

# 冷喷涂增材制造技术研究现状及应用与挑战

崔 焯<sup>1,2,3</sup>, 刘 光<sup>3</sup>, 冯胜强<sup>3</sup>, 朱继宏<sup>1</sup>, 李文亚<sup>2</sup>, 赵 健<sup>3</sup>, 贾 利<sup>3</sup>

(1. 西北工业大学 航宇材料结构一体化设计与增材制造装备技术国际联合研究中心, 陕西 西安 710072)

(2. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072)

(3. 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103)

**摘要:** 冷喷涂增材制造技术是一种固态增材方法, 其依靠粉末颗粒塑性变形形成结合, 增材构件几乎没有氧化、相变及晶粒长大、裂纹等缺陷, 较低的沉积温度对基体热影响较小, 同时具有增材效率高和制造大构件等优势, 已受到多个国家研究团队的关注, 被认为是一种强大而有用的增材制造及增材修复技术。鉴于目前冷喷涂增材制造技术受到各国学者和工业界越来越多的关注, 本文试图在阐述冷喷涂设备的基础上, 总结典型冷喷涂沉积体 (Cu、Al、Ti 及 Ta 等材料) 组织结构与性能, 重点介绍冷喷涂增材制造技术在国防领域的应用和新进展。同时, 也指出了目前冷喷涂增材制造技术存在的挑战。最后对冷喷涂增材制造技术发展尚存的问题与发展方向进行了展望。

**关键词:** 冷喷涂; 固态增材制造; 修复; 热处理; 疲劳性能

中图分类号: TG174

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)01-0351-23

增材制造 (additive manufacturing, AM) 技术是一种根据 3D 模型将材料逐层叠加连接起来的制造工艺<sup>[1]</sup>。该技术自 20 世纪 80 年代发展至今, 因其成形材料广泛 (金属、陶瓷及塑料等)、尺寸跨越度大 (微米元器件到数米的大型结构件)、整体成形免装配及制造周期短等特点, 在航空航天、能源、医疗等领域发挥重要作用<sup>[2-4]</sup>。

按照材料供给方式的不同, 主流的 AM 工艺主要分为 2 种: 一种是粉末床自动铺粉的选区熔化技术, 利用高能热源 (激光或电子束) 有选择地逐层熔化预先铺好的粉体, 最终形成实体构件, 原理如图 1a 所示, 包括激光选区熔化 (selective laser melting, SLM)、激光选区烧结 (selective laser sintering, SLS) 及电子束选区熔化 (selective electron beam melting, SEBM) 等技术<sup>[6-7]</sup>; 另一种是同步材料 (粉末或丝材) 送进的直接能量沉积技术, 其利用高能热源 (激光、电弧或电子束) 熔化同步供给的材料, 逐层沉积形成构件, 原理如图 1b 所示, 包括激光近净成形 (laser near net shaping, LENS)、电子束熔丝沉积快速成形 (electron beam freeform fabrication, EBF3) 以及电弧熔丝沉积 (wire arc additive manufacturing, WAAM) 等技术<sup>[8-9]</sup>。

随着对 AM 技术的深入研究, 这项技术正在不断被重新定义, AM 技术的本质是材料的连接, 任何利用自动化可控能量源叠加材料的方法均可称之为增材制造。这扩大了可用能量源的范围, 拓展了新的成形制造模式, 如图 2 中所示的搅拌摩擦增材制造 (friction stir additive manufacturing, FSAM)<sup>[11]</sup>、超声波增材制造 (ultrasonic additive manufacturing, UAM)<sup>[12]</sup> 及冷喷涂增材制造 (cold spray additive manufacturing, CSAM)<sup>[13-15]</sup> 等技术。

近年来, CSAM 技术由于其高效、高性能及绿色环保等优点受到包括美国 GE、Digital Alloys、VRC、陆军研究实验室 (army research laboratory, ARL), 澳大利亚国家科学局、Titomic 公司, 加拿大 SPEE3D、Centerline, 德国 Impact Innovations 公司, 日本 Plasma Giken 公司、中国西安交通大学、西北工业大学、中国兵器科学研究院宁波分院、广州市科学院新材料研究所、中国科学院金属研究所等世界各国科技界和工业界的高度重视, 成为国际 AM 领域新技术的研究热点之一。鉴于 CSAM 技术在 AM 中发挥着越来越重要的作用, 本文首先介绍了 2 种典型的冷喷设备, 然后综述了 CSAM 技术在制备 Cu、Al、Ti、Ta 等典型材

收稿日期: 2022-04-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51790171, 51735005, 11620101002); 宁波市科技创新 2025 重大专项 (2020Z097); 宁波市自然科学基金 (2019A610173)

作者简介: 崔 焯, 男, 1989 年生, 博士生, 副研究员, 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103, 电话: 0574-87902503, E-mail: cuilxa0410@126.com

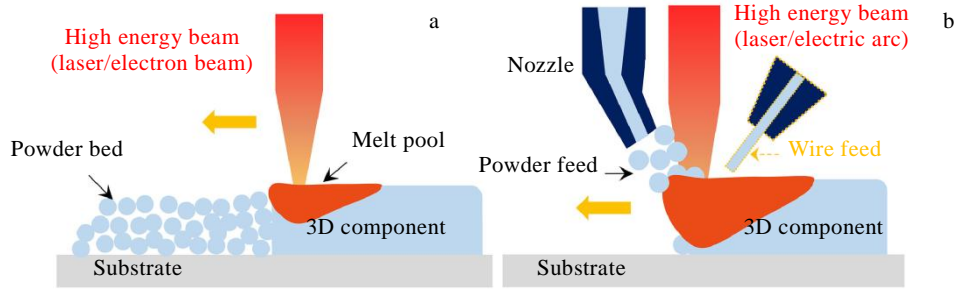


图 1 2 种主要类型的增材制造原理示意图

Fig.1 Schematic diagrams of two major types of additive manufacturing principles<sup>[5]</sup>: (a) powder bed fusion and (b) directed energy deposition

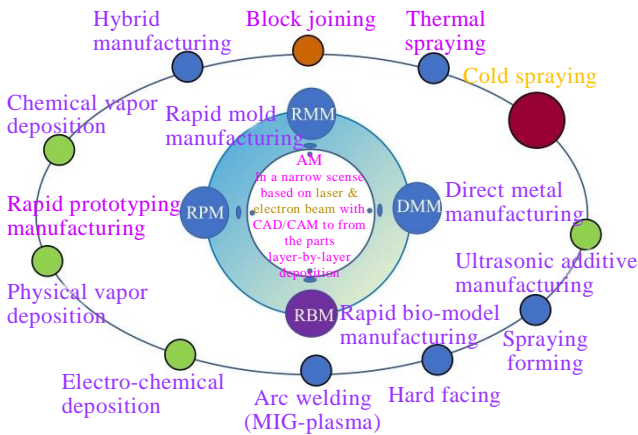


图 2 不同增材制造工艺

Fig.2 Different additive manufacturing processes<sup>[10]</sup>

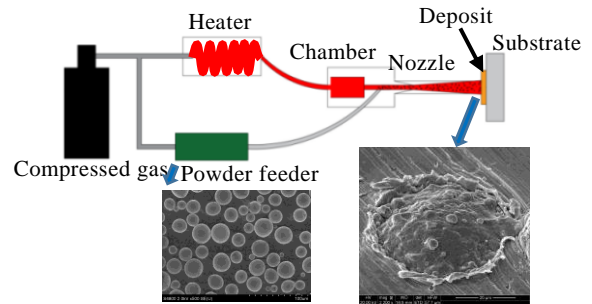


图 3 冷喷涂技术原理图

Fig.3 Schematic drawing of cold spray

料的研究现状, 归纳总结了 CSAM 技术在军事领域的应用。在此基础上, 提出了当前 CSAM 存在的挑战, 最后对 CSAM 技术发展尚存的问题与发展方向进行了展望, 为加快 CSAM 技术工业化应用提供理论基础。

### 1 冷喷涂增材制造原理

冷喷涂增材制造是对冷喷涂技术应用的拓展, 在 CSAM 过程中, 高速高压气体 (氮气、氦气、空气或它们混合气体等) 带动粉末颗粒 (微米或亚微米级) 在完全固态下高速撞击基体, 发生塑性变形产生结合并形成沉积体 (图 3 所示), 随逐层喷涂, 沉积体尺寸在三维方向上逐渐累加, 最终形成零构件<sup>[10,16-17]</sup>。图 4 所示为 CSAM 与激光、电弧、电子束及热喷涂等热源增材制造技术的对比, 由于 CSAM 过程中粉末颗粒不经过熔化和凝固, 增材构件内部几乎没有氧化、相变及晶粒长大等缺陷<sup>[17-18]</sup>, 特别适合对氧敏感 (Ti<sup>[19-20]</sup> 及其合金等)、温度敏感 (纳米<sup>[21]</sup> 和非晶<sup>[22-23]</sup> 等)、高光反射率 (Cu<sup>[24]</sup>、Al<sup>[25]</sup> 等) 及高熔点 (Ta<sup>[26-27]</sup>、Nb<sup>[28]</sup>、Ta-W<sup>[29]</sup>) 等材料的制造。同时, CSAM 对基

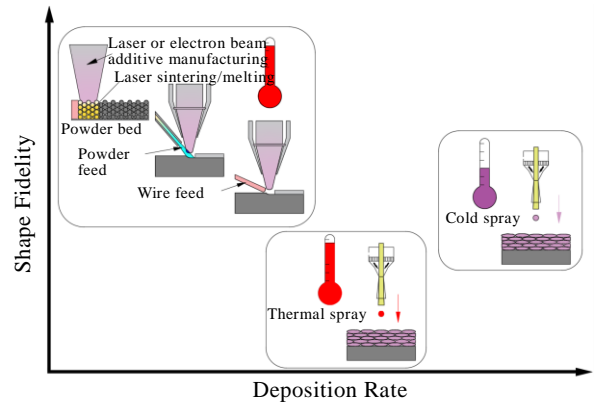


图 4 CSAM 与其他增材制造工艺的比较

Fig.4 Comparison of CSAM with other additive manufacturing processes<sup>[18]</sup>

体热影响小, 可在各种低熔点金属<sup>[30]</sup>及非金属<sup>[31]</sup>等基体表面制备功能沉积体, 如紧固件孔<sup>[32]</sup>、飞机蒙皮<sup>[33]</sup>、变速箱<sup>[34]</sup>等的修复。较高的喷涂效率使得 CSAM 也可用于靶材<sup>[35-36]</sup>、喷管<sup>[37]</sup>及拓扑优化设计结构件<sup>[38]</sup>的制造。

### 2 冷喷涂增材制造设备

典型的 CSAM 系统主要由计算机辅助系统、冷喷

涂设备、工业机器人、除尘系统、在线检测系统、后续处理、机械加工及无损检测等部分组成<sup>[39-40]</sup>,其中冷喷涂设备是CSAM系统中关键构成之一。根据粉末颗粒注入喷嘴位置不同,冷喷涂设备分为:上游注粉设备和下游注粉设备,原理如图5所示。

上游注粉设备中,注粉气体通过送粉器带动粉末在Laval喷嘴收敛前部注入喷嘴。这种注粉方式要求注粉气体压力大于喷涂气体压力,被广泛应用于高压冷喷涂设备<sup>[41]</sup>。由于较高的气体压力和较早的注入点,粉末颗粒可以获得较高的速度,同时颗粒与高温气体接触时间较长,具有较好的预热作用,喷涂材料广泛<sup>[41-46]</sup>。但在喷涂铜合金、铝合金及镍合金等材料时,过高的气体温度容易导致喷嘴堵塞。目前,上游注粉设备最大压力和温度分别可达7 MPa和1100 °C<sup>[47]</sup>,但由于喷枪体积大,只能采取固定在机械臂上的工作模式,在一定程度上限制了其应用。

相较于上游注粉设备,下游注粉设备中粉末被气体带动进入Laval喷嘴发散部,由于此时气体膨胀,能在喷嘴发散部产生足够的负压(低于大气压),送粉器在常压下便可工作,极大降低了喷嘴的磨损、堵塞及气体消耗<sup>[31,41]</sup>。目前,下游注粉设备工作压力已达到3.5 MPa,气体温度600 °C。尽管下游注粉设备在气体压力、温度、粉末沉积效率及沉积体性能方面均低于上游注粉设备,但下游注粉设备成本低,设备更加灵活、喷枪尺寸更小、操作更加方便,且可使用空气压缩机作为气源,非常适合现场手持作业。同时,适合对热固性塑料材料进行表面改性,如碳纤维增强塑料(carbon fiber reinforced plastic, CFRP),由于上游注粉设备较高的粒子速度对CFRP基材具有侵蚀作用,阻碍了涂层的连续沉积,下游注粉设备能够在CFRP基体形成连续的金属沉积体,有效改善CFRP的导电性能<sup>[48-49]</sup>。

### 3 典型CSAM沉积体组织与性能

#### 3.1 Cu及Cu合金

Cu及Cu合金具有优异的导电、导热、耐腐蚀性能,延展性优异,CSAM能够制备致密的Cu沉积体。各国学者们对CSAM Cu及Cu合金沉积体的微观组织及性能进行了大量研究<sup>[50-55]</sup>。

CSAM沉积体性能受多个尺度的微观组织和特征耦合影响。通常CSAM Cu的微观组织由4部分组成,如图6所示,(i)位于颗粒与颗粒结合界面附近,尺寸为10~100 nm的再结晶晶粒;(ii)远离颗粒与颗粒结合界面,变形严重的晶粒和细长亚晶粒;(iii)颗粒中心区域,变形较小的大晶粒;(iv)颗粒与颗粒结合界面的孔隙<sup>[55]</sup>。在低应变速率载荷下,喷涂态沉积体中的孔隙(0.5~20 μm)很容易充当裂纹尖端,导致脆性断裂,且断口多位于颗粒与颗粒结合界面处<sup>[24,55]</sup>。图7所示为CSAM和SLM制备Cu沉积体的组织及性能对比,SLM Cu的微观组织由树枝晶粒和等轴构成,而CSAM Cu只由等轴晶粒组成,复杂的组织及较低的致密度导致SLM Cu的导电率仅有CSAM的56%,但SLM制备Cu具有较优异的力学性能<sup>[24]</sup>。由于Cu对波长1064 nm的激光反射率高,当激光器在高功率(1 kW)下制备Cu时,纯Cu反射的激光可对SLM设备光学系统造成严重损害<sup>[56]</sup>。使用蓝光和绿光激光是改善Cu及其合金材料对激光高反射率问题的有效途径<sup>[57]</sup>,但Cu及其合金的高导热性增加了熔池到周围区域的热传递速率,增材构件易产生诸如球化效应和分层现象等不良缺陷<sup>[58-59]</sup>。CSAM是一种固态增材制造技术,沉积颗粒无需熔化,避免了SLM Cu及其合金存在的高激光反射率、熔池不稳定及润湿不足等问题,同时,较高的增材制造效率和可在大气环境中增材使得CSAM是制造Cu及其合金材料最具发

