

4D 打印形状记忆合金的研究现状及发展趋势

谢桂平, 李昭青, 陈 双

(湖北工程职业学院 智能制造学院, 湖北黄石 435006)

摘要: 4D打印技术通过将增材制造与智能材料和智能结构相结合, 可实现材料-结构-功能的一体化制造, 是未来制造技术的重要发展方向。形状记忆合金作为一种具有独特形状记忆效应和超弹性的金属智能材料, 可实现承载与变形、传感、驱动、控制和能量转换等多种功能的集成。4D打印形状记忆合金有望创造出具有丰富激励响应行为的自适应、自组装或自修复智能结构和装备。为进一步推动4D打印形状记忆合金的发展和应用, 本文综述了4D打印形状记忆合金的主要成形方式, 重点介绍了Ni-Ti基、Cu基和Fe基形状记忆合金的研究进展, 分析讨论了4D打印形状记忆合金目前存在的关键问题和未来的发展方向。

关键词: 智能制造; 4D打印; 增材制造; 形状记忆合金; 镍钛合金; 自适应结构

中图分类号: TG139+.6; TB331; TP391.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 05-0453-11

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0062

Research Status and Development Trends of 4D-Printed Shape Memory Alloys

XIE Gui-ping, LI Zhao-qing, CHEN Shuang

(College of Intelligent Manufacturing, Hubei Engineering Institute, Huangshi 435006, Hubei, China)

Abstract: 4D printing can realize integrated manufacturing of material, structure and functionality by combining additive manufacturing technology with smart material and smart structure, which is an important future direction for manufacturing technology. Shape memory alloys, as a class of intelligent metallic materials characterized by the shape memory effect and superelasticity, can integrate multiple functionalities, including load-bearing, morphing, sensing, actuation, control, energy conversion and so on. 4D printing shape memory alloys are expected to create out adaptive, self-assembling, or self-healing intelligent structures and apparatuses with diverse incentive-responsive behaviors. In order to further promote the development and application of 4D-printed shape memory alloys, this paper reviews the main forming methods of 4D-printed shape memory alloys, focuses on the research progress of Ni-Ti based, Cu based, and Fe based shape memory alloys, and analyzes and discusses crucial issues existed now and future development trends of the 4D-printed shape memory alloys.

Key words: intelligent manufacturing; 4D printing; additive manufacturing; shape memory alloy; Ni-Ti alloy; adaptive structure

3D打印技术是一种以数字模型文件为基础, 利用金属、陶瓷及高分子材料等, 通过自下而上、分层加工、逐层叠加方式直接制造三维实体的技术^[1]。近30年来, 3D打印技术发展迅速, 已成为第三次工业革命的代表性技术之一。随着科学技术和社会经济的快速发展, 人们对设备及构件的要求不再局限于传统的力学性能与功能特性, 而对其智能特性提出了更高的要求。尽管3D打印具有成形复杂几何形状的卓越能力,

但所制备的构件通常是静态的, 不能随着周围动态环境的变化而改变。为满足人们对装备自适应、自组装、自修复、自学习及自感知等智能特性日益增长的需求^[2], 4D打印技术应运而生。

最初, 4D打印技术被定义为在3D打印基础上增加时间维度, 即采用3D打印制备的构件可以在预定环境随时间发生形状改变^[3]。随着4D打印技术相关研究的不断深入, 其内涵得到了进一步丰富。4D打印技术也被

基金项目: 湖北省自然科学基金联合基金项目(2024AFD021); 材料成形与模具技术全国重点实验室开放基金课题(P2025-042)。

收稿日期: 2025-09-29 收到初稿, 2026-02-14 收到修订稿。

作者简介: 谢桂平(1973-), 女, 副教授, 主要研究方向为金属增材制造。E-mail: 33035529@qq.com

通信作者: 李昭青, 男, 副教授, 博士。E-mail: lizhq84@qq.com

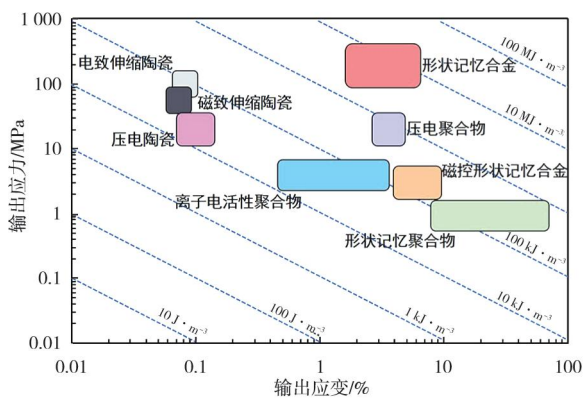
引用格式: 谢桂平, 李昭青, 陈双. 4D打印形状记忆合金的研究现状及发展趋势[J]. 铸造, 2026, 75(5): 453-463.

XIE Guiping, LI Zhaoqing, CHEN Shuang. Research status and development trends of 4D-printed shape memory alloys [J]. Foundry, 2026, 75(5): 453-463.

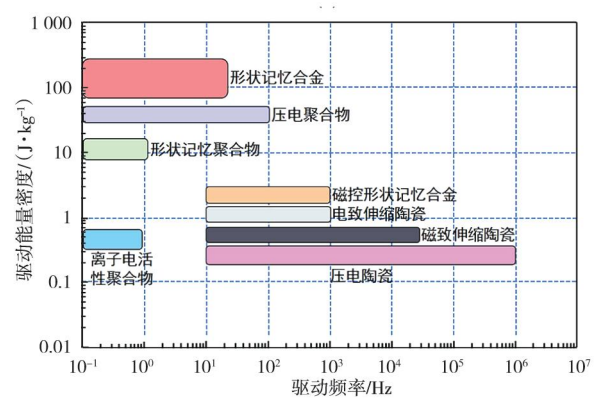
定义为智能构件的增材制造技术，即打印的构件能够在预设的外界激励（如温度、湿度、光、磁场和电场等）作用下自动发生形状、性能或功能的可控变化^[4]。在传统制造技术中，材料的制备、结构的设计和功能的实现通常是三个独立的环节。4D打印技术则将材料与结构的变形、变性、变功能设计直接内置到制造过程中，简化了从设计理念到实物制造的过程，实现了材料-结构-功能的一体化制造，有望改变传统的零部件设计理念和制造方式，为传统制造技术带来巨大变革^[5]。4D打印技术可以在不需要外部机电系统的情况下直接将智能特性植入打印对象，有望消除传统智能装备中机电系统的固有弱点，为高端技术和装备的新理念、新功能带来颠覆性扩展^[6]。譬如，利用4D打印结构的激励响应变化能力，产品可以先打印成易于存储的紧凑结构，使用时再激活为全尺寸状态，从而减少存储和运输所需的空间，节省物流成本^[7]。

4D打印技术是增材制造与智能材料和智能结构的结合。智能材料的增材制造是4D打印技术的重要实

现方式。智能材料是一类能够感知环境变化而进行自我判断和执行相应指令的材料^[8]。目前，智能材料主要包括形状记忆合金、形状记忆聚合物、压电材料、电（磁）致伸缩材料、电流（磁流）变体和功能凝胶等。其中，形状记忆合金是一种具有独特形状记忆效应和超弹性的智能金属材料，可实现承载、传感、驱动、控制、能量转换和减震降噪等多种功能。相较于其他智能材料，形状记忆合金具有能量密度最高、输出应力最大、综合力学性能最好和驱动频率较快等优点（图1）^[9-10]。凭借上述优势，形状记忆合金已在自适应空间展开机构、变体飞行器、自调节宇航服、自修复轮胎及自调节散热器等智能结构中得到广泛应用^[10]。例如：美国国家航空航天局采用形状记忆合金智能驱动器成功研制了多型号可变翼飞机（如战斗机F/A-18、无人机PTERA等）和可应对恶劣火星地形的自修复漫游车轮胎；华为利用形状记忆合金研发了自适应阻尼调节器，并将其成功应用于新一代折叠屏手机。



