引用格式：邬富宝，张世全，乔波，等．形状记忆合金电弧增材制造研究进展与展望[J]．材料工程，2026，54(7)：34-50.
WU Fubao，ZHANG Shiquan，QIAO Bo，et al．Recent advances and prospects in wire arc additive manufacturing of shape memory alloys[J]．Journal of Materials Engineering，2026，54(7)：34-50.

形状记忆合金电弧增材制造研究进展与展望

邬富宝*，张世全，乔　波，高世鹰，吴利军，王晓亭，郑宏伟
（内蒙古金属材料研究所，内蒙古 包头 014034）

摘要：形状记忆合金(SMAs)因具有独特的超弹性和形状记忆效应，作为智能材料已广泛地应用于航空航天、海洋工程、生物医学、汽车等领域。随着国家重大科技项目与工程化的不断推进，传统成形技术已无法满足对形状记忆合金结构件在轻量化、智能化、功能化及兼具优异综合性能方面的严苛要求。电弧增材制造(WAAM)技术，因生产周期短、材料利用率高、成形性能好等优点，在大中型复杂金属结构件的高效低成本制造上具有明显优势，可避免传统制造技术存在的成形质量差、强韧性低、成形空间受限等问题，极大地满足了形状记忆合金构件的制造需求。然而，WAAM由于其复杂的热循环效应，组织存在晶粒粗大、气孔、不均匀变形和裂纹等缺陷，严重影响结构件的性能。本文从形状记忆合金的基础特性、WAAM原理与分类、WAAM成形组织调控、析出相、相变与滞后特性、缺陷抑制、超弹性与形状记忆效应、性能提升等方面对近年来国内外WAAM形状记忆合金的研究进展进行了综述，最后从材料-工艺-组织-性能协同调控方面进行了展望，指出智能化、复合化及跨尺度精准调控技术的深度融合将是未来发展方向。

关键词：形状记忆合金；超弹性；电弧增材制造；组织调控；缺陷抑制
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000346　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000346
中图分类号：TG146；TG444；TB31　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)07-0034-17

Recent advances and prospects in wire arc additive manufacturing of shape memory alloys

WU Fubao*，ZHANG Shiquan，QIAO Bo，GAO Shiying，WU Lijun，
WANG Xiaoting，ZHENG Hongwei
（Inner Mongolia Institute of Metal Materials，Baotou 014034，Inner Mongolia，China）

Abstract：Shape memory alloys (SMAs), owing to their unique superelasticity and shape memory effect, have been widely utilized as intelligent materials in aerospace, marine engineering, biomedicine, automotive industries, and other fields. With the continuous advancement of national major scientific projects and engineering initiatives, traditional forming technologies have become inadequate to meet the stringent requirements for SMAs structural components in terms of lightweight design, intelligent functionality, multifunctional integration, and superior comprehensive performance. Wire arc additive manufacturing (WAAM) technology demonstrates distinct advantages in the efficient and cost-effective fabrication of medium to large-scale complex metal structures, attributed to its short production cycles, high material utilization rates, and excellent forming performance. This technology effectively addresses issues inherent in conventional forming methods, such as poor forming quality, low strength and toughness, and spatial constraints in forming, thereby greatly meeting the manufacturing requirements for SMAs. However, due to the complex thermal cycling effects in WAAM, the microstructure exhibits defects such as coarse grains, pores, inhomogeneous deformation, and cracks, severely affecting the performance of structural components. This paper comprehensively reviews recent domestic and international research progress on WAAM-processed SMAs, encompassing fundamental characteristics of SMAs, principles and classifications of WAAM, microstructure control, precipitation phases, phase

transformation and hysteresis characteristics, defect suppression, superelasticity and shape memory effects, and performance enhancement. Finally, an outlook is provided from the perspective of synergistic control of material-process-microstructure-property, indicating that the deep integration of intelligent, composite, and cross-scale precision control technologies will be the future direction.

Key words: shape memory alloys; superelasticity; wire arc additive manufacturing; microstructure control; defect suppression

随着载人航天、月球探测、北斗导航等国家重大科技专项的持续推进，飞行器的减重和飞行速率要求不断攀升，对构件的智能化结构、功能特性及综合性能提出了越来越高的技术要求。一方面要求构件具有较大的尺寸和复杂的形状特征；另一方面又要求其生产效率高、成本低、成形精度和性能好、兼具优异的综合力学性能。然而，特殊应用场合下，力学性能不足、不具备超弹性、异质金属冶金结合差以及非弹性屈曲引起的不可恢复变形是金属结构面临的一大挑战[1-2]。

形状记忆合金（shape memory alloys，SMAs）作为智能材料，当在高于奥氏体结束温度施加超过其弹性极限的应力后会诱发马氏体相变，并发生显著变形，卸载应力后自动恢复到原始形状，即超弹性[3]；当在低温马氏体状态下发生塑性变形后，加热到奥氏体开始温度便会发生逆相变，完全恢复其原有形状，即形状记忆效应[4]。这种独特能力使形状记忆合金具有能量耗散特性，在设计和制造各种具有可恢复性的能量吸收系统、可控结构以及振动阻尼方面提供了可能性[5-10]，使其在航空航天、生物医学、汽车和相关领域有着广泛的应用前景[11-12]。然而传统的减材制造方法效率低、损耗大、工艺繁琐、成型质量差，只适合加工结构简单的形状记忆合金结构件，限制了形状记忆合金的进一步发展和应用。

电弧增材制造（wire arc additive manufacturing，WAAM）技术，是以焊接电弧作为热源将金属丝材熔化，按设定路径在基板上逐层堆焊的方式制造致密金属实体构件的一种成形技术。因其生产周期短、材料利用率高、无焊接飞溅、成形性能好等[13-15]一系列优点，在大中型复杂金属结构件的高效、低成本制造上具有明显优势，极大地满足了形状记忆合金在航空航天、生物医学、汽车等领域的严苛需求。然而，目前对于形状记忆合金的增材制造，特别是WAAM方面的研究还处于起步阶段[16]，由于其复杂的热循环效应，沉积合金组织仍然存在晶粒粗大、气孔、裂纹、不均匀变形等问题，影响合金的性能[17-18]。针对这些问题，学者们提出了冷金属过渡（cold metal transfer，CMT）、原位合金化、多丝电弧增材制造、多场辅助及后续热处理等方法[19-23]，以优化WAAM结构件的组织与性能，并且取得了一定的成效，未来有望在卫星可展开天线、火星着陆器以及船舶促动器等大型复杂成形制造上取得技术突破。本文从形状记忆合金的基础特性、WAAM组织调控与相组成、相变与滞后特性、缺陷抑制、超弹性与形状记忆效应、力学性能等方面对近年来国内外形状记忆合金WAAM的研究进展进行了综述，并对未来发展趋势进行了展望，以期为今后形状记忆合金WAAM的深入研究提供参考方向。

1　形状记忆合金的基础特性

1.1　材料特性

形状记忆合金（SMAs）是一种集感知与驱动功能于一体的智能型功能材料[24-26]，奥氏体（母相，通常为立方结构，如B2或L21）↔马氏体（低温相，如单斜、三斜或正交结构）相变过程是通过原子协同和沿特定晶面的切变来实现的，且不发生成分变化。变形后通过加热可恢复至变形前的形状，呈现形状记忆效应；加载过程中会发生应力诱导马氏体相变，卸载后自动恢复其原有形状，表现出超弹性。通过热/力驱动的可逆相变来实现大变形恢复与高功密度输出（小体积＋大力/大位移输出），而相界和孪晶界的迁移是形状恢复的基础。由于其独特的智能响应能力和多功能集成能力，形状记忆合金将成为智能材料领域的核心，应用前景广阔。

1.2　形状记忆合金的分类

形状记忆合金按照记忆效应类型可分为单程形状记忆合金、双程形状记忆合金和全程形状记忆合金；按性能可分为磁性形状记忆合金（如Ni-Mn基系）、普通形状记忆合金（如Ni-Ti-Cu、Cu-Zn-Al、Fe-Mn-Si等）、高温形状记忆合金（如Ni-Ti-Pd/Pt、Ni-Ti-Hf等，工作温度100 ℃以上）和复合形状记忆合金（如Al/TiNi、聚合物TiNi等）；按合金成分可分为Ni-Ti基[27]、Ni-Mn基、Cu基[28-29]、Fe基[27,30]、Co基[30]、Ti基[31]、Zr基[32]和Mg基[33]等多种形状记忆合金体系，具体分类如图1所示。

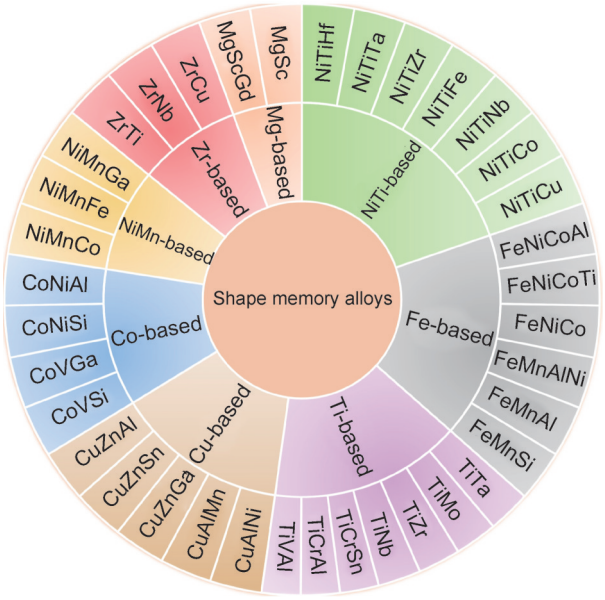


图1 形状记忆合金分类

Fig.1 Classification of shape memory alloys

1.2.1 NiTi基形状记忆合金

NiTi合金因具有优异的超弹性、形状记忆效应和生物相容性，在变形机翼、卫星天线、血管支架、温度传感器、紧固连接件等领域有广泛应用，成为最具发展潜力的形状记忆合金[34-36]。NiTi合金的形状记忆效应和超弹性是由B2(体心立方)奥氏体与B19(正交晶系)马氏体之间的可逆相变形成的。NiTi相为NiTi合金的主要组成相，对于富钛NiTi合金，其溶解度不随温度变化，会析出Ti_2Ni脆性第二相，通常对基体性能有害；对于富镍NiTi合金，随着温度降低，其溶解度会迅速下降，析出亚稳相Ni_3Ti_2和Ni_4Ti_3，最终稳定为Ni_3Ti。Ni_3Ti_2和Ni_4Ti_3相对于NiTi合金的相变温度、形状记忆效应、超弹性以及耐腐蚀性等具有直接影响。然而，这种材料只适用于低相变温度条件(＜100 ℃)，极大地限制了其在高温环境下的应用。相关研究[12,37]发现，在NiTi合金中添加Zr、Cu、Nb、Ta、Hf等元素，可以实现组织、相变温度和临界滑移应力的调控，改善其高温性能。

1.2.2 Ti基形状记忆合金

Ti基形状记忆合金是近年来新兴起的形状记忆合金，形状记忆效应弱于NiTi合金，包括Ti-Nb、Ti-Ta、Ti-Mo、Ti-Zr、Ti-V-Al、Ti-Cr-Al、Ti-Cr-Sn等合金[38-40]。其β→α″相变符合Au-Cd型晶体学对应关系，马氏体变体间呈自协作形态[41-42]，这类合金具有高的相变温度(＞100 ℃)，因此，作为轻质高温形状记忆合金，在太阳帆板、火箭喷嘴调节片、高温驱动件、骨科植入物和管道接头修复等领域应用前景广阔。但是该类合金其马氏体相变热循环稳定性较低，相变过程中会析出脆性ω相，使马氏体相变在热循环过程中出现偏移。研究发现[43-49]，通过添加Co、B、Gd、Zr、Fe、Cu、Y、Zr等合金元素，可以显著改善力学性能、形状记忆效应和热循环稳定性。