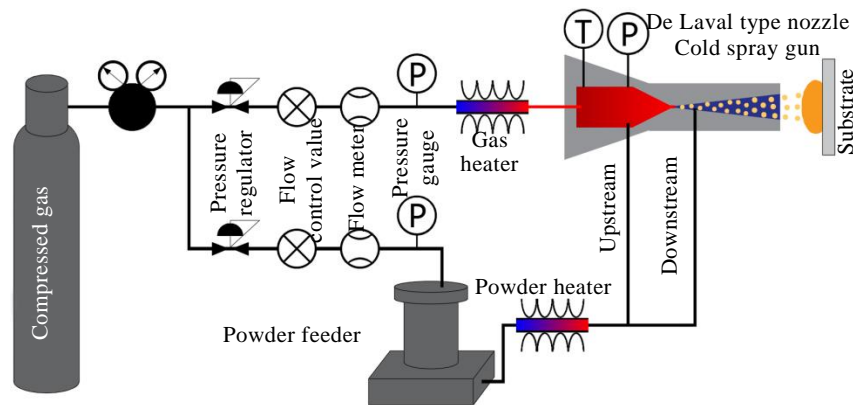


图5 上游送粉与下游送粉冷喷涂原理示意图

Fig.5 Schematic diagram of the cold spray processes for both upstream powder injection and downstream powder injection<sup>[41]</sup>

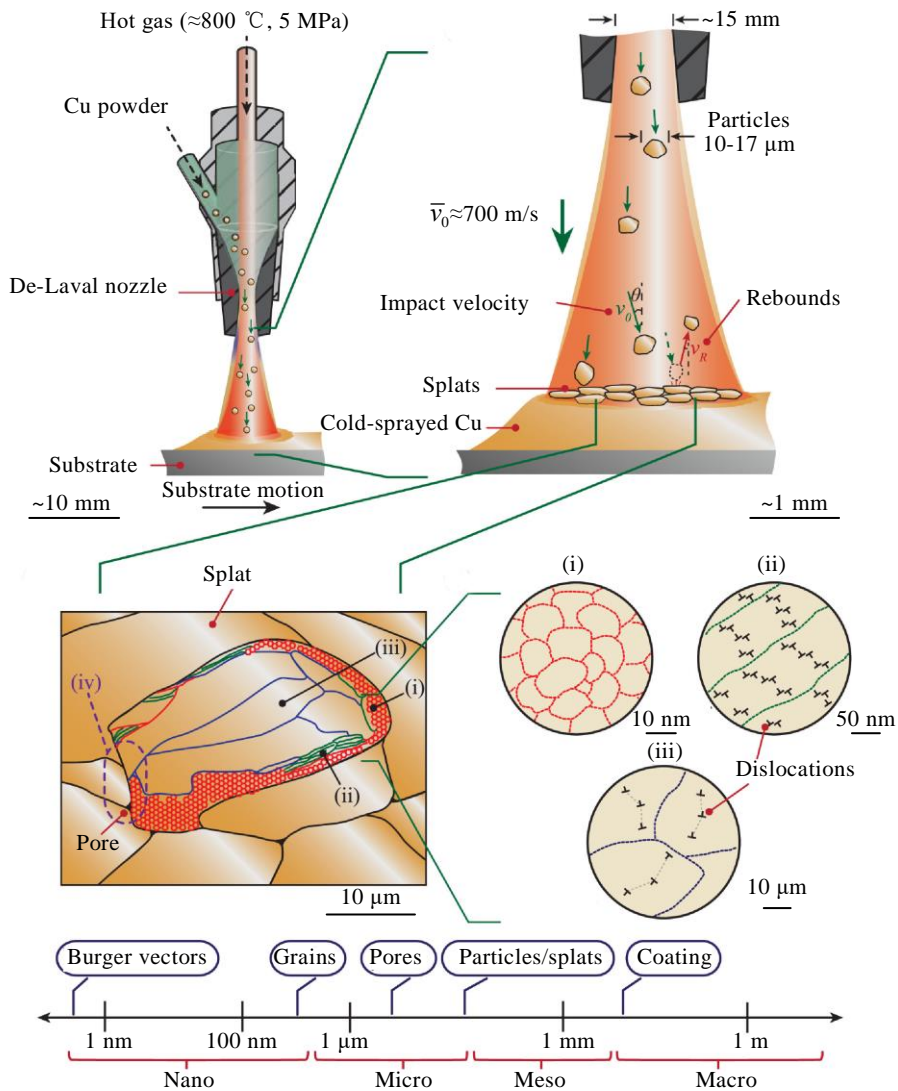


图 6 CSAM Cu 成形过程及微观组织

Fig.6 Forming process and microstructure of CSAM Cu<sup>[55]</sup>

展前景的技术之一。但由于颗粒之间的结合以机械咬合为主，沉积体经过严重加工硬化，导致喷涂态沉积体力学性能较差，几乎没有塑性。此外，由于颗粒界面与颗粒中心之间的应变和应变速率不同，喷涂后粉末颗粒的微观组织不均匀，进一步降低了其力学性能<sup>[42]</sup>，在一定程度上限制了其使用，改善颗粒之间结合是 CSAM 的关键技术之一。

热处理能够促使颗粒发生再结晶，界面融合，降低位错密度，提高 CSAM 材料的性能<sup>[15,17,28,51]</sup>。Yu 等<sup>[55]</sup>研究发现：低温退火虽然不足以消除 CSAM Cu 中的孔隙，但能够促进颗粒界面处晶粒发生再结晶和长大，促使韧窝和裂纹钝化形成，阻碍裂纹的扩展，提高伸长率，经 350 °C、1 h 热处理后，Cu 沉积体的伸长率可达 25%。随着热处理温度的升高，伸长率也不断增加，当温度达到 600 °C 时，伸长率可达到 29%~33%<sup>[60-62]</sup>。

冯力等<sup>[63]</sup>研究了热处理对 CSAM Cu-10%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（体积分数）沉积体的性能影响，发现沉积体的热扩散率及抗拉强度随退火温度的升高，呈现先上升后下降的趋势，经 500 °C 退火后，热扩散率达到铜块体材料的 80%。然而，对某些由不同材料制成的构件进行整热处理是不切实际的。对此，Razavipour 等<sup>[52]</sup>研究了局部激光热处理对钢基体表面 CSAM Cu 沉积体的影响，通过适当的激光热处理工艺能够使 3 mm 厚的 Cu 沉积体硬度降低约 30%。然而，热处理并不能消除沉积体内部大的孔隙<sup>[64]</sup>，热处理后沉积体的性能与热处理前的组织具有相关性。

不同于传统热处理过程中晶粒发生静态再结晶，搅拌摩擦加工（friction stir processing, FSP）是从搅拌摩擦焊演变而来的，原理如图 8 所示。在搅拌针强烈搅拌作用下，强烈的热机械效应会破坏沉积颗粒，促

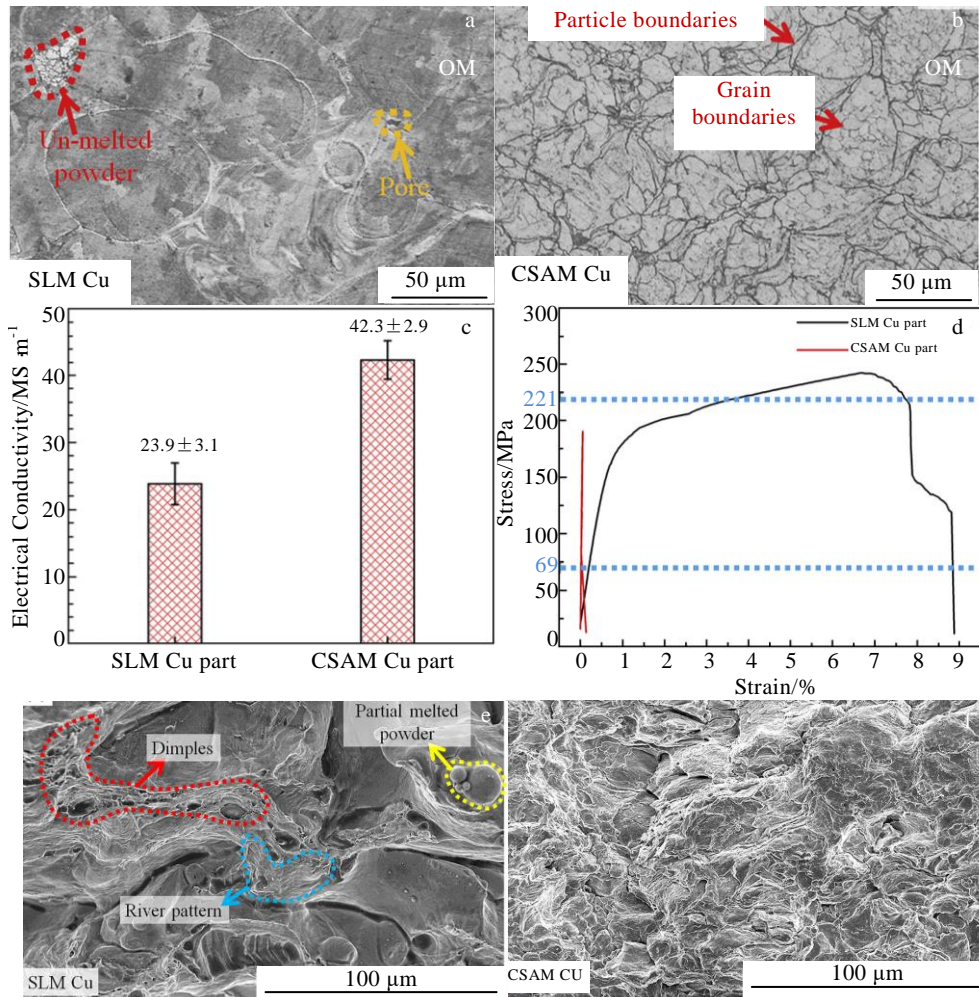


图 7 CSAM 和 SLM Cu 组织与性能对比

Fig.7 Microstructures (a, b), electrical conductivity (c), stress-strain curves (d) and fracture morphologies (e, f) of the pure Cu parts processed via SLM (a, e) and CSAM technology (b, f)<sup>[24]</sup>

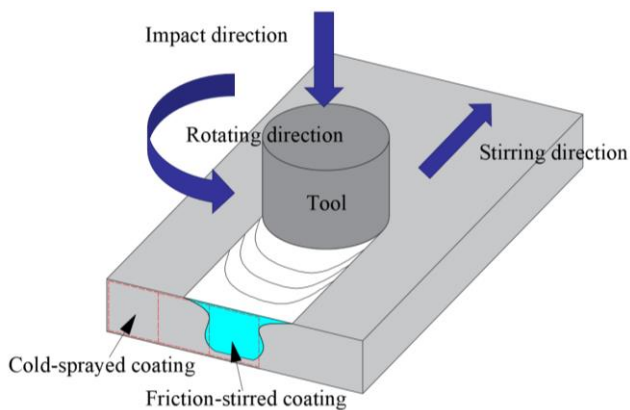


图 8 FSP 原理示意图

Fig.8 Schematic drawing of FSP<sup>[65]</sup>

使晶粒发生动态再结晶, 形成具有细小等轴晶粒的致密均匀组织, 可以用来改善 CSAM 沉积体的组织, 并

提高其力学性能<sup>[15,17,65-66]</sup>。Huang 等<sup>[65]</sup>研究发现, 经过 FSP 处理, CSAM Cu-Zn 合金发生了晶粒细化, 出现了  $\alpha$ 、 $\beta$ "和  $\gamma$  相混合的超细晶粒, 抗拉强度从 87 MPa 提高到 257 MPa。Li 等<sup>[66]</sup>研究了热处理、电脉冲处理 (EPP) 及 FSP 前后 CSAM Cu 沉积体的组织及力学性能 (图 9), FSP 处理具有最佳的组织及性能, 微观组织由超细等轴晶粒组成, 抗拉强度达到 310 MPa, 伸长率达到 40%。

上述研究表明, CSAM Cu 及其合金具有很高的致密度、强度、导电率, 具有很大的应用空间, 但单一 CSAM 技术制备的沉积体塑性差, 需要进行后续处理 (热处理及 FSP 等) 来促使颗粒发生再结晶, 界面融合, 提高材料性能, CSAM 与其他技术形成复合增材制造是实现沉积体强塑性的有效途径。

### 3.2 Al 及 Al 合金

CSAM 是一种固态增材制造技术, 颠覆了传统热

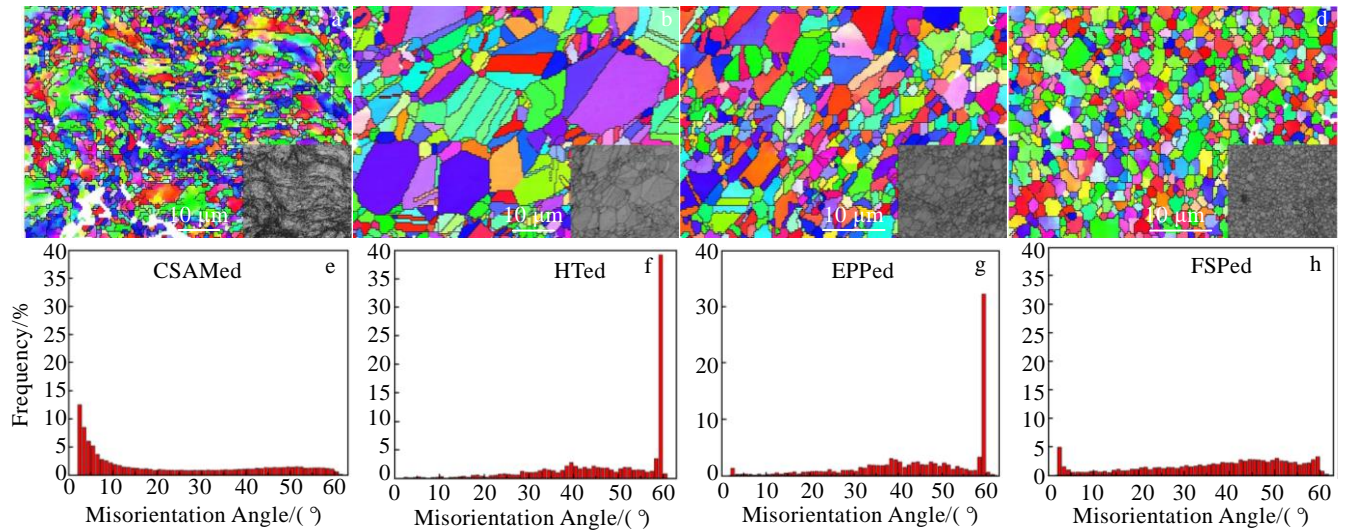


图 9 CSAM Cu 不同方法处理后的 EBSD 反极图及位错角分布

Fig.9 EBSD maps (a-d) and misorientation angle distribution (e-h) of different deposits: (a, e) CSAMed, (b, f) HTed, (c, g) EPPed, and (d, h) FSPed<sup>[66]</sup>

源增材制造方式。增材过程中高速飞行的粉末颗粒在完全固态下撞击基体，发生挤压性塑性变形，沉积体较致密。图 10 所示为 CSAM 及等离子喷涂 (plasma spray, PS) 沉积 Al 的横截面 SEM 像，CSAM Al 孔隙率 (1%) 低于 PS (5.3%)，具有更好的耐腐蚀性能<sup>[67]</sup>。Jenkins 等<sup>[25]</sup>研究发现，较高的致密度使得 Al 沉积体对 400~1800 nm 波长范围内光的反射率达到 93.4%，几乎与 Al 块材一致 (94.5%)。良好的喷涂性及优异的耐腐蚀性能，使得 Al 及 Al 合金已成为 CSAM 应用最广泛的材料。

