

形状记忆合金研究现状及其在航空领域的应用

梁新增^{1,2}, 关慰勉¹, 王 星¹, 赵建国¹, 李世键¹, 刘艳梅¹, 刘 标¹,
白 静², 关子奇³

(1. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110850)

(2. 东北大学 材料各向异性与织构教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

(3. 中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家研究中心, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: 形状记忆合金 (shape memory alloys, SMA) 兼具形状记忆效应和超弹性两大特性, 为了在航空领域更好地利用且发挥该材料的突出作用, 综述了 SMA 的种类及机制、制备与加工工艺、航空应用方面的研究进展。基于 SMA 材料特性特点, 围绕 SMA 在管接头、可变形机翼、进气整流罩、智能降噪喷嘴等航空领域的应用研究特点, 展开详细讨论并分析当前存在的差距。该研究结果表明, 随着航空制造技术的发展, SMA 的应用将朝着耐高温、轻量化、智能化的方向发展。

关键词: 形状记忆合金; 航空领域; 形状记忆效应; 超弹性

中图法分类号: TB34

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)06-1641-12

1 形状记忆合金

形状记忆合金 (shape memory alloy, SMA) 是一种特殊的合金材料, 它能够在温度或其他条件发生变化时记忆其初始形状。最早的研究可以追溯到 1932 年, 当时瑞典科学家 Olander^[1] 发现了 AuCd 合金在冷却和加热过程中的形状变化。随后的 Chang^[2] 等的研究在 1951 年发现了 AuCd 合金在马氏体状态经历形变后能够通过加热回复到其原始形状, 这就是 SMA 的核心力学特性之一, 也就是形状记忆效应。

1963 年, 美国海军武器实验室的研究人员^[3] 发现了 NiTi 合金具有类似的形状记忆效应, 并且这一发现引起了学术界和工程界对 SMA 的广泛关注。随后, 全球各地的科学家陆续发现了其他成分的形状记忆合金, 目前已经开发出多种类型的形状记忆合金, 包括普通形状记忆合金 (Ni 基、Fe 基、Cu 基)、高温形状记忆合金 (Ni-Ti-Hf、Zr-Cu、Ti-Ni-Pt/Pd、Ni-Al-Mn/Fe)、磁性形状记忆合金 (Ni-Mn-Ga/In/Sn/Sb、Fe-Pd/Pt、Co-Ni-Ga/In/Sn) 和复合材料形状记忆合金 (Al/Ti-Ni、NbTi/Ti-Ni、SiC/TiNi)^[4-10]。虽然每种形状记忆合金都有自身的优势和限制, 但 NiTi 基形状记忆合金在形状记忆效应、韧性、热机械性能、抗腐蚀性和生物相容性等方面表现出色, 在科学研究和工程应用中占据着主导地位。

SMA 主要有 2 种显著的力学特性, 即形状记忆效应

和超弹性^[11]。研究表明, 如图 1 所示, SMA 具有 2 种不同的相和 3 种不同的晶体结构, 即孪晶马氏体、非孪晶马氏体和奥氏体。在低温下, 马氏体相是 SMA 的稳定相, 而在高温下, 奥氏体相是稳定的。形状记忆效应是指当 SMA 处于低温的孪晶马氏体结构时, 它可以通过加载来转变为非孪晶马氏体, 并且在这个过程中会发生变形。当 SMA 被加热时, 它会转变回奥氏体, 并消除变形, 从而恢复到初始形状。超弹性是指当 SMA 处于高温的奥氏体结构时, 通过加载使奥氏体转变为非孪晶马氏体, 并产生变形。当加载卸载后, SMA 会立即转变回奥氏体并回复到初始形状。除了这些特性外, SMA 还具有其他性能, 例如相变迟滞特性、电阻可变特性和大阻尼特性等。

SMA 应用于航空领域具有许多优势。与其他材料相比, SMA 具有较高的比强度和良好的耐腐蚀性。当利用其形状记忆效应时, SMA 具有高能量密度和高功率输出^[12-13]。设计采用 SMA 的驱动器结构紧凑可靠, 可以长期重复使用。而当利用其超弹性时, SMA 可以产生大且饱满的应力-应变滞回圈, 具有出色的吸能减振和大变形回复性能。

SMA 在航空领域已经有五十多年的应用历史。1969 年, SMA 成功应用于美国 F14 战斗机的输油管路中的形状记忆合金管接头^[14-15]。此后, SMA 逐渐被应用于航空航天领域的各个方面, 例如空间压紧释放机构、航空

收稿日期: 2024-06-24

基金项目: 国家自然科学基金 (51771044); 国家资助博士后研究人员计划 C 档 (GZC20232741); 中国科学院金属研究所创新基金 (2024-PY05)

作者简介: 梁新增, 男, 1991 年生, 博士, 沈阳飞机工业 (集团) 有限公司, 辽宁 沈阳 110850, E-mail: fortonight@163.com

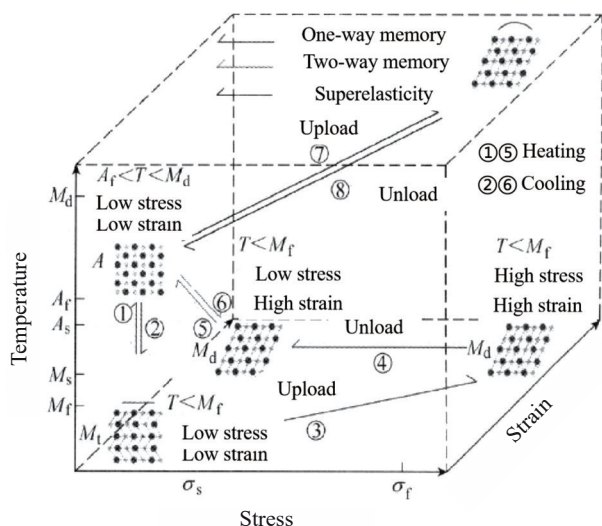


图1 形状记忆合金的记忆效应

Fig.1 Shape memory effect of shape memory alloy^[11]

发动机进气道的几何调节、机翼偏转和减振降噪器等^[16-19]。

本文对国内外科研机构关于 SMA 在航空领域应用研究进行了总结和归纳。主要内容包括 SMA 的种类及其机制、材料制备及加工方法,以及 SMA 在航空领域的应用方面。最后,针对技术发展趋势,对后续研究和应用进行了展望。

2 形状记忆合金种类及其机制

2.1 传统 SMA

(1) NiTi 形状记忆合金

最早发现使用价值的形状记忆合金是 NiTi 合金。该合金不仅具有高形状回复率和性能稳定性,还具有高强度、良好的抗腐蚀性能和优良的力学性能。然而, NiTi 基 SMA 由于相变温度较低、对成分敏感等不足。限制了其在高温领域的应用,并使准确控制相变温度和降低成本变得困难。因此,研究人员致力于通过添加其他元素来改善性能并降低成本,并已取得显著进展。例如,在 NiTi 合金中添加 Cr、V 可以大幅改善超弹性;添加 Cu、V、Al、Cr、Zr 和微量 Ca 可以显著改善其韧性、加工性和切削性;在 NiTiCu 系合金中添加 B、Si、P、S 和 RE,可获得高恢复率的形状记忆合金^[20]。另外,日本住友电气工业公司在 NiTi 合金中添加 Cu、Al、Zr、V、Co、Fe 后,经过表面处理拉丝,可以制得色彩漂亮的形状记忆合金丝,以满足对其装饰性的要求^[21]。而 NiTiNb 和 NiTiTa 是属于宽滞后型 SMA,其热滞宽度为 130~150 °C,在连接件、紧固件以及密封件等工业领域得到广泛应用。NiTi 基形状记忆合金由于其良好的生物相容性在医疗器械领域也有所应用。研究表明^[22],将 Ag 离子注入 NiTi 合金表面制备 TiNiAg 改性层,可提高合金的耐腐蚀性能,这将会进一

