引用格式：郑正鑫，张艺川，岳雯雯，等. 铜合金增材制造研究进展[J]. 材料工程，2026，54(7)：161-176.
ZHENG Zhengxin，ZHANG Yichuan，YUE Wenwen，et al. Research progress in additive manufacturing of copper alloys[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(7)：161-176.

铜合金增材制造研究进展

郑正鑫，张艺川，岳雯雯，来佑彬*
（汕头大学 工学院，广东 汕头 515063）

摘要：铜因其优异的导电与导热性能在传统工业中得到广泛应用。随着复杂铜部件对高制造精度、低成本与高材料利用率的要求不断提高，增材制造为铜及铜合金的加工提供了新的发展契机。本文综述了铜粉与铜线的主要制备方法，包括电解法、等离子旋转电极制粉法、雾化法、拉丝法及丝材制备法，并归纳了各方法的优缺点与适用场景，重点讨论了当前应用于铜合金增材制造技术的发展现状，如激光粉末床熔融、定向能量沉积、黏结剂喷射、冷喷涂增材制造和线材电子束增材制造，系统评述了其在制备铜部件时的优势、瓶颈及技术挑战，探讨了铜的高反射率、高导热性、易氧化性及高热膨胀系数等材料特性对增材制造工艺过程的影响，并提出适当增加扫描间距和激光功率、切换激光源、表面改性、后处理等可供参考的应对策略。

关键词：铜合金；粉末制备；增材制造；工艺优化
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000363　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000363
中图分类号：TG146.1^{+}1　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)07-0161-16

Research progress in additive manufacturing of copper alloys

ZHENG Zhengxin，ZHANG Yichuan，YUE Wenwen，LAI Youbin*
（College of Engineering，Shantou University，Shantou 515063，Guangdong，China）

Abstract：Copper is widely used in conventional industries owing to its excellent electrical and thermal conductivity. With the growing demand for complex copper components featuring higher manufacturing accuracy，lower cost，and improved material utilization，additive manufacturing（AM）has opened up new opportunities for processing copper and its alloys. This review summarizes the major production routes for copper powders and wires，including electrolytic methods，plasma rotating electrode processing，atomization，wire drawing，and wire fabrication method，and compares their advantages，limitations，and suitable application scenarios. It further highlights recent progress in AM technologies for copper alloys，such as powder bed fusion，directed energy deposition，binder jetting，cold-spray additive manufacturing，and wire-based electron beam additive manufacturing，and systematically discusses their advantages，bottlenecks，and key technical challenges in fabricating copper parts. In addition，the effects of copper's intrinsic material characteristics—high reflectivity，high thermal conductivity，susceptibility to oxidation，and high thermal expansion coefficient on AM processes are analyzed. Finally，potential mitigation strategies are proposed，including appropriately increasing scan spacing and laser power，switching laser sources，surface modifications，and post-processing treatments.

Key words：copper alloy；powder preparation；additive manufacturing；process optimization

在传统工业中，铜是重要的材料之一。铜因其极佳的导电性、导热性[1]以及抗腐蚀性能[2]，被广泛应用在电子设备、汽车、航空航天领域中。在传统制造中，制备复杂几何形状的铜部件往往难以实现或成本较高，尤其是减材制造过程（如铣削、车削等）又往往伴随着大量材料的浪费。3D 技术，亦称为增材制造

(additive manufacturing,AM)或快速成型,在早期阶段因成本高昂而不具备市场可行性。随着技术的日益成熟及成本的显著降低,增材制造已被广泛应用于航空航天、医疗、汽车工业等众多行业领域。该技术通过计算机辅助设计将概念转换为三维实体,进而通过将三维模型切片导入打印机,以逐层堆叠的方式最终形成三维实体[3]。因此,增材制造在生产铜部件时具有较为明显的优势。设计师能够设计制造复杂的铜部件,包括内部结构和优化的几何形状。并且由于是逐层构建,在制备复杂部件时减少了材料浪费,提高了铜材料的利用效率,间接减少了成本。3D 打印铜部件允许单件生产和高度定制化,适合小批量生产和特殊应用的需求。通过精细控制制造过程,可以改进铜部件的微观结构,从而优化其力学性能和热性能。

铜在增材制造中的应用不仅保持了其传统的物理和化学特性优势,还通过技术创新拓展了其应用领域和功能。增材制造提供了一种高效、灵活的生产方式,使得铜材料能够在更多高科技和特定需求领域发挥重要作用。自 2014 年起,NASA 在马歇尔航天飞行中心和格伦研究中心致力于开发 GRCop 合金(铜-铬-铌合金,具有高导热性、高强度及弥散强化特性,适用于高温、高热流环境)的增材制造工艺[4],通过选择性激光熔化技术生产的燃烧室对其性能进行了火箭发动机热火测试,证明了该种燃烧室的性能。此外,在航空航天推进系统中,需要材料在极端条件下(如高温、高压和强冲击)保持稳定和高强度。推进系统要求使用能够承受高温和高应力的材料,而使用增材制造技术增强的 Cu-Cr-Nb 合金[5],由于其高强度与稳定性,常被用于制备一些关键的结构部件。Simpson 等[6]采用增材制造技术制备了优化的几何形状铜线圈。通过调整线圈构型,提升了其在电机中的性能。实验测试证明,这种新型绕组设计能够有效降低交流损耗。该优化在电动车辆、航空领域及可再生能源发电机的特定工况下(如低速/高速行驶、高转速和高负载运行等),对提升系统能效与可靠性具有显著效果。铜在增材制造中的应用也存在一些劣势,比如铜的高导热性、高反射率在生产过程中难以控制,可能导致打印缺陷等[7]。本文总结了铜粉/丝的主要制备方法,包括电解法、等离子旋转电极制粉法、雾化法、拉丝法及丝材制备法等,讨论了铜合金在各增材制造技术领域的研究进展,以及针对铜的特性做出的工艺优化和性能提升,旨在梳理能够安全稳定实现复杂铜结构成形的方法,为铜合金增材制造研发创新提供思路与参考。

1 原料制备

在金属增材制造中,球形金属粉末是最常用、最核心的材料,而丝材仅在几种特定类型的增材制造技术中应用。铜合金对粉末的粒度有特定要求,较小的粒度能够增加比表面积,提高烧结驱动力,使烧结过程更顺畅,并增强层间连接,但过小的粒度可能引起粉末团聚,降低流动性和均匀性,影响成品质量[8]。目前对于增材制造,粉体最佳粒径大小分别为 30~50 μm(激光成型)和 50~90 μm(电子束成型)[9-10]。此外,粉末的循环利用性、流动性、振实密度和纯度也是关键质量因素。理想的粉末形态是球形或近球形,以确保最佳的流动性和铺粉均匀性。为保证成品的表面平整性和结构完整性,铺粉的厚度也同样重要[11]。而在制备铜丝时,需要严格控制铜丝的化学成分和纯度,以确保其直径和尺寸一致性,同时保持表面的光滑度和清洁度。此外,还需优化铜丝的力学性能和热特性,以适应特定的打印技术和设备需求。铜丝的包装和贮存也应避免环境损伤,如氧化或变形,以保证其在使用过程中的性能和质量。

1.1 电解法

电解法是一种化学方法,常用于铜、锌等非贵金属的粉末生产[11]。电解原理是使用抛光不锈钢作为阴极,电解铜板作为阳极,硫酸盐体系溶液作为电解液。阳极的铜溶解进入电解液中,而阴极附近溶液中的铜离子沉积在阴极上。但是,这一过程会受到电解液成分、温度以及电流密度的影响。通过调控电解液硫酸浓度、Cu^{2+}浓度、电流密度和温度,可在一定范围内实现对铜粉粒度及电解能耗的有效控制[12]。其中,Cu^{2+}浓度直接影响铜粉的沉积质量与生产效率;适当升温可降低电解液黏度,加快离子扩散并提高导电率,从而提升电流效率。电解法需要定期收集阴极板上的铜粉,在工艺上还需注意铜粉的氧化以及废液的处理等。典型电解铜粉的宏观形貌呈树枝状或不规则块状结构,这与电解过程中电流密度、温度等工艺参数密切相关。

尽管电解法生产的铜粉纯度高、性能好,但是生产效率相对较低,且废液处理要求也很严格,在一定程度上限制了电解铜粉的生产。

1.2 等离子旋转电极制粉法

等离子旋转电极制粉技术(plasma rotating electrode process,PREP)是一种先进的高品质球形金属粉末生产技术[13]。该技术利用高速旋转的电极产生离心力,将液膜甩出形成液滴,在惰性气氛中雾化凝

固成球形粉末。这一技术在制备超低间隙元素含量的球形金属粉末方面具有显著优势，制备的金属粉末具有高球形度，较少卫星粉且几乎无空心粉。图 1 为金属粉末制备典型工艺原理示意图[10,13]，其中 PREP 的技术原理图如图 1(a)所示[13]。PREP 通过高温等离子体对高速旋转的自耗电极棒端面进行熔化，电极棒端面形成熔融液膜并在离心力作用下破碎成液滴，这些液滴在表面张力作用下球化并冷凝为粉末。根据实验结果，这一技术分为转移弧型和非转移弧型两类，适用于制备多种合金体系粉末，包括钛合金、不锈钢、高温合金、难熔金属、轻金属、贵金属和金属间化合物等。