CSAM 工艺具有“遗传”性，粉末颗粒的沉积行为和沉积体的微观组织及性能与粉末的喷涂特性 (微观组织及力学性能) 具有依赖性。在相同喷涂工艺条件下，粉末本体材料强度和硬度越低，越易于沉积，组织致密度越高，性能越优异。对于同种材料而言，不同工艺制备的粉末在微观组织上有所不同，导致不同的喷涂特性，进而影响沉积体的性能。由于 Al 合金粉末

在雾化过程中快速凝固，形成细晶，导致强度较高，且锌或铜溶质原子会沿晶胞边界偏析，形成脆性的金属间化合物导致较低的延展性<sup>[68]</sup>，因此 CSAM 对 Al 合金粉末特性较敏感。研究表明<sup>[68-70]</sup>，对 Al 合金粉末进行固溶处理 (图 11)，能够减少偏析，降低硬度，增加延展性。6061Al 合金粉末经过固溶处理后 (530 °C/4 h，水冷)，粉末微观组织由不规则细长的晶粒以及较小的等轴晶粒转变为均匀的大等轴晶粒 (图 12)，粉末硬度降低了 21%，沉积体颗粒间结合明显增强，孔隙率从 1.3% 降到了 0.3%<sup>[69]</sup>。根据 Huang 等<sup>[70]</sup>的研究发现，在 500 °C，1 h 保温+N<sub>2</sub> 气淬火的固溶处理下，6061Al 合金粉末的强度从 311 MPa 降低到 179 MPa，固溶处理能够有效提高粉末粒子的变形能力，进而提高沉积体的性能。Sabard 等<sup>[71]</sup>系统地研究了固溶+淬火 (solution heat treated and quenched, SHT+Q)、T4 及 T6 处理对 7075Al 合金粉末颗粒沉积行为、沉积体微观组织及性能的影响。结果表明，时

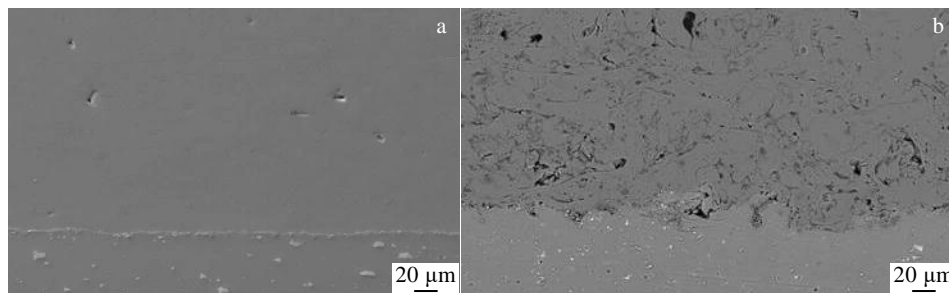


图 10 不同工艺制备 Al 显微组织对比

Fig.10 SEM images of Al coatings sprayed by CSAM (a) and PS (b) processes<sup>[67]</sup>

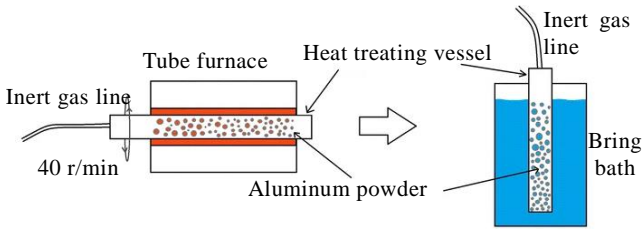


图 11 热处理粉末的设备示意图

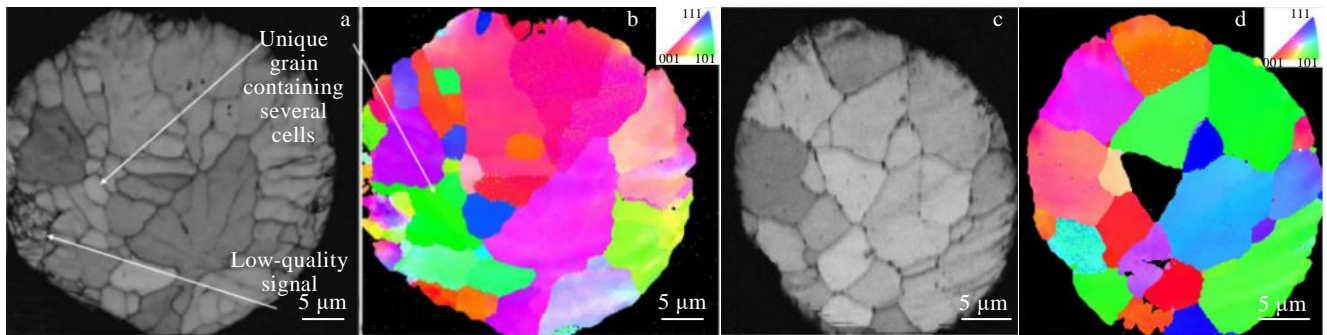
Fig.11 Schematic diagram of the apparatus constructed to heat treat powder<sup>[68]</sup>

图 12 热处理前后 6061Al 合金粉末图像质量图和反极图

Fig.12 Image quality (IQ) maps (a, c) and inverse pole figures (IPFs) (b, d) of the cross section of 6061Al alloy powder before (a, b) and after (c, d) heat treatment<sup>[69]</sup>

高于基体<sup>[72-73]</sup>。Cavaliere 等<sup>[74]</sup>研究表明,通过 CSAM 2198Al 合金粉末修复 2099Al 合金面板,能够有效阻止裂纹扩展,使构件寿命延长 6~7 倍。Petr áčkov á 等<sup>[75]</sup>研究了 CSAM 修复 A357Al 合金结构件的疲劳性能,在对修复构件进行轴向疲劳(应力比  $R=-1$ ),500 万次循环测试的结果发现,其疲劳强度约为 T61 状态 A357Al 合金的 94%,具有较好的抗疲劳性能。修复区域的几何形状也是影响构件疲劳性能的重要因素,理想的几何形状能够避免应力集中。Petr áčkov á 等<sup>[76]</sup>的研究表明,相比较于球形,圆锥形和梯形结构的应力集中系数 ( $K_t$ ) 更高,同时,梯形形状的侧壁和圆锥形的底部有相当大的孔隙(图 13)。经过优化设计,球形结构的  $K_t$  可低至 1.5,沉积体组织结构更加均匀一致,对 500 万次循环疲劳试样的断口分析表明,失效并非由于沉积体引起,裂纹的起始点始于基体内部<sup>[76]</sup>。虽然利用 CSAM 修复能够提高基体材料的疲劳性能,然而,White 等<sup>[77]</sup>和 Kovarik 等<sup>[78]</sup>的研究发现,由于沉积体界面存在未结合区及孔隙,喷涂态沉积体塑性及断裂韧性低,导致 CSAM 沉积体的疲劳强度低于相应的锻造材料。

以上关于 CSAM Al 及其合金的研究表明,改善颗粒界面的结合状况是增强 CSAM 材料性能的关键因

效处理能够改变喷涂过程中的颗粒-基体相互作用, SHT+Q 处理的粉末硬度较低,喷涂过程类似于软粉末撞击硬基体,后续颗粒无法夯实已沉积颗粒,变形主要依靠粉末本身的延展性,颗粒边缘易出现裂纹,结合性能较差, T4 和 T6 处理的粉末形成 GP 区和  $\eta'$  相,硬度高,喷涂过程类似于硬粉末撞击软基体,后续颗粒能够夯实已沉积颗粒, CSAM SHT+Q、T4 和 T6 处理的粉末沉积体抗拉强度分别为 224, 422 及 486 MPa<sup>[71]</sup>。

优异的结合性能、内部残余压应力及喷涂疲劳性能优于基体的材料使得 CSAM 沉积体的疲劳寿命往往

素。为了提高 CSAM 沉积体的力学性能,需对沉积体进行后续处理,消除沉积体和界面的缺陷,提高沉积体的力学性能<sup>[15,79]</sup>。Wang 等<sup>[80]</sup>采用 FSP 对 CSAM Al 沉积体进行后处理,通过 EBSD 表征研究了沉积体的组织结构转变,发现经过 FSP 处理后,晶粒尺寸减小,大角度晶界占比大幅度提升,抗拉强度提高了 38%,延伸率提高了 1336%。Wu 等<sup>[81]</sup>通过固溶+时效处理 AA2024/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 沉积体,处理后抗拉强度提高了 13.8%,延伸率提高了 47.8%,相邻 AA2024 颗粒之间的断裂机制在热处理后由脆性为主转变为韧性为主,但 AA2024 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒之间的界面结合仍未得到改善。Qiu 等<sup>[82]</sup>通过对 CSAM A380 Al 合金沉积体进行热轧处理的研究发现,当增材构件厚度减小到原来的 40% 时,  $\alpha$ -Al 相晶粒发生了细化,小角度晶界占比显著上升,同时伴有  $\theta$ -Al<sub>2</sub>Cu 相生成,抗拉强度由 100 MPa 提高到 420 MPa,延伸率提高了 500%。CSAM 和热轧双重处理也可用来修复表面有缺陷的 B<sub>4</sub>C/6061Al 复合板,三点弯曲试验结果表明,修复后的材料强度基本达到在役板材水平,热轧能够改善粒子与粒子之间及沉积体与基体之间的界面结合<sup>[83]</sup>。

### 3.3 Ti 及 Ti 合金

Ti 及 Ti 合金具有密度低、强度高和出色的耐蚀性

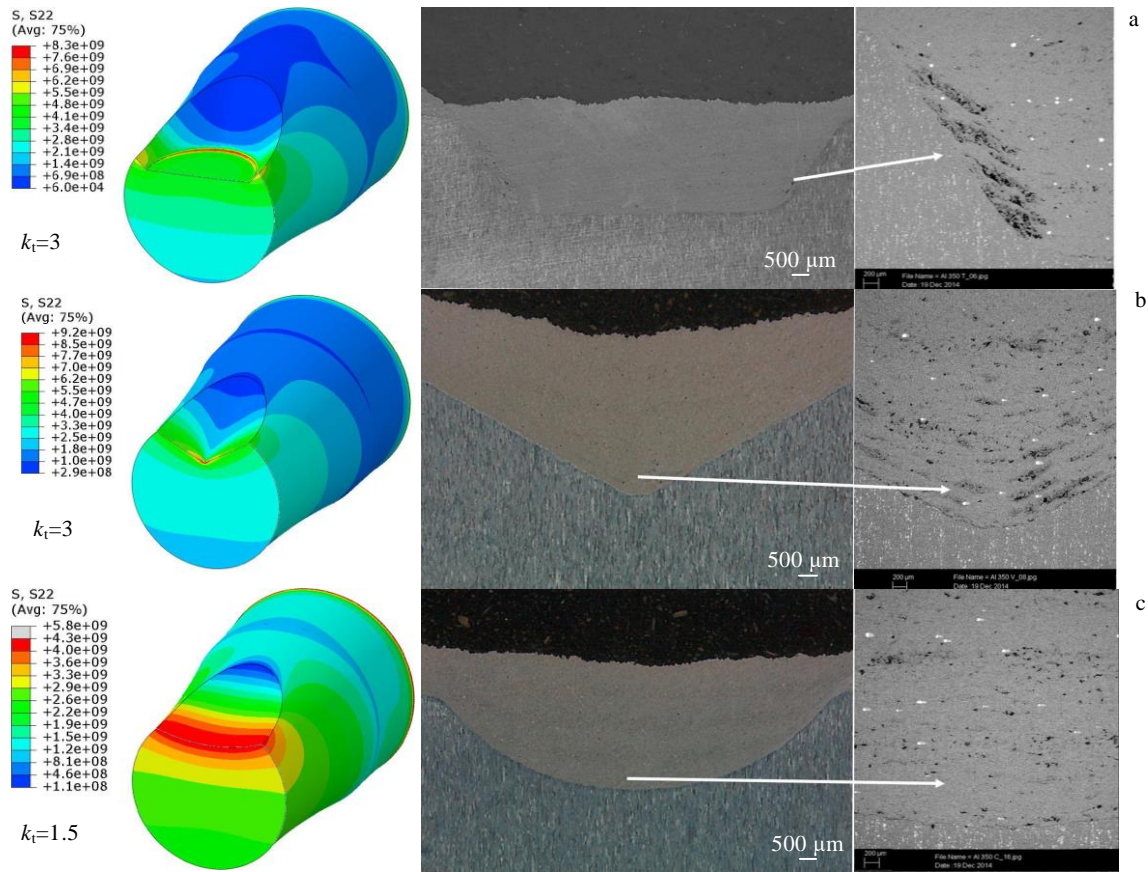


图 13 冷喷涂不同腔体横截面的应力集中系数 ( $K_t$ ) 及微观组织

Fig.13 Stress concentration factor ( $K_t$ ) and microstructures of cross-sections of different cavities filled with cold spray: (a) trapezoidal cavity, (b) conical cavity, and (c) spherical cavity<sup>[76]</sup>

等优点，被广泛用于航空航天和生物医疗等领域。但 Ti 及 Ti 合金的强度较高且组织中具有塑性较差的密排六方  $\alpha$  相，当使用氮气作为 CSAM 气体时，沉积体的孔隙率较高、力学性能较差<sup>[19,84]</sup>。提高喷涂气体温度能够有效提高颗粒速度，改善颗粒之间结合，进而提高致密度及力学性能<sup>[85]</sup>。但 Morks 等<sup>[86]</sup>的研究表明，过高的温度会导致 Ti 的氧化和氮化，当气体温度从 800 °C 增加到 900 °C 时，Ti 沉积体中氧含量增加了 23%，氮含量增加了 50%。氦气能够显著提高颗粒速度，促进颗粒变形，从而提高沉积体的机械性能<sup>[50,67]</sup>。为了在不提高气体温度的情况下获得高的速度，可采用氦气进行喷涂。Khun 等<sup>[87]</sup>研究了不同喷涂气体对 Ti6Al4V (TC4) 沉积体组织的影响 (图 14)。结果表明，当将喷涂气体从氮气换为氦气时，沉积体的平均孔隙率从 9.6% 降低到了 2%，相应的摩擦及腐蚀性能均得到提高<sup>[87]</sup>。然而，氦气喷涂成本高，低成本、高性能的 CSAM 技术是研究的热点。

原位微锻造辅助冷喷技术 (图 15) 是将大粒径刚性喷丸粉末颗粒与小粒径喷涂粉末颗粒混合后进行喷

涂，利用刚性大粒径颗粒的喷丸效应锤击沉积体，提高已沉积颗粒的塑性变形程度，从而致密化沉积体<sup>[88]</sup>。Luo 等<sup>[89]</sup>系统性地研究了添加不同含量 2Cr13 不锈钢粉末对 CSAM Ti 及 TC4 沉积体的微观组织变化。发现随着 2Cr13 不锈钢粉末比例增加，沉积体内部孔隙率逐渐降低，当原始粉末中 2Cr13 不锈钢粉末体积含



图 14 不同喷涂气体的 CSAM TC4 横截面微观组织

Fig.14 Cross-sectional microstructures of CSAM TC4 with spray gas  $N_2$  (a) and He (b)<sup>[87]</sup>