1.2.3 Fe基形状记忆合金

Fe基形状记忆合金主要成分是Fe，与其他元素形成固溶体或间隙化合物。其中应用最多的是Fe-Mn-Si、Fe-Ni-Co-Al和Fe-Mn-Al-Ni[27,30,50]合金。Fe-Mn-Si合金会发生γ(面心立方)→ε(密排六方)马氏体相变，具有较高的耐腐蚀性能，但由于层错能机制和相变的非热弹性导致其形状记忆效应和超弹性远低于NiTi合金；Fe-Ni-Co-Al和Fe-Mn-Al-Ni合金因析出与母相共格的纳米第二相，会诱发热弹性马氏体相变，从而获得大于5.0%的超弹性，但是二者的多晶界协调性和循环稳定性问题仍有待提高。Fe基形状记忆合金因成本低、加工性好、强度高等优点，在管道连接、形状记忆夹具、紧固件等方面有广阔的应用前景，将成为未来开发和应用的重要方向。

1.2.4 其他形状记忆合金

除了以上形状记忆合金外，还有NiMn基形状记忆合金，如Ni-Mn-Ga、Ni-Mn-Co等；Cu基形状记忆合金，如Cu-Zn-Al、Cu-Al-Ni、Cu-Al-Mn等[28,51-52]；Zr基形状记忆合金，如Zr-Cu、Zr-Nb等[32]；Co基形状记忆合金，如Co-Ni-Al、Co-Ni-Si、Co-V-Si、Co-V-Ga等[53-59]；以及后来发现的最轻形状记忆合金Mg-Sc等[60]。随着研究不断深入，形状记忆合金体系将更加完善，未来应用将向大型化、复杂化发展，潜力巨大。

2 电弧增材制造技术

2.1 基本原理与分类

电弧增材制造(WAAM)是通过送丝系统将丝材连续输送到电弧区域，利用电弧等热源，将金属丝材熔化，通过数控系统按预先设定好的轨迹逐层进行堆积，冷却凝固后形成致密金属构件的成形过程。根据电弧热源类型，主要分为4种[61-64]：基于熔化极气体保护焊(gas metal arc welding，GMAW)的WAAM、基于冷金属过渡(CMT)的WAAM、基于非熔化极气体保护焊(gas tungsten arc welding，GTAW)的WAAM以及等离子弧焊(plasma arc welding，PAW)的WAAM，原理如图2所示。近年来，为了改善WAAM结构件的组织和力学性能，研究人员提出了激光＋电弧、双丝/多丝＋电弧、高能超声/磁场辅助等一系列新型WAAM技术，如图3所示。

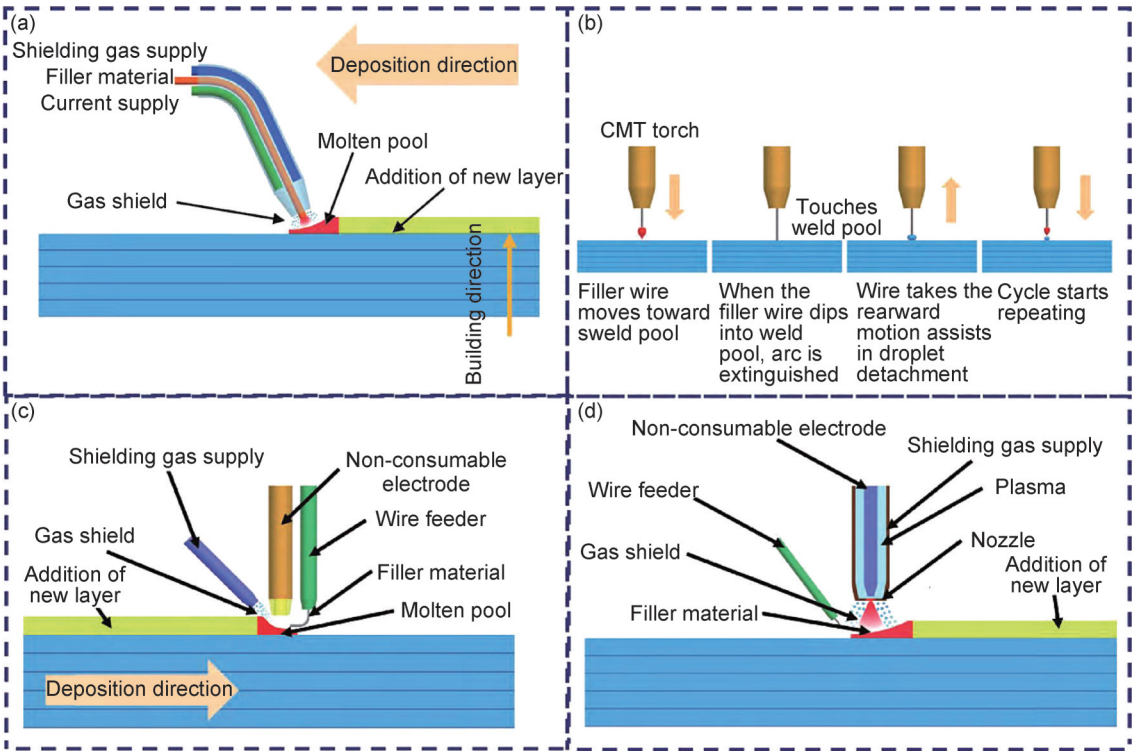


图 2　WAAM 原理示意图[64]　(a)GMAW;(b)CMT;(c)GTAW;(d)PAW

Fig.2　Schematic diagram of WAAM[64]　(a)GMAW;(b)CMT;(c)GTAW;(d)PAW

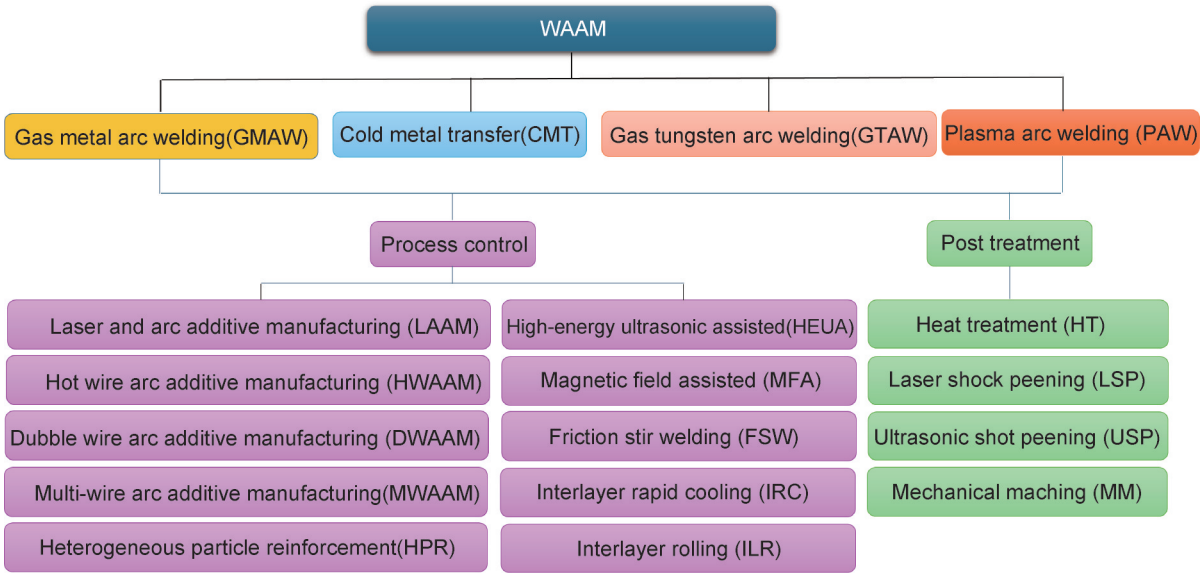


图 3　WAAM 技术分类

Fig.3　Classification of WAAM technologies

2.2　工艺特点与挑战

与其他增材制造技术相比，WAAM 具有沉积效率高、设备和材料利用率高、无焊接飞溅、成形性能好等特点，适合制造形状复杂的大型金属结构件，在智能化、功能化、兼具优异综合性能且小批量快速成型方面具有绝对优势，应用前景广阔。但由于复杂热循环效应和快熔快冷的非平衡凝固特点，导致 WAAM 制造件中存在粗大柱状晶粒、气孔、裂纹、不均匀变形等缺陷，严重影响结构件的成形精度与力学性能。所以，如何消除或减少 WAAM 结构件中的缺陷、获得均匀致密的组织、提升后续加工精度是未来研究面临的挑战。

3　形状记忆合金 WAAM 研究现状

形状记忆合金由于具有优异的阻尼性能、超弹性、形状记忆效应及高比强度而广泛应用于航空航

天、生物医学、汽车工业等领域[65]。相关研究表明[66-67]，通过优化WAAM工艺参数、在形状记忆合金中添加Al、V、Cu、Fe、Nb、La、Ce、Gd、Ta、Hf等元素进行微合金化、多场辅助以及适当后处理，可以实现微观组织、相变温度的调控，进而改善其功能特性和力学性能。

3.1 微观组织调控

3.1.1 晶粒细化与均匀化

WAAM因热源能量密度高、熔池尺寸相对较大、移动速度快以及逐层堆积等特点，沉积层晶粒组织较为复杂。在凝固过程中，由于沉积层底部与基体接触，热量从沉积焊缝流向基体，较大的温度梯度和冷却速率造成粗大的树枝晶在沉积层底部迅速生长；而沉积层中间的温度梯度和冷却速率逐渐减小，晶粒生长速度变慢，形成细小的树枝晶；沉积层顶部与空气接触，温度梯度和冷却速率最小，形成等轴晶组织，即出现凝固组织的分层特性，这种微观组织的不均匀性，严重影响沉积态样品的力学性能和功能特性。目前主要通过优化工艺参数、磁场辅助、微合金化及热处理等手段进行调控。Wang等[68-69]采用GTAW-WAAM工艺制备了NiTi合金薄壁件，通过调整基板预热温度与焊枪电流，实现沉积层晶粒细化与调控。Ke等[1]通过叠加超高频脉冲电流(ultra-high frequency pulsed，UHFP)，实现了熔池振动与破碎，将NiTi合金凝固前沿粗大的柱状晶粒由79.0 μm细化为55.3 μm，组织中存在较强的(001)和(101)取向，是晶粒生长的最优方向，若控制不当，会引起性能的各向异性。Lu等[70]使用电磁搅拌技术作为辅助手段，通过旋转电弧和洛伦兹力引起的强烈搅拌作用，使NiTi粗大柱状枝晶转变为细小均匀的非枝晶或球状晶组织。此外，沉积合金中添加适量稀土元素如La_2O_3[71]、CeO_2[72]、过渡元素Ta[73]等，在晶界或晶粒内部形成第二相颗粒，阻碍晶界移动或提供非均匀形核位置，促进沉积合金组织由粗大的柱状晶向细小的等轴晶转变，晶粒显著细化，如图4(a)，(b)所示。Chen等[74]采用D-WAAM制备了NiTiCu合金单臂构件，并在不同温度进行时效处理。结果发现，各试样晶粒为粗大的柱状晶，但有向等轴晶转变趋势，如图4(c)所示。