(a) 输出应变和应力



(b) 驱动频率和能量密度

图1 典型智能材料的性能对比

Fig. 1 Comparison of properties of typical intelligent materials

形状记忆合金智能构件的传统制备方式主要为铸造、粉末冶金、锻造以及轧制等变形加工方法，成形件结构简单、变形/驱动行为单一，极大地限制了形状记忆合金智能构件的发展与实际应用^[11]。将4D打印技术应用于形状记忆合金有望实现复杂智能变形件、智能传感器和智能驱动器的一体化制造，例如创造出自适应智能蒙皮、自伸展生物支架等具有更丰富激励响应行为的智能结构和装备。西安交通大学王永信等^[12]利用4D打印技术实现了自膨胀Ni-Ti形状记忆合金分叉型血管支架的一体化制备，该支架在低温状态下呈现收缩状态，体积小巧方便手术植入，植入后受人体温度激励自动变形扩张，用于支撑血管堵塞区域，保障血液的正常流通。吉林大学李桂伟等^[13]利用4D打印

形状记忆合金研发了一种具有仿生功率放大行为的小卫星锁紧释放装置，该装置兼具响应速度快和驱动力量大的优点，可保证卫星到轨后实现可靠分离并获得满足要求的分离速度。华南理工大学杨超团队与广东华艺卫浴实业有限公司联合研发了一种4D打印形状记忆智能阀门，该阀门在感受到温度剧烈变化时可自动开合，从而实现水温的精准控制。4D打印形状记忆合金在航空航天、生物医疗、国防装备和民用生活等领域均有着巨大的发展前景和应用潜力，引起了学术界和工程界的广泛关注^[14]。

为进一步推动4D打印形状记忆合金的发展和应用，本文概述了4D打印形状记忆合金的主要成形方式，重点梳理了Ni-Ti基、Cu基和Fe基形状记忆合金4D

打印技术的研究现状,并在此基础上分析和讨论了4D打印形状记忆合金目前存在的主要问题以及未来的发展趋势。

1 形状记忆合金的增材制造方法

形状记忆合金的4D打印是以增材制造技术为基础实现的,选择合适的增材制造方法是制备高质量、高性能形状记忆合金的关键。目前,4D打印形状记忆合金的成形方式主要依赖于传统金属增材制造方法,包括选区激光烧结(selective laser sintering, SLS)、选区激光熔化(selective laser melting, SLM)、激光近净成形(laser engineered net shaping, LENS)和电弧熔丝增材制造(wire arc additive manufacturing, WAAM)等^[15]。了解现有增材制造方法的成形原理及工艺特点,可以为不同材料属性和成形需求的4D打印形状记忆合金的成形工艺选择提供指导。

1.1 选区激光烧结/熔化技术

SLS技术的成形原理如图2^[16]所示:首先采用计算机辅助设计构建目标零件的三维CAD模型,再通过切片软件对三维实体模型进行切片处理;成形时,先通过铺粉装置在工作缸中均匀铺设一层粉末材料,随后激光器在计算机控制下根据分层截面信息进行选择性扫描,被扫描区域的粉末在激光作用下烧结在一起,未被扫描区域的粉末仍保持松散状态并作为下一烧结层的支撑;当一层烧结完成后,工作台下降一定高度,送粉缸上升并进行下一层铺粉,随后激光器再根据新一层截面信息进行选择性烧结;如此重复,直至所有截面烧结完毕,去掉多余粉末即可得到最终制品。SLM技术是在SLS技术上发展起来的,它也是通过计算机辅助设计与制造,基于分层叠加原理,在激光作用下使粉末快速熔化与凝固,从而直接成形任意复杂结构三维实体。两者的区别在于,SLM成形

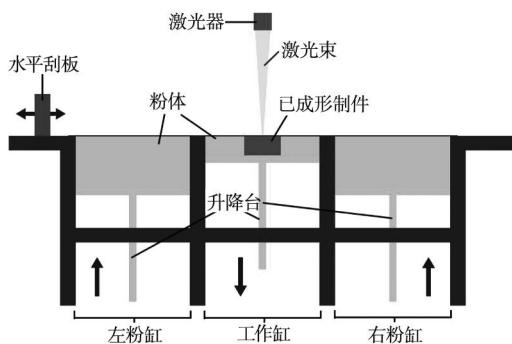


图2 选区激光烧结/熔化技术原理图

Fig. 2 Schematic diagram of selected laser sintering/melting technologies

过程中金属粉末被迅速加热并熔化,零件由液态金属凝固成形;而SLS成形过程中,除主体金属粉末外还需添加一定比例的粘接剂粉末,一般为低熔点的金属粉末或有机树脂,高熔点金属粉末作为结构材料并不熔化,仅低熔点粘接剂粉末熔化,起到粘接作用。

在SLS和SLM过程中,未固结的粉末可以作为复杂结构的支撑,无需使用额外的辅助支撑,这有助于减少材料浪费,节约成本。同时,SLS和SLM技术制备的零件致密度和精度高,产品不需要进行任何后处理或只进行简单的表面处理即可直接使用,极大地简化了制备工艺,缩短了生产周期。此外,SLS和SLM技术还具有成形速度快、定位准确等优点,适合加工尺寸较小、形状复杂、精密度要求高的零件。但SLS技术中,粘接剂的添加会一定程度上降低形状记忆合金制件的力学性能和功能性。因此,目前4D打印形状记忆合金的制备普遍采用SLM技术^[17]。然而,受自身成形原理和工艺特性的限制,SLM通常采用单一腔室、逐层铺粉的工作模式,难以实现不同粉末材料的分区供给和独立铺放,多材料4D打印形状记忆合金智能构件的一体化成形尚无法实现。

1.2 激光近净成形技术

LENS技术的原理如图3^[18]所示:高能激光束聚焦在金属基板上形成一个微小液态熔池,与激光束保持同步移动的喷嘴将金属粉末或丝材连续送到熔池中,金属粉末或丝材在微熔池中熔化,当激光束移出后原熔池中的液态金属快速凝固,从而与下层金属发生冶金结合;点状的熔池在基板上移动,以点-线-面的形式将金属材料在基板上堆积,从而形成二维平面;当一层金属熔覆完成后,成形工件相对于激光焦斑下移一层高度,然后重复以上过程进行新一层截面的熔覆制造;如此逐层堆积,最终形成三维实体。LENS技术具有可制造零件的尺寸范围广、成形效率高、成形件致密度高、可实现多材料复合制造等优点,因而也被广泛应用于4D打印形状记忆合金的制备。

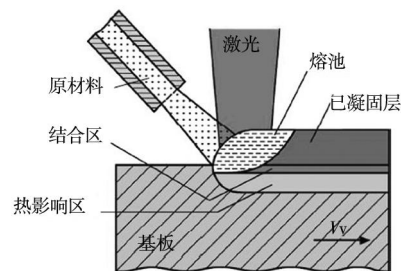


图3 激光近净成形技术原理图

Fig. 3 Schematic diagram of laser engineered net shaping technology

1.3 电弧熔丝增材制造技术

WAAM技术是在熔化极惰性气体保护焊、钨极惰性气体保护焊和等离子弧焊等焊接技术的基础上发展起来的。该技术以金属丝材为原材料,以电弧为热源,通过电弧产生的高热量将金属丝材熔化沉积到基板上形成熔池,然后通过计算机控制焊枪按照打印对象的分层截面信息移动,使熔池按照预先设定的路径和形状沉积、移动和累加,最后获得目标零件^[19]。WAAM技术具有沉积效率高、制造成本低、成形环境开放、材料利用率高、原材料易于保存和运输、可实现自由曲面基底上原位制造等优点,适合大型复杂金属构件的制备。但WAAM技术通常存在电弧稳定性差、能量密度低和加热范围大等问题,导致制件的成形精度低、表面粗糙度大,难以实现复杂薄壁构件的精确成形。