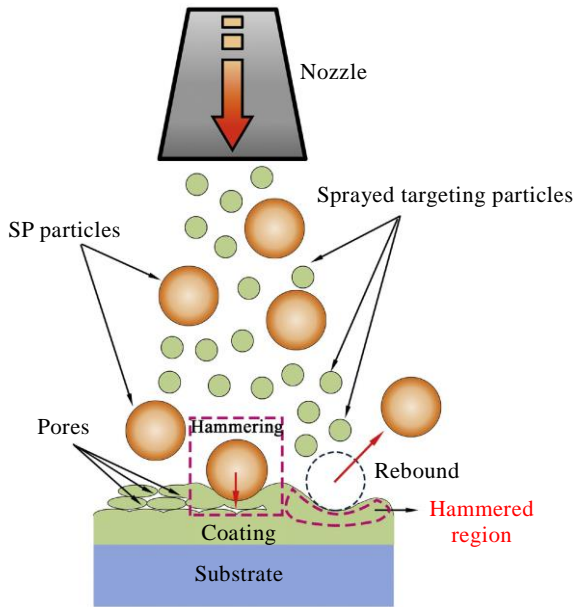


图 15 原位喷丸辅助冷喷涂的原理示意图

Fig.15 Illustration of in-situ shot-peening (SP) assisted cold spraying<sup>[88]</sup>

量达到 50% 时, 氮气喷涂 Ti 和 TC4 粉末的沉积率和沉积体维氏硬度与氮气制备的一致, 然而沉积体中存在少量 2Cr13 颗粒<sup>[89]</sup>。

虽然使用原位微锻造辅助冷喷技术能提高颗粒变形程度, 能够降低沉积体内部的孔隙率, 且成本较低, 但原位微锻造辅助冷喷技术存在刚性颗粒混入增材构件内部的风险, 且不能解决沉积体塑性差的问题。

热处理能够有效改善颗粒之间的结合状态, 提高塑性。CSAM Ti 及 TC4 沉积体经热处理后孔隙率、抗拉强度及延伸率如表 1 所示, 可以看出热处理显著提高了 Ti 及 TC4 沉积体的抗拉强度及延伸率, Ti 抗拉强度最大达到 600 MPa, 超过锻造 Ti 沉积体材料的抗拉强度 (240~550 MPa), 但延伸率 (8%) 低于锻造 (15%~24%); 经气氛炉热处理的 TC4 沉积体抗拉强度和延伸率最大可达 764 MPa 和 6.3%, 但仍低于锻造 (895 MPa, 10%)<sup>[97]</sup>。孔隙率过高是造成延伸率较低的主要原因。Huang 等<sup>[79]</sup>对比分析了退火热处理对致密和多孔 2 种典型 (图 16) CSAM 沉积体的微观结构演变规律。热处理过程中, 颗粒界面会发生扩散, 形成冶金结合, 对于致密沉积体, 颗粒界面逐渐融合并消失, 对于多孔沉积体, 只有紧密连接处的界面会消失, 多孔区域的孔隙仍将残留在沉积体内部, 无法消除<sup>[62,79]</sup>。Zhou 等<sup>[94]</sup>在研究退火处理对 CSAM TC4 沉积体组织与力学性能的影响时, 得出了相似的结论。

以上研究表明, 常规热处理并不能消除沉积体内部大的孔隙。因此还需要结合其他工艺手段来改善沉

积体的综合性能。不同于常规热处理, 热等静压 (hot isostatic pressing, HIP) 是将构件放置于高温高压惰性气体的密闭容器中, 通过气体向构件施加各向同等的压力, 促使颗粒融合, 提高整体力学性能<sup>[17]</sup>。HIP 处理包括无包套加压处理和可变形包套加压处理 2 种工艺, 如图 17 所示。在无包套 HIP 中, 构件与炉内高压高温惰性气体直接接触, 适合于内部较致密的构件。对于高孔隙率的构件, 一方面可能存在与高温高压气体直接贯通的通孔, 阻止孔隙收缩; 另一方面, 大的封闭孔内部的气体在材料收缩过程中, 不能被金属壁吸收 (图 16 所示)<sup>[93]</sup>。因此对于多孔构件一般采用可变形包套加压的 HIP 工艺, 构件被封闭在密封的包套材料中, 并用真空泵去除包套内气体, 然后将包套放入 HIP 炉内, 在 HIP 过程中, 孔隙内部的气体被排除, 从而致密化构件<sup>[98]</sup>。

HIP 处理后的 CSAM 沉积体组织和力学性能不仅取决于 HIP 工艺, 还与喷涂态沉积体内部孔隙有关。CSAM Ti 经无包套 HIP 处理后抗拉强度和延伸率分别从 90~110 MPa 和 2%~3% 提高至 480 MPa 和 8%, 然而, Ti 中仍存在 2.2% 的孔隙<sup>[92]</sup>。Chen 等<sup>[95]</sup>通过 X 射线计算机断层扫描 (X-ray computed tomography, XCT) 来表征研究 HIP 对 TC4 沉积体组织的影响, 发现无包套的 HIP 处理并不能消除氮气喷涂 TC4 沉积体内部孔隙, 而氮气喷涂 TC4 沉积体经 HIP 处理后呈现出高度致密, HIP 处理后氮气与氮气喷涂的 TC4 抗拉强度分别从 90 和 374 MPa 提高到 680 和 963 MPa, 但延伸率仍然很低。有学者认为 HIP 对延伸率有限的提高可能是由于孔隙内部的气体与材料反应, 形成氧化物或脆性相造成<sup>[93]</sup>, 但这种观点需要进一步验证。Petrovskiy 等<sup>[96]</sup>研究了有包套的 HIP 处理对 CSAM TC4 沉积体的组织及力学性能影响 (图 18), 发现有包套的 TC4 沉积体在 HIP 处理后孔隙率显著降低, 抗拉强度从 70 MPa 提高到了 950 MPa, 延伸率达到 13%, 断裂方式从脆性断裂转变为韧性断裂。

如上所述, Ti 及 Ti 合金本体较高的抗拉强度决定了 CSAM 沉积体的高孔隙率, 使用氮气进行喷涂能够增强 Ti 及 Ti 合金粒子的变形程度, 降低孔隙率, 但不能忽略成本问题。热处理、HIP 等后处理工艺为进一步提高沉积体的质量提供了解决方案。

### 3.4 Nb 及 Ta 难熔性材料

Nb 和 Ta 具有高熔点、优异耐腐蚀性和良好导电性等性能, 在航空航天、船舶、兵器、医疗等行业有广泛应用空间。传统工艺制备 Nb 或 Ta 构件成本高、资源浪费大。AM 技术是解决这些问题的有效途径, 但 Nb 和 Ta 熔点高, 热导率低、且易氧化, 以热源为主的

表 1 CSAM Ti 及 TC4 性能对比  
Table 1 Performance comparison of CSAM Ti and TC4

Author	Ref.	Condition	Spraying parameter			As-sprayed			Annealed													
			Gas	P/MPa	T/°C	Porosity/%	UTS/MPa	El/%	Method	T/°C	P/MPa	Time/h	Porosity/%	UTS/MPa	El/%							
Binder et al.	[90]	Ti coating as-sprayed	N <sub>2</sub>	4	1000	0.13	450	-	-	-	-	-	-	-	-							
Zahiri et al.	[91]	Ti coating as-sprayed	He	1.5	600	-	800	-	Air	500	-	2	-	600	8							
Petrovskiy et al.	[92]	Ti coating as-sprayed	N <sub>2</sub>	3.6	750	4.3	90-100	2-3	HIP (capsule-free)	900	110	-	2, 2	480	8							
Petrovskiy et al.	[93]	Ti coating as-sprayed	N <sub>2</sub>	4	800	-	70	-	-	900	150	3	-	480	-							
Zhou et al.	[94]	TC4 coating as-sprayed	N <sub>2</sub>	0.25	680	-	90	-	VAT	600	-	2	-	110	-							
										800	-	2	-	316	-							
Vo et al.	[19]	TC4 coating as-sprayed	N <sub>2</sub>	4	800	7	154±81	2.3±0.9	Ar	600	-	1	-	251±49	3.2±1.1							
										600	-	2	10	219±47	3.5±0.5							
										1000	-	4	5.8	462±42	5.8±1.1							
Chen et al.	[95]	TC4 coating as-sprayed	He	4	350	<1	445±145	3.8±0.8	-	600	-	2	0.3	764±189	6.3±0.5							
										N <sub>2</sub>	5	950	2.4	90	-	HIP (capsule-free)	920	120	2	1.5	680	1.4
																	He	2	950	1.2	374	-
Petrovskiy et al.	[96]	TC4 coating as-sprayed	N <sub>2</sub>	5	800	7.5	68	-	HIP (capsule-free)	900	110	2	0.2	956±5	13.5±0.5							
Petrovskiy et al.	[93]	TC4 coating as-sprayed	N <sub>2</sub>	4	800	~6.2	20	~0.06	HIP (capsule-free)	910	150	2	~4.9	560	~1							
Hollander et al.	[97]	Bulk Ti	-	-	-	-	240-550	15-24	-	-	-	-	-	-	-							
Hollander et al.	[97]	Bulk TC4	-	-	-	-	>895	>10	-	-	-	-	-	-	-							

增材制造技术制备 Nb 和 Ta 非常具有挑战性。Marinelli 等<sup>[99-100]</sup>采用 WAAM 技术制备抗拉强度 261 MPa，延伸率 36% 的 Ta 试样，但存在粗大的柱状晶（约 1 mm）及氧化钽（图 19a），且增材制造效率较低（2.7 kg/h）。SLM 技术具有较高的冷却速率（10<sup>3</sup>~10<sup>8</sup> K/s），试样晶粒尺寸小。Zhou 等<sup>[101]</sup>采用 SLM 技术制备了晶粒尺

寸约 1 μm 的 Ta 试样（图 19b），抗拉强度可达 739 MPa。但由于凝固过程中层与层之间强烈的外延生长趋势，导致沿构造方向形成柱状晶粒，晶体优先沿<111>方向生长，压缩性能各向异性<sup>[102]</sup>，且 SLM 工艺对粉末性能（形貌、流动性等）要求高<sup>[103]</sup>，制备成本高。由于 Nb 和 Ta 优异的韧性，较低的屈服强度，

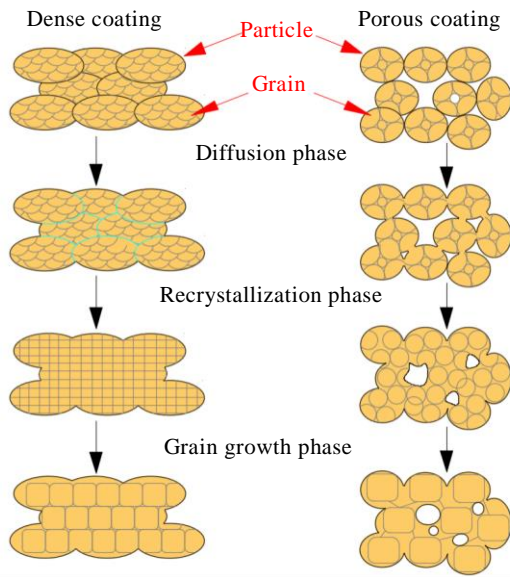


图 16 热处理过程中沉积体的演变示意图

Fig.16 Schematic diagram of the evolving CSAM deposit during heat treatment<sup>[79]</sup>

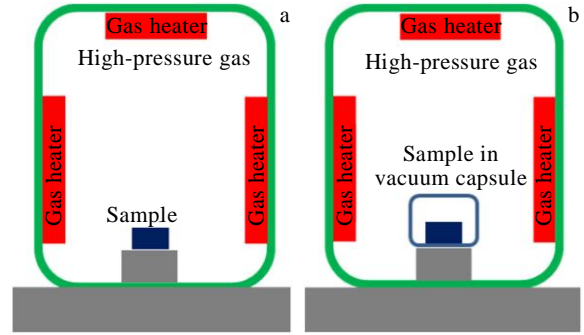


图 17 无包套和可变形包套加压处理工艺 HIP 示意图

Fig.17 Schematic diagrams of capsule-free (a) and encapsulated (b) HIP<sup>[93]</sup>

CSAM 能够获得致密的 Nb 和 Ta 沉积体<sup>[26-29,104-106]</sup>, 孔隙率低于 1%, 如图 19c 和 19d 所示, 喷涂 Ta 效率可达 4.7 kg/h, 相比较于 WAAM 能够显著缩短沉积时间, 节省成本。Jafarlou 等<sup>[107]</sup>研究了 CSAM Ta 沉积体的微观组织和力学性能,发现 Ta 的微观组织由超细晶

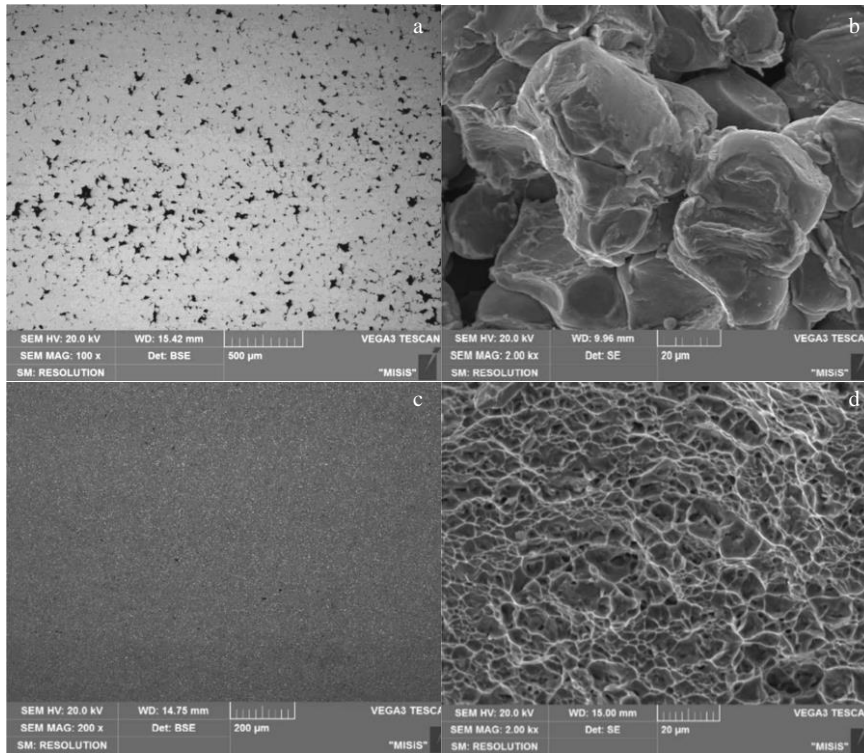


图 18 HIP 理前后 TC4 沉积体微观组织及断口形貌

Fig.18 Microstructures (a, c) and fracture morphologies (b, d) of TC4 deposits before (a, b) and after (c, d) HIP treatment<sup>[96]</sup>

粒和等轴晶粒组成, 没有表现出柱状或其他特定的晶粒取向, 抗拉强度达到 484 MPa, 高于电子束熔炼和粉末冶金制备的 Ta 材料 (205 和 310 MPa), 压缩屈服强度为 761 MPa, 表现为各向同性, 但延伸率和断裂韧性较低。笔者团队制备了孔隙率低至 0.5% 的 Ta