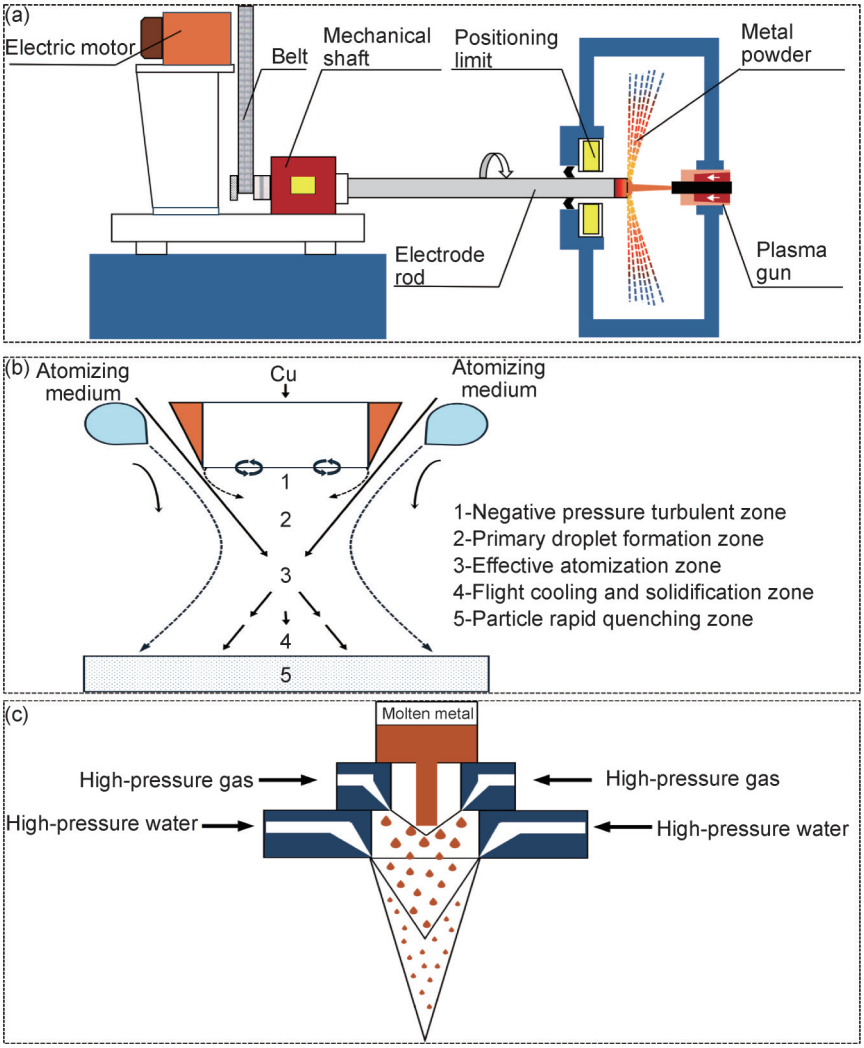


图 1　金属粉末制备典型工艺原理示意图

(a)等离子旋转电极制粉技术[13]；(b)雾化法[10]；(c)水气联合雾化[10]

Fig.1　Schematic diagrams of typical metal powder production processes

(a)PREP[13]; (b)atomization[10]; (c)combined water and air atomization[10]

通过 PREP 技术制备的铜粉粒度分布均匀，且可以通过调整工艺参数来控制粉末的粒径。此外，所得粉末具有高纯度和较好的球形度，粒度分布范围较窄，无团聚现象，流动性好，在金属增材制造过程中铺粉均匀性好，打印产品致密度和表面清洁度高[10]。目前，PREP 技术在制备特殊合金和高性能金属粉末方面显示出巨大的潜力。尽管 PREP 技术具有诸多优点，但其设备成本较高，且对操作条件的控制要求严格，这也在一定程度上限制了其在应用中的推广。

1.3　雾化法

雾化法(atomization)，也称为原子化法，主要用于金属粉末的生产，特别是铜粉末。在雾化法制备金属粉末的过程中，熔融的金属先在高压气体或机械力的作用下被分散成微小的液滴，随后这些液滴迅速冷却和凝固形成粉末。原子化法能够控制粉末的粒度和形状，适用于生产高纯度和均匀粒径的金属粉末。

图 1(b)是雾化法原理结构图[10]。根据雾化介质不同，雾化法主要分为水雾化、气雾化和水气联合雾化等[14]。

水雾化是以水为雾化介质来制备铜粉末。该方法具有效率高、粒径集中、成本低等优点。谭芳香等[15]研究讨论了不同喷嘴类型、冷却水位、雾化压力等因素对铜粉末性能的影响，通过优化雾化机构和调整工艺参数，实现了对铜粉松装密度和粒径分布的有效控制。

气雾化是通过高速气流将液态金属流粉碎为小滴，并快速冷凝成粉末的过程。气雾化法具有成熟的工艺、高成粉率和相对较低的成本。张玮等[16]系统探究了该技术在增材制造粉体制备中的应用，通过比较自由降落式与限制式喷嘴的特点，发现采用限制式喷嘴的紧耦合雾化法，能够获得粒度更细小、分布更均匀的粉末。

水气联合雾化法是一种结合水雾化和气雾化两种技术的雾化方法[17]。它利用高压水和气体的共同作用来雾化熔融金属，形成细小的金属粉末。这种方法在制备微细金属粉末方面具有特定的优势，尤其是在粒度细化和控制粉末形态方面表现出较好的效果。在水气联合雾化技术中，熔融金属在重力作用下从喷嘴流出，首先遭遇高压气体的冲击，这一阶段主要是利用气体的动力作用将熔融金属雾化成较大的液滴。随后，这些液滴会进一步通过高压水流的作用进行二次破碎，形成更小的液滴。这些小液滴在飞行过程中迅速凝固，形成粒度更细的金属粉末。其原理图如图 1(c)所示[10]。这种联合雾化技术的关键优势在于，能够有效提高粉末的球形度和减少粉末的氧化。由于金属液滴在经历二次破碎后的表面积明显增加，有利于热量的迅速散失和粉末的快速固化，从而降低粉末内部氧化的可能性。同时，这种技术可以生成粒度分布较均匀的粉末，适合于精密制造领域的应用。刘坤杰等[18]使用水气联合雾化法来制备用于金刚石工具的铁基预合金粉末。相比传统的水雾化法，生产出的球形粉末氧含量更低、粒度更细、形态更规则，从而提升了金刚石工具的性能和使用寿命。这种新型预合金粉末制成的金刚石工具在切割效率和耐用性方面表现更好，切割寿命比常规方法制备的长 1.62 倍，且具有更佳的切削锐利度和更低的制造成本。吴环[19]通过调整水雾化压力，制备出不同粒度的铜粉。当水雾化压力达到 99 MPa 时，可以得到平均粒径最小且氧含量最低的铜粉。此外，通过喷雾干燥造粒法对铜粉进行了改性处理，研究了黏结剂和分散剂含量对粉末形貌的影响，发现黏结剂含量为 2%（质量分数，下同）、分散剂含量为 1% 时，可以制备出具有更高球形度的粉末。

1.4 其他铜粉制备方法

1.4.1 化学还原法

温益等[20]用明胶作为分散剂，通过葡萄糖和水合肼两步法液相还原 $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 制备超细铜粉。实验结果表明，这种方法可以有效控制铜粉的粒径分布和形貌。当水合肼浓度为 4.8 mol/L、反应温度为 80 ℃ 时，可以制备出粒径分布良好、团聚程度低的铜粉。此外，明胶的添加对铜粉的形貌和粒径有显著影响，当明胶含量为 3% 时，可以得到粒径最小、分布均匀的铜粉，如图 2(a)所示[20]。这种方法的优点是成本较低，但对反应条件和原料纯度的要求较高。

1.4.2 物理机械法

物理机械法通常指通过机械研磨与粉碎铜块或铜片来制备铜粉。该方法工艺相对简单，但可能导致粉末粒度不均与纯度下降。该思路也被应用于从含铜废料中回收铜粉。例如，王发展[21]使用磁选除铁来去除电子废料中的铁磁性物质，通过破碎机械将废线路板解离成较小颗粒，从而实现金属和非金属的初步分离，然后通过球磨机的细化作用进一步除去杂质，并通过酸浸处理去除非金属杂质，提高铜的纯度。最后，经过球磨细化处理获得高纯度的铜粉末。铜粉微观形貌，如图 2(b)所示。这个工艺流程既环保又高效，对

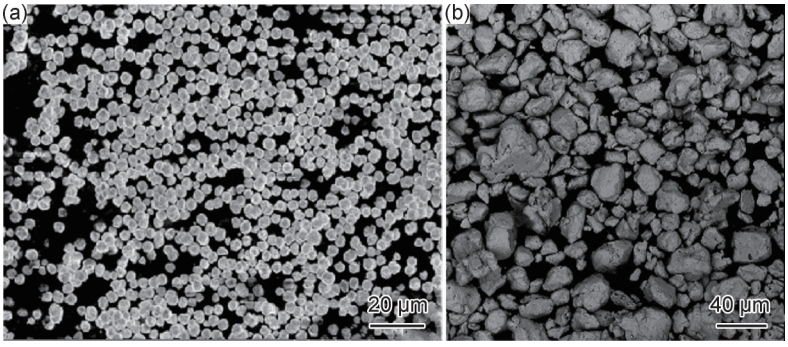


图 2 采用化学还原法(a)[20]和物理机械法(b)[21]制备的铜粉微观形貌

Fig.2 Micro-morphologies of copper powders prepared by chemical reduction method(a)[20] and physico-mechanical method(b)[21]