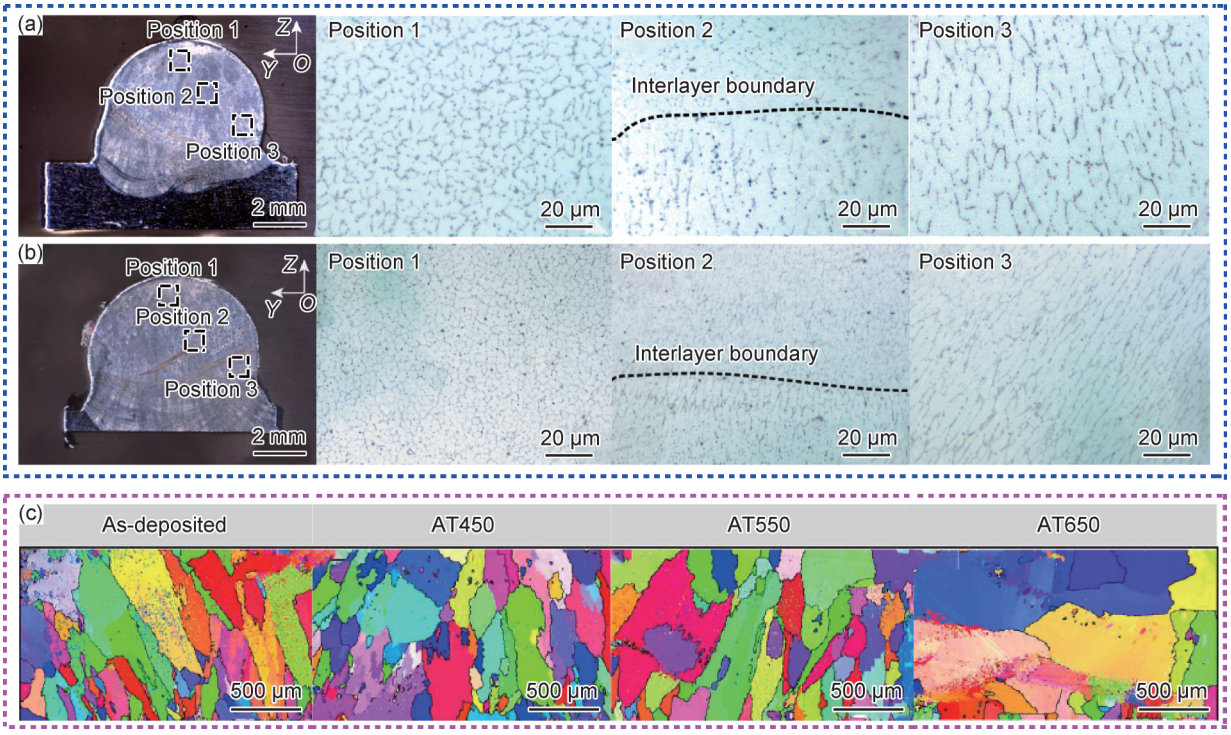


图4 WAAMed形状记忆合金显微组织

(a)NiTi试样不同区域金相组织[73]；(b)NiTiTa试样不同区域金相组织[73]；(c)不同状态NiTiCu合金EBSD分析图[74]

Fig.4 Microstructure of WAAMed shape memory alloys

(a)microstructure of NiTi samples in different regions[73]; (b)microstructure of NiTiTa samples in different regions[73]; (c)EBSD map of NiTiCu alloys in different states[74]

晶粒细化与均匀化调控是一个综合运用热力学驱动力和动力学控制的过程，核心在于最大化形核率与最小化长大速率的比值。根据材料体系和目标性能，可通过凝固控制(增大ΔT(过冷度)、增加形核剂)

和固态相变调控(增加形核位置)抑制晶粒长大、热变形或再结晶(利用储能)实现粒子钉扎、强烈塑性变形(引入缺陷密度)以及应力场、磁场对粗大晶粒的振动破碎作用等多种途径及其组合来实现。

3.1.2　析出相

WAAM成形过程是一个反复加热-冷却的复杂热循环过程,合金元素或溶质原子不断地重熔与再分配,以沉淀相的形式在晶界或晶粒内部析出,形成沉淀强化或晶界强化,改善形状记忆合金的性能。Zhang等[75]通过WAAM制备了富Ni和富Ti的NiTi合金及复合NiTi合金(富Ni NiTi与富Ti NiTi合金交替沉积而成),富Ti合金中含有大量微米级$NiTi_2$沉淀物,呈簇状分布;富Ni合金中的$NiTi_2$沉淀物较少,由簇状变为链状,出现了大尺寸的Ti(C,O)黑色沉淀,靠近基体处还存在Ni_4Ti_3相,呈透镜状,尺寸约为1.5 μm,局部区域分布有位错;复合NiTi合金的富Ni区Ni_4Ti_3相尺寸仅为50.0 nm,富Ti区存在大量中心分布的$NiTi_2$沉淀相。陈新亚[76]采用M-WAAM制备了NiTi与NiTiCu合金,结果发现Ni53.0Ti47.0(原子分数,下同)合金中析出了针状Ni_4Ti_3、Ni_3Ti及球状Ni_3Ti_2沉淀相,Ni_3Ti相和基体存在$(0\bar{2}0)_{Ni_3Ti}//(111)_{NiTi}$和$[100]_{Ni_3Ti}//[0\bar{1}1]_{NiTi}$取向关系,而$Ni_3Ti_2$相与基体之间存在$(111)_{Ni_3Ti_2}//(111)_{NiTi}$和$[0\bar{1}1]_{Ni_3Ti_2}//[01\bar{1}]_{NiTi}$取向关系,球状$Ni_3Ti_2$周边存在位错与层错;Ni50.8Ti49.2合金中析出的细小块状$NiTi_2$相与基体存在$(220)_{NiTi_2}//(011)_{NiTi}$的位向关系,$NiTi_2$周边存在位错缠结和位错网络;添加Cu元素后,Cu原子取代部分Ni原子,在基体边缘析出了大量细小针状$(Cu,Ni)_2Ti$与$(Cu,Ni)Ti_2$相。Zhao等[77]研究发现,随沉积层数增加,D-WAAM Ti-Ni-Al-V试样中的$NiTi_2$相含量减少,Al、V主要固溶在基体中,起到固溶强化作用,顶部出现了与基体呈共格关系的纳米级针状Ni_4Ti_3沉淀相,但随Ni_4Ti_3相尺寸粗化,这种共格关系逐渐消失。Zuo等[78]在WAAM NiTiTa合金晶界上观察到了尺寸约为100.0 nm的椭球状或球状的$(TiTa)_2Ni$析出相,与基体界面清晰,周围存在阶梯状马氏体;由于Ta原子替代了部分Ti原子,抑制了部分马氏体相变,使得沉淀物周围存在残留奥氏体(B2),如图5所示。Tian等[79]在CMT-WAAM Ni-Ti-Cr-Mo-Nb合金中发现,在试样上部区域,Ti_2Ni析出相以纳米颗粒形式镶嵌在Cr_2Ti相中,形成平行、交替生长的条带状结构,相邻条带间距约为0.5 μm,均匀分布在基体中。

WAAM特有的快速凝固与复杂热循环既带来了析出相控制的挑战(如非均匀性、脆性),也提供了独特的调控机遇(如原位形成细小弥散强化相)。通过工艺参数优化、成分设计和微合金化,一方面可以抑制脆性相(如$NiTi_2$)的形成,促进细小沉淀相在晶界或晶粒内部析出,通过钉扎晶界、提供形核位置,促进晶粒细化与阻碍位错的运动,形成弥散强化与细晶强化;另一方面,一些沉淀相与基体保持高度的一致性,可以有效增强基体,这两方面的协同作用强化了合金,提高了材料的性能[80-83]。

3.1.3　马氏体相变与滞后特性

WAAM形状记忆合金在应力诱导或温度变化条件下同样会发生奥氏体与马氏体的可逆相变,且存在一定的滞后现象。在NiTi合金中,Ni元素含量显著影响其马氏体相变,原子分数每增加0.1%,M_s点下降10 ℃左右。Resnina等[84]采用GMAW-WAAM沉积了五层Ti-Ni单壁结构,研究了各层Ni含量分布对马氏体相变温度的影响。由于各沉积层Ni、Ti含量的差异以及第二相粒子的形成,导致各沉积层马氏体相变温度不同,正相变的起始温度M_s从第一层的73.0 ℃降到第五层的−16.0 ℃,逆相变起始温度A_s从第一层的70.0 ℃降到第五层的−69.0 ℃,各层均发生了一步式立方奥氏体(B2)↔单斜马氏体(B19′)相变。Yu等[85]采用CMT-WAAM制备了五层NiTi合金,每层合金的相变过程与Resnina研究结果相似,马氏体呈现微片状,为典型的脱孪结构,马氏体相变M_s点均低于NiTi丝材。Xiang等[86]通过调控Ni/Ti原子比,制备WAAM NiTi合金薄壁件,Ni/Ti原子比为1∶1时,马氏体相变可产生两种不同取向的孪晶马氏体;Ni/Ti原子比为1.6∶1时,产生了板条马氏体。陈新亚[76]采用M-WAAM制备了不同Cu含量的NiTiCu合金,均发生了立方奥氏体(B2)↔单斜马氏体(B19′)的相变,其中Ti50.0Ni35.0Cu15.0合金中形成了(011)化合物和(111) Ⅰ型单对复合孪晶马氏体,细小的$(Cu,Ni)_2Ti$析出相可以被孪生剪切力切割穿过,在一定程度上阻碍孪晶界的运动,影响了马氏体板条的生长。张启蒙[87]研究发现,WAAM Ti-V-Al合金的相组成会随V含量的升高产生明显变化,会由α′马氏体+α″马氏体+少量β相向少量α″马氏体+大量β相转变,α′和α″相逐渐减少,甚至消失,β相含量不断升高,晶粒逐渐粗化;WAAM Ti-14.7V-9.8Al合金存在两种粗细不同的板条状α″马氏体,呈自协作形态,均存在{111}Ⅰ型孪晶关系和〈211〉Ⅱ型孪晶关系。Chen等[74,88]添加Cu后,提高了D-WAAM NiTiCu合金的相变温度,相变滞后区间变窄,由24.4 ℃变为7.1 ℃,但是添加过量的Cu会形成脆性金属间化物,恶化力学性能,所以应合理控制Cu的添加量;随后该团队发现,在不同温