沉积体, Ta 沉积体自腐蚀电流密度较 316L 块体降低了 1 倍, 具有优异的耐腐蚀性能<sup>[26]</sup>。

成本是影响 AM 技术发展及应用的关键因素之一。AM 对粉末形貌及氧含量要求高, 大多采用射频等离子体球化技术制备高熔点粉末<sup>[103]</sup>, 成本高。CSAM 过程

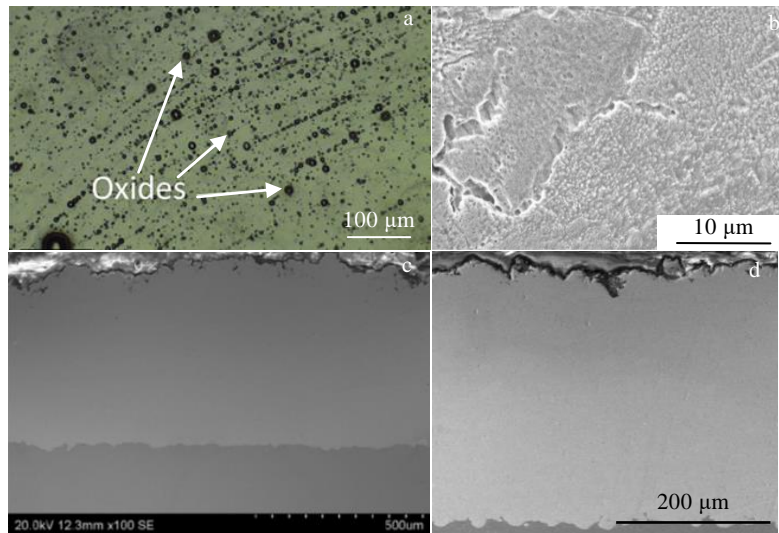


图 19 不同工艺制备 Nb 和 Ta 沉积体微观组织

Fig.19 Microstructures of Nb and Ta deposits prepared by different processes<sup>[26,28,99,101]</sup>: (a) WAAM Ta, (b) SLM Ta, (c) CSAM Nb, and (d) CSAM Ta

中，粒子速度是决定能否形成沉积体的关键因素。由于非球形粉末具有更高的飞行速度，可使用非球形粉末进行增材制造，例如使用氟钽酸钾钠还原法或氢化脱氢法制备的 Ta 粉末取代球形 Ta 粉末，降低制造成本。Tang 等<sup>[108]</sup>研究了粉末形貌对 CSAM Ta 性能的影响，相比较于准球形和角形粉末，多孔粉末在喷涂过程中有利于产生压缩和压实行行为，沉积体更为致密；Kim 等<sup>[109]</sup>指出对 Ta 粉进行预热处理会降低冷喷涂的 Ta 沉积体的孔隙率。

以上研究表明，CSAM 能够制备致密的 Ta 和 Nb 沉积体，抗拉强度高，但受限工艺本身的特性，沉积体几乎没有塑性，断裂韧性低，如何实现抗拉强度和塑性共存是 CSAM 技术尚待解决的问题之一。

## 4 CSAM 在国防领域的应用及进展

### 4.1 武器装备维修

得益于 CSAM 沉积体优异的耐腐蚀及疲劳性能<sup>[68,82]</sup>，2000 年 CSAM 技术便引起相关科研人员的关注。2001 年美国 ARL 与桑迪亚国家实验室合作成立了首个将 CSAM 应用于装备维修的实验室；2008 年，美国国防部发布了用于手动或自动的冷喷涂制造工艺标准。目前 CSAM 技术已广泛用于空军、陆军及海军武器装备的维修，经验证，其修复效果明显优于传统的热喷涂、焊接、激光熔覆等工艺。空军武器装备方面，自 2008 年以来，ARL 已经开始利用 CSAM 修复高价值的铝及镁合金零构件，例如直升机镁合金传动齿轮箱、UH-60 主旋翼变速箱壳体、B-1 轰炸机的前

系统舱面板及钛合金液压管路、AH-64 阿帕奇桅杆支架、飞机起落架、F/A-18 战斗机液压泵齿轮轴等构件，如图 20 所示<sup>[33,110]</sup>。

陆军武器装备方面，2019 年，美国陆军作战能力发展司令部陆军研究实验室联合地面车辆系统中心和军备中心的工程师利用 CSAM 技术对 M2 布拉德利步兵战车的 25 mm 自动炮炮架进行了修复，构件修复后表现出优异的耐磨性能，验证了将磨损的炮塔支架重新投入使用的能力。同时，ARL 将 CSAM 技术引入维修史崔克装甲车被腐蚀的装甲钢部件，并对修复后的部件进行防弹性能测试<sup>[111]</sup>。结果表明，CSAM 修复后部件的防弹性能优于装甲钢本体<sup>[111]</sup>，CSAM 技术能够有效保障现有武器装备的战斗力。值得注意的是，2019 年，伍斯特工业学院和新泽西州罗恩大学都获得 ARL 资助，用于研究和开发适用于战场环境下的 CSAM 技术及便携式 CSAM 系统。2020 年，澳大利亚陆军已初步验证了便携式 CSAM 设备在现场环境下修复军事装备上的可行性，未来计划将 CSAM 技术及系统融入澳大利亚陆军的基础设施中。

海军武器装备方面，早在 2000 年，美国制造与后勤技术研究所针对海军两栖攻击艇用铝合金轮子面临的磨损问题，开展了 CSAM 沉积耐磨沉积体的研究。2015 年，VRC 联合普及特湾海军造船厂采用氦气 CSAM 沉积 6061 Al 合金粉末成功修复了铝合金阀门制动器密封面及表面的腐蚀坑，沉积体与基体结合强度大于 71 MPa，修复后的制动器通过了服役测试考核<sup>[112]</sup>。2019 年，美国海军东部舰队战备中心使用移动 CSAM

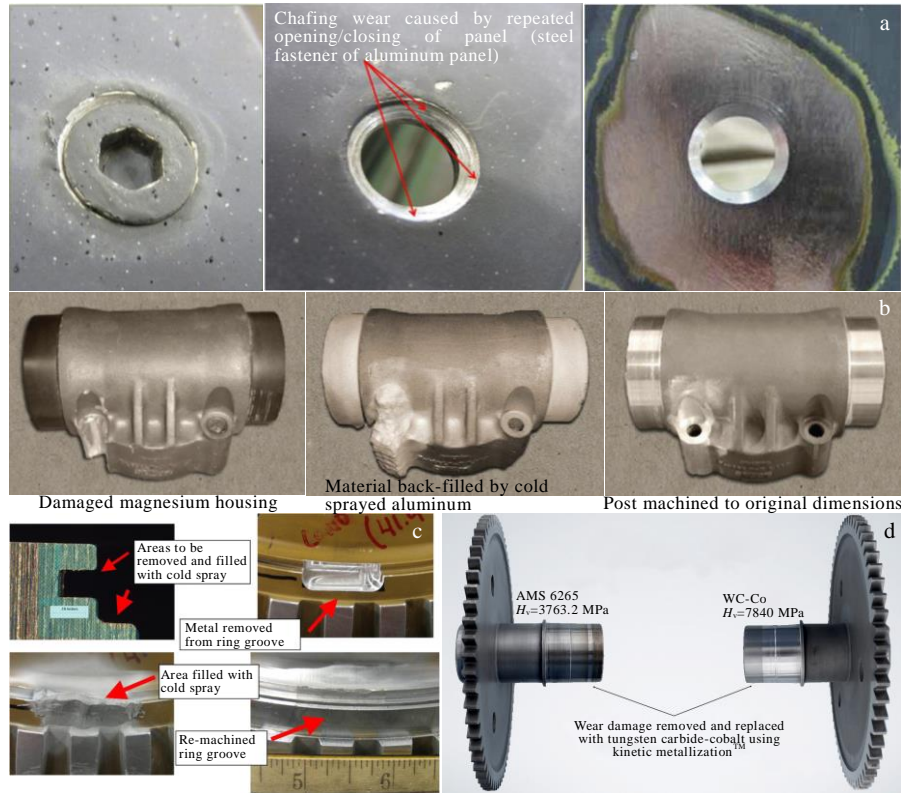


图 20 CSAM 修复构件

Fig.20 Examples of CSAM repair parts<sup>[33,110]</sup>: (a) repair the B-1 bomber's front system deck panel, (b) repair magnesium alloy transmission gearbox, (c) repair the mast bracket, and (d) repair the hydraulic pump gear shaft

系统修复了 V-22 鱼鹰上的腐蚀窗台。2020 年,美国诺福克海军造船厂利用冷喷涂技术成功修复了“乔治·布什”号航母的 2 个海水止回阀盘。同年,澳大利亚皇家海军将 CSAM 技术用于维修柯林斯级潜艇的耐压船体等关键潜艇部件,同时正在开发可在潜艇上携带的便携式 CSAM 设备。

在中国,西安交通大学、西北工业大学、中国兵器科学研究院宁波分院、中国科学院金属研究所、广东省科学院新材料研究所等单位已开展了 CSAM 研究,取得了一定成果,如导弹弹筒及发动机中央传动机匣的修复工作<sup>[113-114]</sup>。笔者团队针对装甲车辆用的轻质镁合金部件在铸造过程中产生的裂纹开展了 CSAM 修复研究,如图 21 所示,沉积体内部致密,与基体的结合强度约 50 MPa,具有较好的机械性能。

#### 4.2 战斗部材料

聚能装药内衬,即药型罩,是战斗部的关键构件。传统药型罩多为单层金属结构,如 Cu、Al、Ni 等,而随着装甲防护能力的提高,对药型罩的毁伤威力提出了新的挑战。双层含能药型罩是一种内层为高延展性金属,外层为含能结构材料的新型药型罩,兼具高射流头部速度和含能高毁伤性能的优点。由于 Al 及 Al-Ni

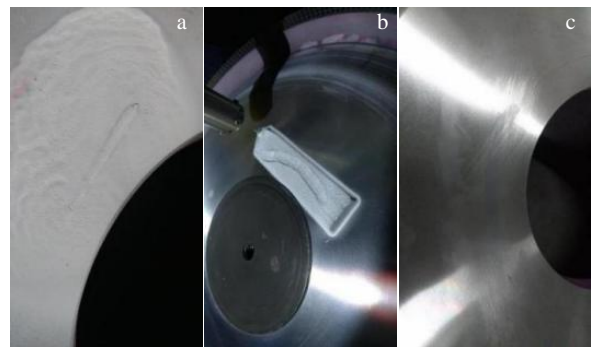


图 21 CSAM 修复行动构件

Fig.21 CSAM repair mobile parts: (a) before repair, (b) after repair, and (c) after machining

等材料在高温下会释放大量热能,非常适合充当双层含能药型罩的外层<sup>[115]</sup>,一般通过粉末冶金、电沉积、冷轧及冷喷涂等工艺制备<sup>[116-119]</sup>。相比较于原始粉末,CSAM 沉积体中氧含量几乎不发生改变,沉积体孔隙率低<sup>[67,117]</sup>,因此 CSAM 制备的含能药型罩比常规工艺制备的具有更多的放热反应能,这将更有利于提升战斗威力<sup>[117-119]</sup>。Lee 等<sup>[120]</sup>对 CSAM 的双层药型罩进行了破甲性能测试,结果表明,CSAM 双层药型罩的

Al 或 Al-Ni 外层能够与靶板进行二次反应, 造成更大的破甲孔径, 提高药型罩的威力, 这可能是 CSAM 的另一应用。

### 4.3 极端条件下防护

轻量化是保障装甲车辆、火炮等武器装备高机动型、战场生存能力和快速部署能力的关键, 大量应用高性能镁合金材料是实现武器装备轻量化最重要的途径之一。然而, 装甲车辆在沙漠、山地等极端严苛的服役环境下对镁合金构件的耐磨性提出了严格要求, 较差的耐磨性能及耐腐蚀性能是制约镁合金在武器装备上实现工程化应用的瓶颈问题。表面改性是提高镁合金材料使用性能的有效手段, 但是传统喷涂输出热量高, 易引起镁合金变形及性能降低, 同时也难以制备较厚的耐磨沉积体。笔者团队优化设计了界面结构及耐磨沉积体的母相与陶瓷增强相材料, 通过 CSAM 在镁合金构件表面制备了厚度 3 mm 的 420SS/WC-17Co 沉积体 (图 22a), 耐磨性较镁合金提高了 2 个数量级, 并通过了 2000 km 的砂石车载考核 (图 22b) [121], 显示出较好的防护效果, 具有重要的工程应用价值。

作为一种新兴的增材制造方式, CSAM 技术已被广泛应用于武器装备的维修及增材制造领域。其在修复镁合金及铝合金零部件的效果明显优于传统的热喷涂、焊接、激光熔覆等工艺, 能够保持材料 (沉积体与基体) 特性不发生改变, 在含能材料、高熔点材料增材制造及特种工况防护方面具有一定优势。然而, 受限了其特有的沉积方式, 决定了其局限性。

## 5 CSAM 目前存在的挑战

### 5.1 控形

几何形状控制差、无法制备复杂结构件在一定程度上限制了 CSAM 的应用。在喷涂过程中, 颗粒数量沿喷嘴横截面呈类高斯分布, 且中心的颗粒速度高于外

侧的颗粒速度, 导致沉积在中心区域的颗粒数量大于边缘的颗粒 [122]。特别是当喷枪移动速度较低或喷涂遍数较多时, 沉积体中心区域厚度增长较快而边角区域厚度增长较慢, 造成沉积体厚度不均匀, 形成中间高两边低的典型“三角形”轮廓, 如图 23a 所示, 随后由于边角区域沉积角度逐渐变小, 颗粒沉积变得更加困难, 加剧“三角形”轮廓两侧向中心的倾斜 [40,122-123]。在大面积、多道次的喷涂后造成沉积体边角缺失, 如图 23b 所示, 需要额外的后续加工去除才能获得所需尺寸, 增加了生产时间和成本, 同时造成材料浪费。

针对几何形状控制差的问题, 科研人员分别采用优化喷嘴形状及优化喷涂路径 2 种策略来改善 CSAM 控形差的问题。

颗粒在圆形拉瓦尔喷嘴内分布呈现类高斯分布, 改变喷嘴形状能够改变颗粒在喷嘴内的分布, 颗粒分布更加均匀, 沉积体厚度更加均匀, 如图 24 所示, 该喷嘴可提高 CSAM 过程中控形能力 [40,122,124]。但未来需进行更多的试验来验证沉积体的性能。

除了上述基于优化喷嘴形状的思路来研发 CSAM 控形外, 优化喷涂路径也是提升 CSAM 技术控形性的重要手段。Pattison 等 [123] 提出一种通过分段式沉积“三角形镶嵌”策略来制造垂直墙壁。如图 25a 中所示, 通过倾斜喷嘴使其垂直于先前沉积的“三角形”表面进行喷涂, 构建另一“三角形”, 以此类推, 最终堆积成形所需的结构, 如图 25b 中所示。在此基础上, Wu 等 [125] 在基于对粉末特性、控制参数对涂层影响进行分析后, 选取有效的参数创建涂层厚度模型。根据喷涂路径中所涉及的偏转角  $\theta$ 、偏移量  $s$  和后退距离  $d$  这 3 个重要参数进行系统的研究 (图 25c), 通过仿真模拟与实际实验进行验证, 获得了无边角缺失的垂直墙壁 (图 25d) [125], 这意味着可以通过优化喷涂路径策略来制造复杂形状。然而“三角形”与“三角形”界面结合状况尚待考察。Hutasoit 等 [64] 指出当冷喷涂