于从废电子产品中回收铜资源具有重要的实际意义。

1.5　丝材制备法

制备丝材的方法主要包括熔融挤压法[22]（金属材料被加热到熔点以上，使之熔化，然后通过一定形状的模具挤出，冷却固化后形成连续的丝状材料）、冷拔法[23]（在金属未熔化的状态下，通过冷加工的方式进行拉伸形变，制得细长的金属丝）以及拉丝法[24]等。其中，拉丝法是制备铜丝最常用的一种工艺。这种方法主要用于制备直径较小的金属丝，原料金属在未完全熔化的状态下，通过多道次的拉伸，使金属截面逐渐减小，直至形成所需直径的金属丝。拉丝法可以制得表面光滑、直径均匀的高质量金属丝。此过程中关键的操作参数包括拉拔速度、拉拔力、模具及润滑剂温度。通过调节模具的角度和长度以及优化润滑条件，可以有效控制摩擦和热量生成，从而保证产品的力学性能和表面质量。

Cao 等[25]使用热水平连续铸造技术制备直径为 8.0 mm 的单晶铜棒，再经过多阶段拉伸处理减至 0.2 mm。通过控制不同的拉伸速度和退火条件，系统地评估了这些变量对铜线力学性能和电性能的影响。实验结果显示，适当的拉伸和退火处理可以显著提高铜线的抗拉强度和延展性，同时在高温退火处理下，铜线的微观结构经历从单晶到多晶的转变，进一步优化了其抗拉强度、电阻率等性能。为了进一步研究拉拔过程的影响因素，Santana 等[24]通过使用有限元模拟对铜线拉拔过程进行了详细分析，模拟考虑铜线和模具的接触摩擦，探索模具设计（包括模具的角度和承载区长度）以及操作条件（如拉拔速度和润滑剂的应用）对拉拔力、温度和应力分布的影响。结果表明，优化模具角度和润滑条件可以显著减少摩擦和材料的应力，同时合理的拉拔速度能够有效控制由摩擦产生的热量，防止铜线过热。

2　铜合金增材制造技术发展现状

迄今为止，铜及铜合金部件已经应用到多种增材制造技术中。国内外铜合金增材制造技术主要集中在粉末床熔融（powder bed fusion，PBF）、定向能量沉积（directed energy deposition，DED）、黏结剂喷射（binder jetting，BJ）、冷喷涂增材制造（cold spray additive manufacturing，CSAM）以及线材电子束增材制造（wire electron beam additive manufacturing，WEBAM）等。其中，PBF 技术根据其能量源的不同又分为激光粉末床熔融（laser powder bed fusion，LPBF）和电子束熔化（electron beam melting，EBM）；DED 根据其能量和原材料的不同可分为激光定向能量沉积（laser directed energy deposition，LDED）和丝弧增材制造（wire and arc additive manufacturing，WAAM）。为清晰对比，表 1 总结了这些技术的原料、能量源以及常见的应用领域。不同增材制造工艺示意图如图 3 所示[26-29]。

表 1　铜合金增材制造技术分类

Table 1　Classification of copper alloy additive manufacturing technology

Process	Materials used	Energy source	Application field
LPBF	Powder	Laser	Aerospace，medical
EBM	Powder	Electron beam	Aerospace
LDED	Powder/Wire	Laser	Repair
WAAM	Wire	Wire electron beam	Ship or construction industry
BJ	Powder		Complex sand molds and ceramic parts
CSAM	Powder		Repair
WEBAM	Powder/Wire	Electron beam	Aerospace，energy

2.1　激光粉末床熔融技术

激光粉末床熔融又称激光选区熔化（selective laser melting，SLM）[30]，多用于金属零件的制备，是目前成型精度最高的金属增材制造工艺。对于形状复杂的零件，可直接由三维模型直接形成最终的零件，无需模具且基本不需要后续机械加工。由于 SLM 设计自由度较高、交货期较短的特点[31]，该技术更适合应用于制备小型和精细的组件。如图 3(a)所示，SLM 通过使用高能量激光束逐层熔化粉末金属来构建零件，这个过程通常在惰性气体（如氩气或氮气）环境中进行，以防止金属氧化。惰性气体主要有两个作用[26,32]：(1)保护熔池与粉末床，防止其因气氛失控而发生氧化，并抑制工艺过程中产生的液体或粉末飞溅物；(2)驱散激光与材料作用时产生的蒸汽羽流，尽可能减少羽流对激光的干扰，同时保护光学窗口，避免金属蒸汽在其上沉积和冷凝。

在激光粉末床熔合过程中，首先机器上的构建平台被加热，以减少因温差引起的变形。致动器提升粉

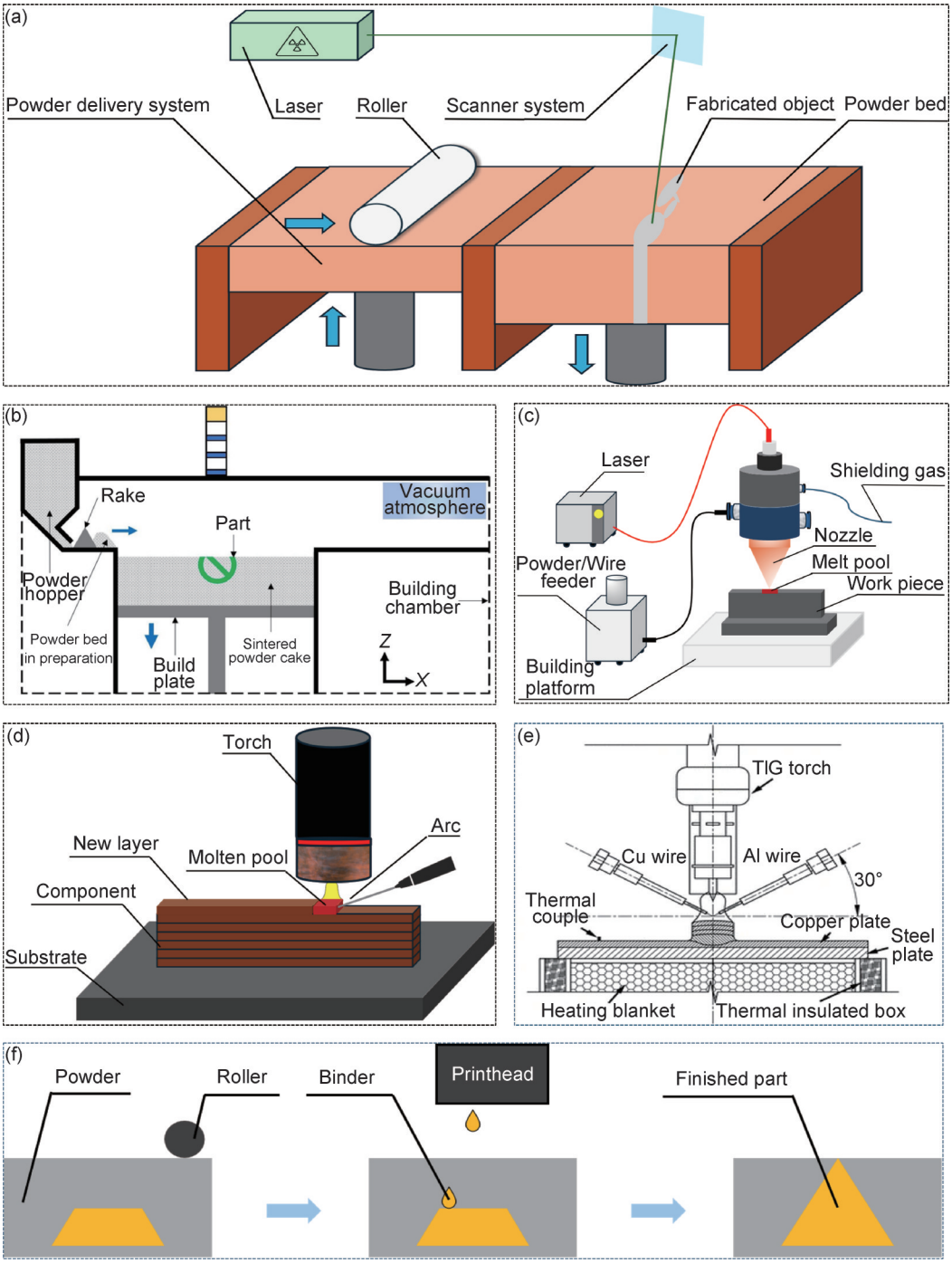


图3 不同增材制造工艺示意图

(a)LPBF;(b)EBM[26];(c)LDED;(d)WAAM[27];(e)铜铝合金工艺设置[28];(f)BJ[29]