步促使 NiTi 基合金在医疗上的使用。

(2) Cu 基形状记忆合金

为了降低成本,学者们集中研发了 Cu 基形状记忆合金^[23]。Cu 基合金有多种类型,如 CuZn、CuAlNi、CuZnAl 等,这些合金价格相对较低,加工性能良好。然而,与 NiTi 基形状记忆合金相比,Cu 基合金的形状记忆效应较差。最主要的问题是晶界容易破碎,循环稳定性差,性能不够稳定。

(3) Fe 基形状记忆合金

在 20 世纪 80 年代初,科学家已经开始研究 Fe 基形状记忆合金^[24]。目前已经开发并应用了 FeMnSi、FePt、FeNiCoTi 等 10 余种 Fe 基合金。相比前 2 种合金,Fe 基形状记忆合金的价格更低,强度和塑性也较好。然而,形状记忆效应相对较差。

SMA 的种类及性能比较见表 1。

2.2 高温 SMA

随着科技的不断发展,SMA 在许多领域的应用需求越来越高。然而,传统的 NiTi 基、Cu 基和 Fe 基等 SMA 由于其相变温度较低,往往不能满足高温工作环境的需求。这就促使人们开始研究和开发具有较高使用温度的高温 SMA。近年来,一些新型高温 SMA 逐渐崭露头角^[25]。例如, NiTiY(Y=Hf, Pd, Pt, Au) 合金^[26]、CuAlNiMnX(X=Ti, B, V) 合金、NiAlZ(Z=Fe, Mn, B) 合金和 RuTa(Nb)形状记忆合金等^[27-28]都具备在高温环境中使用的潜力。然而,大多数高温 SMA 在塑性和抗疲劳性能方面存在着一定的局限性,制造成本也相对较高。在目前的研究中,仅有 TiNiPd、TiNiPt、NiTiHf、NiTiZr 和 CuAlNiMn 合金被认为在 100~300 °C 的范围内有着较好的应用潜力。而其他高温 SMA 的性能还需要进一步改进才能满足实际需求^[25]。因此,在未来的研究和开发中,需要集中精力提高高温 SMA 的塑性和抗疲劳性能,并降低制造成本,以推动高温 SMA 的广泛应用。

2.3 磁性 SMA

1996 年,人们发现了 Ni-Mn-Ga 合金存在磁场诱发应变效应,这使得它成为了一种最典型且被广泛研究的

表1 SMA种类及性能比较

Table 1 Types and performances of SMA

Type	Performance
NiTi-based	Phase transition hysteresis of 150 °C
	Recoverable strain of 6%
	Recovery force of 400 MPa
	Shape change rate≥16%
Fe-based	Recoverable strain of 2%
Cu-based	CuZnMn recoverable strain of 4%
	CuAlMn phase transition hysteresis of 24 °C
	CuAlBe expansion rate of 11%

形状记忆合金。自此之后,大量具有形状记忆效应的合金相继涌现,包括 Co-Ni-Ga、Co-Ni-Al、Ni-Fe-Ga 和 Ni-Mn-X($X=\text{In, Sn, Sb}$)等合金^[29-32]。然而,这种合金的磁场诱发应变效应只存在于单晶样品中,并且与晶体学取向关系密切相关。为了克服这一限制,研究者们开始着手制备工艺简单且制造成本较低的 Ni-Mn-X($X=\text{In, Sn, Sb}$)合金的多晶样品。相对于 Ni-Mn-Ga 合金, Ni-Mn-X($X=\text{In, Sn, Sb}$)合金的驱动机制对晶体学取向的依赖性较小。因此,通过研究并发展这种新型合金,有望实现更广泛的应用。

近年来, Ni-Mn 基磁致形状记忆合金因其应变输出和驱动力较大而成为科研界的研究重点。研究者在晶体结构、马氏体相变、力学性能、合金化、磁热效应、机械制冷效应、交换偏置效应等方面进行了大量的研究^[33-40]。这些合金具有独特的行为和出色的磁控功能特性,使得 Ni-Mn-X($X=\text{In, Sn, Sb}$)合金在工业和医疗领域得到广泛应用。例如,它们被用于制造智能机电系统的核心器件和磁制冷领域,还可以作为高性能传感器、环境友好的磁制冷剂 and 磁力控制阻尼器的应用实例。

合金的晶体结构与形状记忆效应、材料性能密切相关。常见的 Ni-Mn 基合金马氏体结构包括五层调制马氏体(five-layered modulated martensite, 5M)、六层调制马氏体(six-layered modulated martensite, 6M)、七层调制马氏体(seven-layered modulated martensite, 7M)和非调制马氏体(non-modulated martensite, NM),详细的晶体结构示意图可参见图 2^[41-45]。

Ni-Mn-X 合金的奥氏体结构具有 $L2_1$ 型有序结构^[41],具体晶格常数和空间群如图 2a 所示。5M 马氏体和 7M

马氏体均具有长程周期调幅的单斜结构^[42],通过奥氏体中的原子迁移产生。5M 马氏体以 5 个(110)A 面作为周期,第 1 个面不发生位移,其他面发生位移偏离规则位置。7M 马氏体以 7 个(110)A 面作为周期,第 1 个面不发生位移,其他面发生位移偏离规则位置。5M 马氏体的电子衍射图谱显示为 2 个主衍射斑之间被 4 个额外的卫星斑分成 5 份。7M 马氏体的电子衍射图谱显示为 2 个主衍射斑之间被 6 个额外的卫星斑分成 7 份。7M 马氏体具有单斜对称的非公度超结构(7M(IC)),而非由纳米孪晶非调制 NM 马氏体组合(7M - $(5\bar{2})_2$)而成。Li 等人^[43]利用 EBSD 菊池线花样标定技术,澄清了 7M 马氏体具有单斜对称的非公度超结构(7M(IC))而非由纳米孪晶非调制 NM 马氏体组合(7M - $(5\bar{2})_2$)而成的这一长期争议。

通过对 6M 调制马氏体的电子衍射图谱的分析,研究人员发现在主衍射斑点之间有 5 个额外的卫星斑,将这些斑点分为了 6 份。Yan 等人^[44]通过超空间理论证明,可以通过使用 1 个包含 3 个平均晶体结构晶胞沿着 c 轴排列的超结构模型来近似描述 6M 非公度晶体结构。鉴于调制向量的不合理性,应将这种结构分类为三维空间中的非周期性结构。另外, NM 马氏体结构具有四方 $L1_0$ 非调制晶体结构,其 c 轴较长,空间群为 $I4/mmm$ (No.139),且其 c/a 值大于 1^[45]。

2.4 复合 SMA

SMA 不仅具有感知环境和驱动功能,还可以通过改变环境温度来产生功效,并具备智能驱动器和减振器的属性。此外, SMA 可以嵌入到不同材料中,如铝合金、镁合金和高分子材料,使得复合材料具有智能性质。尽管 SMA 在复合材料中的应用具有许多优点,但复合材料的