2 4D打印形状记忆合金的研究现状

形状记忆效应是指具有某初始形状的材料在外界应力或磁场作用下发生形状改变后,在热、磁或光的作用下可全部或部分恢复到变形前初始形状的现象。具有形状记忆效应的合金称为形状记忆合金。迄今为止,人们已陆续研究和开发了数十种形状记忆合金,其中发展最为成熟并具有工程应用价值的主要有三类: Ni-Ti基、Cu基和Fe基形状记忆合金^[20]。目前关于4D打印形状记忆合金的研究也主要围绕这三类形状记忆合金开展。

2.1 4D打印 Ni-Ti基形状记忆合金

Ni-Ti基形状记忆合金具有优异的形状记忆效应和超弹性(可回复变形量达12%)、良好的耐腐蚀性和耐磨性、优良的综合力学性能和耐疲劳性能(疲劳寿命可达 10^7 次)、良好的功能稳定性和生物相容性,是目前研究最广泛、发展最为成熟的形状记忆合金^[21]。然而,由于其化学活性高、回弹效应显著、加工硬化率高、延展性好, Ni-Ti基形状记忆合金的机械加工难度大、成本高^[22]。同时, Ni-Ti基形状记忆合金的成分和温度敏感性高,易形成脆性金属间化合物,焊接与连接难度大^[23-24]。因此,通过传统成形方法难以实现复杂结构Ni-Ti形状记忆合金的制备。到目前为止,大多数传统方法制造的Ni-Ti智能构件均由简单的半成品设计而成,如板材、带材、线材、管、棒等。4D打印技术为复杂Ni-Ti基形状记忆合金的设计与制备提供了新思路。2008年,英国利物浦大学的Clare等^[25]采用SLM技术制备了Ni-Ti形状记忆合金悬臂梁结构,该结构经训练后可在加热与冷却过程中实现可逆的弯曲变形和回

复,这证明了利用4D打印制备Ni-Ti形状记忆合金智能变形构件的可能性。此后,学者们在成形工艺和后处理工艺对4D打印Ni-Ti形状记忆合金微观组织、马氏体相变行为、力学性能和形状记忆性能的影响规律及机制,以及4D打印多孔Ni-Ti形状记忆合金的设计与制造方面展开了大量研究。激光功率、扫描速度、扫描间距、能量密度、打印方向和扫描方式等工艺参数均会影响SLM成形Ni-Ti形状记忆合金的微观组织和形状记忆性能。

2.1.1 成形工艺

2013年,法国贝尔福蒙贝利亚技术大学的Zhang等^[26]研究了扫描速度对SLM成形Ni-45Ti(质量分数%)合金微观组织和力学性能的影响,结果表明:采用低的扫描速度($0.05\sim 0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)可以获得相对密度高达99.5%、显微硬度为350~450 HV0.2的SLM成形Ni-Ti合金;提高扫描速度会显著降低其相对密度,并增加显微硬度的不均匀性。瑞士巴塞尔大学医学院的Bormann等^[27]研究发现:控制扫描速度可以有效调控Ni元素的挥发量,从而调节SLM成形Ni-Ti合金的马氏体相变温度;增加激光功率会显著增加Ni-Ti合金的晶粒尺寸。美国肯塔基大学的Saedi等^[28]系统研究了扫描速度和激光功率对SLM成形Ni-49.2Ti合金微观组织和超弹性的影响,结果表明:为获得致密的SLM成形Ni-Ti合金,成形过程中应选择高激光功率与高扫描速度结合,低激光功率与低扫描速度结合;低激光功率下制备的Ni-Ti合金的超弹性显著高于高激光功率下制备的合金;采用100 W激光功率和 $125\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 扫描速度制备的SLM成形Ni-Ti合金的超弹性最好,在 $A_r+10\text{ }^\circ\text{C}$ 压缩变形6.02%后实现了高达5.77%的可回复变形量。类似地,比利时鲁汶大学的Dadbakhsh等^[29-30]研究了能量密度为 $111\sim 126\text{ J}\cdot\text{mm}^{-3}$ 时,高激光参数(HP:扫描功率250 W,扫描速度 $1\text{ }100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,层厚 $60\text{ }\mu\text{m}$)和低激光参数(LP:扫描功率40 W,扫描速度 $160\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,层厚 $75\text{ }\mu\text{m}$)对SLM成形Ni-44.8Ti(质量分数%)合金微观组织和马氏体相变行为的影响。结果表明:采用上述两种成形工艺均能获得致密度接近99%的Ni-44.8Ti合金;LP试样在室温下主要为马氏体相,变形时形状记忆效应占主导;HP试样在室温下主要为奥氏体相,变形时超弹性占主导。基于上述研究结果可知,在利用SLM技术制备4D打印Ni-Ti合金智能构件时,采用低激光功率和低扫描速度的组合有助于提高其激励响应变形能力。

除激光功率和扫描速度外,扫描间距也是影响SLM成形Ni-Ti合金相变温度和形状记忆性能的重要工艺参数。美国得克萨斯大学阿灵顿分校的Moghaddam

等^[31]研究了固定激光功率和扫描速度时,扫描间距对SLM成形Ni-49.2Ti(原子分数/%)合金微观组织和超弹性的影响,发现SLM成形Ni-Ti合金的超弹性随着扫描间距的增加而降低;扫描间距80 μm下制备的试样在 A_f+10 °C循环压缩变形10次后可回复变形量稳定在5.2%,而扫描间距160 μm下制备的试样仅稳定在3.4%。美国得克萨斯农工大学的Ma等^[32]研究发现扫描间距对SLM成形Ni-Ti合金的马氏体相变温度具有显

著影响。他们通过改变SLM成形件不同部位的扫描间距来控制相应部位的马氏体相变温度,成功制备了具有多级顺序形状恢复行为的U形Ni-Ti制件,如图4^[32]所示。综上可知,随着扫描间距的增大,SLM成形Ni-Ti合金的马氏体相变温度降低,通过调控Ni-Ti合金构件不同位置的扫描间距可以对其变形响应温度进行调节,从而实现具有多级顺序激励响应形状变化的4D打印Ni-Ti合金智能构件的一体化制备。