Fig.3 Schematic diagrams of different additive manufacturing processes

(a)LPBF;(b)EBM[26];(c)LDED;(d)WAAM[27];(e)copper-aluminium alloy process setup[28];(f)BJ[29]

末盒,并分配预定量的铜粉。然后使用整平辊在施工平台上形成均匀的粉末层,多余粉末被推到另一个料筒中。通过高能激光熔化粉末,形成约100 μm长的熔池。最后施工平台根据每层厚度(通常在20~100 μm之间)下降,重复这个过程直到零件完成[33]。

Badrinarayan等[34]报道了使用SLM方法间接制备纯铜零件。目前,在铜及铜合金的增材制造领域,SLM是研究最深入、应用最成熟的技术。本文对近年来SLM铜合金的性能研究结果进行了总结,如表2[5,35-44]所示。

SLM成形质量受多项工艺参数影响,主要包括激光功率、光斑尺寸、扫描速度、舱间距、层厚及基板预热温度等[45]。其中,激光功率与扫描速度是实际生产中最核心的控制变量。Jadhav等[46]系统地研究了激光

表 2　SLM铜合金性能研究结果总结

Table 2　Summary of properties research results of SLM copper alloy

Copper alloy	Result	Reference
Cu-Cr-Nb	The sample density of the fabricated alloy is higher than 99.5% and the addition of Y_2O_3 nanoparticle reinforcement significantly increases the hardness of the Cu-Cr-Nb alloy.	[5]
Cu-4Sn	The relative density and Vickers hardness of the samples were mainly determined by the laser power. The highest relative density exceeded 93 percent of the theoretical density and the Vickers hardness reached $118HV_{0.3/5}$ (the hardness was measured on the polished cross-section using a Vickers hardness tester under a 2.94 N load applied for 5 s). The optimum tensile strength was in the range of 316-320 MPa.	[35]
Cu-Sn10	There is a non-linear relationship between the density and mechanical properties of the tin-bronze strip samples and the laser energy density, with the best performance being obtained at 220 J/mm^2. The yield and final strengths of the SLM samples were increased from 120 MPa and 180 MPa for the cast samples to 220 MPa and 420 MPa, respectively, and the elongation was also increased from 7% to 17%.	[36-38]
Cu-10Zn	The parts achieved an ultimate tensile strength of 269.2 MPa, a yield stress of 203.4 MPa, an elongation of 26.4% and an electrical conductivity of 43.19%ICAS. Experimentally, it was found that the highest relative density (99.97%) was achieved when using a laser power of 1800 W, a scanning speed of 300 mm/s and a powder spreading distance of 0.14 mm.	[39]
Cu-15Ni-8Sn	The yield strength $R_{p0.2}$, ultimate tensile strength R_m, elongation A and modulus of elasticity E of the SLM samples increased by 67%, 24.6%, 360%, and 7%, respectively, compared with those of ingots.	[40]
Cu-15Sn	The unannealed samples have higher tensile strength and hardness, whereas the annealed samples show better ductility (elongation over 20%), but with reduced strength and hardness.	[41]
CuCrZr	The samples exhibit excellent mechanical properties. The average tensile strength is 321 MPa, the average yield strength is 244 MPa, the average modulus of elasticity is 98.9 GPa, and the elongation at break is up to about 25%.	[42-43]
Cu-Cr-Zr-Ti	The relative density of the samples was as high as 97.9%, and the tensile strength and elongation at break at 20 ℃ were 195-211 MPa and 11%-16%, respectively. Both parameters were decreased at increasing temperature.	[44]

功率(200～500 W)与扫描速度(100～1000 mm/s)对纯铜SLM成形的影响。研究发现,在较低的200 W功率下,部件普遍存在未熔颗粒与熔池不稳定;当功率升至300、400 W时,在较低扫描速度下可获得稳定熔池,但高速下稳定性下降;在500 W的较高功率下,扫描速度在800 mm/s以内时熔池较为稳定,但达到1000 mm/s则会导致孔隙增多与熔池失稳。其中,在500 W激光功率与800 mm/s扫描速度组合下,成功制备出了接近全密度的纯铜部件。表明通过合理匹配激光功率与扫描速度,能够有效提升纯铜零件的SLM成形质量。

理论上,鉴于铜的高反射率与高热导率,采用SLM成形纯铜通常需要较高的激光能量密度与功率,以获取高致密度。然而,这并不意味着低功率激光无法制备出性能良好的部件。Lykov等[47]使用最高输出功率为200 W的CO_2激光器研究纯铜粉末的SLM过程,通过SEM分析了抛光后的试样孔隙率,并进行拉伸实验评估力学性能。调整SLM参数发现,孔隙率最低的样品拉伸强度为149 MPa。因此,尽管使用低功率激光进行铜的SLM加工存在挑战,但通过优化SLM参数依然能够实现试样相对较高的密度和较好的力学性能。

2.2　电子束熔化技术

EBM技术作为另一种PBF技术,其基本原理与激光粉末床熔融相似,主要区别在于能量源不同。EBM首先是铺设一层金属粉末,使用电子束按照预定路径熔化粉末,随后降低工作台一个层厚的高度,并铺设新的粉末层,重复这一过程直至构建完成,其示意图如图3(b)所示[26]。EBM通过高功率的电子束(通常为1～3 kW)作为热源,逐层熔化铜粉,从而制造出复杂的三维铜结构[48]。由于电子束的高能量吸收率和预热步骤,铜易于通过EBM成形,在电导率和热导率方面均接近或达到传统工艺制造的铜材料水平。在EBM中,金属粉末的粒度通常高于40～100 μm,因此可以使用更高的层厚度(50～150 μm),但这两个因素也将导致表面粗糙度增加[26]。

Lodes等[49]成功地制造出相对密度高达99.95%的铜件。图4为纯铜样品相对密度随线能量的变化,总体上线能量越高,样品越致密,图中的水平虚线表示相对密度 ,垂直虚线表示达到该判据所需的线能量(约0.275 J/mm)。因此,适当的线能量输入关键在于避免粉末未熔化和过度熔化。Raab等[50]通过优化调整EBM参数制备了99.95%相对密度的铜部件,其孔隙率非常低,电导率达到55.82 MS/m,热导率高达400.1 W/(m·K),已接近其理论最大值。

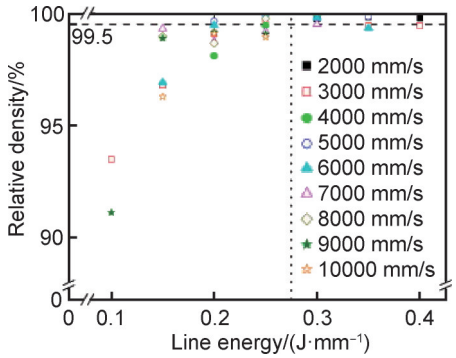


图4 纯铜立方体样品的相对密度与线能量关系[49]

Fig.4 Relative density of pure copper cubic samples as a function of line energy[49]

类似地，Ramirez等[51]通过优化EBM参数来控制铜组件的微观结构，这些调整显著提高了铜组件的硬度（从57HV提升到88HV），说明通过精细控制制备过程中的电子束参数可以有效改善材料的力学性能和耐磨性，为高性能金属部件的制备提供新的可能性。Guschlbauer等[52]通过调节电子束功率和扫描速度，研究了铜样本微观结构的变化，发现其结构从柱状转变为接近等轴形态。虽然加工参数影响微观结构，但对电导率和硬度影响较小。此外，样本的垂直裂纹显著影响机械强度。为优化电子束熔化加工纯铜，使用高纯度、低氧含量的气雾化铜粉，采用恒定电流扫描策略保证加工一致性，控制加工温度在300～450 ℃，有效降低裂纹和变形风险。通过对上述工艺参数的优化，成功地制备出相对密度大于99.5%的纯铜组件，其最高电导率可达59.1 MS/m。在特定取向拉伸测试条件下，该组件的抗拉强度约为177 MPa、断后伸长率约为59%。这些结果证明EBM技术在加工高性能纯铜材料方面的巨大潜力。

2.3 激光定向能量沉积技术

LDED使用高功率激光作为热源。如图3(c)所示，其工艺流程主要为：首先对材料进行快速加热，在激光作用下，材料熔化形成熔池，随着激光束的移动，基体和材料被熔化，熔池凝固后逐层制造，形成最终的零件[53]。

Yadav等[54]研究了铜-镍合金的沉积性能，使用2 kW光纤激光的LDED系统来沉积铜-镍（Cu-Ni）合金层，实验探究激光功率、扫描速度和粉末组成对沉积层几何形状的影响。结果表明，提高激光功率会增加沉积轨迹的宽度和高度，但减小扫描速度同样能增加轨迹宽度和高度，且增加铜的比例会降低轨迹高度但增加其宽度。通过优化参数，可以有效控制沉积件的几何形状和微观结构，从而制备出适用于高热传导和强度需求的铜-镍功能材料。之后Yadav等[55]提出了一种有效的使用LDED技术制造复杂铜部件的方法，通过改变LDED过程参数进行单轨道沉积实验，确定了制造大体积铜结构的过程窗口，并采用了三种不同的层间处理方案：恒定单位粉末供给激光能量（laser energy per unit powder feed，LEPF）、递减LEPF和递增LEPF。在递增LEPF方案中，制备的铜块显示出99.9%的相对密度，并通过X射线衍射确认了纯铜相的存在。微观结构分析显示，所制铜块主要由等轴晶粒构成，平均晶粒为24.47 μm。此外，通过硬度测试，铜块的维氏硬度为77HV（0.98 N载荷、保持10 s条件下），屈服强度为135～152 MPa，最终抗拉强度为277～288 MPa，这些力学性能均高于LPBF制造和锻造的铜样本。