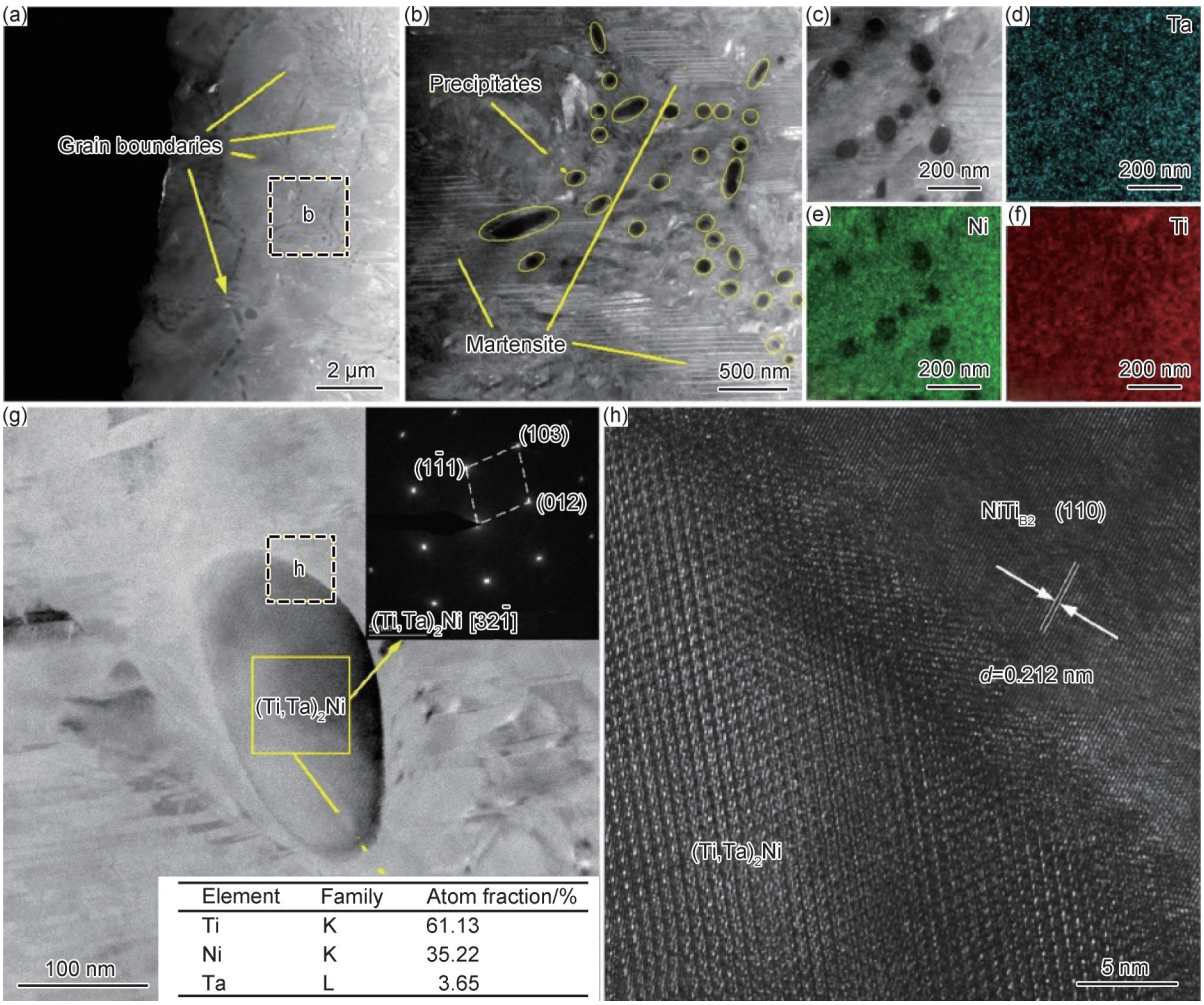


图5 WAAMed NiTiTa形状记忆合金的$(TiTa)_2Ni$析出相[78]

(a)低放大倍率下等轴晶区的透射电镜像;(b)图(a)中区域b的放大像;(c)~(f)局部析出相及元素分布映射;(g)析出相的放大形态及其元素组成和SAED;(h)图(g)中区域h的高分辨透射电镜像

Fig.5 $(TiTa)_2Ni$ precipitates in WAAMed NiTiTa shape memory alloys[78]

(a)TEM image of the equiaxed grains region at low magnification;(b)magnified image of region b in Fig.(a);(c)-(f)images of local precipitates and the corresponding elemental mapping;(g)enlarged morphology of precipitates with element composition and SAED;(h)high-resolution TEM image of region h in Fig.(g)

度下时效,马氏体相变同样存在滞后现象,450 ℃时效时,相变滞后温度最窄,为11.7 ℃,之后随时效温度升高,相变滞后温度区间变宽,如图6所示。许博[89]采用D-WAAM+Nb元素原位合金化制备了Ni47.0Ti44.0Nb9.0合金,结果发现,Nb元素的添加降低了M_s点,相变温度滞后从-6.4 ℃提升至40.9 ℃。

形状记忆合金的马氏体相变具有热力学可逆性,过程中伴随着晶体结构的改变和能量的交换。在马氏体正向变过程中,发生马氏体变体的再取向或去孪晶化;在逆相变过程中,不同取向马氏体重新回到具有同一个原始取向的奥氏体。由于相变过程的能量耗散(界面摩擦、缺陷相互作用)和正逆相变路径的固有不对称性,导致相变存在滞后现象($\Delta T=A_s-M_s$)。由以上研究可知,WAAM凝固组织的不均匀性、合金成分、微合金化、析出相(第二相粒子),以及热处理对马氏体相变和滞后特性具有重要影响。今后应通过成分-组织-工艺-外场等协同调控,提高组织均匀性和优化WAAM工艺参数、研究多因素交互机制(如析出相-位错协同效应)及跨尺度建模,以实现马氏体相变、析出相的合理调控和宏观滞后的精准预测,改善材料在实际应用中的多功能特性,从而适应不同领域的响应速度需求。

3.1.4 内部缺陷抑制

由于WAAM过程的复杂热循环特性,会造成成形合金内部产生气孔/孔洞、残余应力、裂纹及成分偏析等缺陷,严重影响合金的性能与功能特性,近年来引起学者们的广泛关注。Biffi等[90]采用微激光线弧能量沉积技术制备了高长宽比和亚毫米厚度的NiTi合

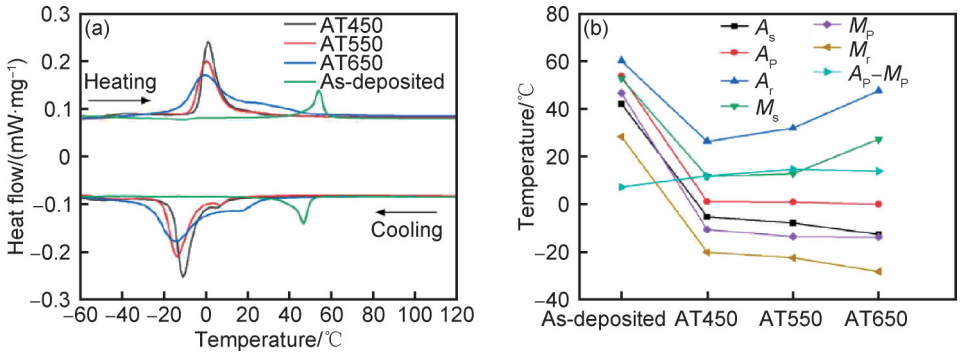


图 6　WAAMed NiTiCu 形状记忆合金不同状态下相变行为[74]

(a)DSC 曲线；(b)相变温度与滞后变化曲线

Fig.6　Phase transformation behaviour of WAAMed NiTiCu alloys in different states[74]

(a)DSC curves; (b)variation curves of phase transformation temperature and hysteresis

金壁面，壁面无裂纹，相对密度高达 99.0%；对出现的孔洞缺陷拟合了等效直径，使用球形度参数评估了孔洞与完美球体的偏离程度，结果发现，缺陷尺寸范围在 50.0～200.0 μm，随缺陷尺寸的减小，缺陷球度从 60.0% 增加到 80.0%。说明该工艺在制备 NiTi 合金方面具有一定的技术优势。为了减少变形和残余应力，Xiang 等[86]通过控制送丝速度，制备了不同 Ni/Ti 原子比的 WAAM NiTi 合金薄壁件，结合实验和有限元数值模拟对 NiTi 合金 WAAM 过程的变形和应力场进行了分析。结果表明，由于热积累，导致沉积层与基体之间的界面处产生高度应力集中，随 Ni/Ti 原子比增加，基底变形以及沉积层内部和两侧的残余应力增加，正下方区域的残余应力减小；Ni/Ti 原子比为 0.8∶1 时，沉积层与基底间应力最小，且在 Ni/Ti 原子比为 1∶1 时，NiTi 合金层间应力差最小，这两种情况下可有效降低开裂风险；变形主要集中在沉积层中心，以及少量边缘变形区，垂直于基板方向的变形呈对称分布；Ni/Ti 原子比由 0.8∶1 增大到 1.6∶1 时，垂直于基板的变形量由 1.4 mm 增大到 1.6 mm，变形加剧。可见，Ni/Ti 原子比对残余应力和不均匀变形有重要影响。Zhang 等[91]对 CMT-WAAM 沉积的 NiTi 合金在 200 ℃退火 3 h，成功将合金内部的残余应力由－400.0～200.0 MPa 降为－20.0～50.0 MPa。Koley 等[92]根据 Schiel Gulliver 模型模拟偏析轮廓和凝固路径，使用不同的凝固开裂理论计算了 Fe-17.0Mn-5.0Si-10.0Cr-4.0Ni-0.5V-0.5C（质量分数/%）沉积合金薄壁件在不同位置和不同工艺条件下的开裂倾向。结果发现，在非平衡凝固下，Ni、Mn、Si 被排挤到液相中，导致严重的元素偏析，产生芯状结构产物，凝固 40.0%～60.0% 时，热裂敏感性显著升高，并达到最大值，开裂倾向加剧。

WAAM 是一个局部快速熔化-凝固-重新再熔化的复杂热循环过程。在熔化过程中，一些无法完全去除的水分、油脂和其他杂质、污染物很容易吸收到熔池中并在凝固后产生气孔；当路径规划不当或沉积过程不稳定时，会产生熔化不足或者飞溅，形成间隙或孔洞。气孔或孔洞的存在会造成应力集中，成为裂纹源；WAAM 过程高能量输入、高沉积速率和大的温度梯度会造成熔池边缘以及内部晶界处产生应力集中，发生不均匀塑性变形，形成具有累积效应的残余应力，而熔池边缘和晶界处往往分布有脆性金属间化合物，在应力作用下容易产生脆性断裂，形成裂纹；相邻堆积层之间的未熔合，在应力作用下也会出现层间分离和层间开裂。在非平衡凝固下，某些合金元素被排挤到液相中，导致严重的元素偏析，造成热裂倾向。这些缺陷的存在，严重降低增材件的性能。可以看出，填充丝与基材的洁净度、沉积层数、合金成分、热输入等因素对 WAAM 形状记忆合金内部缺陷的形成有重要影响，应严格控制。未来应采用多元化研究方法，如沉积路径规划、基板预热、脉冲电流＋氩-氦混合气体保护、丝材制备与优化、熔池过程监控与调整、数值模拟辅助以及后处理工艺创新等多尺度协同策略，以实现微观组织调控、降低合金内部缺陷的目的。

3.2　超弹性与形状记忆效应

形状记忆合金的超弹性与形状记忆效应都是通过马氏体相变实现的，但是触发机制不同，超弹性的触发机制为应力诱导，而形状记忆效应则是温度变化。二者受合金成分、微观结构与缺陷、相变与环境温度、加载条件、热处理以及 WAAM 工艺等因素的影响。Zeng 等[93]采用 WAAM 沉积了富 Ni 的 NiTi 形状记忆合金，拉伸过程首先发生奥氏体弹性变形，在 350 MPa 时发生应力诱导马氏体相变，随后马氏体孪晶解体、发生塑性变形，在约为 17.0% 的应变处产生