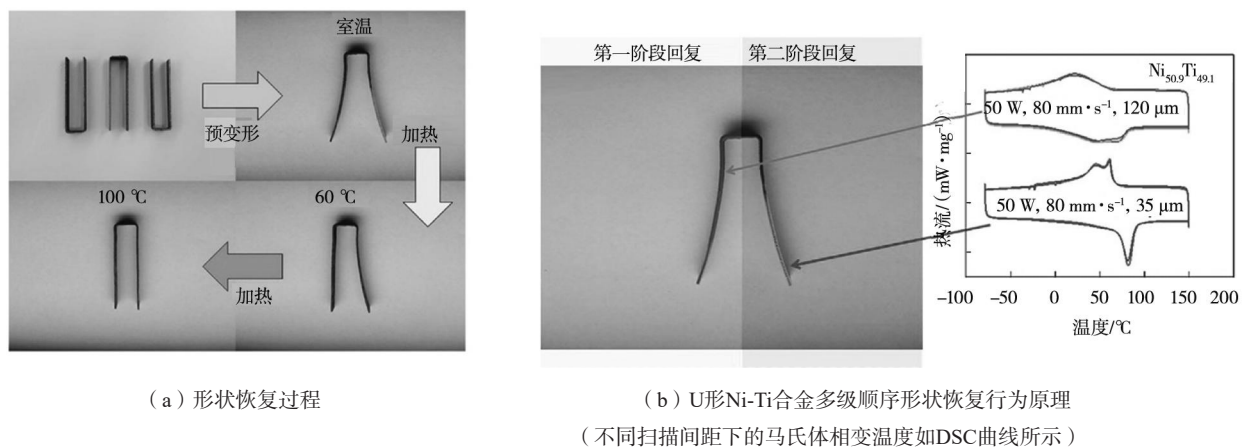


图4 SLM成形U形Ni-Ti合金的多级形状恢复过程及实现原理
(不同扫描间距下的马氏体相变温度如DSC曲线所示)

Fig. 4 Multi-stage shape recovery process and its underlying mechanism of a U-shaped Ni-Ti piece fabricated by SLM technology

能量密度是评价SLM成形过程中能量输入大小的重要指标,直接反映激光对粉末的熔化能力,是决定熔池温度和冷却速度的核心工艺参数。美国俄亥俄州立大学的Walker等^[33]系统研究了能量密度对SLM成形Ni-49.91Ti(原子分数/%)合金微观组织和形状记忆效应的影响,结果表明:低的能量密度容易导致非连续熔化的发生,从而降低SLM试样的相对密度;增加能量密度可以提高SLM试样的相对密度,但也会增加杂质元素的含量,且能量密度过高,易产生气孔和孔洞等缺陷。基于上述研究结果,他们提出SLM成形Ni-Ti合金的最佳能量密度为 $55.5 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$ (激光功率250 W,扫描速度 $1.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,扫描间距120 μm);利用该工艺参数制备的Ni-Ti合金相对密度高达98%,在室温压缩变形4.5%时的可回复变形量约为2.9%。美国托莱多大学的Haberland等^[34]通过研究能量密度对SLM成形Ni-Ti合金微观组织和形状记忆效应的影响,提出其最佳能量密度为 $234 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$ (激光功率77 W,扫描速度 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,粉层厚度50 μm,扫描间距120 μm);通过该工艺制备的Ni-Ti合金在 A_f+10 °C压缩4%时的可回复变形量高达3.74%。德国波鸿大学的Meier等^[35]认为制备致密SLM成形Ni-49.8Ti(原子分数/%)合金的最佳能量密度为 $85 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$,利用该工艺参数制备的Ni-49.8Ti合金在室温压缩5.5%后获得了4.75%的可回

复变形量。华南理工大学的Lu等^[36]研究了高能量密度($155 \sim 292 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$)下,SLM成形Ni-49.4Ti(原子分数/%)合金的马氏体相变温度和形状记忆效应,结果表明:随着能量密度的降低,SLM成形Ni-Ti合金的马氏体相变温度降低,但室温变形时的可回复变形量提高;采用 $292 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3}$ 能量密度制备的SLM试样在室温循环拉伸变形10次后,可回复变形量稳定在4.99%。基于上述研究可知,在采用SLM技术制备Ni-Ti合金时,不同学者报道的最佳能量密度有很大不同,目前尚未建立统一的能量密度选择原则,仍需系统研究能量密度对SLM成形Ni-Ti合金微观组织和形状记忆性能的影响规律及机制,建立健全其能量密度-微观组织-性能的关系。

大量研究表明,优化扫描方式也可以有效提高SLM成形Ni-Ti合金的变形能力和形状记忆性能。美国托莱多大学的Moghaddam等^[37]研究了打印方向和扫描方式对SLM成形Ni-49.9Ti(原子分数/%)合金力学性能和形状记忆效应的影响,结果表明:采用 x/y 交替扫描方式制备的Ni-Ti合金试样在水平方向上具有最高的抗拉强度(606 MPa)和伸长率(6.8%)以及最好的形状记忆效应(室温拉伸变形4%时可回复变形量约为3.5%);采用 $\pm 45^\circ$ 交替扫描策略会导致SLM成形Ni-Ti合金力学性能和形状记忆效应显著降低。中国石油大

学的Zhang等^[38]和Xiong等^[39]利用分区扫描方式制备了具有优异形状记忆性能的SLM成形Ni-Ti形状记忆合金,合金试样抗拉强度可达 $690\text{ MPa} \pm 15\text{ MPa}$,伸长率可达 $15.2\% \pm 0.8\%$,预变形4%和6%时的形状回复率分

别为 $97.7\% \pm 1.2\%$ 和 $92.5\% \pm 1.2\%$ 。图5^[38-39]给出了分区扫描方式制备的SLM成形Ni-Ti形状记忆合金条带和支架的变形与回复过程,两者在加热后均能较好地恢复至初始形状。

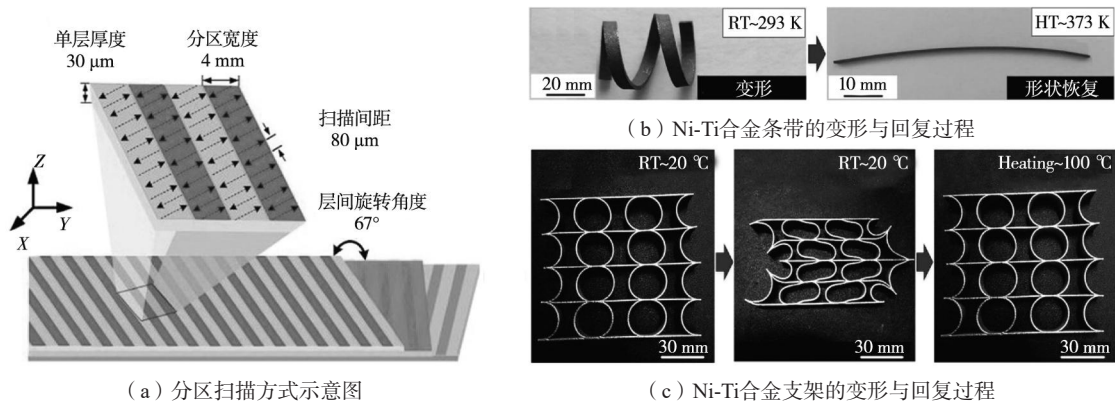


图5 分区扫描方式原理及该方式下SLM成形Ni-Ti合金条带和支架的变形与回复过程

Fig. 5 Schematic diagrams of partition scanning way, and the deformation and recovery processes of SLM-fabricated Ni-Ti tripe and scaffold under this way