激光金属沉积（laser metal deposition，LMD）也是LDED的一种，其使用高强度的激光束作为热源，金属粉末为原材料。LMD技术相比于基于粉末床的增材制造技术，允许进行混合制造（增材和减材）和多材料处理[31]，这意味着可以应用、交换和现场混合各种粉末，实现具有局部材料特性的多材料组件。另外，LMD技术在制备复杂的原型部件方面表现出色，它可以在模具插入件中局部实现铜特性，显著提高性能并缩短生产周期。

Siva等[56]研究了纯铜在不同波长激光照射下的吸收率。纯铜在近红外波段具有极高反射率，其对1090 nm红外激光的吸收率仅为4%，难以有效耦合激光能量，而当波长缩短至可见光范围时，吸收率显著提升：525 nm绿光的吸收率达到54.5%，457 nm蓝光的吸收率则进一步提高65.2%。Ono等[57]开发的蓝色二极管激光金属沉积系统可用于高效增材制造纯铜杆，该系统使用100 W的蓝色二极管激光器，光纤芯径为100 μm，能够将激光能量更加精确和集中地传输到工件表面，从而提高激光的强度和加工效率。通过精确控制激光功率、粉末喂送率及加工速度，可以在短时间内精确制造出形状和质量优异的纯铜杆。实验数据显示，不同的加工条件会影响杆的形成模式和能量利用率。该技术显著提升了制造速度、灵活性及制品质量，但同时也面临着激光参数精确控制、材料性能一致性以及设备成本较高等问题。

2.4 丝弧增材制造技术

在金属丝作为原料和电弧作为热源的情况下，DED通常被称为WAAM[58-59]。其工艺过程类似于传统焊接（示意图如图3(d)[27]所示），丝材（铜、铝、钛、不锈钢等[60]）被送入焊枪，用于后续的熔化和沉积过程，而电弧产生的高温能够熔化金属丝。熔化的金属通过焊枪逐层沉积在基板或已沉积的层上[61]。通过精

确控制焊枪的移动，可以按照预设的路径和图层信息进行沉积。沉积的金属层在冷却过程中固化，形成部件的一部分。冷却过程需要仔细控制，以防止部件出现热应力和变形。在多层沉积过程中，需要监控和控制每一层的质量[62]，包括层间黏合、孔洞形成和微观结构等。WAAM制备的部件通常需要后处理[63]（如去除支撑结构、机械加工以达到所需的表面粗糙度和尺寸精度）以及热处理，以优化材料的力学性能。

WAAM的主要优势[61]在于沉积效率高、材料利用率高、综合制造成本低。但WAAM同时也面临多种挑战[64]，如控制热输入、优化层间黏合质量、减少残余应力和提高制造精度等。Treutler等[65]提出了优化WAAM过程中铜材料使用的策略：(1)调整焊接参数，如熔池形状控制和能量输入管理，以改善铜的打印质量和减少变形；(2)通过光学监控等方法控制焊接过程，以维持构件的准确几何形状，并通过等待时间或主动冷却应对热积聚问题；(3)优化路径规划，以减少残余应力和变形。通过这些优化方法，可以显著提高WAAM制备的铜件质量，拓宽其在工业应用中的适用性。

Rodrigues等[27]通过X射线衍射分析发现，WAAM制备的铜部件中形成了由α相(Cu)和金属间化合物（如NiAl和Fe_3Al）组成的均匀微观结构。表明WAAM过程中的热处理能够在铜材料中引入新的相结构（这些结构在原始基材中并不存在）。这些新形成的结构成分，特别是金属间化合物，使材料硬度显著增加（从基材的181HV增加到经WAAM后热处理的210HV）。硬度的提升也意味着通过WAAM技术制备的铜材料在力学性能上有显著提升，尤其是在耐磨性和抗压强度方面。Chen等[66]使用WAAM制备$CuAl_8Ni_2Fe_2Mn_2$合金，并研究了沉积高度对合金微观结构和力学性能的影响。发现随着层高的增加力学性能下降，而微观结构呈现出高度定向，并伴随着力学性能的各向异性行为。这项研究不仅展示了WAAM技术在制备复杂铜部件方面的潜力，还为改善和定制材料的特定性能开辟了新的途径。表明通过适当的工艺控制和后续处理，可以极大地扩展铜及其合金的应用范围，从而满足更为苛刻的工业应用需求。

Dong等[28]采用创新的WAAM过程，通过单独送入纯Cu和Al线材到熔池中，在纯铜板上原位制备Cu-Al合金，其工艺设置图如图3(e)所示。该技术使用气体钨弧焊过程产生熔池，解决了多个制造问题，如在高热导性的铜板上打开沉积熔池，以及以低送丝速度将铝丝导入熔池。成功生产了恒定的预设计铝含量的铜富集Cu-Al合金。为了均匀化材料和改善力学性能，分别在1073 K(800 ℃)和1173 K(900 ℃)对样品进行2次均质化热处理。对原始制造和热处理后样品的材料和其力学性能进行了详细比较和分析，发现随着退火温度的提高，沉积相的含量减少，样品强度和韧性逐渐改善，微观结构变化较小，为Cu-Al合金的原位制造打开了一扇大门。通过这种方法，可以在保持材料特性的同时，实现更灵活和经济高效的生产方式，特别是在需要定制合金成分和性能的领域。

2.5　黏结剂喷射技术

BJ是一种在材料表面或内部均匀分布黏结剂的方法。在打印过程中，打印头选择性地将液体结合液滴沉积到粉末床上，以结合粉末形成一层粉末层（类似于PBF的方式）。之后，粉末供料活塞上升，构建活塞下降，一个逆向旋转的滚筒在上一层上铺设新的粉末层。接着打印下一层，并通过喷射的黏结剂与前一层缝合。粉末床中未黏结的松散粉末可作为支撑介质稳定悬垂/内腔结构，待打印完成后通过刷粉或压缩空气等方式清除。所得“绿色件”（未烧结的原始打印坯体）随后进行脱脂与烧结，以获得所需的致密度和力学性能。在烧结过程中，黏结剂发生热解，颗粒通过原子扩散烧结在一起[67-68]。黏结剂材料和粉末的选择取决于应用的具体要求，如黏结强度、耐热性、耐化学性等。而粒径较小的粉末（D_{90} ＜ 16 μm）在黏结喷射和烧结过程中表现出更优越的特性[69]。同时，需要确保被喷射表面的清洁和干燥，以提高黏结效果。喷射后，黏结剂需要一定时间固化和干燥，固化时间根据黏结剂类型和环境条件（如温度和湿度）而变化。固化后，需要进行后处理工作，如打磨或清洁，以去除多余黏结剂，提高表面的整体外观和性能。BJ工艺示意图如图3(f)所示[29]。

Bai等[68]通过调整打印和热处理过程中的参数，研究粉末尺寸和烧结周期对其致密化的影响，发现使用15 μm直径的粉末和1080 ℃最高烧结温度的烧结周期，能够制备出致密度达85%和纯度达97%的铜部件，其致密度高于BJ工艺（无渗透）的典型水平，这对热管理器件等应用具有重要意义。由于粉末加工技术在粉末打包和颗粒尺寸方面的固有局限性，能够制备出完全致密的铜部件存在很大困难。而BJ烧结铜件孔隙率高，抗拉强度仅为116.7 MPa，因此BJ工艺的一个主要挑战是在满足铜粉尺寸要求的同时提高零件的致密化和烧结性能。Romano等[70]通过膨胀率分析和微观结构表征，研究了高纯铜粉末（粒径为3.4 mm）在黏结喷射加工过程中的致密化行为。发现冷压部件的烧结开始温度（680 ℃）比黏结喷射部件的

烧结开始温度(900 ℃)更低的原因是,粉末压缩引入的应变能降低了烧结所需的活化能。黏结剂喷射成形的高纯铜在较低烧结温度下即可实现致密化,且在真空环境中的致密化过程较氩气气氛更均匀,从而能够制备出适用于电/热功能应用的复杂构件。