断裂，在室温拉伸过程中展现出超弹性。Khismatullin等[94]分别研究了WAAM沉积NiTi合金在室温下弯曲变形-卸载后的超弹性以及沉积态和时效态合金在液氮中(−196 ℃)弯曲变形后加热过程的形状记忆效应。结果发现，当初始应变为5.8%时，沉积态合金顶部区域和中间区域表现出优异的超弹性，形状恢复率分别为92%和95%；当初始应变为4.0%～5.0%时，沉积态和时效态合金的形状恢复率均达100%，表现出优异的形状记忆效应。Zhang等[91]对CMT-WAAM制备的NiTi合金试样进行退火处理，研究了不同状态下合金的超弹性，结果发现，经过15次加载/卸载循环实验，在1.6%的应变下释放残余应力后，合金超弹性(形状恢复率)由自由态的69.8%提升到退火态的95.7%；在2.5%的应变下释放残余应力后，合金超弹性(形状恢复率)从自由态的63.1%提升到退火态的73.7%。说明残余应力影响合金的相变行为，退火有助于应力释放，可显著提升NiTi合金的超弹性。为了评估Fe基记忆合金的超弹性，Felice等[95]对WAAM制备的Fe-17.0Mn-5.0Si-10.0Cr-4.0Ni-1.0(V,C)(质量分数/%)合金进行100次循环加载/卸载测试，第二个循环后，合金具有0.6%至0.7%的不可逆应变，从第五个循环开始，所有循环都显示出类似的行为，说明合金具有良好的循环稳定性。Xu等[96]比较了WAAM制备的Cu-12.5Al-3.0Mn(质量分数/%)和Cu-12.5Al-3.0Mn-1.0Ni(质量分数/%)两种合金的形状恢复率、可恢复应变与记忆恢复行为。结果发现，Cu-12.5Al-3.0Mn合金的形状恢复率从4.0%预应力的91.2%下降到10.0%预应力的62.4%，其极限可恢复应变约为7.0%；而Cu-12.5Al-3.0Mn-1.0Ni合金的形状恢复率在4.0%～8.0%预应力时为100%，并在预应力增加到10.0%之前仍保持为96.6%，即可恢复应变超过9.0%；另外，弯曲预应变为8.0%的Cu-12.5Al-3.0Mn-1.0Ni合金在酒精灯加热不到2 s便开始形状恢复，5 s后便完全变平恢复，明显快于Cu-12.5Al-3.0Mn合金，如图7(a)，(b)所示。说明添加Ni后，显著提升了Cu-Al-Mn合金的超弹性和形状记忆效应。张启蒙[87]将WAAM制备的Ti-14.7V-9.8Al合金和其他典型高温形状记忆合金的比强度和最大可恢复应变进行了对比，如图7(c)所示。可以看出，WAAM Ti-14.7V-9.8Al合金的完全可恢复应变优于Ti-Ta、Ti-Nb合金且仅次于NiMnGa合金，形状记忆效应明显优于传统熔炼法制备的固溶态Ti-V-Al合金，综合性能优异，具有较高的比强度和可恢复应变。

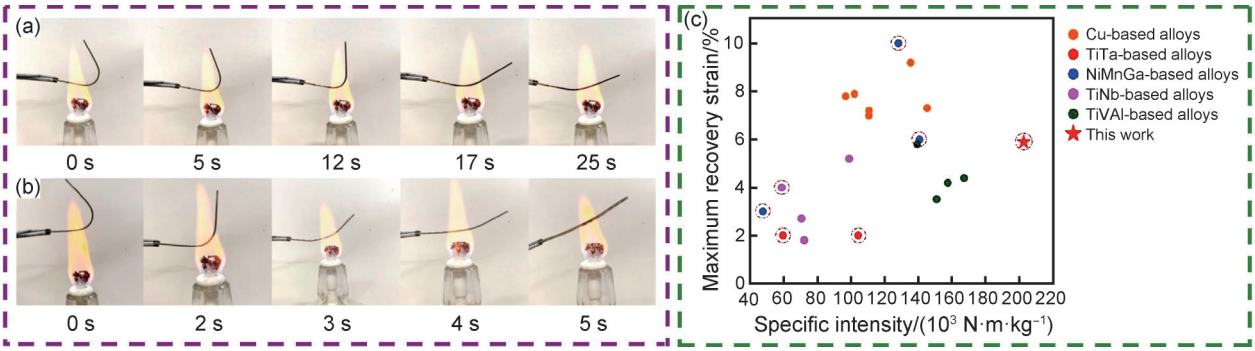


图7 WAAMed形状记忆合金的形状记忆效应

(a)Cu-12.5Al-3.0Mn合金的形状恢复过程(预应变8.0%)[96]；(b)Cu-12.5Al-3.0Mn-1.0Ni合金的形状恢复过程(预应变8.0%)[96]；(c)Ti-14.7V-9.8Al合金与其他典型高温形状记忆合金的比强度和最大可恢复应变的比较(注：红色虚线框的点的纵坐标为合金的最大完全可恢复应变)[87]

Fig.7 Shape memory effect of WAAMed shape memory alloys

(a)memory recovery process of Cu-12.5Al-3.0Mn alloy (pre-strain is 8.0%)[96]; (b)memory recovery process of Cu-12.5Al-3.0Mn-1.0Ni alloy (pre-strain is 8.0%)[96]; (c)comparison of specific strength and maximum recoverable strain between WAAMed Ti-14.7V-9.8Al shape memory alloy and other typical high-temperature shape memory alloys (Note: the ordinate of the red dotted box point is the maximum fully recoverable strain of the alloy)[87]

超弹性和形状记忆效应是形状记忆合金的两个核心功能特性。当奥氏体受到应力作用或降温至马氏体转变点M_s以下时，会转变为马氏体，这种转变伴随着晶体结构的改变和相应的形状变化。应力卸载后或升温至奥氏体转变开始温度A_s以上时，马氏体可以恢复到奥氏体，从而使材料恢复其原始形状。可见，WAAM形状记忆合金在一定条件下，具有较高的可恢复应变和形状恢复率，呈现出优异的超弹性与形状记忆效应，为形状记忆合金的大尺寸、低成本制造提供了可能。但其超弹性和形状记忆效应的稳定性

仍受工艺缺陷和微观组织非均匀性的限制。未来应从降低热输入(如施加高频脉冲电弧)、增加层间冷却时间、后处理工艺优化、丝材成分补偿、各向异性调控、新型合金设计及复合增材工艺(搅拌摩擦、冷喷涂、层间轧制)等方面加大研究力度。

3.3　力学性能

高强高韧材料的开发对于未来工程技术领域的发展具有深远意义,而形状记忆合金作为一种特殊的功能材料,其力学性能的优化与提升受到广大学者的极大关注。Huang 等[97]采用 D-WAAM 工艺制备的 Ni49.0Ti51.0 合金,极限抗压强度和断裂应变分别可达 2241.3 MPa 和 31.7%。Chen 等[98]研究了 WAAM NiTi 合金在 750～900 ℃、应变速率为 0.1×10^{-1}～5.0 s^{-1}的热变形行为。结果表明,合金流动应力随应变速率增加而增加,随变形温度升高而减小,计算值与实验值吻合良好,随变形程度的增加,流动不稳定区域扩大,合金的最佳加工窗口为 800～900 ℃、应变速率为 0.1×10^{-1}～0.5×10^{-1} s^{-1}。Zhang 等[99]测试了 D-WAAM 工艺制备的 Ti-3.0Al-2.0V(质量分数/%)壁面构件的拉伸性能,水平与垂直方向的平均极限抗拉强度分别为 634.0 MPa 和 648.0 MPa,平均伸长率分别为 7.0% 和 5.1%,拉伸断口为韧性和脆性的混合组织。近年来各系列形状记忆合金的力学性能总结如表 1 所示[40,73-74,77,79,87-89,95,100-102]。由表 1 可知,虽然 WAAM 形状记忆合金在力学性能提升上取得了一定的研究进展,但是 WAAM 凝固组织的分层特性与不均匀性引起的性能各向异性仍然存在。

在拉伸过程中,一方面,由于弹性变形和塑性变形,造成晶界处变形不协调,出现应力集中以保持晶粒的连续性;另一方面,晶界的存在使滑移位错难以直接穿过晶界,破坏了滑移系统的连续性,阻碍了位错运动。由于不同区域和方向上所含等轴晶粒数量不同,等轴晶粒多的区域和方向包含有更多的晶界,使得位错在更多的晶粒中移动,从而产生更均匀的塑性变形,造成该区域和方向伸长率较高。根据 Hall-Petch 理论,当晶粒尺寸减小时,晶界面积增大,晶界对位错的阻碍作用增强,变形抗力增加,强度升高,晶粒细小的区域和方向力学性能更高。这种性能的各向异性,严重制约着 WAAM 形状记忆合金在高强高韧工程领域的应用。未来应从微观组织调控、工艺路径优化(交替沉积方向)、后处理技术开发等方面加大研究力度,提升组织均匀性和细化晶粒,获得细小等轴晶组织,以消除各向异性,这将是未来增材制造技术的一大挑战。

3.4　耐磨损性能

合金的摩擦学性能不仅取决于硬度和延展性,还取决于摩擦测试系统、加工硬化、裂纹萌生和扩展阻力以及材料缺陷等因素。所以优化 WAAM 工艺、减少组织缺陷、提高合金表面硬度,是改善耐磨性能的关键。Liu 等[103]基于 CMT-WAAM 技术,制备了墙形 NiTi 合金组件,并优化了沉积速度,深入研究了沿沉积方向试样的磨损性能。结果发现,塑性变形和磨损引起的加工硬化是磨损的主要形式,顶部摩擦因数最小,硬度最大,显示出较高的耐磨性;而中部摩擦因数波动稳定,表面两侧有材料堆积,无明显切削,具有稳定的摩擦行为。表明该技术在制造新型镍钛柔性结构上具有技术优势。Teng 等[104]通过优化热输入,研究了 WAAM 制备的均质 NiTi 合金结构件沿不同沉积高度的磨损性能,结果与 Liu 类似,合金显示出优异的耐磨性能,摩擦因数随沉积高度的增加,由 0.8 降到 0.7,上中下区域的划痕两侧均有材料堆积,磨损形态以沟槽为主,伴有剥落和黏附,只有上部区域出现少量氧化,氧化磨损和黏着磨损为主要磨损机制。可以看出,目前对于 WAAM 制备形状记忆合金的抗磨损研究仅停留在工艺参数的调整上,未见有深入的研究报道,未来可以开展磨损机理的多尺度研究,如微观相变与磨损关联性、高低载荷下超弹性的抗磨损机制、高温或腐蚀介质中的磨损-腐蚀耦合机制、热-力-电多物理场耦合的磨损模拟和预测以及探索形状记忆效应对磨损表面的自适应、自修复设计与内在机理等。

3.5　耐腐蚀性能

在 WAAM 制备形状记忆合金领域,耐蚀性是材料耐久性与功能化应用的一个关键问题,而原位合金化可以促进合金表面钝化膜的形成,提高合金的耐腐蚀性能。左新德等[73]发现,添加 Ta 后,WAAM 制备 NiTiTa 合金的腐蚀电位从－0.6V 增加到－0.4V,腐蚀电流密度从 1.9×10^{-6} A/cm^2下降到 4.2×10^{-7} A/cm^2,具有更高的自腐蚀电位和更小的腐蚀电流密度,NiTiTa 表面形成了致密的 TiO_2-Ta_2O_5钝化膜,耐腐蚀性能显著提升。赵婧[40]发现,添加 Zr 后,WAAM 制备 Ti-V-Al-Zr 合金的电容环半径和低频率电阻在 Zr 含量为 4.0% 时最大,合金膜电极表面形成的钝化膜具有最强的保护能力。Zr 元素的添加进一步改善了 Ti-V-Al 合金的热循环稳定性。当前对于 WAAM 制备形状记忆合金的耐腐蚀性能研究仍处于起步阶段,未来可以结合机器学习,筛选抗腐蚀合金成分并优化 WAAM 工艺参数,开展 WAAM 形状记忆合金的多尺度腐蚀机理研究,利用形状记忆效应探索合金腐蚀自修复可能性等。