2.1.2 后处理工艺

2012年,美国托莱多大学的Haberland等^[40]通过 $950\text{ }^{\circ}\text{C} \times 5.5\text{ h}$ 固溶处理+ $350\text{ }^{\circ}\text{C} \times 24\text{ h}$ 时效处理提高了SLM成形Ni-49.3Ti(原子分数/%)合金的超弹性,合金的压缩可回复变形量约为3.4%。2016年,美国肯塔基大学的Saedi等^[41-42]亦研究发现固溶处理和时效处理能够提高SLM成形Ni-49.2Ti(原子分数/%)合金的超弹性;经 $950\text{ }^{\circ}\text{C} \times 5.5\text{ h}$ 固溶处理+ $350\text{ }^{\circ}\text{C} \times 18\text{ h}$ 时效处理的SLM成形Ni-49.2Ti合金在压缩变形5.8%时的可回复变形量约为5.5%;对于未经固溶处理的SLM成形Ni-49.2Ti合金,通过 $350\text{ }^{\circ}\text{C} \times 1\text{ h}$ 或 $600\text{ }^{\circ}\text{C} \times 1.5\text{ h}$ 直接时效处理,合金在 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 压缩变形时可获得高达5.5%的可回复变形量。印度卡纳塔克邦国家技术研究所的Marattukalam等^[43]研究了退火对LENS成形Ni-44.8Ti(质量分数/%)合金形状记忆效应的影响,结果表明:室温压缩变形10%时,未经热处理的LENS成形Ni-44.8Ti合金的可回复变形量约为7%~8%, $500\text{ }^{\circ}\text{C} \times 30\text{ min}$ 退火可提高其可回复变形量至8.6%~10%,而 $1\text{ }000\text{ }^{\circ}\text{C} \times 30\text{ min}$ 退火处理使其可回复变形量降低至3.8%~6.6%。新加坡南洋理工大学的Khoo等^[44]利用激光选区重熔技术制备了Ni-49.91Ti(原子分数/%)合金,该合金在拉伸变形5%时的可回复变形量约为3.37%;经 $400\text{ }^{\circ}\text{C} \times 5\text{ min}$ 时效处理后,其可回复变形量进一步提高至3.59%。

2.1.3 4D打印多孔Ni-Ti形状记忆合金

Ni-Ti形状记忆合金具有良好的生物相容性、优异的耐腐蚀性和耐磨性,是一种理想的生物医用材料。其

中,多孔Ni-Ti形状记忆合金具有低弹性模量、高孔隙率和渗透率,更有利于营养和氧的进入以及组织的长入和结合,因此在骨组织工程领域展示出广阔的应用前景^[45]。4D打印多孔Ni-Ti形状记忆合金骨植入体则可以进一步利用其独特的形状记忆效应实现自伸展功能。这种骨植入体可以在手术前被压缩成较小体积,植入后再通过体温或外部热源激活展开成全尺寸状态,从而实现微创,减小病人痛苦,因此成为国内外学者的研究热点之一。

2009年,美国华盛顿州立大学的Bandyopadhyay等^[46]利用LENS技术成功制备了孔隙率为12%~42%、可回复变形量约2%~4%的多孔Ni-Ti形状记忆合金。2017年,美国托莱多大学的Andani等^[47]利用SLM技术制备了不同孔隙率的多孔Ni-49.9Ti(原子分数/%)合金,并研究了孔隙率对其力学性能和形状记忆效应的影响,结果表明:随着孔隙率从0增加至58%,Ni-Ti合金的弹性模量和抗压强度分别从69 GPa和1 619 MPa显著降低至20.5 MPa和410 MPa,而室温压缩时的可回复变形量仅从5.5%降至4.9%。随后,美国肯塔基大学的Saedi等^[48]进一步研究了孔隙率对经 $950\text{ }^{\circ}\text{C} \times 5.5\text{ h}$ 固溶处理+ $350\text{ }^{\circ}\text{C} \times 15\text{ min}$ 时效处理后SLM成形多孔Ni-49.2Ti(原子分数/%)合金超弹性的影响,结果表明:随着孔隙率从0增加至58%,多孔Ni-Ti合金的弹性模量和抗压强度分别从47 GPa和1 224 MPa显著降低至9 MPa和300 MPa,在 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 压缩变形6%时的可回复变形量也从5.65%显著降低至2.7%。

总体看来,目前4D打印技术已能够制备具有一定

可控变形行为的Ni-Ti形状记忆合金智能构件，并且通过调控成形工艺参数可以实现同一Ni-Ti合金构件不同位置响应温度的调节，从而实现具有多级顺序激励响应形状变化的4D打印Ni-Ti合金智能构件的一体化制备。然而，值得注意的是，Ni-Ti形状记忆合金的4D打印成形仍面临较多问题：

(1) 虽然目前4D打印Ni-Ti形状记忆合金的压缩性能已基本接近传统成形Ni-Ti合金，但由于在增材制造过程中Ni-Ti合金易形成气孔等缺陷以及不均匀微观组织和粗糙表面，其拉伸性能（抗拉强度低于650 MPa，伸长率低于8%，拉伸可回复变形量约为2%~5%）仍远低于传统成形Ni-Ti合金（抗拉强度高于900 MPa，伸长率高于20%，拉伸可回复变形量约为7%~10%）。

(2) 不同成形设备下Ni-Ti合金的最佳工艺参数有很大不同，目前尚未建立统一的工艺参数选择原则。

(3) 现有4D打印Ni-Ti合金的成形主要采用基于粉末床的SLM增材制造技术。Ni-Ti合金本身原材料较为昂贵，制粉等工艺会进一步增加成形成本。

(4) Ni-Ti合金的物相组成、马氏体相变温度和形状记忆效应对合金成分非常敏感，通过SLM等传统增材制造技术制备Ni-Ti合金时，Ni元素容易挥发，且容易引入C、O、N等杂质元素，导致制件的实际成分与设计成分存在一定差异，制件性能和变形行为的精确控制较为困难。

2.2 4D 打印 Cu 基形状记忆合金

Cu基形状记忆合金具有优异的导电性和导热性、良好的形状记忆效应和超弹性（可回复变形量达8%），价格仅为Ti-Ni基形状记忆合金的1/10左右。但它在传统铸造过程中易形成粗大的晶粒并在晶间析出脆性相，力学性能较差^[49]。同时，由于多晶Cu基形状记忆合金的塑性不佳、弹性各向异性显著，其在传统锻造、轧制、拉拔等变形加工过程中极易发生开裂、边角崩缺等，严重制约了Cu基形状记忆合金的产业化制备和应用^[50]。4D打印技术在成形过程中具有极快的冷却速度，可以有效细化晶粒并抑制母相分解，从而提高制件力学性能。因此，学者们就Cu基形状记忆合金的4D打印技术展开了一定研究。

2014年，巴西圣卡洛斯联邦大学的Mazzer等^[51]利用SLM技术成功制备了晶粒尺寸为10~100 μm、相对密度接近97%、无裂纹的Cu-11.85Al-3.2Ni-3Mn（质量分数/%）合金，证明了通过SLM技术制备Cu基形状记忆合金的可行性。2016年，德国莱布尼茨固态与材料研究所的Gustmann等^[52]系统研究了SLM成形工艺对

Cu-11.85Al-3.2Ni-3Mn合金微观组织和力学性能的影响，结果表明：当激光功率为300 W、扫描速度大于700 mm·s⁻¹时，Cu-11.85Al-3.2Ni-3Mn合金的相对密度接近99%；拉伸变形时，SLM成形合金的抗拉强度和塑性较同质铸造合金均明显提高，但屈服强度显著降低；压缩变形时，SLM成形合金的屈服强度较同质铸造合金显著增加，但塑性明显恶化。随后，该团队进一步研究了激光选区重熔处理对合金微观组织和力学性能的影响，发现激光选区重熔处理可以提高SLM成形Cu-11.85Al-3.2Ni-3Mn合金的相对密度，经重熔处理后试样相对密度可达99.5%，拉伸时塑性提高，但压缩时塑性恶化^[53-54]。2019年，华中科技大学的Tian等^[55]利用SLM技术成功制备了表面质量良好、致密度接近99.5%、平均晶粒尺寸约为43 μm的Cu-13.5Al-4Ni-0.5Ti（质量分数/%）合金，该SLM合金的室温伸长率（7.63%）较同质铸造合金提高了5.41%。随后，华中科技大学的朱文志等^[56]进一步采用SLM技术制备了Cu-13.5Al-4Ni-0.5Ti合金U形试样，并对其变形过程和形状记忆性能进行了研究，结果表明：U形试样在外力作用下变形后置于100 °C沸水浴中，形状可恢复接近90%。该研究证明了Cu基形状记忆合金在4D打印领域应用的可行性。