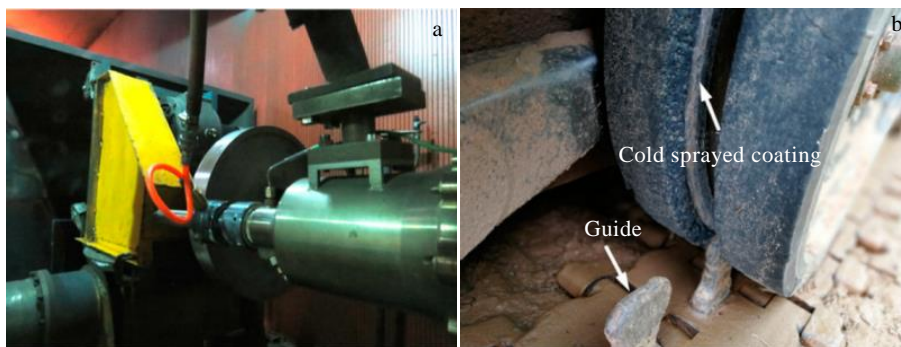


图 22 履带车辆用镁合金车轮 CSAM 420SS/WC-17Co 的制备和应用

Fig.22 Preparation (a) and application (b) of CSAM 420SS/WC-17Co deposit in magnesium alloy road wheel of tracked vehicle [121]

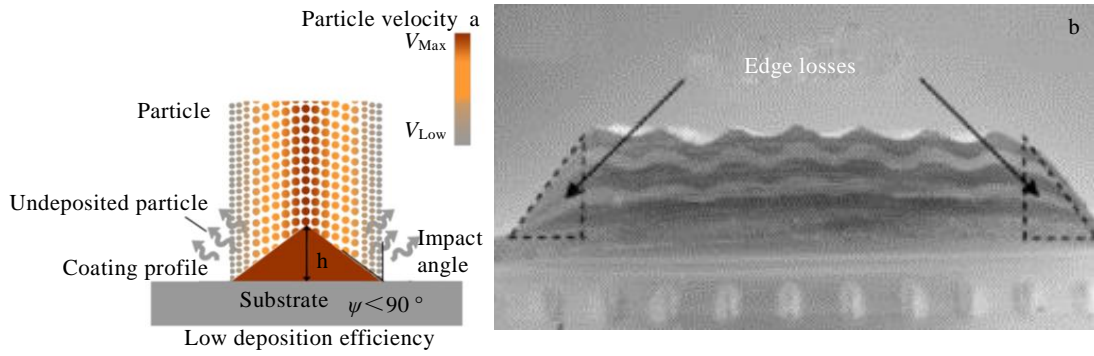


图 23 CSAM 粒子沉积和边角损失

Fig.23 Schematic diagram of CSAM particle deposition (a) and edge loss (b)<sup>[122-123]</sup>

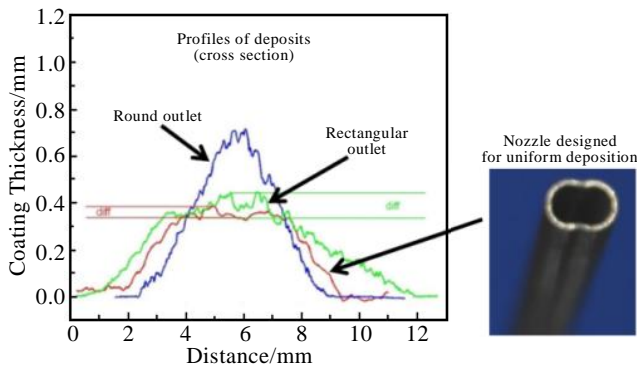


图 24 不同截面形状喷嘴沉积的单道沉积体截面厚度分布

Fig.24 Comparison of cross-section thickness profiles of single-track coating deposited using different nozzle cross-section shapes<sup>[124]</sup>

角度从 90°变为 45°方向时, Cu 沉积体界面会产生大量孔隙, 如图 26 所示, 这些孔隙随着喷涂遍数增加在厚度方向上逐层出现, 称之为网络孔隙, 由于网络孔隙的存在, 显著降低了沉积体的强度。

通过优化喷嘴形状及优化喷涂路径能够有效降低边角缺失, 使得 CSAM 具有制备复杂结构件的潜力。但在优化喷涂路径策略中由于喷涂角度的改变, 沉积体内部可能会存在孔隙、裂纹等缺陷, 需开展喷涂路径对沉积体性能的研究。

### 5.2 控性

#### 5.2.1 各向异性

AM 过程中, 机器人是零构件实现高精度的关键构件。典型喷涂路径为单一的锯齿形, 机器人携带喷枪重复喷涂, 由于多道次产生的轨迹间界面存在, 孔

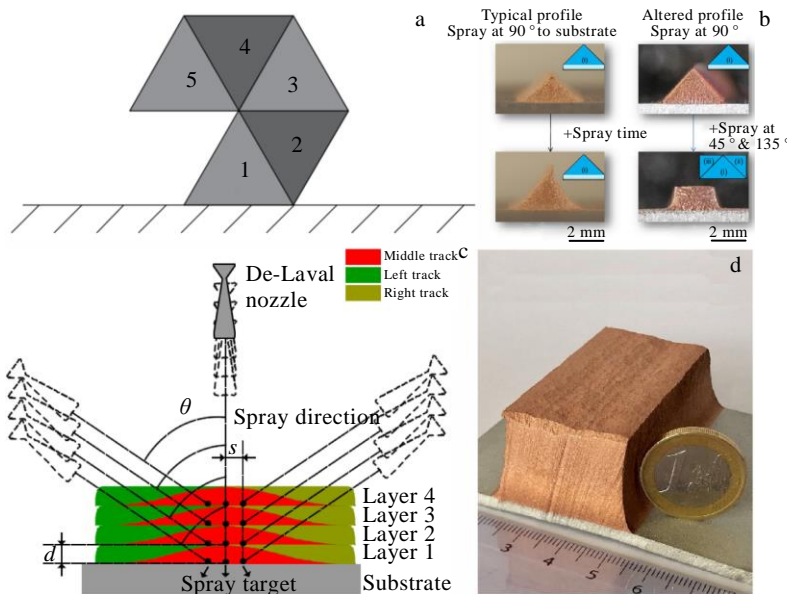


图 25 喷涂路径策略

Fig.25 Spray path strategy<sup>[123,125]</sup>: (a) triangular tessellation scheme for production of primitive shapes; (b) a vertical wall created using the technique of Fig.25a; (c) technique with three main parameters to enable stable layer building; (d) a vertical wall created using the technique of Fig.25c

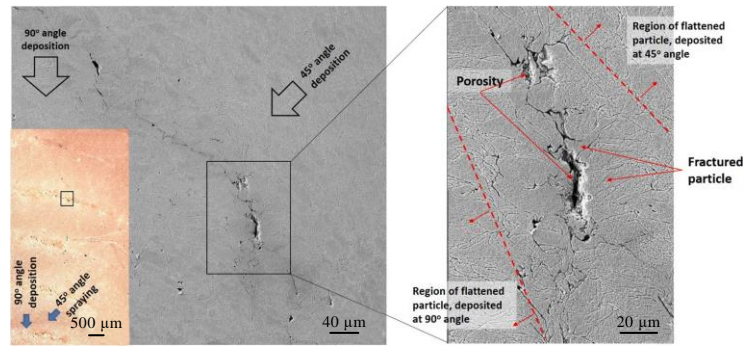


图 26 不同喷涂角度结合界面

Fig.26 Combining interface with different spraying angles<sup>[64]</sup>

隙在沉积体内分布不均匀，CSAM 沉积体的微观结构及力学性能表现出各向异性，平行于喷涂轨迹方向的拉伸性能优于垂直于喷涂轨迹方向的拉伸性能<sup>[64,126-127]</sup>。Wu 等<sup>[81]</sup>、Qiu 等<sup>[82]</sup>及 Wu 等<sup>[127]</sup>的研究发现，热处理虽然可以通过原子扩散和再结晶显著减弱或消除喷涂时的微观结构各向异性，能够改善机械各向异性，但由于不能消除沉积体中分布不均匀的孔隙，无法完全去除沉积体的机械各向异性。通过路径优化可以改善各向异性，Wu 等<sup>[127]</sup>通过交替的喷涂增加轨迹间界面的分散水平，从而削弱机械各向异性。同时，通过优化喷涂路径还可以制备具有受控孔隙率的近净形状构件<sup>[128]</sup>。以上研究表明，喷涂路径优化及设计将是未来 CSAM 研究的重点，有效的喷涂路径规划能够降低沉积体机械性能的各向异性及孔隙率，提高沉积体的可靠性。

### 5.2.2 沉积体脆性

由于颗粒经过剧烈的塑性变形形成沉积体及颗粒界面结合以机械咬合为主，导致冷喷涂沉积体塑性极差，断裂韧性为同等冷轧材料的 6%~25%<sup>[78]</sup>（表 2 所示）。在交变应力作用下结构件易发生断裂，疲劳强度低于相应的锻造材料，这在一定程度上限制了 CSAM 技术的应用。西北工业大学、广东省科学院新材料研究所正联合开展具有一定塑性沉积体制备研

究，有望突破现有瓶颈。

### 5.2.3 脆性及高强度材料

在 CSAM 过程中，高速飞行的颗粒撞击基体，发生塑性变形并与基体形成有效结合，形成第一层，后续颗粒撞击在先前沉积的颗粒表面发生变形，进而形成结合，这种情况适合于软粉末-硬基体及软粉末-软基体组合，当硬粉末-软基体时，首层硬质颗粒高速撞击基体，硬质颗粒基本不发生塑性变形，软基体发生塑性变形，颗粒直接嵌入软基体内部，形成结合，后续硬质颗粒撞击在已沉积颗粒表面，颗粒及基体塑性变形较小，沉积体体孔隙高。而对于硬粉末-硬基体，首层颗粒难以与硬基体形成有效结合，因此 CSAM 适合于塑性好、强度低的材料。脆性或高强度材料难以制备致密的沉积体的关键问题是材料本身难以发生有效塑性变形。Cao 等<sup>[20]</sup>通过优化设计喷嘴尺寸来提高 CSAM TC4 颗粒的速度，但提升空间有限，沉积体仍表现出多孔结构。因此，单一冷喷涂技术提供的能量无法激活材料本身的塑性，多能场复合制造是未来 CSAM 技术发展的重点方向之一。

激光具有高能量密度、聚焦性好等优点，在热喷涂领域其最早应用在激光辅助热喷涂中，激光的作用是增加粉末的熔化，与普通热喷涂涂层相比，激光辅助热喷涂可以制备出更致密和结合强度更高的涂层<sup>[39,129]</sup>。

表 2 冷喷涂与冷轧纯金属的断裂韧性对比

Table 2 Fracture toughness measurement of cold sprayed pure metals compared to cold-rolled references<sup>[78]</sup>

Material	As-sprayed, $K_{IC}/\text{MPa m}^{1/2}$	Cold-rolled, $K_Q/\text{MPa m}^{1/2}$	$\frac{K_{IC}}{K_Q}$
Al	10.5	59.3	0.18
Ti	16.6	136.9	0.12
Ni	49.2	194.1	0.25
Cu	8.7	134.5	0.06



2006年由英国剑桥大学的 O'Neill 等<sup>[130]</sup>提出激光辅助冷喷涂 (laser assisted cold spray, LACS) 技术, 原理如图 27 所示, 利用激光辐照对高速飞行的粉末颗粒和基体进行加热和软化, 促进颗粒和基体的结合。与其他激光增材制造技术相比, LACS 仍是固态沉积技术, 从而避免与许多基于激光技术相关的热应力、变形、稀释和微观结构转变等问题。LACS 可制备致密的 TC4 等高强度材料的沉积体<sup>[131]</sup>, 也可制备 AISI 4340 钢<sup>[132]</sup>、W<sup>[133]</sup>等高强度及高硬度沉积体。由于激光辐照的软化作用, LACS 可显著提高粉末的沉积率, 促进颗粒之间良好的结合, LACS W 沉积体抗弯强度可达 724 MPa<sup>[133]</sup>。

LACS 技术突破了单一冷喷涂无法沉积致密的高强度、高硬度材料的局限性, 其主要依靠提高沉积温度, 增强材料的塑性流变。提高沉积温度一方面引起塑性变形增加, 颗粒沉积率升高, 另一方面过高的温度会导致粉末颗粒在沉积时发生相变、氧化等问题, 降低性能。因此, 沉积过程中温度控制是 LACS 的关键, 工艺优化仍是 LACS 的研究重点。

### 5.3 残余应力

残余应力是在粉末沉积过程中产生的, 高速粉末颗粒撞击到基材时, 会在沉积体与界面处产生极高的局部应变, 此时便产生残余应力, 通常主要是压应力,

有助于防止裂纹的形成及传播。然而, 研究表明<sup>[134]</sup>, 喷砂、沉积体与基材的热失配及喷涂过程中温度升高等因素会引起残余应力由压应力转变为拉应力。拉应力对沉积体的完整性、强度、疲劳性能具有破坏性影响<sup>[139]</sup>, 如图 28 所示<sup>[135]</sup>。因此, 必须评估 CSAM 沉积体的残余应力。

目前, 研究残余应力主要通过中子衍射方法和数值模拟等方法来实现。Sinclair 等<sup>[51]</sup>利用中子衍射技术分析了 CSAM 圆柱形和漏斗形 Cu 构件的残余应力, 结果表明, Cu 沉积体的残余应力表现为各向异性, 并与构件结构相关, 相比较于 DMD、WAAM 等技术, CSAM 具有更低的残余应力, 使其成为制造某些几何形状的合适方法。喷涂工艺参数和基材材料也会对残余应力产生影响。Vargas-Vscategui 等<sup>[135]</sup>也指出 CSAM Ti 构件不同位置的残余应力表现不同形式, 在 Ti 圆柱内表面和外表面产生拉应力, 而圆柱壁中心积产生压应力, 喷枪移动速度能够改变残余应力状态, 高的喷枪移动速度和低粉末进给速率有利于降低残余应力, 更加适合 CSAM。Luzin 等<sup>[136]</sup>使用中子衍射研究了 CSAM Ti 沉积体在不锈钢和 Al 基体上的残余应力。由于基体和沉积体之间的热膨胀系数的差异, 残余应力主要通过热失配机制形成。