表 1 WAAMed 形状记忆合金力学性能

Table 1 Mechanical properties of WAAMed shape memory alloys

SMAs		Process	Heat treatment	UTS/MPa	CS/MPa	YS/MPa	EL/%	HV	Ref.
Ti-based	Ti14.4V9.7Al2Zr	GTAW	Annealing: 900 ℃/6 h; ice-water quenching	814.0		352.0	10.1		[40]
	Ti14.4V9.7Al4Zr			775.0		501.0	13.0		
	Ti14.4V9.7Al6Zr			646.0		＜200.0	12.8		
	Ti-12.2V-10.1Al	GTAW	Annealing: 900 ℃/6 h; ice-water quenching	905.0		550.0	7.9	326.0	[87]
	Ti-14.7V-9.8Al			852.0			9.0	317.0	
	Ti-17.0V-9.5Al			534.0		260.0	6.1	303.0	
Fe-based*	Fe-17.0Mn-5.0Si-10.0Cr-4.0Ni-1.0(V,C)	GMAW		821.0±64.0		472.0±18.0	26.0±1.5	250.0-300.0	[95]
	Fe28.0Mn5.0Si		Annealing: 1050 ℃/8 h; Solution: 900 ℃/2 h					220.0-260.0	[100]
	Fe28.0Mn5.0Si+50.0% nano-Si doping							278.4	
NiTi-based	Ni50.8Ti49.2	W-DED		511.6			8.5		[73]
	Ni49.1Ti48.6Ta2.3			558.1			7.9		
	NiTiCu(20.0%Cu)	CMT		232.0±11.0			3.7±0.7	369.5	[74, 88]
			T6: 900 ℃/1 h+450 ℃/1 h	539.0			6.9	317.0	
	Ti-Ni-Al-V	CMT			2100.0±15.0		8.7±0.6	685.4 (bottom area) 553.0(top area)	[77]
	Ni52.0Ti48.0	CMT			1766.0(H) 1981.0(L)		28.1(H) 35.3(L)	500.0-750.0 (bottom area) 400.0 (middle area) 500.0(top area)	[89, 101]
			Solution: 800 ℃/1 h		2406.0(H) 2537.0(L)		16.9(H) 18.4(L)		
			T6: 800 ℃/1 h+450 ℃/3 h		1927.0(H) 2271.0(L)		27.5(H) 35.2(L)		
	Ni49.0Ti47.0Nb4.0				1874.0(H) 2268.0(L)		31.7(H) 36.2(L)	300.0-600.0 (bottom area) 300.0-450.0 (near top)	
	Ni47.0Ti44.0Nb9.0				2042.0(H) 2214.0(L)		32.6(H) 38.3(L)	300.0-400.0 (bottom area) 280.0-350.0 (near top)	
			Solution: 800 ℃/1 h		2216.0(H) 2143.0(L)		32.4(H) 40.2(L)		
			T6: 800 ℃/1 h+450 ℃/3 h		2072.0(H) 2243.0(L)		33.4(H) 40.2(L)		
	Ni45.0Ti42.0Nb13.0				2483.0(H) 2206.0(L)		37.2(H) 35.6(L)	250.0-300.0	
	Ni51.1Ti48.9	UHFP-GTA	Annealing: 950 ℃/5 h	611.3±12.4			19.5	288.6±10.5	[102]
	Ni-Ti-Cr-Mo-Nb	CMT			1970.0		8.0	570.0 (bottom area) 580.0-650.0 (middle area) 603.0-714.0 (top area)	[79]

Note: UTS, CS, YS, EL, L, and H stand for ultimate tensile strength, compressive strength, yield strength, elongation, longitudinal, and horizontal, respectively; *SMA content: mass fraction

4　结束语

通过WAAM工艺参数调控、微合金化、稀土改性、引入第二相及后续热处理等技术手段可以显著改善沉积合金的组织和相组成，进而引发位错强化、细晶强化、沉淀强化等综合强化效应，提升沉积合金的综合力学性能。WAAM作为一种新型的材料成形技术，为形状记忆合金的高效、低成本制造提供了新途径。但需要通过材料-工艺-组织-性能协同调控来改善工艺缺陷和微观组织非均匀性，突破力学性能、超弹性和形状记忆效应的稳定性瓶颈。未来发展方向将聚焦于智能化、复合化及跨尺度精准调控技术的深度融合，研究方向如图8所示。

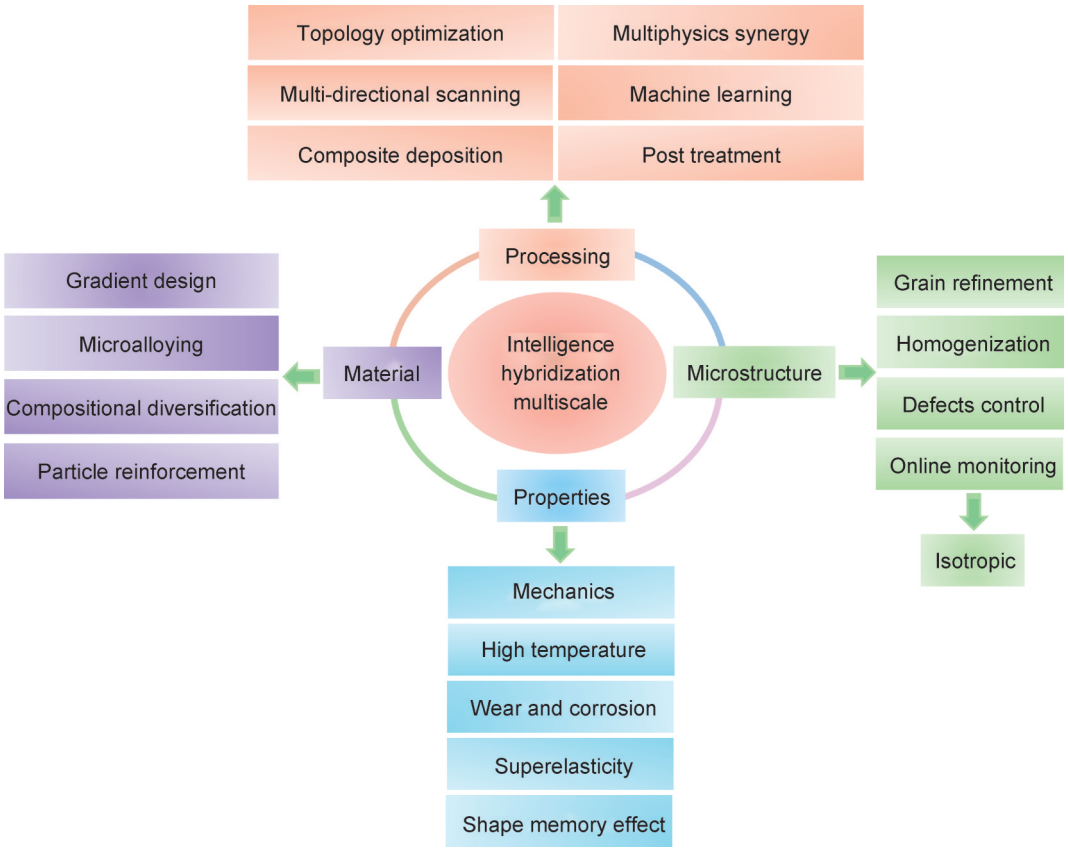


图8　WAAMed形状记忆合金未来研究方向

Fig.8　Future research directions of WAAMed shape memory alloys

(1)WAAM制备形状记忆合金在成形过程监控与模型建立方面不够深入，今后应采用多元化研究方法，从材料-工艺-组织-性能多维度协同，基于机器学习算法和人工智能实时监控熔池过程、数值模拟辅助，建立材料-工艺-组织-性能映射模型。

(2)WAAM制备形状记忆合金在微观组织调控方面，今后可以采用拓扑优化、多向扫描、脉冲电流+氩-氦混合气体保护等多种手段，细化晶粒，打破晶粒取向偏好；结合微合金化与梯度设计、多材料复合沉积技术与多场协同辅助技术实现组织均匀化；通过热等静压和热处理消除气孔/孔洞、残余应力、裂纹等缺陷；最终消除组织和性能的各向异性，优化综合性能。

(3)WAAM制备形状记忆合金的抗磨损与耐腐蚀性研究不够深入，未来可以开展磨损与腐蚀机理的多尺度研究，如建立微观组织、相变与磨损-腐蚀关联性，揭示晶界、析出相与磨损-腐蚀的优先路径关系、高低载荷与高温或腐蚀环境中超弹性的抗磨损-耐腐蚀耦合机制；基于机器学习法建立热-力-电多物理场耦合的磨损-腐蚀预测模型，预测残余应力与磨损-腐蚀介质交互作用下的失效风险；探索超弹性与形状记忆效应对磨损-腐蚀表面的自适应、自修复可能性以及在航空航天、深海装备、核反应堆冷却系统等极端环境中的应用潜力等。

(4)目前WAAM成形形状记忆合金尚处于起步阶段，研究报道较少，仅集中在少数NiTi基、Ti基、Fe基、Cu基形状记忆合金上，今后应拓展WAAM多元化应用体系，结合成分设计与微合金化，开发新型形状记忆合金，推动形状记忆合金在更多领域深度发展。

参考文献

[1] KE W C, OLIVEIRA J P, CONG B Q, et al. Multi-layer deposition mechanism in ultra high-frequency pulsed wire arc additive manufacturing (WAAM) of NiTi shape memory alloys[J]. Additive Manufacturing, 2022, 50: 102513.

[2] BIFFI C A, SOYARSLAN C, FIOCCHI J, et al. Additive manufacturing of NiTi architected metamaterials[J]. Additive Manufacturing Letters, 2024, 10: 100216.

[3] MEHRPOUYA, M, ANNAMARIA G, HOSSEIN L, et al. Advanced welding and deforming: chapter 8-laser welding of nickel-titanium (NiTi) shape memory alloys [M]. Netherlands: Elsevier Inc, 2021.

[4] MEHRPOUYA M, BIDSORKHI H C. MEMS applications of NiTi based shape memory alloys: a review[J]. Micro and Nanosystems, 2017, 8(2): 79-91.

[5] SAEDI S, ACAR E, RAJI H, et al. Energy damping in shape memory alloys: a review [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 956: 170286.

[6] AFKHAMI S, AMRAEI M, GARDNER L, et al. Mechanical performance and design optimisation of metal honeycombs fabricated by laser powder bed fusion[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 180: 109864.

[7] ISAAC C W, DUDDECK F. Recent progress in 4D printed energy-absorbing metamaterials and structures [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2023, 18(1): e2197436.

[8] JAFARABADI A, FERRETTO I, MOHRI M, et al. 4D printing of recoverable buckling-induced architected iron-based shape memory alloys[J]. Materials & Design, 2023, 233: 112216.

[9] DU PLESSIS A, RAZAVI N, BENEDETTI M, et al. Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: a review[J]. Progress in Materials Science, 2022, 125: 100918.

[10] YAZDANDOOST F, SADEGHI O, BAKHTIARI-NEJAD M, et al. Energy dissipation of shock-generated stress waves through phase transformation and plastic deformation in NiTi alloys [J]. Mechanics of Materials, 2019, 137: 103090.

[11] LI X Q, CHEN H, GUO W M, et al. Improved superelastic stability of NiTi shape memory alloys through surface nanocrystallization followed by low temperature aging treatment[J]. Intermetallics, 2021, 131: 107114.

[12] DZOGBEWU T C, DE BEER D J. Additive manufacturing of NiTi shape memory alloy and its industrial applications[J]. Heliyon, 2024, 10(1): e23369.