总体而言，目前关于4D打印Cu基形状记忆合金的研究主要集中在成形工艺、微观组织和力学性能方面，关于马氏体相变行为（马氏体相变特征温度和马氏体稳定化）以及功能性（形状记忆效应和超弹性）的研究较少。值得注意的是，尽管通过SLM技术实现了对Cu基形状记忆合金晶粒的细化，提高了力学性能，但目前SLM成形Cu基形状记忆合金的力学性能仍较差，尚不能满足实际工程应用的要求，需进一步开展工艺调控与性能优化方法的系统研究。此外，由于Cu的热导率高，且对工业常用的1064/1070 nm红外激光的反射率高达95%以上，Cu基形状记忆合金在SLM成形过程中难以形成稳定、连续的熔池，易出现气孔、飞溅和未熔合等冶金缺陷，现有SLM成形Cu基形状记忆合金的相对密度普遍较低，亟需开发适用于4D打印Cu基形状记忆合金的增材制造新工艺。

2.3 4D 打印 Fe 基形状记忆合金

Fe基形状记忆合金的加工性能和力学性能优良，价格较低，被认为是最适合大规模应用的形状记忆合金。Fe基形状记忆合金的传统制备方法主要包括铸造和变形加工（如轧制、锻造、拉拔和挤压等）。然而，这些方法很难在免训练条件下同时获得低孪晶界面数量、高堆垛层错密度和高屈服强度的组织结构，

难以实现兼具大可回复应变和高回复应力的Fe基形状记忆合金的制备^[57-59]。训练处理虽能有效提高Fe基形状记忆合金的可回复应变和回复应力,但其工艺复杂且难以应用于复杂形状构件^[60]。4D打印技术以增材制造为基础。一方面,与传统铸造类似,增材制造通过液态金属直接凝固成形,可以抑制Fe基形状记忆合金母相孪晶界面的形成^[61]。另一方面,增材制造独特的点-线-面-体叠加成形方式、高度非平衡的冶金特点和复杂的非均匀热力耦合过程,使Fe基形状记忆合金易形成高密度堆垛层错和高强度多层级结构^[62-63]。因此,利用增材制造技术制备Fe基形状记忆合金有望同时实现低孪晶界面数量、高堆垛层错密度和高屈服强度,从而获得兼具大可回复应变和高回复应力的4D打印Fe基形状记忆合金智能结构,这成为国内外学者的重要研究方向。

2016年,德国卡塞尔大学的Niendorf等^[64]首次利用SLM技术制备了Fe-34Mn-14Al-7.5Ni(原子分数/%)形状记忆合金,该合金经100℃×1h固溶处理+200℃×6h时效处理后,在-100℃压缩时实现了高达7.5%的可回复变形量。2020年,中南大学的姚聪等^[65]采用LENS技术制备了Fe-21Mn-4.8Si-8.5Cr-4.8Ni形状记忆合金,该合金在室温下由FCC奥氏体和HCP马氏体组成,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%。2021年,瑞士联邦材料科学与技术实验室的Ferretto等^[66]采用SLM技术制

备了Fe-17Mn-5Si-10Cr-4Ni形状记忆合金,研究了激光能量密度(63.89~194.44 J·mm⁻³)对其相对密度、微观组织和相变行为的影响。结果表明:该合金的相对密度随激光能量密度的增加而增加;提高激光能量密度可以促进合金中的 $\delta \rightarrow \gamma$ 相变,因而有助于获得单相奥氏体组织。随后,他们研究了热处理工艺对该合金微观组织和形状记忆性能的影响,指出SLM成形Fe-17Mn-5Si-10Cr-4Ni形状记忆合金的最佳热处理工艺为800℃×30 min^[67]。采用高能量密度(194.44 J·mm⁻³)制备的合金经800℃退火30 min后,表现出良好的拉伸力学性能(屈服强度278~320 MPa,抗拉强度882~940 MPa,伸长率34%~47%) and明显的形状记忆效应。在此基础上,他们进一步设计并制备了系列SLM成形Fe-Mn-Si基形状记忆合金结构,如图6所示,实现了具有多种变形行为的Fe-Mn-Si基形状记忆合金的4D打印^[68]。

总体看来,目前通过增材制造技术已经实现了具有优良形状记忆性能Fe基形状合金的制备,证明了4D打印Fe基形状记忆合金的可行性。然而,目前国内外关于4D打印Fe基形状记忆合金的研究仍比较匮乏,相关研究证明了增材制造工艺和热处理工艺对其微观组织、力学性能和形状记忆性能具有显著影响,但尚未系统建立其工艺-组织-性能的耦合影响关系,最佳工艺仍有待进一步探究。

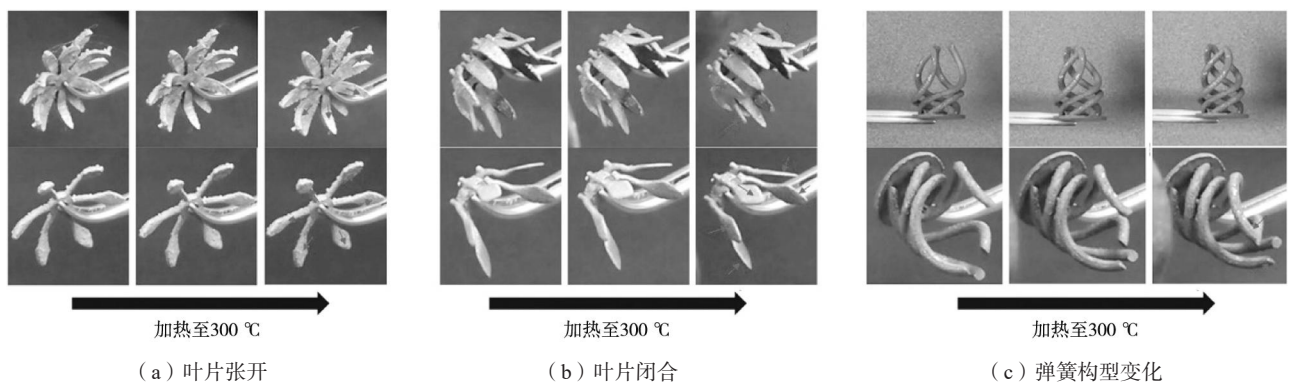


图6 不同SLM成形Fe-Mn-Si基形状记忆合金结构在加热时的形状变化过程

Fig. 6 Shape change processes of different SLM-formed Fe-Mn-Si-based shape memory alloy structures when heated

3 结束语

综合国内外研究现状可以看出,目前形状记忆合金的4D打印技术尚处于概念验证阶段,虽然具备成形简单形状记忆合金变形构件的能力,但现有4D打印形状记忆合金制件的激励响应行为和可实现的智能化功能仍比较简单,需进一步探索与挖掘。本文认为,4D打印形状记忆合金还需围绕以下几个方面进行深入研

究:

(1) 研究和开发适用于4D打印的形状记忆合金新材料。形状记忆合金的高质量、高性能增材制造是4D打印形状记忆合金发展和应用的基础。然而,增材制造技术独特的点-线-面-体成形方式和快熔快冷的成形特点,导致制件的微观组织和性能较传统方法成形的形状记忆合金有很大不同。现有4D打印形状记忆合金的研究主要采用Ni-Ti基、Cu基和Fe基等传统形状记忆