为了更好地理解材料特性与制造过程的关系,Yegyan等[29]重点研究了通过BJ技术制造纯铜件的过程中工艺诱导孔隙率对材料性能的影响,通过改变粉末形态、后处理烧结和热等静压(hot isostatic pressing,HIP)条件,制备了不同孔隙率(2.7%~16.4%)的铜样件,并对这些样件的性质进行了量化分析,结果表明,最低孔隙率的铜件显示出相对较高的拉伸强度、热导率和电导率。这项研究为理解黏结剂喷射制备铜件的过程-性能关系提供了科学基础,并为通过调整材料和处理条件以达到期望性能的目标铺平了道路。Miyanaji等[71]进一步拓展了这一领域,使用黏结喷射增材制造技术生产泡沫结构铜(一种多孔材料,由大量连通或非连通的小孔构成)后,分析了不同后处理条件下泡沫结构铜的孔隙率。发现在特定的烧结和退火条件下,可以获得高孔隙率,这对于某些应用(如过滤器或热交换器)非常重要。另外,测量并比较了不同烧结条件下部件的弯曲强度和体积收缩,结果表明,适当的烧结和退火处理可以显著提高部件的机械强度,在优化的烧结条件下,体积收缩可以被最小化,这对于保持部件尺寸的精确度至关重要。需要指出的是,在氢气气氛中烧结的部件有更高的孔隙率以及较低的体积收缩。

2.6 冷喷涂增材制造技术

CSAM[72]是一种固态沉积增材制造技术,其利用高速固态金属颗粒撞击基体形成涂层或构件。冷喷涂过程中通常采用一个收敛-发散型喷嘴产生超音速气流(例如空气、氮气或氦气),将颗粒加速至约300~1200 m/s的速度范围,从而获得稳定的沉积与结合。为了使颗粒成功沉积,颗粒撞击前的速度必须超过一定的阈值(称为临界速度)。冷喷涂的核心优势在于其极低的热输入,能有效避免氧化、相变、晶粒长大等传统热加工中的不利影响。此外,CSAM还具有沉积速率高、尺寸可扩展性强、工艺灵活等特点,适用于铜、铝、钛等多种金属及其合金复杂构件的制备,在异种材料组合方面优势明显。然而,目前沉积体内部存在的颗粒间界面会降低其强度与延展性,这在一定程度上限制了其在主承力结构上的应用。

2.7 线材电子束增材制造技术

WEBAM克服了铜的高光反射率问题,能够有效地在铜上实现高能量输入。WEBAM工艺需要使用特定的设备,主要包括电子束枪、供料系统(金属粉末或丝材料)、真空室、操控系统等[73]。所选用的材料通常是粉末状或丝状的金属,例如铜、钛或不锈钢。在真空环境下,电子束枪发射高能量的电子束,用来加热并熔化金属材料[74]。与此同时,供料系统向工作区域输送金属粉末或丝材料。当金属材料被电子束击中并熔化时,会在指定区域沉积,随着供料的持续和电子束的移动,逐层构建出零部件的形状[75]。通过电子束枪和工作台的精准联动控制,金属材料被逐层堆积,最终形成复杂的零部件[76]。每一层都经过精确控制,以确保尺寸精度和材料质量。完成所有层的堆积后,零件将进行冷却处理。在某些情况下,可能需要后续的热处理或机械加工以达到最终所需的物理特性和表面质量[74]。在整个过程中,需要不断监控电子束的能量、焦点位置、材料供给速率等参数,以确保产品质量[73]。

WEBAM技术可高效生产高致密、几乎无孔的铜组件,其沉积速率可达2 kg/h,从而保障了构件的高质量[74]。且其在高真空环境中进行操作,防止了材料的氧化,提高了表面质量。WEBAM技术已在航天、能源等领域得到了应用,如用于火箭发动机的模型部件等。

3 增材制造铜部件的质量与性能优化

增材制造技术在制备铜部件时面临一系列挑战,包括其高导热性、高反射率、高延展性、高热膨胀系数以及易氧化性。这些特性在成形过程中会显著加剧加工难度,例如,高导热性会导致熔化区的热量急速散失,形成剧烈的局部温度梯度,从而引发层间翘曲、分层,最终导致成形失败。

3.1 高导热性

铜的高导热性(300 K时导热系数为401 W/(m·K))是激光增材制造中的主要挑战之一。它使热量从熔池快速散失,导致局部热梯度与熔池失稳,进而引发层间翘曲、剥离及成形失败[77]。因此,工艺的关键在于精细调控热输入与散热路径,以优化温度场,促进组织均匀、抑制缺陷并提升性能。可通过优化光束参数、采用表面预处理或预热等策略来提升能量耦合效率,从而减少能量损失,更好地控制冷却速率与热积累,增强工艺稳定性。

Ikeshoji等[78]使用由气雾化法制得的纯铜粉末构建了10 mm×10 mm×10 mm的立方体样本。用FLIR热像仪实时监测熔池温度分布,熔池形状沿扫描方向呈不对称性。实验结果表明,当横向间距(相

邻扫描熔道中心线之间的距离）为 0.10 mm 时，可获得最高相对密度（99.6%）。总体而言，纯铜 SLM 成形受制于熔池稳定性与热管理：横向间距作为关键工艺参数，会显著改变道间搭接程度与热量积累，从而影响熔池尺寸、形态以及最终致密化水平。为进一步阐明激光功率、扫描速度与横向间距对熔池行为的耦合影响，研究构建有限元瞬态热传导模型，模拟了粉末在 SLM 过程中的熔化-凝固演化，结果显示适当增大横向间距有利于形成尺寸更大、稳定性更好的熔池，进而提升致密度与结构完整性。鉴于纯铜导热率高和散热快，若横向间距设置不当易造成熔池能量不足与道间结合不良，最终引发孔隙、缺熔等缺陷，并削弱构件的结构与力学性能。

3.2　高反射率

铜对常用红外激光的反射率高，使入射能量中相当一部分被反射而非吸收，导致粉末有效熔化能量不足。其后果不仅是能量利用效率下降，还容易引发熔池波动、表面粗糙度增大、缺熔和孔洞等缺陷。早期采用约 200 W 红外激光时，纯铜构件的最高致密度仅为 83%～88%[47]。因此，传统的 SLM 制备的铜部件常伴随较低致密度以及氧化物夹杂、孔隙与沉积相关缺陷，从而削弱电导率等[79]。为弥补高反射与高导热带来的能量损失，LPBF 设备通常需要提供更高、更稳定的有效能量输入。

除了使用更高功率的激光功率外，LPBF 在处理纯铜方面还可以采取切换到绿色激光源的办法。大多数金属激光粉末床熔合机器使用 Yb:YAG 或 Nd:YAG 光纤红外激光器，波长为 1080 nm。然而，在这个数值附近，纯铜反射高达 98% 的激光[3]。现在有些机器配备了波长为 515 nm 的绿色激光器，这种类型的激光器专门用于反射材料，如铜及其合金或贵金属（金、银）[26]。由于铜对绿激光的吸收率高于红外激光，使用绿激光可以在较低的激光功率下实现有效加工，提高加工效率的同时减少能量消耗。同时，在制造过程中绿激光可实现更平滑的表面处理，减少重熔和表面缺陷。这些优点使得绿激光成为加工纯铜的一个更高效的选择，特别适用于对零件质量和表面平滑度有严格要求的应用场景[80]。然而，绿激光技术也存在成本较高、功率相对较低等缺点，这在需要成形厚壁构件或追求高效率的加工场景中，限制了其生产能力和效率。

也有学者通过对纯铜粉末进行表面改性和添加合金化元素制备铜合金，以降低材料热导率并减弱对激光的反射。Ozasa 等[81]研究发现，添加锆元素可以有效提高铜合金的激光吸收率和相对密度，特别是在面积能量密度大于 18 J/mm^{2}的条件下，可以获得超过 99.5% 相对密度的高密度构造体。此外，Cu-Zr 合金的 LPBF 制品相比铸造材料和纯铜具有更低的电阻率，表明 LPBF 特有的柱状组织使晶界数量相对减少，从而降低电子在晶界处的散射，进而减小电阻率。

锌在与激光束相互作用时会发生蒸发，而蒸发主要通过二次沉积机制（如飞溅和凝结）出现，而不是在制备过程中的直接合金化。锌的这种行为对于铜粉末在 LPBF 中的性能有着重要影响，尤其是在材料的组成、激光束吸收性和近轨道蒸汽环境方面。Speidel 等[79]通过物理气相沉积（PVD）将锌涂层施加在铜粉末上（其系统示意图如图 5 所示），发现锌涂层能够改变铜粉末对激光的吸收性，从而提高铜在 LPBF 中的加工性能。锌涂层还可以改善熔池的热特性，增加局部化的热量，这对于提高部件的密度和减少缺陷是必要的。此外，在 LPBF 过程中锌涂层的蒸发也可能改善铜粉末的流动性，进一步影响打印过程和部件质量。而通过热处理可以促进锌与铜更好的合金化以及涂层与铜粉末的界面扩散，减少局部浓度梯度和表面残留物，从而提高铜部件的质量和整体性能。

3.3　高热膨胀系数

铜的热膨胀系数反映其尺寸（长度或体积）随温度变化的程度。这一特性在经历热循环的增材制造过程中至关重要。增材制造过程中，沉积材料会经历反复的加热和冷却，造成热膨胀与收缩。为降低铜的热膨胀系数对增材制造过程的影响，现有研究主要从工艺参数优化、材料（粉末/原料）处理和后处理技术三个方面入手。