[13] 李承德,王帅,任玲玲,等.丝材直径对电弧增材制造ZL114A铝合金组织与性能的影响[J].焊接技术,2022,51(3):8-11.
LI C D, WANG S, REN L L, et al. Effect of wire diameter on microstructure and properties of ZL114A aluminum alloy deposited by wire arc additive manufacturing [J]. Welding Technology, 2022, 51(3): 8-11.

[14] GOMES B F, MORAIS P J, FERREIRA V, et al. Wire-arc additive manufacturing of Al-Mg alloy using CMT and PMC technologies[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 233: 00031.

[15] 李承德,顾惠敏,王伟,等.电弧增材制造ZL114A铝合金的组织与性能[J].稀有金属材料与工程,2019,48(9):2917-2922.
LI C D, GU H M, WANG W, et al. Microstructure and properties of ZL114A aluminum alloy prepared by wire arc additive manufacturing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(9): 2917-2922.

[16] 耿鹏,陈道兵,周燕,等.增材制造智能材料研究现状及展望[J].材料工程,2022,50(6):12-26.
GENG P, CHEN D B, ZHOU Y, et al. Research status and prospect of additive manufacturing of intelligent materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(6): 12-26.

[17] 李雷,于治水,张培磊,等.TC4钛合金电弧增材制造叠层组织特征[J].焊接学报,2018,39(12):37-43.
LI L, YU Z S, ZHANG P L, et al. Microstructural characteristics of wire and arc additive layer manufacturing of TC4 components [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(12): 37-43.

[18] YUAN T, YU Z L, CHEN S J, et al. Loss of elemental Mg during wire + arc additive manufacturing of Al-Mg alloy and its effect on mechanical properties [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 49: 456-462.

[19] YANG Z W, FU L Q, WANG S L, et al. Balance of strength and plasticity of additive manufactured Ti-6Al-4V alloy by forming TiB whiskers with cyclic gradient distribution[J]. Additive Manufacturing, 2021, 39: 101883.

[20] 刘齐,张萌,付乐琪,等.原位合金化双丝电弧增材制造γ-TiAl组织性能研究[J].稀有金属材料与工程,2020,49(11):3919-3924.
LIU Q, ZHANG M, FU L Q, et al. Microstructure and properties of γ-TiAl fabricated by *in-situ* alloying assisted double-wire arc additive manufacturing[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(11): 3919-3924.

[21] 冯英超,刘金平,王世杰,等.固溶处理对Inconel 625合金电弧增材组织的影响[J].焊接学报,2018,39(6):81-85.
FENG Y C, LIU J P, WANG S J, et al. Effect of solution treatment on the microstructure of Inconel 625 alloy fabricated by arc additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(6): 81-85.

[22] 王磊磊,张占辉,徐得伟,等.双脉冲电弧增材制造数值模拟与晶粒细化机理[J].焊接学报,2019,40(4):137-140.
WANG L L, ZHANG Z H, XU D W, et al. Numerical simulation and mechanism study of grain refinement during double pulsed wire arc additive manufacturing [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(4): 137-140.

[23] WANG L W, CHEN S J, XIAO J, et al. Droplet-targeting laser hybrid indirect arc for additive manufacturing technology-a preliminary study[J]. China Welding, 2020, 29(1): 50-55.

[24] SUN F Z, FENG X X, WANG H Z, et al. Brief overview of functionally graded NiTi-based shape memory alloys [J]. Advanced Engineering Materials, 2023, 25(9): 2201434.

[25] KIM M S, HEO J K, RODRIGUE H, et al. Shape memory alloy (SMA) actuators: the role of material, form, and scaling effects [J]. Advanced Materials, 2023, 35(33): 2208517.

[26] GHAFOORI E, WANG B, ANDRAWES B. Shape memory alloys for structural engineering: an editorial overview of research

and future potentials [J]. Engineering Structures, 2022, 273: 115138.

[27] 郭良,张修庆.金属基形状记忆合金研究进展[J].功能材料与器件学报,2020,26(5):323-330.
GUO L, ZHANG X Q. Research progress of metal-based shape memory alloys[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2020,26(5):323-330.

[28] 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 (1): 162-182.

[29] ZHANG Y K, XU L Y, ZHAO L, et al. Deformation mechanism of Cu-Al-Ni shape memory alloys fabricated *via* laser powder bed fusion: tension-compression asymmetry [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 167: 14-26.

[30] 左阳,孙礼鑫,范世满,等.Fe-Mn-Al-Ni基形状记忆合金的研究进展和挑战[J/OL].材料工程,2024.https://link.cnki.net/urlid/11.1800.TB.20241226.1550.002.
ZUO Y, SUN L X, FAN S M, et al. Fe-Mn-Al-Ni based shape memory alloys: research progress and challenges[J/OL]. Journal of Materials Engineering, 2024. https://link.cnki.net/urlid/11.1800.TB.20241226.1550.002.

[31] 魏金,尚勇,刘仲礼,等.高性能β型Ti-Nb基形状记忆合金研究进展[J].有色金属科学与工程,2025,16(2):230-244.
WEI J, SHANG Y, LIU Z L, et al. Research progress of β type Ti-Nb-based shape memory alloys with high performances [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2025, 16 (2): 230-244.

[32] 熊承阳,屈文涛,李岩.锆基形状记忆合金的研究进展[J].材料热处理学报,2022,43(5):1-9.
XIONG C Y, QU W T, LI Y. Research progress of Zr-based shape memory alloys [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(5): 1-9.

[33] 赵文彬.Mg-Sc基轻质形状记忆合金马氏体相变机理及性能的理论研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2022.
ZHAO W B. Theoretical investigation of the martensitic transformation mechanism and property optimization in Mg-Sc based lightweight shape memory alloys [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022.

[34] 冯丹洋,肖熠程,刘遵峰.弹热制冷的研究进展[J].激光与光电子学进展,2023,60(13):1316014.
FENG D Y, XIAO Y C, LIU Z F. Recent developments in elastocaloric cooling [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60 (13): 1316014.

[35] WANG X B, SPEIRS M, KUSTOV S, et al. Selective laser melting produced layer-structured NiTi shape memory alloys with high damping properties and Elinvar effect[J]. Scripta Materialia, 2018, 146: 246-250.

[36] SEO J, KIM Y, HU J. Pilot study for investigating the cyclic behavior of slit damper systems with recentering shape memory alloy (SMA) bending bars used for seismic restrainers[J]. Applied Sciences, 2015, 5(3): 187-208.

[37] 李仲瀚,刘高飞,李诗翰,等.电弧增材制造NiTi形状记忆合金研究进展[J].材料工程,2025,53(5):103-118.
LI Z H, LIU G F, LI S H, et al. Research progress in wire arc additive manufacturing of NiTi shape memory alloys [J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(5): 103-118.

[38] KIM J I, PARK Y C, OCK J M. Effect of annealing temperature on shape memory characteristics in Ti-20Nb-6Zr-0.5O(at%) biomedical alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 577: 453-458.

[39] MATSUMOTO H, YONEDA H, FABREGUE D, et al. Mechanical behaviors of Ti-V-(Al, Sn) alloys with α′ martensite microstructure[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(6): 2684-2692.

[40] 赵婧.电弧增材制造Ti-V-Al-Zr轻质高温形状记忆合金的组织及性能[D].天津:天津理工大学,2024.
ZHAO J. Organization and properties of Ti-V-Al-Zr lightweight high-temperature shape memory alloy fabricated by arc additive manufacturing [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2024.

[41] 杨哲一.Ti-V-Al基轻质记忆合金的马氏体相变与力学行为[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
YANG Z Y. Martensitic transformation and mechanical behavior of Ti-V-Al based lightweight shape memory alloys [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[42] INAMURA T, HOSODA H, MIYAZAKI S. Incompatibility and preferred morphology in the self-accommodation microstructure of β-titanium shape memory alloy [J]. Philosophical Magazine, 2013, 93(6): 618-634.

[43] YANG Z Y, ZHENG X H, WU Y, et al. Martensitic transformation and shape memory behavior of Ti-V-Al-Fe lightweight shape memory alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 680: 462-466.

[44] YI X Y, SUN K S, WANG H Z, et al. Tuning microstructure, transformation behavior, mechanical/functional properties of Ti-V-Al shape memory alloy by doping quaternary rare earth Y[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2021, 31(2): 296-302.

[45] SUN K S, YI X Y, SUN B, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-V-Al-Cu shape memory alloy by tailoring Cu content [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 771: 138641.

[46] YI X Y, WANG H Z, SUN B, et al. The microstructural characteristics and high temperature mechanical properties of quaternary Ti-V-Al-Co shape memory alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 835: 155416.

[47] YI X Y, WANG H Z, SUN K S, et al. Simultaneous enhancement of strength and ductility in quaternary Ti-V-Al-B light weight shape memory alloys with high transformation temperature[J]. Intermetallics, 2020, 126: 106943.

[48] YI X Y, SUN K S, SUN B, et al. Achieving fine-grained Ti-V-Al light weight shape memory alloys with higher transformation temperature, superior performances by doping Gd[J]. Materials Characterization, 2020, 168: 110534.

[49] YI X Y, SHENG L J, FU G Q, et al. Microstructural design for

achieving high performances in Ti-V-Al lightweight shape memory alloys by optimizing Zr content[J]. Materials Characterization, 2023, 205: 113283.

[50] 任彦. 铁基形状记忆合金研究与应用的新进展[J]. 新材料产业, 2014(6): 42-45.
REN Y. New progress in research and application of iron-based shape memory alloys[J]. Advanced Materials Industry, 2014(6): 42-45.

[51] 王建伟, 宫晨利, 赵礼. Cu基形状记忆合金的阻尼及记忆效应的应用[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(5): 49-52.
WANG J W, GONG C L, ZHAO L. Damping behavior of Cu-based shape memory alloy and applications[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2011, 2(5): 49-52.

[52] 王跃平. Cu-Al-Mn形状记忆合金弹热效应研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
WANG Y P. Study on elastocaloric effect of Cu-Al-Mn shape memory alloys[D]. Shenyang: Northeastern University, 2022.

[53] 罗丰华, 陈嘉砚, 陈康华, 等. Fe对β基Co-Ni-Al合金马氏体相变和磁性转变的影响[J]. 功能材料, 2005, 36(12): 1862-1865.
LUO F H, CHEN J Y, CHEN K H, et al. Influence of Fe on martensitic and magnetic transformation of β based Co-Ni-Al alloy [J]. Journal of Functional Materials, 2005, 36(12): 1862-1865.

[54] PENG H B, WANG D, LIAO Q, et al. Degeneration and rejuvenation of shape memory effect associated with the precipitation of coherent nano-particles in a Co-Ni-Si shape memory alloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 76: 150-155.

[55] JIANG H X, XU X, OMORI T, et al. Martensitic transformation and shape memory effect at high temperatures in off-stoichiometric Co_2VSi Heusler alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 676: 191-196.

[56] XU X, NAGASHIMA A, NAGASAKO M, et al. Martensitic transformation and phase diagram in ternary Co-V-Ga Heusler alloys[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(12): 121906.

[57] 李庆帅. Co基Heusler合金中新型形状记忆合金的开发[D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
LI Q S. Studies on new shape memory alloy in co-based heusler alloys[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.

[58] 张翔宇. Co-Ni-Ga形状记忆合金的相变行为及功能特性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
ZHANG X Y. Study on phase transformation behavior and functional properties of co-Ni-Ga shape memory alloys[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.

[59] 张扬. Co_2VZ(Z=Ga、Si)磁形状记忆合金马氏体相变及弹性常数的理论研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2021.
ZHANG Y. Theoretical study on martensite transformation and elastic constants of Co_2VZ(Z=Ga, Si) magnetic shape memory alloy[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2021.