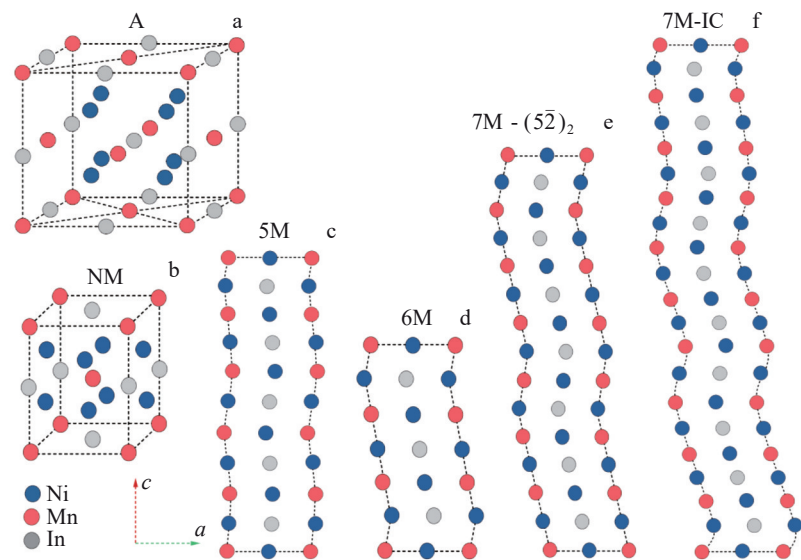


图2 Ni-Mn基合金的晶体结构

Fig.2 Crystal structures of Ni-Mn based alloy^[41-45]: (a) austenite; (b) NM martensite; (c) 5M martensite; (d) 6M martensite; (e) 7M - $(5\bar{2})_2$ martensite; (f) 7M-IC martensite

界面比表面积小,结合强度较低,容易在受到外力作用时发生开脱^[46]。

为了解决这个问题,可以使用基于 NiTi 的 SMA 丝或颗粒来制备环境响应型智能复合材料,这些材料能够显著改善力学性能或阻尼性能。NiTi 合金具有应变能力,可以阻止基体的裂纹扩展,从而产生外部力或位移并执行工作。此外,如果将 NiTi SMA 丝编织成网状并粘贴到高分子材料表面,可以提高材料的冲击韧度^[47]。通过这种方式,在受到冲击的过程中,带有 NiTi 丝的复合材料吸收了大量的冲击能量,并使得冲击能量均匀分布到整个复合材料中,从而导致塑性变形量减小。此外,通过使用纳米级 SiC 颗粒作为增强相,并结合低温分解造孔技术,成功制备了 SiC/NiTi 复合材料,该材料解决了多孔 NiTi 合金强度低的问题^[48]。

3 形状记忆合金制备方法

3.1 粉末冶金法

固态扩散法、自蔓延高温合成法和金属注射成形法是粉末冶金工艺的几种方法。这些方法利用固态扩散将镍和钛这 2 种金属元素进行合金化。相比传统的熔炼法,粉末冶金法可以解决凝固不均匀的问题。此外,借助粉末冶金模具,还可以制备出具有特殊形状的零部件或多孔结构件。然而,粉末冶金法的一个缺点是含有较多的杂质,并且成本较高。

3.2 真空熔炼法

真空熔炼法是制备 Ni-Ti 基记忆合金体材的常用方法之一,包括真空自耗电极电弧熔炼、真空高频感应熔炼和真空感应铜坩埚水冷熔炼法。真空自耗电极电弧熔炼得到的铸锭含有较少的杂质,但其组织成分不均匀。相比之下,真空高频感应熔炼法能够通过频率控制获得成分均匀的材料,但由于使用石墨坩埚,杂质元素 C 和 O 容易掺杂进去。要想得到不含 C、O 杂质且成分均匀的熔炼方法,真空感应铜坩埚水冷法是不二选择,不过这种方法的设备昂贵。此外,还有电子束熔炼、非自耗熔炼等其他熔炼方法,但目前主要用于科研实验,因为其熔炼代价过高。

3.3 增材制造技术

增材制造技术利用集成制造方法,通过控制系统将不同材料填充成形,形成完整的数字化零件。与传统制造方式相比,增材制造技术具有加工工序简单、加工周期短、材料利用率高和实现复杂拓扑结构快速制造的优势。然而,制备 NiTi 合金构件由于加工硬化和刀具磨损等问题具有挑战性,特别是那些具有复杂几何形状的构件。过去几十年来,增材制造技术因其设计自由度高和近净成形的能力而备受研究人员和工程师期待,被认为是制备复杂部件和个性化金属部件的重要手段。这项技术利

用高能激光束逐层熔化金属粉末制造零件,因此具有快速的熔化/凝固速度和周期性的热循环,导致形成试样具有不同于传统工艺的独特显微组织和性能。

激光增材制造 NiTi 形状记忆合金具有许多优点,其中包括微观组织晶粒细小、可控的微观组织、可控的相变过程以及可控的力学和功能特性。作为一种智能材料,NiTi 形状记忆合金能够快速响应和形状变形,从而满足智能结构的要求。4D 打印技术是一种智能材料的增材制造技术,它结合了 NiTi 形状记忆合金、智能结构、外界驱动机制和增材制造技术,实现了形状、性能和功能的变化,如图 3 所示^[49]。这种技术具有近净成形制造复杂智能结构的能力,并在生物医疗、航空航天和智能器件等领域具有潜在的应用价值。4D 打印技术在制备 NiTi 合金方面具有广阔的应用前景,可以为工业产品的设计和制造带来新的理念。

4 形状记忆合金加工工艺

尽管可以从各个方面改善传统加工方法带来的弊端,但形状记忆合金的传统加工方法仍然存在许多不足之处,如使刀具磨损严重,耗费时间,并且由于严重的加工硬化和伪弹性的出现使材料出现不规则变形。近年来出现了一些非常规的加工方法,如激光加工、水射流加工和电化学加工。然而,这些新工艺受到材料成分和力学性能的限制。例如在制备形状记忆合金管接头时,由于成型和加工困难,热变形和机加工设备以及工艺条件要求很高,尺寸精度不能满足要求。另外,机加工过程中会产生大量废料,原料利用率极低,原料损失率在 50% 以上。此外,在一定热加工条件下,晶粒尺寸的细化程度有限,这严重影响了管接头的综合力学性能和形状记忆性能,尤其是紧固力等方面。

5 形状记忆合金应用

形状记忆合金是一种具有相变能力的材料,其相变温度通常在 150 °C 以下,因此被归类为低温形状记忆合金。然而,目前已经发现了几十种不同种类的记忆合金,其相变温度范围覆盖了 0~1400 °C 之间的广泛范围。其中,Ru-Nb 合金的相变温度超过了 1000 °C,并且可以通过添加 Fe 元素进行调节。这使得 Ru-Nb 合金具备了在高温环境中应用的潜力。除了高温适应性,Ru-Nb 合金还具备了记忆较大的变形量的特点。实验表明,Ru₄₃Nb50Fe₇合金可以完全恢复达到 2.5% 的应变量,这意味着它能够应对一定程度的形变。这对于某些应用领域来说是非常重要的,特别是在高超声速飞行器等领域。有鉴于此,高相变温度形状记忆合金已经展现出在高超声速飞行器中的应用中的潜力。这些合金具备了在高温环境下的稳定性,并且能够承受较大的形变量。图 4 为形状记忆合金的研发历史示意图^[50]。