合金,其研究思路仍局限在通过优化增材制造工艺来实现合金的组织调控和性能优化。然而,受材料固有属性限制,部分传统形状记忆合金与增材制造技术的适配性较差,难以实现高质量成形,力学性能或形状记忆效应不佳。因此,研究和开发适用于增材制造的形状记忆合金新材料将成为4D打印形状记忆合金发展的重要研究方向之一。

(2)研究和开发适用于4D打印形状记忆合金的增材制造新技术。目前4D打印形状记忆合金的成形方式主要依赖于传统金属增材制造技术,成形方式种类较少,难以满足不同类型形状记忆合金的成形需求,且难以适配大型高端4D打印形状记忆合金智能构件性能、精度、成本和成形效率的多重要求。同时,现有增材制造技术大多只能实现单一材料构件的成形,无法实现多种材料的复合制造,这限制了4D打印形状记忆合金智能结构的设计自由度。因此,研发适用于形状记忆合金的增材制造新技术对于促进4D打印形状记忆合金的发展与应用具有重要意义。

(3)建立健全4D打印形状记忆合金化学成分-几

何结构-成形工艺-激励响应性能的映射关系。目前化学成分、几何结构、成形工艺参数对4D打印形状记忆合金激励响应性能的影响规律和机制还不清楚,4D打印形状记忆合金的变形、驱动能力较传统成形件仍存在较大差距,复杂形状记忆合金智能构件的高质量、高性能4D打印亦面临巨大挑战。进一步完善此映射关系,明确4D打印形状记忆合金智能构件的结构优化、工艺调控和性能提升方法,是其未来发展的重要研究方向之一。

(4)扩展4D打印形状记忆合金智能构件的设计思路。目前4D打印形状记忆合金的几何形状仍较为简单,如长方体、圆柱体、线材、棒状物、U形和狗骨形等。它们的响应行为仅限于拉伸、压缩和弯曲等简单变形,无法满足实际应用中的复杂需求。为扩大4D打印形状记忆合金的应用范围,通过复杂形状的构建、多材料的结合及新型触发方式的引入等,设计具有多样化变形、变性、变功能的形状记忆合金智能构件也是未来的重要发展方向。

参考文献:

- [1] DHANESH G M, SAIYATHIBRAHIM A, GOPI S, et al. Additive manufacturing for space applications: a review of materials, methods, and future frontiers [J/OL]. China Welding, 2025-11-15. <https://doi.org/10.1016/j.cwe.2025.100010>.
- [2] WANG Z W, ZHANG Z B, KUANG X. Recent advances in polymer 4D printing: 3D printing techniques, smart material design, and healthcare applications [J]. Smart Materials in Medicine, 2025, 6 (3): 305-333.
- [3] RYAN K R, DOWN M P, BANKS C E. Future of additive manufacturing: overview of 4D and 3D printed smart and advanced materials and their applications [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 403: 126162.
- [4] 史玉升, 伍宏志, 闫春泽, 等. 4D打印——智能构件的增材制造技术 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (15): 1-25.
- [5] SHIN D G, KIM T H, KIM D E. Review of 4D printing materials and their properties [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 4 (3): 349-357.
- [6] LEE J, KIM H C, CHOI J W, et al. A review on 3D printed smart devices for 4D printing [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 4 (3): 337-383.
- [7] MOMENI F, HASSANI S M, LIU N X, et al. A review of 4D printing [J]. Materials and Design, 2017, 122: 42-79.
- [8] 陈花玲, 罗斌, 朱子才, 等. 4D打印: 智能材料与结构增材制造技术的研究进展 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52 (2): 1-12.
- [9] ZHANG Y, LIU G L, LIU S C, et al. Optimization of laser cladding FeMnSiCrNi memory alloy coating process based on response surface model and NSGA-2 algorithm [J]. China Foundry, 2025, 22 (3): 311-322.
- [10] 闫晓军, 张小勇. 形状记忆合金智能结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-30.
- [11] 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.
- [12] 王永信, 赵蒙, 侯熙硕, 等. 面向自膨胀分叉型血管支架的金属4D打印快速制造方法: CN201910023592.1 [P]. 2020-01-21.
- [13] 李桂伟, 冯宇轩, 吴文征, 等. 4D打印仿生功率放大的小卫星锁紧释放装置: CN202510049440.4 [P]. 2025-03-14.
- [14] KUANG X, ROACH D J, WU J T, et al. Advances in 4D printing: materials and applications [J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29 (2): 1805290.
- [15] YANG Y X, GAO W H, SUN B, et al. Recent advances on additive manufactured shape memory alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34 (7): 2045-2073.
- [16] KRUTH J P, MERCELIS P, VAERENBERGH J V, et al. Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting [J]. Rapid Prototyping Journal, 2005, 11 (1): 26-36.
- [17] ALAGHA A N, HUSSAIN S, ZAKI W. Additive manufacturing of shape memory alloys: a review with emphasis on powder bed systems [J]. Materials and Design, 2021, 204: 109654.
- [18] HOU H L, SIMSEK E, MA T, et al. Fatigue-resistant high-performance elastocaloric materials made by additive