[60] OGAWA Y, ANDO D, SUTOU Y J, et al. A lightweight shape-memory magnesium alloy[J]. Science, 2016, 353(6297): 368-370.

[61] 王强, 王磊磊, 高转妮, 等. 快速电弧模式增材制造316L不锈钢组织与性能[J]. 焊接学报, 2023, 44(10): 86-93.
WANG Q, WANG L L, GAO Z N, et al. Microstructure and properties of 316L stainless steel fabricated by speed arc wire arc additive manufacturing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(10): 86-93.

[62] 赵文勇, 曹熙勇, 杜心伟, 等. CMT电弧增材制造过程传热传质数值模拟[J]. 机械工程学报, 2022, 58(1): 267-276.
ZHAO W Y, CAO X Y, DU X W, et al. Numerical simulation of heat and mass transfer in CMT-based additive manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(1): 267-276.

[63] ZHANG H, LI R S, LIU J J, et al. State-of-art review on the process-structure-properties-performance linkage in wire arc additive manufacturing[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2024, 19(1): e2390495.

[64] 王树文, 陈树君, 赵骐跃, 等. 高强铝合金电弧增材制造的研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(7): 1-14.
WANG S W, CHEN S J, ZHAO Q Y, et al. Research progress in arc additive manufacturing of high-strength aluminum alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(7): 1-14.

[65] WANG J, PAN Z X, YANG G S, et al. Location dependence of microstructure, phase transformation temperature and mechanical properties on Ni-rich NiTi alloy fabricated by wire arc additive manufacturing [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 749: 218-222.

[66] SHUITCEV A, GUNDEROV D V, SUN B, et al. Nanostructured $Ti_{29.7}Ni_{50.3}Hf_{20}$ high temperature shape memory alloy processed by high-pressure torsion[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 52: 218-225.

[67] RAHUL V M, BALAJI V, NARENDRANATH S. Optimization of wire-EDM process parameters for Ni-Ti-Hf shape memory alloy through particle swarm optimization and CNN-based SEM-image classification[J]. Results in Engineering, 2023, 18: 101141.

[68] WANG J, PAN Z X, CARPENTER K, et al. Comparative study on crystallographic orientation, precipitation, phase transformation and mechanical response of Ni-rich NiTi alloy fabricated by WAAM at elevated substrate heating temperatures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 800: 140307.

[69] WANG J, PAN Z X, WANG Y F, et al. Evolution of crystallographic orientation, precipitation, phase transformation and mechanical properties realized by enhancing deposition current for dual-wire arc additive manufactured Ni-rich NiTi alloy[J]. Additive Manufacturing, 2020, 34: 101240.

[70] LU B W, CUI X F, JIANG L P, et al. Influence of electromagnetic stirring on microstructure and wear resistance of plasma arc deposited shape memory alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 359: 125-131.

[71] LU B W, CUI X F, MA W Y, et al. Promoting the heterogeneous nucleation and the functional properties of directed energy deposited NiTi alloy by addition of La_2O_3[J]. Additive Manufacturing, 2020, 33: 101150.

[72] 尹小琴, 朱建, 唐第东, 等. CeO_2添加量对电弧增材制造铁基形状记忆合金组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2024, 48(4): 83-88.
YIN X Q, ZHU J, TANG D D, et al. Effect of CeO_2 addition on microstructure and properties of iron-based shape memory alloys by arc additive manufacturing[J]. Materials for Mechanical Engi-

neering,2024,48(4):83-88.

[73] 左新德,陈懿,李洋,等.添加钽对电弧熔丝增材制备镍钛形状记忆合金组织性能的影响[J].上海交通大学学报,2024,58(3):382-390.
ZUO X D,CHEN Y,LI Y,et al.Effect of adding tantalum on microstructure and properties of NiTi shape memory alloy manufactured by wire arc additive manufacturing[J].Journal of Shanghai Jiao Tong University,2024,58(3):382-390.

[74] CHEN L,ZHAO M,WU J H,et al.Mechanical property strengthening by post-heat treatments in NiTiCu shape memory alloys fabricated by twin-wire arc additive manufacturing[J].Virtual and Physical Prototyping,2025,20(1):e2457579.

[75] ZHANG M G,FANG X W,LI X Z,et al.Tailorable elastocaloric cooling performance of wire-arc directed energy deposition NiTi alloy through concentration gradient design[J].Journal of Materials Science & Technology,2025,226:229-244.

[76] 陈新亚.多丝电弧增材制造NiTi基形状记忆合金显微组织与力学性能研究[D].天津:天津理工大学,2023.
CHEN X Y.Study on microstructure and physical properties of NiTi-based shape memory alloy fabricated by multi-wire + arc additive manufacturing[D].Tianjin:Tianjin University of Technology,2023.

[77] ZHAO X X,CHEN X Y,MA T,et al.Microstructure and properties of a shape memory alloy Ti-Ni-Al-V fabricated by double-wire arc additive manufacturing[J].Heliyon,2024,10(2):e24347.

[78] ZUO X D,ZHANG W,CHEN Y,et al.Wire-based directed energy deposition of NiTiTa shape memory alloys:microstructure,phase transformation,electrochemistry,X-ray visibility and mechanical properties[J].Additive Manufacturing,2022,59:103115.

[79] TIAN Y B,CHEN X Y,CAI Y C,et al.Microstructure and properties of a Ni-Ti-Cr-Mo-Nb alloy fabricated *in situ* by dual-wire arc additive manufacturing[J].Materials Science and Engineering:A,2022,853:143740.

[80] ARAGON N K,GRAVELL J D,RYU I.Dislocation interactions at the grain boundary in FCC bicrystals:an atomistically-informed dislocation dynamics study [J]. Acta Materialia, 2022, 223:117455.

[81] HSU Y T, WU C T, CHEN C H. Nanoscale-precipitate-strengthened (Ni, Cu)-rich TiNiCu shape memory alloy with stable superelasticity and elastocaloric performance[J].Journal of Alloys and Compounds,2024,997:174937.

[82] GU H L,BUMKE L,CHLUBA C,et al.Phase engineering and supercompatibility of shape memory alloys[J].Materials Today,2018,21(3):265-277.

[83] LI Z C,ZHONG J,ZHANG J L,et al.Toward additive manufactured crack-free NiTiCu shape memory alloys with low-hysteresis and tailorable phase transition behavior supported by theoretical design[J].Additive Manufacturing,2024,92:104386.

[84] RESNINA N,PALANI I A,BELYAEV S,et al.Structure,martensitic transformations and mechanical behaviour of NiTi shape memory alloy produced by wire arc additive manufacturing[J].Journal of Alloys and Compounds,2021,851:156851.

[85] YU L,CHEN K Y,ZHANG Y L,et al.Microstructures and mechanical properties of NiTi shape memory alloys fabricated by wire arc additive manufacturing[J].Journal of Alloys and Compounds,2022,892:162193.

[86] XIANG R,HUANG J K,YU X Q,et al.The effect of Ni/Ti atomic ratios on residual stress and deformation in WAAM of dissimilar filler wire NiTi alloys[J].Journal of Materials Research and Technology,2025,35:1813-1828.

[87] 张启蒙.电弧增材制造Ti-V-Al轻质形状记忆合金的结构和性能[D].天津:天津理工大学,2023.
ZHANG Q M.Structure and properties of Ti-V-Al light shape memory alloys fabricated by wire arc additive manufacturing[D].Tianjin:Tianjin University of Technology,2023.

[88] CHEN L,OLIVEIRA J P,YAN X,et al.Microstructure and phase transformation behavior of NiTiCu shape memory alloys produced using twin-wire arc additive manufacturing[J].Additive Manufacturing Frontiers,2024,3(2):200132.

[89] 许博.双丝电弧增材制造NiTi基形状记忆合金工艺研究[D].天津:天津大学,2021.
XU B.Study on fabrication process of dual wire and arc additive manufactured NiTi-based shape memory alloys[D].Tianjin:Tianjin University,2021.

[90] BIFFI C A,TUISSI A,DEMIR A G.Martensitic transformation,microstructure and functional behavior of thin-walled Nitinol produced by micro laser metal wire deposition[J].Journal of Materials Research and Technology,2021,12:2205-2215.

[91] ZHANG M G,DUAN Y S,FANG X W,et al.Tailoring the superelasticity of NiTi alloy fabricated by directed energy deposition through the variation of residual stress[J].Materials & Design,2022,224:111311.

[92] KOLEY S, RAJAMUDILI K, GANGULY S. Challenges in wire-arc additive manufacturing of Fe-based shape memory alloy[M]//TMS 2023 152nd Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023:120-130.

[93] 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.

[94] KHISMATULLIN A,PANCHENKO O,KURUSHKIN D,et al.Functional and mechanical properties of as-deposited and heat treated WAAM-built NiTi shape-memory alloy[J].Metals,2022,12(6):1044.

[95] FELICE I O,SHEN J J,BARRAGAN A F C,et al.Wire and arc additive manufacturing of Fe-based shape memory alloys:microstructure,mechanical and functional behavior[J].Materials & Design,2023,231:112004.

[96] XU D,WANG H Y,YUAN X M,et al.Comparison of shape memory properties between Cu-12.5Al-3Mn and Cu-12.5Al-3Mn-1Ni produced by additive manufacturing technology[J].Journal of Materials Research and Technology,2023,26:4070-4077.

[97] HUANG Y F,XIN D Q,CHEN X Z.Microstructure and properties of NiTi shape memory alloy fabricated by double-wire plasma arc additive manufacturing with a nearly equal atomic ratio[J].Ma-

terials Letters, 2024, 354: 135406.

[98] CHEN X C, CHEN H S, NIE H H, et al. Research on hot deformation behavior and microstructure characterization of the NiTi alloy fabricated by wire arc additive manufacturing [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 33: 9180-9194.

[99] ZHANG G Y, CHEN X Y, CAI Y C, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-3Al-2V alloy by dual wire + arc additive manufacturing[J]. Materials Letters, 2021, 299: 130109.

[100] 丁扬. 基于微纳粉芯丝材的Fe基记忆合金增材制造及抑损特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
DING Y. Research on additive manufacturing and loss suppression characteristics of Fe-based memory alloy with micro-nano powder core wire[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.

[101] 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.
XU B, WANG Y, ZHANG M, et al. Effect of Nb alloying on wire arc additive manufacturing NiTi-based shape memory alloys [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(8): 1-7.

[102] 葛福国, 彭倍, 柯文超, 等. 电弧增材制造NiTi形状记忆合金成形与性能[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 99-106.
GE F G, PENG B, KE W C, et al. Forming properties of wire arc additive manufactured NiTi shape memory alloy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 99-106.

[103] LIU G F, ZHOU S H, LIN P Y, et al. Analysis of microstructure, mechanical properties, and wear performance of NiTi alloy fabricated by cold metal transfer based wire arc additive manufacturing [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 246-259.

[104] TENG J Z, JIANG P F, CUI X H, et al. Revealing microstructural evolutions, mechanical properties and wear performance of wire arc additive manufacturing homogeneous and heterogeneous NiTi alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 1593-1610.

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2025LHMS05046)
收稿日期: 2025-06-18; **录用日期**: 2025-07-21
通讯作者: 邬富宝(1984—), 男, 助理研究员, 硕士, 研究方向为铝合金加工与成形技术、电弧增材制造, 联系地址: 内蒙古包头市青山区呼得木林大街5号五二研究所北区(014034), E-mail: wufubao324@163.com

(本文责编: 齐书涵)