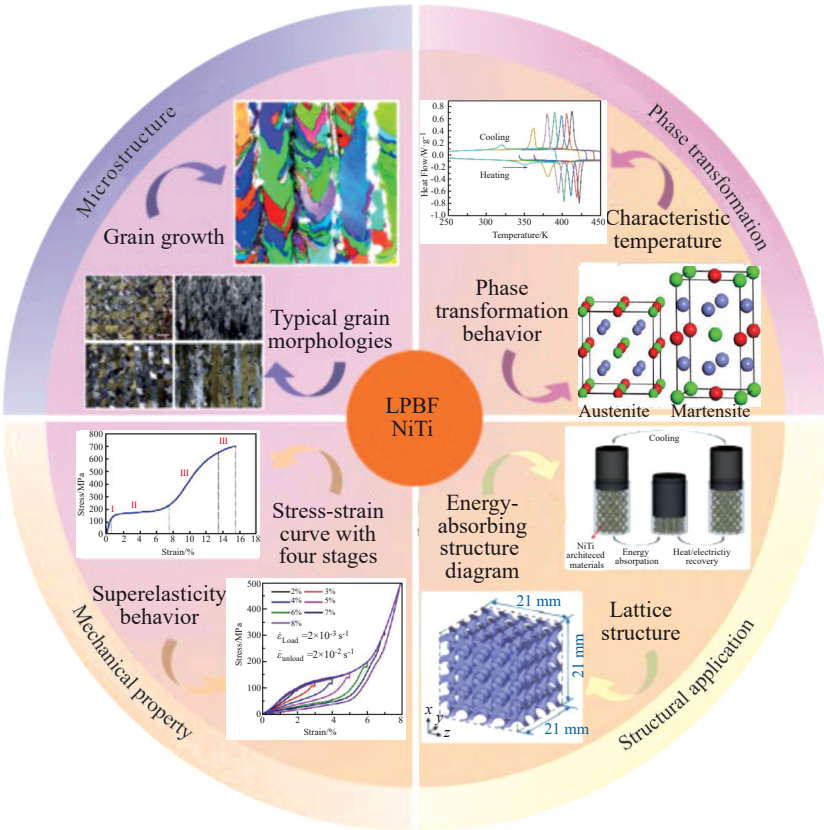


图3 增材制造技术制备NiTi合金的显微组织、相变、机械性能和结构应用

Fig.3 Microstructure, phase transformation, mechanical properties, and structural applications of NiTi alloy prepared by additive manufacturing technology^[49]

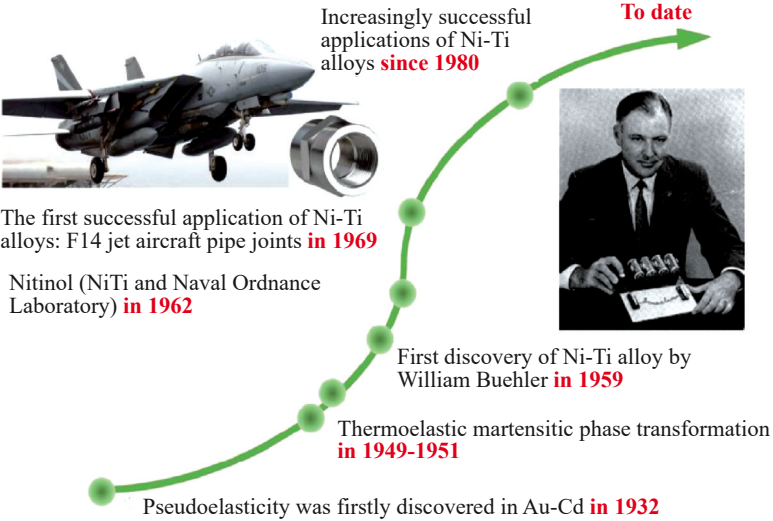


图4 形状记忆合金研发历史

Fig.4 History of shape memory alloy development^[50]

5.1 管接头

航空管路连接件是飞机的重要零部件,用于介质输送和能量传输。随着航空技术的发展,出现了多种形式和材料的管路连接件。其中,航空形状记忆合金永久连接钛管连接件具有轻量化、高强度、高可靠性的特点。这

种连接件能够在高压环境下保持稳定的连接,并在极端条件下自动恢复其原始形状。因此,航空形状记忆合金永久连接钛管连接件成为航空管路连接件的重要研究和应用方向之一。

目前,航空管路连接件的研究和应用方向主要包括

轻量化、高强度、高压以及高可靠性。其中,航空形状记忆合金永久连接钛管连接件具备明显的优势。首先,由于其材料特性和智能记忆功能,该连接件相对较轻,能够有效地减少飞机的总质量,提高飞行性能。其次,该连接件的高强度能够承受高压环境下的负载,确保连接的稳定性和可靠性。此外,当连接件受到外力变形时,它可以自动恢复其原始形状,减少对连接件的损伤,延长其使用寿命。因此,航空形状记忆合金永久连接钛管连接件作为一种具有轻量化、高强度、高可靠性特点的管路连接件,在航空领域的研究和应用中具备重要的意义。它可以满足航空管路连接件的高要求,并带来更好的飞行性能和安全性。

图 5 为形状记忆合金管接头的应用实例及工作原理。SMA 管接头在飞机等管道系统中被广泛采用。然而,传统的 NiTi 合金具有较小的相变滞后,这不利于运输和储存。为了解决这个问题,研究人员于 1986 年开发了一种新型的形状记忆合金,它以 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 为成分,具有宽滞后的特点,并且制备过程简单可靠,不需要特殊储存条件^[51]。因此,这种 NiTiNb 合金成为了理想的选择,它不仅有宽滞后性能,还具有出色的力学性能和广泛的储存温度范围,同时容易安装。正因如此,该合金已广泛应用于航空航天、医疗器械、电子电缆等工业领域。然而,要进一步推动形状记忆合金管接头在更广泛领域的应用,需要继续研发其结构设计和工艺参数,以适应不同环境条件下的需求。这样的研发工作将有助于形状记忆合金管接头的扩大应用范围,并有助于满足各个行业的需求。

20 世纪 90 年代开始, NiTiNb 形状记忆合金在航空领域的研究取得了重要进展。国内多个研究组织深入研究了 NiTiNb 形状记忆合金并取得了大量实验数据, NiTiNb 形状记忆合金的微观组织由 NiTi 基体以及基体上的一些 $\beta\text{-Nb}$ 软质点构成。董治中等人^[52]发现 $\text{Ni}_{47}\text{Ti}_{44}\text{Nb}_9$ 合金的耐腐蚀性能较好,当加工成管接头后,

对其变形扩径 16% 升温装配,然后进行拉拔、扭转及疲劳实验,发现经过处理后管接头强度较高,抗疲劳性能良好。赵连城等人^[53]的研究表明形变对 NiTiNb 宽滞后形状记忆合金的形状记忆效应以及相变滞后的显著影响。杨冠军等人^[54]发现 NiTiNb 中 Nb 的原子含量需要达到 9% 左右就可以使合金具备较宽的滞后温度以及较大可回复应变。

形状记忆合金在航空、航天、石油、化工、机械、仪器仪表、汽车等多个行业有广泛应用前景。其中, NiTiFe 基形状记忆合金管接头广泛应用于美国的第 3 代作战飞机,如 F15、F14、F18 等。然而,相比 NiTiFe 形状记忆合金管接头, NiTiNb 管接头具有一些优势,例如宽的相变滞后 (130°C)、室温储存和安装简单等。此外,目前的研究主要关注无内筋型管接头。然而,在实际应用中,更常见的是使用内筋管接头。内筋可以提供更好的管接头与被接管之间的密封性和结合强度,进一步增强了连接的性能。这是由于内筋在大变形扩径条件下,它的大量不可恢复变形及加工硬化,能够增强管接头与被接管之间的密封性与结合强度。因此,在设计和制造 NiTiNb 记忆合金管接头时,应考虑使用内筋来提高其性能。

