memory alloys[J]. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2017, 7(1): 57-64.
- [57] Kim Y S, Choi E, Kim W J. Characterization of the microstructures and the shape memory properties of the Fe-Mn-Si-Cr-Ni-C shape memory alloy after severe plastic deformation by differential speed rolling and subsequent annealing[J]. *Materials Characterization*, 2018, 136: 12-19.

- [58] Babacan N, Bilal M, Hayrettin C, et al. Effects of cold and warm rolling on the shape memory response of Ni50Ti30Hf20 high-temperature shape memory alloy[J]. *Acta Materialia*, 2018, 157: 228–244.
- [59] 王广春, 刘闪, 朱杰, 等. 形状记忆合金形变细晶方法及其研究进展[J]. *自动化与仪器仪表*, 2019(9): 87–91.
- [60] Maleki E, Unal O, Guagliano M, et al. The effects of shot peening, laser shock peening and ultrasonic nanocrystal surface modification on the fatigue strength of Inconel 718[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 810: 141029.
- [61] Li X, Chen H, Guo W, et al. Improved superelastic stability of NiTi shape memory alloys through surface nanocrystallization followed by low temperature aging treatment[J]. *Intermetallics*, 2021, 131: 107114.
- [62] Takeda K. Enhancement of fatigue properties in sensor element by surface modification[J]. *Sensors and Materials*, 2020, 32(8): 2851.
- [63] Ye C, Suslov S, Fei X, et al. Bimodal nanocrystallization of NiTi shape memory alloy by laser shock peening and post-deformation annealing[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(19): 7219–7227.
- [64] Wang H, Pöhl F, Yan K, et al. Effects of femtosecond laser shock peening in distilled water on the surface characterizations of NiTi shape memory alloy[J]. *Applied Surface Science*. 2019, 471: 869–877.
- [65] Yoo Y I, Jeong J W, Lim J H, et al. Development of a non-explosive release actuator using shape memory alloy wire[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(1): 15005.
- [66] Glücksberg A, Soul H, Yawny A. Releasing systems for aerospace industry based upon shape memory alloys: Characterization of materials for actuators[J]. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 2018, doi: 10.1590/S1517-70762018002.0328.
- [67] Pan X, Yue H, Tian Y, et al. A shape memory alloy actuated release device using non-self-locking thread[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(11): 115107.
- [68] 刘颖, 杨巧龙, 闫泽红, 等. 一种形状记忆合金压紧释放装置设计与试验[J]. *航天器工程*, 2016, 25(3): 40–44.

Shape memory alloys and their applications in non-energetic separating attachment: A review

WU Xiaojuan, CHEN Wenlong, ZHANG Xiaobing, LIU Lijuan, CHEN Xiaosong, SUO Liang

Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China

Abstract This paper presents a review of the characteristics, types, manufacturing processes and performance control of shape memory alloys (SMAs). The current application in non-energy containing unlocking separation device is also reviewed. Basic working principles of SMA and current series of commonly used alloys are summarized. The main preparation processes of SMA are analyzed, especially the current application situation of spray casting, powder metallurgy and additive manufacturing in preparation of SMA materials. The current research status of SMA performance control based on typical processes such as alloying component design, heat treatment and plastic processing is introduced. Moreover, the current application status of SMA in non-energy containing unlocking separation device is discussed. Finally, key issues that need to be urgently addressed in institutional research and SMA material are prospected from a perspective of application and promotion.

Keywords shape memory alloys; separating attachment; preparation process; properties optimization ●



(责任编辑 刘志远)