数值模拟方面, Oyinbo 等<sup>[137]</sup>使用拉格朗日方法

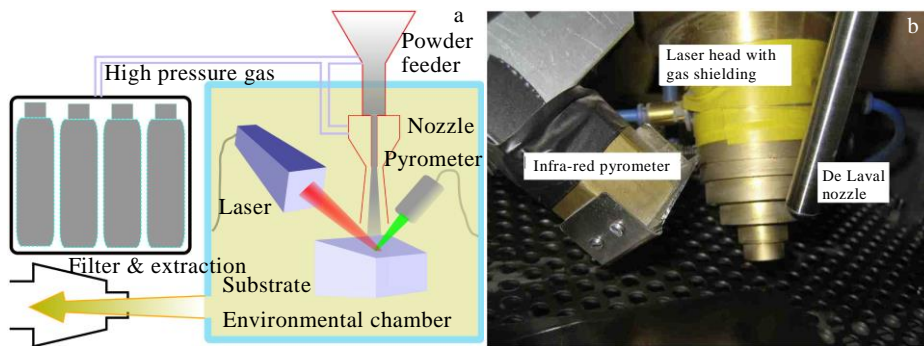


图 27 LACS 结构图

Fig.27 Schematic diagram (a) and side view (b) of experimental set-up<sup>[130]</sup>

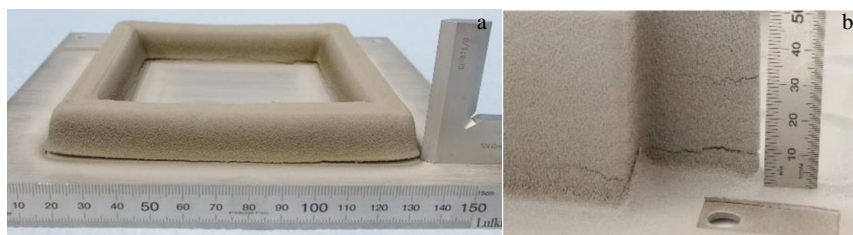


图 28 CSAM Ti 沉积体残余应力导致的缺陷

Fig.28 Defects caused by residual stress in CSAM Ti<sup>[135]</sup>: (a) geometric distortion and (b) spontaneous fracture during or after the manufacturing process

详细讨论了粉末颗粒冲击过程的压应力、拉应力、应变速率、等效塑性应变和温度的演变,指出残余压应力随着预热温度和颗粒初始撞击速度的增加而增加。此外,喷涂角度也是影响残余应力的重要因素。Seng 等<sup>[138]</sup>采用欧拉法研究了喷涂角度对 CSAM TC4 在 Al6061-T6 基体上的影响,结果表明,增大喷涂角度,有利于产生压应力。针对拉格朗日方法极端的塑性变形会导致严重的网格变形及欧拉方法很难跟踪基板和沉积微粒之间的界面的问题,Wang 等<sup>[139]</sup>基于任意拉格朗日-欧拉(ALE)方法开发了适用于 CSAM 残余应力分析的仿真模型,该模型避免了网格失真并能有效地捕获运动界面,得到的残余应力与实测值接近,为未来残余应力的研究建立了有效模型。

此外,也有学者通过钻孔法来测量 CSAM 沉积体的残余应力。Marzbanrad 等<sup>[140]</sup>指出,热输入和传热速率是控制残余应力符号的关键因素。CSAM 7075Al 沉积体和 AZ31B 基体之间的热失配导致基体中产生拉伸残余应力,降低沉积体温度能够将拉应力转变为压应力。同时,提高喷枪移动速度有利于保持残余压应力。然而,根据 Singh 等<sup>[141]</sup>的研究,在 IN718 基体上 CSAM IN718 沉积体中产生的残余压应力受到喷丸效应的强烈影响,残余压应力随着沉积体厚度的增加而降低。这 2 种不同的结果可能是基体材料不同导致。

以上关于 CSAM 沉积体残余应力的研究表明,CSAM 沉积体内部残余应力并非单一拉应力或压应力,而是两者互存。残余应力主要由喷丸、沉积体与基体的热失配及喷涂淬火等因素引起,通过合理的基体选材及优化喷涂工艺参数能够获得理想的压应力。然而,喷涂工艺参数优化研究耗时耗力,性能预测研究是解决此问题的有效手段。

#### 5.4 质量评价与性能预测

由于 CSAM 的成形机理与传统制造及热源 AM 工艺不同,CSAM 构件内部缺陷具有尺寸不均匀(未结合区、孔隙,几微米到几十微米;裂纹,上百微米)、分布不均匀的特点,CSAM 构件的性能对缺陷敏感性更大。因此,为了充分利用 CSAM 的优势,需要对构件进行质量检测来准确评估缺陷。另一方面,对于 CSAM 构件服役过程来讲,性能预测可以直观地了解在特定缺陷和服役环境下的构件的性能,这对优化喷涂工艺参数具有很大的帮助。因此,实现 CSAM 构件质量的快速、可靠检测和性能预测,形成面向应用的 CSAM 构件质量评价和性能预测标准体系,对于未来 CSAM 构件服役的可靠性和安全性至关重要。

目前,AM 构件的内部质量评价主要通过破坏性检测方法和无损检测方法<sup>[142]</sup>。破坏性检测方法主要为

金相法,检测范围小,无法真实地反应 AM 构件内部质量情况。无损检测方法主要有 XCT、X 射线检测技术和超声检测技术等<sup>[39]</sup>。XCT 检测精度高,但由于其对检测尺寸和检测材料有一定的限制,无法对大尺寸试样及高密度材料检测<sup>[142]</sup>。X 射线检测技术主要用来检测焊接缺陷(气孔、夹杂及裂纹等),对小尺寸缺陷束手无策。超声检测技术具有穿透力强、灵敏度高的特点<sup>[142]</sup>,在 AM 构件的无损检测中得到了越来越多的关注和研究。然而,在 CSAM 构件方面尚未见相关研究。笔者团队首次将超声检测技术应用于 CSAM 构件上做了初步可行性研究工作,为了能够全面分析 CSAM 构件内部缺陷分布情况,采用超声波扫描显微镜对长 450 mm,壁厚 2.5 mm 的 CSAM 的 Ta 管进行了无损检测,如图 29 所示,测试前将 Ta 管表面车削平整后,放置耦合液中,利用超声波在材料内部发生折射、反射的现象,经过数据采集计算形成灰度值图片,分析构件内部缺陷状况。相比较于 XCT,超声波扫描显微镜对检测尺寸要求范围更加宽广,精度几乎与 XCT 相似,在未来 CSAM 构件的质量评价方面将发挥重要作用。

在性能预测方面,已有部分研究报道了通过模拟仿真预测沉积体微观组织。Msolli 等<sup>[143]</sup>结合仿真模型及 EBSD 表征研究了 CSAM 6061 Al 合金沉积体的微观结构演变规律,提出一个经过实验验证的计算模型,可用于预测不同工艺条件下(喷涂角度、预热温度及颗粒速度)的微观组织演变,为设计和制备不同的微观组织提供了新的指导。Liu 等<sup>[144]</sup>创建了第 1 个 CSAM 沉积体变形机制图,使用局部 Zener-Hollomon 参数和塑性应变(应变-Z-微观结构图)来解释和预测 Cu 的微观结构演变,该图可用于根据工艺参数预测和设计 CSAM Cu 沉积体的微观结构,也可以扩展到其他严重塑性变形工艺。Razavipour 等<sup>[152]</sup>开发了一种用于寻找满足所需硬度的激光热处理条件的人工神经

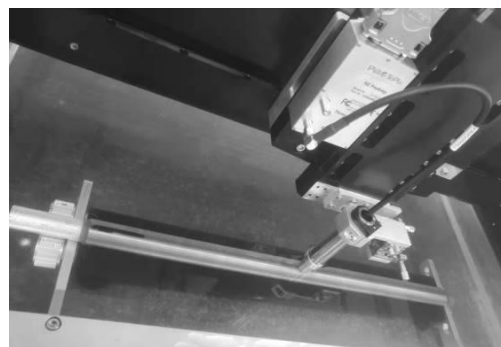


图 29 超声波扫描显微镜检测 Ta 管

Fig.29 Ultrasonic scanning microscope inspection of Ta tubes

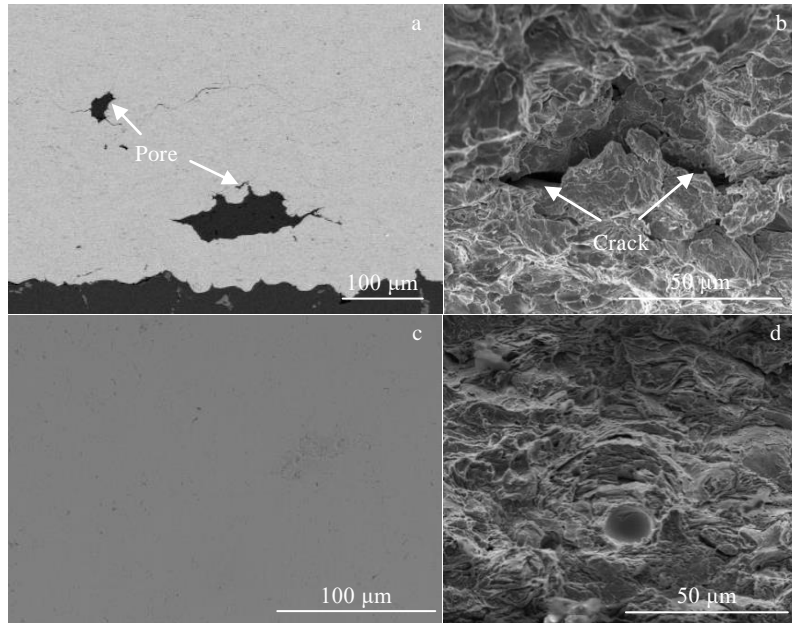


图 30 粉末热处理前后 CSAM 弥散强化铜微观组织与断口形貌

Fig.30 Microstructures (a, c) and fracture morphologies (b, d) of CSAM dispersion strengthened copper before (a, b) and after (c, d) powder heat treatment

网络模型。该模型能够根据各种激光热处理条件产生的局部热影响预测 CSAM 构件的局部硬度,因此可用于辅助工艺参数的选择和优化。但这类模型复杂,计算成本高,且由于缺少 CSAM 构件的微观组织与性能之间的内在联系,无法预测沉积体的性能。未来,质量评价与性能预测是 CSAM 构件实现工艺-组织-性能一体化的重要方向。

### 5.5 成本

CSAM 成本主要由气体、粉末、设备配件及人工成本等组成。由于高压冷喷涂对气体消耗极大,气体成本对增材制造最终成本影响较大,特别是当氮气无法产生足够高的速度,难以沉积高硬度或高强度材料时,使用氦气可以显著提高沉积效率及沉积体性能,但极大增加了成本。通过氦气回收系统及液氮系统可显著降低制造成本。

粉末成本高是影响 AM 技术发展及应用的另一关键因素。粉末在运输、储存过程中易发生氧化,造成沉积体性能欠佳,需要重新制粉,提升了制造成本。笔者团队基于未来低成本、高性能 CSAM 技术发展趋势及潜在工程化应用,提出氢还原处理氧化粉末,降低氧含量,揭示了粉末预处理对 CSAM 沉积体性能的影响,如图 30 所示。对 15~45  $\mu\text{m}$  的氧化铝弥散强化铜粉末进行 500  $^{\circ}\text{C}$ , 1 h 的氢还原热处理后,粉末氧含量降低了 3 倍,沉积体更加致密,颗粒结合更加优异,抗拉强度从 70 MPa 提高到了 242 MPa。

可见,粉末预处理为低成本的 CSAM 技术提供了新途径,但其中还涉及一些关键科学难题包括:不同粉末特性的沉积结合机制、粉末特性与 CSAM 沉积体性能的映射关系及优化、CSAM 典型构件评价方法等。

## 6 结 语

CSAM 因其成形效率高,沉积温度低且材料没有相变而成为增材制造工艺中的研究热点之一,CSAM 不仅可以制造各种材料,也可以对受损零构件进行修复,在航空航天、兵器、核能及新能源汽车等制造业领域具有巨大的应用潜力。随着高性能喷涂系统及粉末发展,CSAM 应用空间将进一步扩展。但是,这项技术仍存在一些关键问题亟待解决,主要包括:

1) 喷嘴出口直径较大,喷涂过程控制较困难,增材构件精度低,制造复杂结构零构件存在局限性,需要开展诸如多轴联动 CSAM 及复合其他技术的增材制造工艺研究。

2) 低延展性及各向异性,相比较于块体材料,喷涂态材料延展性低,需要加强冷喷涂复合增材制造技术和后处理前后组织及性能映射关系研究。同时,喷涂态增材构件机械性能各向异性,不同方向上力学性能差别较大,缺少后续处理对不同方向力学性能的影响研究。

3) 增材构件内部缺陷检测及控制技术,包括颗粒之间的孔隙、微裂纹及结合较弱,大型结构件的增材

制造或修复过程中, 内部缺陷是影响增材构件质量的关键因素, 需建立内部缺陷与构件性能的内在关联。

4) CSAM 工艺的“遗传”性, 粉末性能对沉积体性能具有很大影响, 需要开展粉末特性与 CSAM 构件典型功能的映射关系及优化研究。

5) 性能预测方面, 传统以实验为主的探索工艺参数耗时耗力, 缺少 CSAM 构件的微观组织与性能之间的内在联系, 无法准确预测沉积体的性能, 性能预测是 CSAM 构件实现工艺-组织-性能一体化的重要研究方向。

6) 由于喷涂气体(He)及粉末制备工艺(雾化)的限制, CSAM 成本较高, 低成本的 CSAM 技术仍是未来研究的热点。

#### 参考文献 References

- [1] Frazier W E. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2014, 23(6): 1917
- [2] Kumar R, Kumar M, Chohan J S. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2021, 64: 828
- [3] Zhu J H, Zhou H, Wang C *et al.* *Chinese Journal of Aeronautics*[J], 2021, 34(1): 91
- [4] Kerstens F, Cervone A, Gradl P. *Acta Astronautica*[J], 2021, 182: 454
- [5] Liu Z Y, Zhao D D, Wang P *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2022, 100: 224
- [6] Nouri A, Shirvan A R, Li Y C *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2021, 94: 196
- [7] Kumar M B, Sathiya P. *Thin-Walled Structures*[J], 2021, 159(2): 107 228
- [8] Svetlizky D, Zheng B L, Vyatskikh A *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2022, 840: 142 967
- [9] Svetlizky D, Das M, Zheng B L *et al.* *Materials Today*[J], 2021, 49: 271
- [10] Li W Y, Yang K, Yin S *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2018, 34(3): 440
- [11] Srivastava A K, Kumar N, Dixit A R. *Materials Science and Engineering B*[J], 2021, 263: 114 832
- [12] Honarvar F, Varvani-Farahani A. *Ultrasonics*[J], 2020, 108: 106 227
- [13] Prashar G, Vasudev H. *Journal of Cleaner Production*[J], 2021, 310: 127 606
- [14] Yin S, Lupoi R. *Cold Spray Additive Manufacturing*[M]. Cham: Springer, 2021: 190
- [15] Xie X L, Yin S, Raolison R N *et al.* *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2021, 86: 20
- [16] Sova A, Grigoriev S, Okunkova A *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2013, 69(9): 2269
- [17] Li W Y, Cao C C, Wang G Q *et al.* *Science and Technology of Welding and Joining*[J], 2019, 24(5): 420
- [18] Moridi A. *Powder Consolidation Using Cold Spray*[M]. Cham: Springer, 2016
- [19] Vo P, Irissou E, Legoux J G. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2013, 22(6): 954
- [20] Cao C C, Li W Y, Zhang Z M *et al.* *Coatings*[J], 2022, 12(2): 210
- [21] Liu J, Liu Y, Suo X K *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2021, 30(4): 918
- [22] Wang Q, Han P, Yin S *et al.* *Coatings*[J], 2021, 11(2): 206
- [23] Li Xu(李旭), Wang Qiang(王强), Mao Xuan(毛轩) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(6): 2186
- [24] Huang J, Yan X C, Chang C *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2020, 395: 125 936
- [25] Jenkins R, Aldwell B, Yin S *et al.* *Optics & Laser Technology*[J], 2019, 115: 251
- [26] Cui Lang(崔焱), Wang Chunting(王春婷), Jia Li(贾利) *et al.* *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2021, 42(2): 139
- [27] Barnett B, Trexler M, Champagne V. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2015, 53: 139
- [28] Kumar S, Jyothirmayi A, Wasekar N *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2016, 296: 124
- [29] Ham G S, Wi D Y, Yang J M *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2019, 28(8): 1974
- [30] Xie C, Li H X, Zhou X L *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2019, 374: 797
- [31] Liao T Y, Biesiekierski A, Berndt C C *et al.* *Progress in Surface Science*[J], 2022, 97(2): 100 654
- [32] White B, Story W, Brewer L *et al.* *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*[J], 2020, 43(2): 317
- [33] Champagne V, Helfrich D. *Materials Science and Technology*[J], 2015, 31(6): 627
- [34] Champagne V K. *Journal of Failure Analysis and Prevention*[J], 2008, 8: 164
- [35] Vlcek J, Hardikar K, Juliano D R. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2016, 25(1): 183
- [36] Huang Rengzhong(黄仁忠), Sun Wen(孙文), Guo Shuangquan(郭双全) *et al.* *China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2020, 33(4): 16
- [37] Sun W, Chu X, Lan H M *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2022, 31: 848