国外在 SMA 永久连接管接头方面已经有了一定的性能考核标准和规范。然而,国内的 SMA 永久连接管路连接件仍处于研制和应用研究阶段。这导致了国内在相关领域缺乏适用的考核评价标准。因此,需要掌握 SMA 管接头的制备和加工技术,并建立 SMA 永久连接钛管连接件相应的考核评价方案。

5.2 可变形机翼

可变形机翼能够根据不同的飞行任务调整机翼的外形,以适应不同的气动特性,并进一步提高飞机的升阻比、燃油节省率和机动性能。表 2 为变体飞行器不同变形尺度的划分实现功能概况。

1995 年,美国国防部与格鲁曼公司共同合作开展了智能可变形机翼计划,这使得可变形机翼技术开始成为

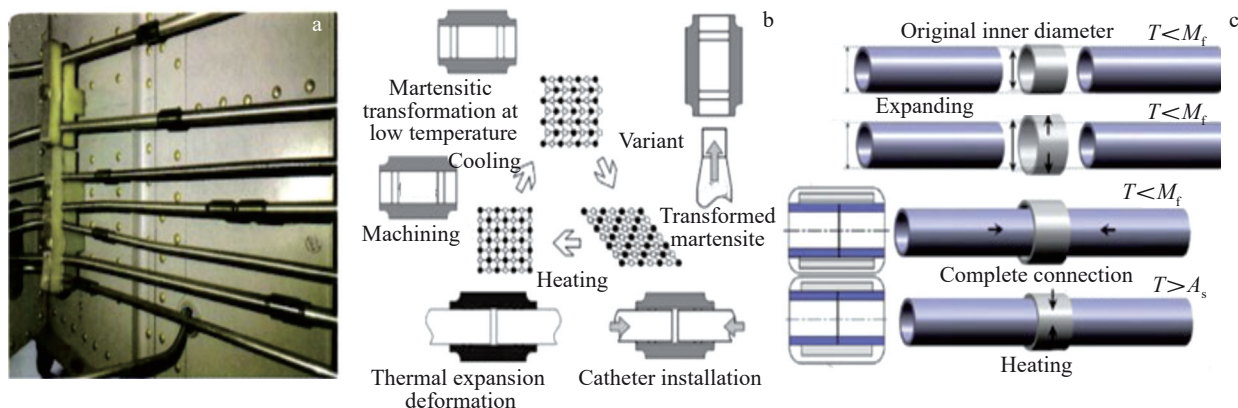


图 5 形状记忆合金管接头应用实例及工作原理

Fig.5 Application examples and mechanisms of shape memory alloy pipe joints^[51]: (a) Yun-12 memory alloy pipe joint; (b) connection process; (c) working principle

表2 变体飞行器按变形尺度划分和实现功能概况

Table 2 Overview of the classification and functions of morphing aircraft according to deformation degree

Deformation degree	Specific method
Micro/small size deformation (partial changes to the wing)	Shock wave control bulge
	Active skin vibration
	Circulation control
	Synthetic jet
Medium-scale deformation (wing shape change)	Curvature
	Variable thickness
	Wing twist
	Variable wing tip
Large-scale deformation (overall changes to the wing)	Folding wings
	Variable sweep angle
	Variable length
	Variable wing area

学术界和工业界的关注重点。与此同时,美国NextGen公司^[55]推出了一款蝠翼无人机,该无人机具有可调整的后掠翼角度,从而可以改变机翼的面积和展弦比。其他研究机构进行了可变形机翼的研究,其中包括马里兰大学、美国弗吉尼亚大学、南京航空航天大学 and 哈尔滨工业大学。至此,可变形机翼技术的研究和开发已经取得了广泛的进展,并且可以显著改善飞机的飞行性能和操纵能力。

早在60年代国外就已经采用机械式变体技术应用于F-111飞机^[56]、贝尔X-5^[57]和F-14^[58]变机翼后掠飞机,如图6、图7所示。F-111飞机的机翼后掠角度变化范围为16°~72.5°贝尔X-5可以在不到30 s的时间内从全面展开到最大后掠。然而,贝尔X-5的自旋不稳定性导致了飞机的坠毁。尽管如此,贝尔X-5的研究仍然展示了变后掠机翼在扩大飞行器速度范围方面的优势。F-14的机翼后掠角变化范围为20°~68°。然而,F-14由于整体造价极高,维护保养费用昂贵,机身质量增大等因素对其垂直机动性能产生了负面影响,F-14在2006年完全退出使用。

加拿大魁北克大学Popov等^[59]采用柔性复合材料和SMA驱动器,设计了一种具有自适应变形的变厚度机翼。在马赫数变化范围为0.2~0.3时,增加厚度后的机翼升力相比初始翼型提高了22%。针对冷战升级的要求,北美公司推出了XB-70“女武神”战略轰炸机,如图8所示^[60]。其翼尖设计具有折叠功能,在飞行时,翼尖可向下偏转25°~65°, (其中,低空超音速飞行时可下折25°,高空高速巡航飞行时可下折65°)。从理论上讲,翼尖的折叠可以在高速飞行中提高飞机的方向稳定性,并且抵消由于压力中心后移而带来的不稳定因素,进一步减小飞机的配平阻力。

以上的研究表明,通过调整机翼的后掠角、厚度、翼尖等方式,可以使飞机在低速飞行和起飞阶段获得更大的升力,从而提高飞机的性能和操控能力。



图6 贝尔X-5飞机

Fig.6 Bell X-5 aircraft^[57]



图7 F-14飞机变后掠前后对比

Fig.7 Comparisons of F-14 aircraft before (a) and after (b) changing to sweep^[58]



图8 XB-70“女武神”超音速战略轰炸机

Fig.8 North American aviation XB-70 Valkyrie bomber^[60]

根据国内的研究情况,变后掠翼方案的研究主要集中在机构设计、气动分析和仿真建模等几个方面。其中,南航徐志伟等人^[61]实现了在后缘的变形驱动和精确控制。此外,南航熊克等人^[62]证明了 SMA 扭矩管在变体飞行器变形驱动中的可行性。哈工大冷劲松等人^[63]在形状记忆聚合物方面进行了大量研究,研制的形状记忆复合材料管由形状记忆聚合物制成,通过加热可改变刚度,刚度变化可达 79 倍。

南京航空航天大学裘进浩等人^[64]一直在研究智能结构的变体,包括机翼变厚度、机翼后缘连续偏转、折叠翼、伸缩翼、变后掠和大变形蒙皮结构,还有智能驱动器等。他们成功实现了自适应结构的变体,并验证了复合驱动器的驱动能力,验证了飞行器机翼自适应变体结构以及多点分布式驱动控制方法的可行性。团队还进行了飞行试验,成功地实现了在高空飞行过程中机翼后缘和翼尖小翼的自适应变体功能,达到了最高飞行速度 60 m/s,如

图9、图10所示。

虽然国内科研单位和高等院校在新型变后掠机构和材料、建模方法和智能计算等方面有深入研究,但在实际工程型号上尚未开展应用。因此,国内还需要进一步推动可变后掠机翼技术的实际应用,以进一步提高该技术的研究水平 and 应用程度。