Tiberto 等[82]发现，添加特定元素（如 Sn、Si、Ni）可显著改善铜的加工性，能将初期孔隙率从纯铜的约 25% 降至更低水平。此外，较小的粉末粒径有助于提升能量吸收率，进而减少孔隙。因此，合理选择粉末粒径与层厚是改善成品致密度的关键。激光功率、扫描速度和铺粉层厚度等参数的优化同样对提高部件的密实度和力学性能至关重要，通过精细调整这些参数，可以实现更佳的熔池稳定性和部件质量。此外，还评估了铜合金零件在传统两步热处理后的性能，发现对部件进行适当的热处理可以大幅改善其性能，例如通过时效硬化处理后 $CuNi_3Si$ 合金部件的电导率可达 40%IACS，硬度达到 180HV1，超过铸造材料的性能，与板材料的硬度相当。Kumar 等[83]研究了 HIP 对黏结剂喷射成形铜部件致密度、孔隙率及收缩行为的影响。通过在高温和高压环境中处理材料，来消除材料内部的孔洞和缺陷，从而改善材料的密度、均匀性和综合性能，实验发现，使用 HIP 可以将零件密度从

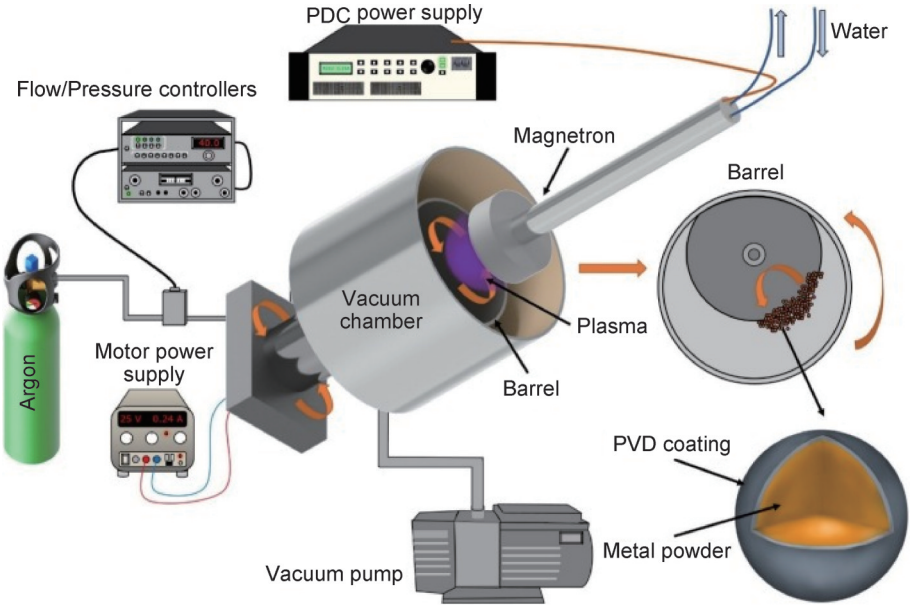


图5 用于制备锌涂层粉末的专用粉末涂层 PVD 系统示意图[79]

Fig.5 Schematic diagram of specialised powder coating PVD system for preparation of Zn coated powders[79]

烧结后的92%提高到理论密度的99.7%。这一发现对于增材制造领域中铜零件的生产具有重要意义。

3.4 易氧化性

铜在加工过程中对氧化较为敏感,特别是在高温下。氧化不仅会影响铜的导电性和导热性,而且会降低零件的力学性能[77]。EBM技术本身要求在真空环境下进行,以确保电子束的有效传输与聚焦[26],客观上为防止铜的氧化提供了有利条件。但是,纯铜粉在运输和储存过程中不可避免地会发生氧化。为了评估不同氧含量铜粉末在EBM过程中的性能表现,Guschlbauer等[48]采用两种不同氧含量的铜粉末,通过设置特定的制造参数,如扫描速度、电子束功率等,对制备出的样品进行了拉伸测试和微观结构分析,发现低氧含量的铜粉末可以制备出无裂纹的样品,且样品的力学性能与传统的热轧铜材料相当。

Ledford等[84]在EBM处理之前,使用氢炉处理来减少铜粉末的氧含量。当初始铜粉末的氧含量较低时,处理机制主要集中在去除表面氧化物上。随着氧含量的增加,除了去除表面氧化物外,氢还会与粉末内部的氧化物反应生成水蒸气。在EBM过程中,熔池前方和侧面的受热区域会释放内部困住的水蒸气,这会影响到铜粉末在高温下的反应和稳定性。采用连续熔化的扫描策略时,预热-熔化过程具有更长的热作用时间,有利于将氢处理过程中生成或释放的H_2O逐步排出,降低其在局部高温区的滞留与再反应风险。经氢热处理后,铜粉的氧含量可显著降低。

4 结束语

本文综述了铜及其合金在增材制造中的应用,包括铜粉/丝的制备技术、铜合金增材制造技术的现状,以及铜部件的质量与性能优化,详细探讨了原料的制备方法,如电解法、等离子旋转电极制粉技术、雾化法、拉丝法、丝材制备法等,介绍了主要的增材制造技术,如激光粉末床熔融、定向能量沉积、冷喷涂增材制造和黏结剂喷射丝材电子束增材制造等,并分析了这些技术在提高铜部件生产效率和性能方面的优势与挑战。此外,还探讨了铜的相关特性对增材制造工艺过程的影响,并提出可供参考的应对策略,包括适当增大扫描间距与激光功率、切换激光波长/光源、开展表面改性以及结合热处理等后处理手段。

铜合金增材制造有望在更广泛的领域发挥关键作用,如文物保护、医疗器械及可再生能源等。铜合金在文物保护方面[85]应用显著,这项技术不仅能够通过复制品研究青铜器的腐蚀机理,提出保护措施,还能用于展览,以减少对原件的损害,并简化传统修复流程;铜的抗菌特性[86]使其在医疗设备制备中具有独特的应用,通过增材制造技术,可以生产出具有复杂设计的铜制医疗工具和设备,这些设备在保持卫生和预防感染方面具有重要作用;在可再生能源领域,如太阳能和风能[87],铜的增材制造可用于生产高效的电力传输组件,其高导电性和强耐腐蚀性使得这些组件在恶劣环境下也能可靠运行。随着技术的不断进步

和市场需求的增长，铜合金的增材制造有望在多个领域实现更广泛的应用，推动制造业的发展。

参考文献

[1] TRAN T Q, CHINNAPPAN A, LEE J K Y, et al. 3D printing of highly pure copper[J]. Metals, 2019, 9(7): 756.

[2] 黄金昌. 铜合金在工业构件中的应用[J]. 稀有金属快报, 1997(3): 10-12.
HUANG J C. Application of copper alloy in industrial components [J]. Rare Metals Letters, 1997(3): 10-12.

[3] JIANG Q, ZHANG P, YU Z, et al. A review on additive manufacturing of pure copper[J]. Coatings, 2021, 11(6): 740.

[4] GRADL P R, PROTZ C S, ELLIS D L, et al. Progress in additively manufactured copper-alloy GRCop-84, GRCop-42, and bimetallic combustion chambers for liquid rocket engines[C]//70th International Astronautical Congress (IAC). Washington, DC: International Astronautical Federation, 2019: 1-14.

[5] WILMS M B, RITTINGHAUS S K. Laser additive manufacturing of oxide dispersion-strengthened copper-chromium-niobium alloys [J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2022, 6(5): 102.

[6] SIMPSON N, NORTH D J, COLLINS S M, et al. Additive manufacturing of shaped profile windings for minimal AC loss in electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 2510-2519.

[7] 顾瑞楠, WONG K S, 严明. 金、银、铜等典型高反射率材料的激光增材制造[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学), 2020, 50(3): 40-53.
GU R N, WONG K S, YAN M. Laser additive manufacturing of typical highly reflective materials: gold, silver and copper[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2020, 50(3): 40-53.

[8] 许德, 高华兵, 董涛, 等. 增材制造用金属粉末研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(2): 245-257.
XU D, GAO H B, DONG T, et al. Research progress of metal powder for additive manufacturing [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(2): 245-257.

[9] 高超峰, 余伟泳, 朱权利, 等. 3D打印用金属粉末的性能特征及研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2017, 27(5): 53-58.
GAO C F, YU W Y, ZHU Q L, et al. Performance characteristics and research progress of metal powders for 3D printing[J]. Powder Metallurgy Industry, 2017, 27(5): 53-58.

[10] 尚青亮, 张玮, 包崇军, 等. 3D打印用球形金属粉末制备工艺[J]. 云南冶金, 2018, 47(6): 64-67.
SHANG Q L, ZHANG W, BAO C J, et al. Preparation technology of spherical metal powder for 3D printing[J]. Yunnan Metallurgy, 2018, 47(6): 64-67.

[11] 金世平, 杨斌. 电解法制备铜粉的影响因素的研究[J]. 中国粉体技术, 2004, 10(3): 21-23.
JIN S P, YANG B. Research on influence factors of preparing copper powder by electrolysis [J]. China Powder Science and Technology, 2004, 10(3): 21-23.

[12] 朱澍勋. 电解法制备铜粉工艺研究[J]. 冶金工程, 2021, 8(3): 120-126.
ZHU S X. Study on copper powder preparation by electrolysis [J]. Metallurgical Engineering, 2021, 8(3): 120-126.

[13] 汤慧萍. 等离子旋转电极制粉技术研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2023, 41(1): 2-11.
TANG H P. Progress of plasma rotating electrode processing technology [J]. Powder Metallurgy Technology, 2023, 41(1): 2-11.