- manufacturing [J]. *Science*, 2019, 366: 1116–1121.
- [19] ZENG Z, CONG B Q, OLIVEIRA J P, et al. Wire and arc additive manufacturing of a Ni-rich NiTi shape memory alloy: microstructure and mechanical properties [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 32: 101051.
- [20] JANI M J, LEARY M, SUBIC A, et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities [J]. *Materials and Design*, 2014, 56: 1078–1113.
- [21] AHMAD S, HASHMI A W, SINGH J, et al. Innovations in additive manufacturing of shape memory alloys: alloys, microstructures, treatments, applications [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 32: 4136–4197.
- [22] DZOGBEWU T C, DE BEER D J. Additive manufacturing of NiTi shape memory alloy and its industrial applications [J]. *Heliyon*, 2024, 10: e23369.
- [23] OTSUKA K, REN X. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys [J]. *Progress in Materials Science*, 2005, 50 (5) : 511–678.
- [24] OLIVEIRA J P, MIRANDA R M, FERNANDES F M B. Welding and joining of NiTi shape memory alloys: a review [J]. *Progress in Materials Science*, 2017, 88: 412–466.
- [25] CLARE A T, CHALKER P R, DAVIES S, et al. Selective laser melting of high aspect ratio 3D nickel-titanium structures two way trained for MEMS applications [J]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2008, 4: 181–187.
- [26] ZHANG C Y, REN Y P, CHEN X S. The development situation of selective laser melting metal powder based on 3D printing [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 518: 12–18.
- [27] BORMANN T, MÜLLER B, SCHINHAMMER M, et al. Microstructure of selective laser melted nickel–titanium [J]. *Materials Characterization*, 2014, 94: 189–202.
- [28] SAEDI S, MOGHADDAM N S, AMERINATANZI A, et al. On the effects of selective laser melting process parameters on microstructure and thermomechanical response of Ni-rich NiTi [J]. *Acta Materialia*, 2018, 144: 552–560.
- [29] DADBAKSH S, SPEIRS M, KRUTH J P, et al. Effect of SLM parameters on transformation temperatures of shape memory nickel titanium parts [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2014, 16 (9) : 1140–1146.
- [30] DADBAKSH S, SPEIRS M, KRUTH J P, et al. Influence of SLM on shape memory and compression behaviour of NiTi scaffolds [J]. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, 2015, 64 (1) : 209–212.
- [31] MOGHADDAM N S, SAEDI S, AMERINATANZI A, et al. Achieving superelasticity in additively manufactured NiTi in compression without post-process heat treatment [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 41.
- [32] MA J, FRANCO B, TAPIA G, et al. Spatial control of functional response in 4D-printed active metallic structures [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 46707.
- [33] WALKER J M, HABERLAND C, ANDANI M T, et al. Process development and characterization of additively manufactured nickel-titanium shape memory parts [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2016, 27 (19) : 2653–2660.
- [34] HABERLAND C, ELAHINIA M, WALKER J M, et al. On the development of high quality NiTi shape memory and pseudoelastic parts by additive manufacturing [J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23: 104002.
- [35] MEIER H, HABERLAND C, FRENZEL J. Structural and functional properties of NiTi shape memory alloys produced by selective laser melting [J]. *Innovative Developments on Virtual and Physical Prototyping*, 2012: 291–296.
- [36] LU H Z, YANG C, LUO X, et al. Ultrahigh-performance TiNi shape memory alloy by 4D printing [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2019, 763: 138166.
- [37] MOGHADDAM N S, SAGHAIAN S E, AMERINATANZI A, et al. Anisotropic tensile and actuation properties of NiTi fabricated with selective laser melting [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 724: 220–230.
- [38] ZHANG Q Q, HAO S J, LIU Y T, et al. The microstructure of a selective laser melting (SLM) -fabricated NiTi shape memory alloy with superior tensile property and shape memory recoverability [J]. *Applied Materials Today*, 2020, 19: 100547.
- [39] XIONG Z W, LI Z H, SUN Z, et al. Selective laser melting of NiTi alloy with superior tensile property and shape memory effect [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2019, 35 (10) : 2238–2242.
- [40] HABERLAND C, MEIER H, FRENZEL J. On the properties of Ni-rich NiTi shape memory parts produced by selective laser melting [C]// *ASME 2012 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, 2012: 97–104.
- [41] SAEDI S, TURABI A S, ANDARI M T, et al. The influence of heat treatment on the thermomechanical response of Ni-rich NiTi alloys manufactured by selective laser melting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 677: 204–210.
- [42] SAEDI S, TURABI A S, ANDARI M T, et al. Texture, aging, and superelasticity of selective laser melting fabricated Ni-rich NiTi alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 686: 1–10.
- [43] MARATTUKALAM J J, BALLA V K, DAS M, et al. Effect of heat treatment on microstructure, corrosion, and shape memory characteristics of laser deposited NiTi alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 744: 337–346.
- [44] KHOO Z X, AN J, CHUA C K, et al. Effect of heat treatment on repetitively scanned SLM NiTi shape memory alloy [J]. *Materials*, 2019, 12 (1) : 77.
- [45] YANG X, YANG Q, SHI Y S, et al. Effect of volume fraction and unit cell size on manufacturability and compressive behaviors of Ni-Ti triply periodic minimal surface lattices [J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 54: 102737.
- [46] BANDYOPADHYAY A, KRISHNA B V, XUE W C, et al. Application of laser engineered net shaping (LENS) to manufacture porous and functionally graded structures for load

- bearing implants [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2009, 20: 29–34.
- [47] ANDANI M T, SAEDI S, TURABIA S, et al. Mechanical and shape memory properties of porous $\text{Ni}_{50.1}\text{Ti}_{49.9}$ alloys manufactured by selective laser melting [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2017, 68: 224–231.
- [48] SAEDI S, SAGHAIAN S E, JAHADAKBAR A, et al. Shape memory response of porous NiTi shape memory alloys fabricated by selective laser melting [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 2018, 29: 40.
- [49] MAZZER E M, DA SILVA M R, GARGARELLA P. Revisiting Cu-based shape memory alloys: recent developments and new perspectives [J]. *Journal of Materials Research*, 2022, 37: 162–182.
- [50] WU M W, YONG W, FU C Q, et al. Machine learning-assisted efficient design of Cu-based shape memory alloy with specific phase transition temperature [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2024, 31 (4): 773–785.
- [51] MAZZER E M, KIMINAMI C S, GARGARELLA P, et al. Atomization and selective laser melting of a Cu-Al-Ni-Mn shape memory alloy [J]. *Materials Science Forum*, 2014, 802: 343–348.
- [52] GUSTMANN T, DOS SANTOS J M, GARGARELLA P, et al. Properties of Cu-based shape memory-alloys prepared by selective laser melting [J]. *Shape Memory and Superelasticity*, 2017, 3 (1): 24–36.
- [53] GUSTMANN T, NEVES A, KÜHN U, et al. Influence of processing parameters on the fabrication of a Cu-Al-Ni-Mn shape-memory alloy by selective laser melting [J]. *Additive Manufacturing*, 2016, 11: 23–31.
- [54] GUSTMANN T, SCHWAB H, KÜHN U, et al. Selective laser remelting of an additively manufactured Cu-Al-Ni-Mn shape-memory alloy [J]. *Materials and Design*, 2018, 153: 129–138.
- [55] TIAN J, ZHU W Z, WEI Q S, et al. Process optimization, microstructures and mechanical properties of a Cu-based shape memory alloy fabricated by selective laser melting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 785: 754–764.
- [56] 朱文志, 党明珠, 田健, 等. 激光能量密度对激光选区熔化Cu-Al-Ni-Ti合金相对密度、微观组织和力学性能的影响 [J]. *机械工程学报*, 2020, 56 (15): 53–64.
- [57] WEN Y H, PENG H B, RAABE D, et al. Large recovery strain in Fe-Mn-Si-based shape memory steels obtained by engineering annealing twin boundaries [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4964.
- [58] PENG H B, CHEN J, WANG Y N, et al. Key factors achieving large recovery strains in polycrystalline Fe-Mn-Si-based shape memory alloys: a review [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2017, 20 (3): 1700741.
- [59] PENG H B, WANG G X, WANG S L, et al. Key criterion for achieving giant recovery strains in polycrystalline Fe-Mn-Si based shape memory alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 712: 37–49.
- [60] LIU Z Q, DONG Z Q, HU L L, et al. Mechanical and recovery behavior of a new iron-based shape memory alloy plate [J]. *Structures*, 2024, 61: 106049.
- [61] YANG X, CHENG L J, PENG H B, et al. Development of Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloy with ultrahigh mechanical properties and large recovery strain by laser powder bed fusion [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2023, 150: 201–216.
- [62] PENG J, LI J, LIU B, et al. Formation process and mechanical properties in selective laser melted multi-principal-element alloys [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2023, 133: 12–22.
- [63] GODEC M, ZAEFFERER S, PODGORNIK B, et al. Quantitative multiscale correlative microstructure analysis of additive manufacturing of stainless steel 316L processed by selective laser melting [J]. *Materials Characterization*, 2020, 160: 110074.
- [64] NIENDORF T, BRENNE F, KROOß P, et al. Microstructural evolution and functional properties of Fe-Mn-Al-Ni shape memory alloy processed by selective laser melting [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, 47: 2569–2573.
- [65] 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.
- [66] FERRETTO I, KIM D, VENTURA N M D, et al. Laser powder bed fusion of a Fe-Mn-Si shape memory alloy [J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 46: 102071.
- [67] KIM D, FERRETTO I, JEON J B, et al. Formation of metastable bcc- δ phase and its transformation to fcc- γ in laser powder bed fusion of Fe-Mn-Si shape memory alloy [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14: 2782–2788.
- [68] KIM D, FERRETTO I, LEINENBACH C, et al. 3D and 4D printing of complex structures of Fe-Mn-Si-based shape memory alloy using laser powder bed fusion [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2022, 9 (13): 2200171.