5.3 进气整流罩

波音公司采用记忆合金和其他智能材料以及结构技术,成功地实现了 F-15 战斗机超声速进气道的调节目标。这些技术包括转动压缩面、转动下唇口和引入可变鼓包等。实验结果显示,记忆合金驱动器具有较高的驱动力和行程。图 11 为依靠形状记忆合金实现进气道自动变形调节方式示意图^[65]。记忆合金驱动器和超弹性记忆合金蒙皮技术能够改变进气道下唇罩前缘的半径。其用于转动压缩面的记忆合金驱动器能够提供高达 88.9 kN 的驱动力,且行程为 152 mm;而用于转动下唇口的记忆

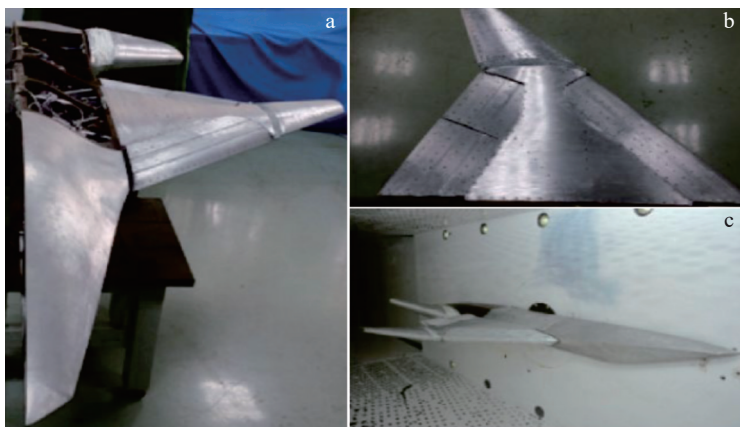


图9 形状记忆合金和电机复合驱动变体机翼模型及风洞实验

Fig.9 Shape memory alloy (a); motor composite drive variant wing model (b); wind tunnel experiment (c)^[64]

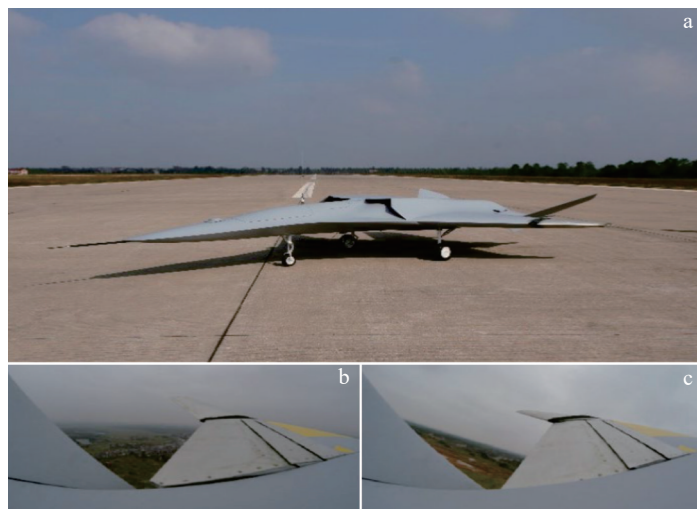


图 10 SMA 驱动可偏转翼梢小翼和后缘飞行实验

Fig.10 Deflectable winglet (a) and trailing edge flight experiment (b-c) driven by SMA^[64]

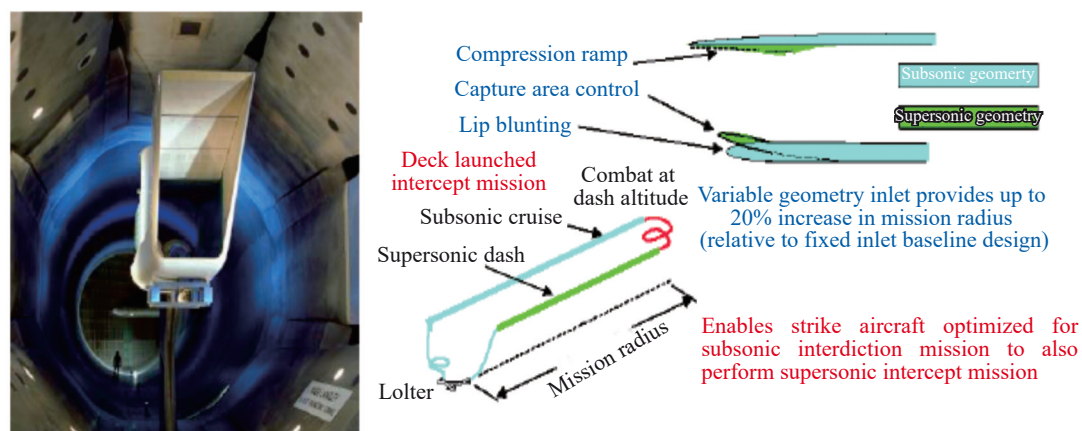


图 11 波音公司依靠形状记忆合金实现进气道自动变形调节方式
Fig.11 Boeing relies on shape memory alloy to realize automatic deformation adjustment method of inlet^[65]

合金驱动器可在马赫数 0.8 的飞行条件下使下唇口转动 20°。此外,自适应鼓包技术在静止条件下可以变形,但在气动力载荷的作用下无法对型面进行准确控制^[65]。

5.4 智能降噪喷口

在 2001 年,波音公司进行了飞行器降噪技术演示计划(quiet technology demonstrator, QTDI)。这个计划主要研究了形状记忆合金在涡扇发动机降噪方面的应用,并开发出一种智能降噪喷口技术^[66],如图 12 所示。这种喷口采用了双向记忆合金板驱动,可以根据飞行状态来改变形状,从而降低噪音和推力损失。通过在波音 777-300ER 的 GE115B 发动机上进行的飞行试验,该记忆合金喷口技术取得了良好的效果。这项技术具有一些优点,比如驱动力大、控制直接、占用空间小等。然而,它对于记忆合金板的制备和训练有较高的要求,因此需要进一步的研究。

5.5 自适应激波控制鼓包

针对飞行器马赫数升高所导致的机翼表面激波问题,南京航空航天大学裘进浩等人^[64]提出了一种新的改进方法,称为自适应激波控制鼓包(adaptive shock control bump, ASCB),如图 13 所示。通过采用等熵压缩

方法和 SMA 双程记忆效应,基于加热装置改变 SMA 鼓包温度,进而改变鼓包的形状,从而调整机翼局部构型以减小波阻。在迎角 AOA=2.31° 时,ASCB 能够减阻 6.15%;而在迎角 AOA=2.8° 时,减阻效果甚至达到 10.28%。

6 国内外差距分析

从目前的发展来看,国内外在形状记忆合金于航空领域的应用技术的研究方法仍然存在很大差距,主要体现在:

- 1)在材料制备和加工技术方面,国外已经将形状记忆合金管接头成功应用,而国内传统的制备方法极易引入杂质形成第二相,导致其形状记忆效应和超弹性性能较差,所使用的形状记忆合金管接头依赖于进口。近年来 4D 打印技术发展迅速,可以借助于增材制造的制备方法 & 工艺对形状记忆合金管接头、变体结构及超材料等进行设计及制备,这将极大可能的消除传统方法带入的杂质及第二相,达到细晶强化的目的。
- 2)在变体技术工程应用方面,尤其是考虑实际工程约束的结构/机构变形/承载分析设计、机械驱动可实现