- [38] Lynch M E, Gu W J, El-Wardany T *et al.* *Virtual and Physical Prototyping*[J], 2013, 8(3): 213
- [39] Irissou E, Poirier D, Vo P *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2022, 31(4): 908
- [40] Wu H J, Liu S W, Zhang Y C *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2021, 30(5): 1284
- [41] Villafuerte J. *Modern Cold Spray*[M]. Cham: Springer, 2015
- [42] Li Wenya(李文亚), Zhang Zhengmao(张正茂), Xu Yaxin(徐雅欣) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2022, 58(1): 1
- [43] Rojas D F, Li H Y, Orhan O K *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2022, 893: 162 309
- [44] Qi Yanfei(齐艳飞), Ren Xiqiang(任喜强), Zhou Jingyi(周景一) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2022, 51(2): 735
- [45] Xie J F, Cao S H, Bai X P *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2014, 43(12): 2989
- [46] Sun Xiaofeng(孙晓峰), Chen Zhenghan(陈正涵), Li Zhanming(李占明) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2018, 47(11): 3493
- [47] Huang Chunjie(黄春杰), Yin Shuo(殷硕), Li Wenya(李文亚) *et al.* *Surface Technology(表面技术)*[J], 2021, 50(7): 1
- [48] Perna A S, Viscusi A, Gatta R D *et al.* *International Journal of Material Forming*[J], 2022, 15(2): 1
- [49] Sun J Y, Yamanaka K, Zhou S Y *et al.* *Applied Surface Science*[J], 2022, 579: 151 873
- [50] Kim Y K, Lee K A. *Journal of Materials Science & Technology*[J], 2022, 97: 264
- [51] Sinclair-Adamson R, Luzin V, Duguid A *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2020, 29(6): 1525
- [52] Razavipour M, Legoux J G, Poirier D *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2022, 31: 525
- [53] Chen W Y, Yu Y, Tieu A K *et al.* *Tribology International*[J], 2020, 142: 105 992
- [54] Sousa B C, Massar C J, Gleason M A *et al.* *Journal of Biological Engineering*[J], 2021, 15(1): 1
- [55] Yu B, Tam J, Li W *et al.* *Materialia*[J], 2019, 7: 100 356
- [56] Jadhav S D, Dadbakhsh S, Goossens L *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2019, 270: 47
- [57] Gu Ruinan(顾瑞楠), Wong K S, Yan Ming(严明). *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica(中国科学: 物理学、力学、天文学)*[J], 2020, 50(3): 44
- [58] Singer F, Deisenroth D C, Hymas D M *et al.* *16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*[C]. Orlando: IEEE, 2017: 174
- [59] Campagnoli M R, Galati M, Saboori A. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2021, 72: 320
- [60] Guerreiro B, Vo P, Poirier D *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2020, 29(4): 630
- [61] Boyle C H, Meguid S A. *Nuclear Engineering and Design*[J], 2015, 293: 403
- [62] Keech P G, Behazin M, Binns W J *et al.* *Materials and Corrosion*[J], 2021, 72(1-2): 25
- [63] Feng Li(冯力), Li Dongting(李洞亭), Chang Jirong(畅继荣) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2020, 49(5): 1729
- [64] Hutasoit N, Rashid R A, Palasinamy S *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2020, 110(9): 2341
- [65] Huang C J, Li W Y, Feng Y *et al.* *Materials Characterization*[J], 2017, 125: 76
- [66] Li W Y, Wu D, Hu K W *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2021, 409: 126 887
- [67] Yandouzi M, Gaydos S, Guo D *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2014, 23(8): 1281
- [68] Story W A, Brewer L N. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2018, 49(2): 446
- [69] Sabard A, Hussain T. *Journal of Materials Science*[J], 2019, 54(18): 12 061
- [70] Huang C J, List A, Shen J J *et al.* *Materials & Design*[J], 2022, 215: 110 494
- [71] Sabard A, McNutt P, Begg H *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2020, 385: 125 367
- [72] Sample C M, Champagne V K, Nardi A T *et al.* *Additive Manufacturing*[J], 2020, 36: 101 371
- [73] Marzbanrad B, Toyserkani E, Jahed H. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2021, 289: 116 928
- [74] Cavaliere P, Silvello A. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2017, 26(4): 661
- [75] Petr kov  K, Kond  J, Guagliano M. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2017, 26(8): 1888
- [76] Petr kov  K, Kond  J, Guagliano M. *International Journal of Fatigue*[J], 2018, 110: 144
- [77] White B C, Story W A, Brewer L N *et al.* *International Journal of Fatigue*[J], 2018, 112: 355
- [78] Kovarik O, Siegl J, Cizek J *et al.* *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2020, 29(1): 147
- [79] Huang R Z, Sone M, Ma W H *et al.* *Surface and Coatings Technology*[J], 2015, 261: 278
- [80] Wang W, Han P, Wang Y H *et al.* *Journal of Materials*

- Research and Technology*[J], 2020, 9(4): 9073
- [81] Wu D, Li W Y, Liu K *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2022, 106: 211
- [82] Qiu X, Tariq N H, Qi L *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 780: 597
- [83] Qiu X, Qi L, Tang J R *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2022, 106: 173
- [84] Pertou M, Costil S, Wong W. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2012, 21(6): 1322
- [85] Wong W, Irissou E, Ryabinin A N *et al. Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2011, 20(1): 213
- [86] Morks M F, Zahiri S H, Chen X B *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2022, 31: 5549
- [87] Khun N W, Tan A W Y, Bi K J W *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2016, 302: 1
- [88] Wei Y K, Li Y J, Zhang Y *et al. Corrosion Science*[J], 2018, 138: 105
- [89] Luo X T, Wei Y K, Wang Y. *Materials & Design*[J], 2015, 85: 527
- [90] Binder K, Gottschalk J, Kollenda M *et al. Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2011, 20(1): 234
- [91] Zahiri S H, Fraser D, Jahedi M. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2009, 18(1): 16
- [92] Petrovskiy P, Sova A, Doubenskaia M *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2019, 102(1): 819
- [93] Petrovskiy P, Khomutov M, Cheverikin V *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2021, 405: 126 736
- [94] Zhou H X, Li C X, Luo X T. *Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2020, 29(5): 1054
- [95] Chen C Y, Xie Y C, Yan X C *et al. Additive Manufacturing*[J], 2019, 27: 595
- [96] Petrovskiy P, Travyanov A, Cheverikin V V *et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2020, 107(1): 437
- [97] Hollander D A, Von Walter M, Wirtz T *et al. Biomaterials*[J], 2006, 27(7): 955
- [98] Bocanegra-Bernal M H. *Journal of Materials Science*[J], 2004, 39(21): 6399
- [99] Marinelli G, Martina F, Ganguly S *et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2019, 83: 104 974
- [100] Marinelli G, Martina F, Ganguly S *et al. Additive Manufacturing*[J], 2020, 32: 101 009
- [101] Zhou L, Yuan T C, Li R D *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 707: 443
- [102] Thijs L, Sistiaga M L M, Wauthle R *et al. Acta Materialia*[J], 2013, 61(12): 4657
- [103] Li Q Q, Zhang B C, Wen Y J *et al. Applied Surface Science*[J], 2022, 593: 153 357
- [104] Kumar S, Rao A A. *Applied Surface Science*[J], 2017, 396: 760
- [105] Kumar S, Ramakrishna M, Chavan N M *et al. Acta Materialia*[J], 2017, 130: 177
- [106] Ozdemir O C, Schwartz P, Muftu S *et al. Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2021, 30(1): 344
- [107] Jafarlou D M, Sousa B C, Gleason M A *et al. Additive Manufacturing*[J], 2020, 47: 102 243
- [108] Tang J R, Zhao Z P, Li N *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2019, 377: 124 903
- [109] Kim J, Bae G, Lee C H. *Materials Characterization*[J], 2018, 141: 49
- [110] Yin S, Cavaliere P, Aldwell B *et al. Additive Manufacturing*[J], 2018, 21: 628
- [111] Champagne V K, Widener C A, Nardi A T *et al. Ndia Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium*[C]. Novi: Proceedings of the Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium, 2019: 1
- [112] Widener C A, Carter M J, Ozdemir O C *et al. Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2016, 25(1): 193
- [113] Liu Yongsheng(刘永胜), Zhao Yang(赵阳), Jiang Guangshun(姜广顺) *et al. Aviation Maintenance Engineering(航空维修与工程)*[J], 2020(12): 82
- [114] Chen Chaogang(陈朝刚). *Scientific and Technological Innovation(科学技术创新)*[J], 2020(13): 176
- [115] Trunov M A, Schoenitz M, Dreizin E L. *Combustion Theory and Modelling*[J], 2006, 10(4): 603
- [116] Wang M Z, Qiu L S, Zhao X J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2019, 757: 23
- [117] Zhao H L, Tan C W, Yu X D *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 741: 883
- [118] Won J, Bae G, Kang K *et al. Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2014, 23(5): 818
- [119] Byun G, Kim J, Lee C H *et al. Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2016, 25(3): 483
- [120] Lee S, Kim J, Seejo K *et al. Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2019, 28(3): 484
- [121] Chen J, Ma B, Feng S Q *et al. Surface Engineering*[J], 2019, 35(4): 351
- [122] Wu Hongjian(吴洪键), Li Wenbo(李文波), Deng

- Chunming(邓春明) *et al. China Surface Engineering*(中国表面工程)[J], 2020, 33(4): 1
- [123] Pattison J, Celotto S, Morgan R *et al. International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2007, 47(3-4): 627
- [124] Xue L J, Li Y S, Wang S D. *Journal of Laser Applications*[J], 2011, 23(4): 42 004
- [125] Wu H J, Xie X L, Liu M M *et al. Additive Manufacturing*[J], 2020, 35: 101 356
- [126] Yin S, Jenkins R, Yan X C *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 734: 67
- [127] Wu H J, Huang C J, Xie X L *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2021, 405: 126 703
- [128] Vargas-Uscategui A, King P C, Yang S *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2021, 298: 117 272
- [129] Hiraga H, Inoue T, Matsunawa A *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2001, 138(2-3): 284
- [130] Bray M, Cockburn A, O'Neill W. *Surface and Coatings Technology*[J], 2009, 203(19): 2851
- [131] Lupoi R, Sparkes M, Cockburn A *et al. Materials Letters*[J], 2011, 65(21-22): 3205
- [132] Barton D J, Bhattiprolu V S, Thompson G B *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2020, 400: 126 218
- [133] Jones M, Cockburn A, Lupoi R *et al. Materials Letters*[J], 2014, 134: 295
- [134] Luzin V, Spencer K, Zhang M X. *Acta Materialia*[J], 2011, 59(3): 1259
- [135] Vargas-Uscategui A, King P C, Styles M J *et al. Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2020, 29(6): 1508
- [136] Luzin V, Kirstein O, Zahiri S H *et al. Journal of Thermal Spray Technology*[J], 2020, 29(6): 1498
- [137] Oyinbo S T, Jen T C, Oviroh P O. *Materials Today: Proceedings*[J], 2021, 44: 1931
- [138] Seng D H L, Zhang Z, Zhang Z Q *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2022, 432: 128 068
- [139] Wang Q, Luo X T, Tsutsumi S *et al. Additive Manufacturing*[J], 2020, 35: 101 296
- [140] Marzbanrad B, Toyserkani E, Jahed H. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2021, 289: 116 928
- [141] Singh R, Schrufer S, Wilson S *et al. Surface and Coatings Technology*[J], 2018, 350: 64
- [142] Hu Ping(胡平), Ai Lin(艾琳), Qiu Xinyan(邱梓妍). *Chinese Journal of Lasers*(中国激光)[J], 2022, 49(14): 1 402 803
- [143] Msolli S, Zhang Z Q, Seng D H L *et al. International Journal of Solids and Structures*[J], 2021, 225: 111 065
- [144] Liu Z Y, Wang H Z, Haché M J R *et al. Acta Materialia*[J], 2020, 193: 191

## Research Status, Application and Challenges of Cold Spray Additive Manufacturing Technology

Cui Lang<sup>1,2,3</sup>, Liu Guang<sup>3</sup>, Feng Shengqiang<sup>3</sup>, Zhu Jihong<sup>1</sup>, Li Wenya<sup>2</sup>, Zhao Jian<sup>3</sup>, Jia Li<sup>3</sup>

(1. State IJR Center of Aerospace Design and Additive Manufacturing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3. Ningbo Branch of Chinese Academy of Ordnance Science, Ningbo 315103, China)

**Abstract:** Cold spray additive manufacturing technology is a solid-state additive manufacturing method that relies on the plastic deformation of powder particles to form bonds. The additive components have almost no defects such as oxidation, phase transformation, grain growth, cracks, etc. The lower deposition temperature has little effect on the heat of the matrix, and has the advantages of high additive efficiency and the manufacture of large components. It has attracted the attention of many national research teams and is recognized as a powerful and useful additive manufacturing and additive repair technology. In view of the increasing attention of scholars and industry in various countries to the cold spraying additive manufacturing technology, this paper attempted to summarize the microstructure and properties of typical cold spraying deposits (Cu, Al, Ti, Ta and other materials) on the basis of describing the cold spraying equipment, with emphasis on the application and new progress of cold spraying additive manufacturing technology in the field of national defense. At the same time, the challenges of cold spraying additive manufacturing technology were also pointed out. Finally, the remaining problems and development direction of cold spraying additive manufacturing technology were prospected.

**Key words:** cold spray; solid-state additive manufacturing; repair; heat treatment; fatigue performance

Corresponding author: Zhu Jihong, Ph. D., Professor, State IJR Center of Aerospace Design and Additive Manufacturing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88493914, E-mail: jh.zhu@nwpu.edu.cn