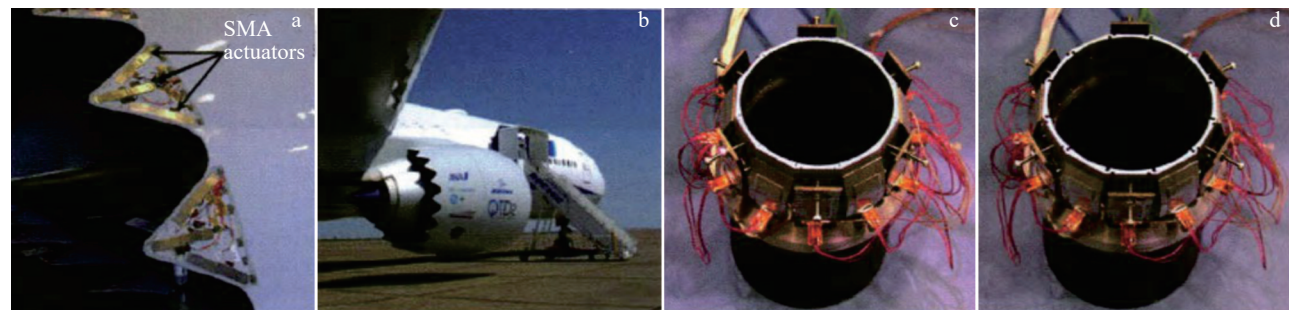


图 12 发动机尾喷嘴
Fig.12 Covers removed (a), thrust reversers installed (b), contracted (c), and expanded (d) engine tail nozzle^[66]

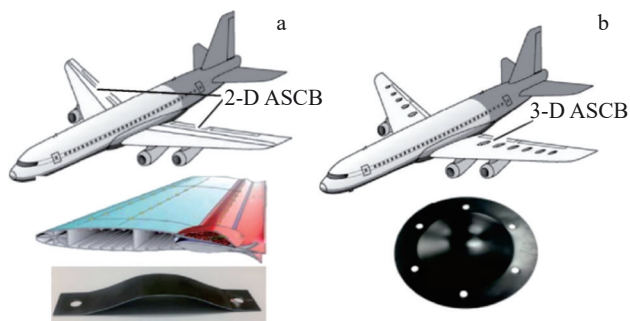


图 13 自适应 SMA 激波控制鼓包

Fig.13 Adaptive SMA shock wave control bulge^[64]: (a) 2-D ASCB and (b) 3-D ASCB

性设计等技术方面,国外积攒了大量工程设计经验和数据,而国内仍然处于研究阶段,尚未全面考虑工程约束限制,技术成熟度偏低。国外开展了大量的针对性研究,且部分成果已经完成了飞行试验,例如基于智能材料的新型驱动器、可承载柔性蒙皮等,国内研究还主要处于试验室阶段。

3)在高超声速飞机设计方面,国外从60、70年代开始,就逐步开展了多个高超声速飞行设计研制工作,在高超声速飞机变体结构的热防护等技术领域开展了大量研究,且“女武神”超音速战略轰炸机上已经实现了机翼翼尖的向下折叠变体,国内虽然近年来在高超声速飞机技术领域投入了大量研究,但是尚未有服役的成熟机型,仍然与国外存在较大差距。

7 结束语

本文介绍了形状记忆合金在航空领域的应用研究进展,随着材料、工艺、控制、信息技术的发展,SMA在航空航天领域的应用将更广泛,在研究方面,体现出更强的多学科交叉和融合特征。

1)SMA材料的应用范围需要更加丰富,以满足不同温度环境下的要求。虽然SMA材料在低温研究和应用方面相对较为完善,但在高温环境下的研究和应用相对较少。通过使用诸如NiTiHf和NiTiHfZr等材料,已经满足了高温条件下的需求,从而扩大了SMA的应用范围。但应更多关注合金的马氏体相变转变温度和服役温度的匹配性,相变滞后以及力学性能是否满足要求。

2)通过传统工艺和新型工艺的改进,可以改善SMA的性能,以满足航空航天领域对轻量化和小型化的需求。随着4D打印工艺的发展,SMA材料的利用得以实现制造复杂功能结构的目标。可以借助于增材制造的制备方法以及工艺对形状记忆合金管接头及变体结构等进行设计及制备,这将极大可能的消除传统方法带入的杂质及第二相,达到晶粒强化力学性能的目的。

3)SMA材料还可以制造结构紧凑、控制简便、低功

耗高输出的驱动器,在航空领域得到广泛应用。SMA驱动器正在呈现轻量化、自动化和智能化的发展趋势,其性能优势将进一步提升。

4)通过改善材料性能和结构形式的多样化,更好地发挥SMA的应用价值。通过人工设计SMA合金的结构实现超材料的形成,进而达到变体机翼变弯度、变厚度、变曲度及变后掠的目的。

参考文献 References

- [1] Olander A. *Journal of the American Chemical Society*[J], 1932, 54(10): 3819
- [2] Chang L C, Read T A. *Transactions of AIME Journal of Metals*[J], 1951, 47(191): 47
- [3] Buehler W J, Gilfrich J V, Wiley R C. *Journal of Applied Physics*[J], 1963, 34(5): 1475
- [4] Deng Huaibo(邓怀波), Chen Yuhua(陈玉华), Li Shuhan(李树寒) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(12): 4119
- [5] He Xiangming(何向明), Rong Lijian(戎利建), Yan Desheng(闫德胜) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(2): 227
- [6] Yamamoto T, Taya M. *Applied Physics Letters*[J], 2007, 90(25): 251905
- [7] Kakeshita T, Takeuchi T, Fukuda T et al. *Applied Physics Letters*[J], 2000, 77(10): 1502
- [8] Wuttig M, Li J, Craciunescu C. *Scripta Materialia*[J], 2001, 44(10): 2393
- [9] Morito H, Fujita A, Fukamichi K et al. *Applied Physics Letters*[J], 2002, 81(9): 1657
- [10] Murakami Y, Shindo D, Oikawa K et al. *Applied Physics Letters*[J], 2003, 82(21): 3695
- [11] Yan Xiaojun(闫晓军), Zhang Xiaoyong(张小勇). *Shape Memory Alloy Smart Structure*[M]. Beijing: Science Press, 2015: 5
- [12] Stephane L. *Issues in the Design of Shape Memory Alloy Actuators*[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology 2002
- [13] Hollerbach J M, Hunter I W, Ballantyne J. A *Comparative Analysis of Actuator Technologies for Robotics*[M]. Cambridge: MIT Press, 1992: 1
- [14] Liu D Z, Liu W X, Gong F Y. *Journal De Physique: IV*[J], 1995, 5(C8): 1241
- [15] Gu Fan(谷凡), Zhang Ling(张玲), Wang Wei(王伟) et al. *Construction and Budget*(建筑与预算)[J], 2017(12): 30
- [16] Hartl D J, Lagoudas D C. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*[J], 2014, 221(4): 535
- [17] Humbeeck J V. *Materials Science Engineering A*[J], 1999, 273-275: 134
- [18] McDonald S L. *Materials Design*[J], 1991, 12(1): 29
- [19] Yamauchi K, Ohkata I, Tsuchiya K et al. *Shape Memory and Superelastic Alloys: Technologies and Applications*[M]. Sawston Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2011: 6

- [20] He Zhirong(贺志荣), Wang fang(王 芳). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2013, 23(7): 1866
- [21] Yin Yan(尹 燕), Xu Yangtao(徐仰涛), Shen Jie(沈 婕) *et al. Materials Reports*(材料导报)[J], 2006, 20(12): 70
- [22] Xu Fuchao(徐付超). *Microstructure and Properties of TiNi Alloy Modified by Ag*(Ag 改性 TiNi 合金的组织结构与性能)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013
- [23] Liu Yongkang(刘永康), Jiang Nayun(蒋娜云), Li Wei(李 微). *China Science and Technology Information*(中国科技信息)[J], 2018(11): 29
- [24] Ren Yan(任 彦). *Advanced Materials Industry*(新材料产业)[J], 2014(6): 42
- [25] Ma J, KaYalan I, Noebe R D. *International Materials Reviews*[J], 2010(55): 257
- [26] Meng Xiaokai(孟晓凯), Zhao Chunwang(赵春旺). *Materials Reports*(材料导报)[J], 2013, 27(2): 99
- [27] Firstov G S, Van Humbeeck J, KoVal Y N. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*[J], 2006, 17: 1041
- [28] He Z, Wang F, Zhou J. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2006, 22(5): 634
- [29] Oikawa K, Ota T, Ohmori T *et al. Applied Physics Letters*[J], 2002, 81(27): 5201
- [30] Karaca H E, Karaman I, Basaran B *et al. Advanced Functional Materials*[J], 2009, 19(7): 983
- [31] Kainuma R, Imano Y, Ito W *et al. Applied Physics Letters*[J], 2006, 88(19): 192513
- [32] Gao Li(高 丽), Xin Xiangyang(辛向阳), Liu Zili(刘紫莉) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(12): 4021
- [33] Du J, Zheng Q, Ren W *et al. Journal of Physics D: Applied Physics*[J], 2007, 40(18): 5523
- [34] Zheng H, Wang W, Xue S *et al. Acta Materialia*[J], 2013, 61(12): 4648
- [35] Aksoy S, Acet M, Wassermann E F *et al. Philosophical Magazine*[J], 2009, 89(22–24): 2093
- [36] Zhang R, Zhang X, Qian M, *et al. Intermetallics*[J], 2018, 97: 1
- [37] Tan C L, Tai Z, Zhang K *et al. Scientific Reports*[J], 2017, 7(1): 1
- [38] Zhang R, Qian M, Zhang X *et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2017, 428: 464
- [39] Liu J, Gottschall T, Skokov K P *et al. Nature Materials*[J], 2012, 11(7): 620
- [40] Wang B, Liu Y, Ren P *et al. Physical Review Letters*[J], 2011, 106(7): 077203
- [41] Hames F A. *Journal of Applied Physics*[J], 1960, 31(5): S370
- [42] Pons J, Chernenko V, Santamarta R *et al. Acta Materialia*[J], 2000, 48(12): 3027
- [43] Li Z B, Zhang Y D, Esling C *et al. Acta Materialia*[J], 2011, 59(7): 2762
- [44] Yan H L, Zhang Y D, Xu N *et al. Acta Materialia*[J], 2015, 88: 375
- [45] Cong D Y, Zetterström P, Wang Y D *et al. Applied Physics Letters*[J], 2005, 87(11): 111906
- [46] Alam S, Moni M, Tesfamariam S. *Engineering Structures*[J], 2012, 34(1): 8
- [47] Shukla U, Garg K. *Smart Materials in Medicine*[J], 2023(4): 227
- [48] Jiang Hongjie(江 鸿 杰). *Preparation and Properties of Lightweight, High Strength and High Damping Ni-Ti Shape Memory Alloys and Composites*(轻质高强高阻尼 Ni-Ti 形状记忆合金与复合材料的制备及其性能研究)[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013
- [49] Wei S S, Zhang J L, Zhang L. *International Journal of Extreme Manufacturing*[J], 2023(5): 032001
- [50] Zeng Youcai(曾才有). *Preparation of NiTi Shape Memory Alloy by Rapid Solidification and Multi-step Restrained Aging and Its Phase Transition and Functional Fatigue Characteristics*(快速凝固与多步约束时效制备 NiTi 形状记忆合金及其相变和功能疲劳特性研究) [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019
- [51] Duerig, T W Melton K N Proft J L. *Engineering Aspects of Shape Memory Alloys*[M]. Butterworth-Heinemann: Elsevier, 1990: 130
- [52] Yu Shenjun(于申军), Dong Zhizhong(董治中), Zhou Shouli(周守理). *Transactions of Tianjin University*(天津大学学报)[J], 1999(1): 82
- [53] Zhao Liancheng(赵连城), Zhang Zhifang(张志方), Cai Wei(蔡伟). *Journal of Materials Engineering*(材料工程) [J], 1992, S1: 187
- [54] Deng Ju(邓 炬), Yang Guanjun(杨冠军). *Rare Metals Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1998, 27(6): 322
- [55] Barbarino S, Flores E I S, Ajaj R M *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2014, 23(6): 63
- [56] Barbarino S, Bilgen O, Ajaj R M *et al. Journal of Intelligent Material Systems and Structures*[J], 2011, 22(9): 823
- [57] Perry R L. *Bell X-5 Variable Sweep Wing Research Aircraft Technical Report*[R]. Washington: NASA, 1966
- [58] Anderson B T, Meyer R R, Chiles H R. *Journal of Aircraft*[J], 1988, 28(10): 622
- [59] Popov A V, Grigorie L T, Botez R *et al. Journal of Aircraft*[J], 2010, 47(4): 1309
- [60] Beaulieu W, Burcham W, Campbell R. *Journal of Aircraft*[J], 1969, 6(4): 312
- [61] Zhu Qian(朱 倩), Xu Zhiwei(徐志伟), Qi Jianlong(戚健龙) *et al. Transducer and Microsystem Technologies*(传感器与微系统) [J], 2011, 30(9): 33
- [62] Xiong Ke(熊 克), Tao Baoqi(陶宝祺), Yao Entao(姚恩涛). *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报) [J], 2001, 22(4): 379
- [63] Leng Jinsong(冷劲松), Sun Jian(孙 健), Liu Yanju(刘彦菊). *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*(航空学报) [J], 2014, 35(1): 29
- [64] Qiu Jinhao(裘进浩), Ji Hongli(季宏丽), Xu Zhiwei(徐志伟) *et al. Journal of Nanjing University of Aeronautics &*

- Astronautics*(南京航空航天大学学报)[J], 2022, 54(5): 867
[65] Pitt D, Dunne J, White E. *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*[C]. Denver, Colorado: The Boeing Company, 2002: 1356
[66] Hartl D, Lagoudas D, Calkins F *et al. Smart Materials and Structures*[J], 2009, 19(1): 015020

Research Progress in Shape Memory Alloys and Their Applications in Aviation Field

Liang Xinzeng^{1,2}, Guan Weimian¹, Wang Xing¹, Zhao Jianguo¹, Li Shijian¹, Liu Yanmei¹, Liu Biao¹, Bai Jing², Guan Ziqi³

(1. Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd, Shenyang 110850, China)

(2. Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

(3. Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Shape memory alloys (SMA) possess both the shape memory effect and superelasticity. This material plays a significant role in the aviation field, and it is crucial to understand its types, mechanisms, preparation, and processing techniques. This review focused on the research progress of SMA in aviation applications. Considering the material characteristics of SMA, its application research in aviation fields was analyzed, such as pipe joints, deformable wings, air intake fairings, and intelligent noise reduction nozzles. The research findings indicate that as aviation manufacturing technology advances, the application of SMA is expected to evolve towards high temperature resistance, lightweightness, and intelligence.

Key words: shape memory alloys; aerospace; shape memory effect; superelasticity

Corresponding author: Guan Ziqi, Ph. D., Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, P. R. China, E-mail: zqguan@imr.ac.cn