[14] 姚妮娜, 彭雄厚. 3D打印金属粉末的制备方法[J]. 四川有色金属, 2013(4): 48-51.
YAO N N, PENG X H. The preparation method of metal powder for 3D printing[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2013(4): 48-51.

[15] 谭芳香, 黄以伟. 水雾化法制备铜及铜合金粉[J]. 金属功能材料, 2021, 28(3): 18-22.
TAN F X, HUANG Y W. Preparation of copper and copper alloy powder by water atomization [J]. Metallic Functional Materials, 2021, 28(3): 18-22.

[16] 张玮, 尚青亮, 刘捷, 等. 气体雾化法制备粉体方法概述[J]. 云南冶金, 2018, 47(6): 59-63.
ZHANG W, SHANG Q L, LIU J, et al. Summary on powder preparation by gas atomization [J]. Yunnan Metallurgy, 2018, 47(6): 59-63.

[17] 孟瑶. 逐液滴离心雾化法制备微细球形金属粉末的工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
MENG Y. Investigation on preparation of spherical fine metal powders by centrifugal atomization based on mono-sized droplets [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

[18] 刘坤杰, 乐晨, 赵放, 等. 水气联合雾化法制备铁基预合金粉末及其在金刚石工具中的应用[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2018, 38(2): 32-36.
LIU K J, LE C, ZHAO F, et al. Preparation of iron-based pre-alloyed powders by water-gas atomization and its application in diamond tools [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2018, 38(2): 32-36.

[19] 吴环. 雾化法制备3D打印用Cu粉末的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
WU H. Study on the preparation of Cu powder for 3D printing by atomization method [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.

[20] 温益, 陈洪龄. 导电浆料用超细铜粉的制备[J]. 化学工程师, 2015, 29(5): 11-16.
WEN Y, CHEN H L. Preparation of ultrafine copper powder for conductive paste[J]. Chemical Engineer, 2015, 29(5): 11-16.

[21] 王发展. 机械物理法处理废线路板制备铜粉末的新工艺[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
WANG F Z. New process for producing copper powder from waste printed circuit boards by mechanical and physical method [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

[22] TURNER B N, STRONG R, GOLD S A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. process design and modeling[J]. Rapid Prototyping Journal, 2014, 20(3): 192-204.

[23] YUAN X, ZHANG P, WANG J, et al. Influences of Fe content and cold drawing strain on the microstructure and properties of powder metallurgy Cu-Fe alloy wire [J]. Materials, 2023, 16

(14):5180.

[24] SANTANA M G A, QIAN W L, KABAYAMA L K, et al. Effect of process parameters in copper-wire drawing[J]. Metals, 2020, 10(1):105.

[25] CAO J, WU X, SU C, et al. Processing and properties of single-crystal copper wire[J]. Micromachines, 2023, 14(11):2080.

[26] DE TERRIS T, BAFFIE T, RIBIÈRE C. Additive manufacturing of pure copper: a review and comparison of physical, microstructural, and mechanical properties of samples manufactured with laser-powder bed fusion (L-PBF), electron beam melting (EBM) and metal fused deposition modelling (MFDM) technologies [J]. International Journal of Material Forming, 2023, 16 (4): 32.

[27] RODRIGUES T A, DUARTE V, MIRANDA R M, et al. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM)[J]. Materials, 2019, 12(7):1121.

[28] DONG B, PAN Z, SHEN C, et al. Fabrication of copper-rich Cu-Al alloy using the wire-arc additive manufacturing process [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(6): 3143-3151.

[29] YEGYAN K A, WANG J, BAI Y, et al. Impacts of process-induced porosity on material properties of copper made by binder jetting additive manufacturing[J]. Materials & Design, 2019, 182: 108001.

[30] 魏水淼,马盼,季鹏程,等. 高熵合金增材制造研究进展[J]. 材料工程,2021,49(10):1-17.
WEI S M, MA P, JI P C, et al. Research progress on additive manufacturing of high entropy alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(10):1-17.

[31] CORREA J, FERREIRA P. Analysis and design for rapid prototyping mechanism using hybrid flexural Pivots [J]. Procedia Manufacturing, 2015, 1:779-791.

[32] ZHANG M, Z HOU X L, WANG D F, et al. AlCoCuFeNi high-entropy alloy with tailored microstructure and outstanding compressive properties fabricated via selective laser melting with heat treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 743:773-784.

[33] TEIXEIRA Ó, SILVA F J G, ATZENI E. Residual stresses and heat treatments of Inconel 718 parts manufactured via metal laser beam powder bed fusion: an overview[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113 (11): 3139-3162.

[34] BADRINARAYAN B, BARLOW J W. Metal parts from selective laser sintering of metal-polymer powders[C]//MARCUS H L, BEAMAN J J, BARLOW J W, et al. Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin: The University of Texas at Austin, 1992:141-146.

[35] MAO Z, ZHANG D, WEI P, et al. Manufacturing feasibility and forming properties of Cu-4Sn in selective laser melting[J]. Materials, 2017, 10(4):333.

[36] ZENG C, ZHANG B, HEMMASIAN E A, et al. Mechanical, thermal, and corrosion properties of Cu-10Sn alloy prepared by laser-powder-bed-fusion additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2020, 35:101411.

[37] DENG C, KANG J, FENG T, et al. Study on the selective laser melting of CuSn10 powder[J]. Materials, 2018, 11(4):614.

[38] SCUDINO S, UNTERDÖRFER C, PRASHANTH K G, et al. Additive manufacturing of Cu-10Sn bronze[J]. Materials Letters, 2015, 156:202-204.

[39] ZHANG S, ZHU H, HU Z, et al. Selective laser melting of $Cu_{10}Zn$ alloy powder using high laser power[J]. Powder Technology, 2019, 342:613-620.

[40] WANG J, ZHOU X L, LI J, et al. Microstructures and properties of SLM-manufactured Cu-15Ni-8Sn alloy[J]. Additive Manufacturing, 2020, 31:100921.

[41] MAO Z, ZHANG D Z, JIANG J, et al. Processing optimization, mechanical properties and microstructural evolution during selective laser melting of Cu-15Sn high-tin bronze[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 721:125-134.

[42] WALLIS C, BUCHMAYR B. Effect of heat treatments on microstructure and properties of CuCrZr produced by laser-powder bed fusion[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 744: 215-223.

[43] MA Z, ZHANG D Z, LIU F, et al. Lattice structures of Cu-Cr-Zr copper alloy by selective laser melting: microstructures, mechanical properties and energy absorption [J]. Materials & Design, 2020, 187:108406.

[44] POPOVICH A, SUFIIAROV V, POLOZOV I, et al. Microstructure and mechanical properties of additive manufactured copper alloy[J]. Materials Letters, 2016, 179:38-41.

[45] CAO S, ZOU Y, LIM C V S, et al. Review of laser powder bed fusion (LPBF) fabricated Ti-6Al-4V: process, post-process treatment, microstructure, and property[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(3):313-332.

[46] JADHAV S D, GOOSSENS L R, KINDS Y, et al. Laser-based powder bed fusion additive manufacturing of pure copper[J]. Additive Manufacturing, 2021, 42:101990.

[47] LYKOV P A, SAFONOV E V, AKHMEDIANOV A M. Selective laser melting of copper[J]. Materials Science Forum, 2016, 843:284-288.

[48] GUSCHLBAUER R, BURKHARDT A K, FU Z, et al. Effect of the oxygen content of pure copper powder on selective electron beam melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 779:139106.

[49] LODES M A, GUSCHLBAUER R, KÖRNER C. Process development for the manufacturing of 99.94% pure copper via selective electron beam melting[J]. Materials Letters, 2015, 143:298-301.

[50] RAAB S J, GUSCHLBAUER R, LODES M A, et al. Thermal and electrical conductivity of 99.9% pure copper processed via selective electron beam melting[J]. Advanced Engineering Materials, 2016, 18(9):1661-1666.

[51] RAMIREZ D A, MURR L E, MARTINEZ E, et al. Novel precipitate-microstructural architecture developed in the fabrication of solid copper components by additive manufacturing using electron beam melting[J]. Acta Materialia, 2011, 59(10):4088-4099.

[52] GUSCHLBAUER R, MOMENI S, OSMANLIC F, et al. Process development of 99.95% pure copper processed via selective electron beam melting and its mechanical and physical properties [J]. Materials Characterization, 2018, 143: 163-170.

[53] WANG H, LIU W, TANG Z, et al. Review on adaptive control of laser-directed energy deposition [J]. Optical Engineering, 2020, 59(7): 070901.

[54] YADAV S, JINOOP A N, SINHA N, et al. Parametric investigation and characterization of laser directed energy deposited copper-nickel graded layers [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(11): 3779-3791.

[55] YADAV S, PAUL C P, JINOOP A N, et al. Laser directed energy deposition based additive manufacturing of copper: process development and material characterizations [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 984-997.

[56] SIVA P H, BRUECKNER F, VOLPP J, et al. Laser metal deposition of copper on diverse metals using green laser sources [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(3): 1559-1568.

[57] ONO K, SATO Y, TAKAZAWA Y, et al. Development of high intensity multibeam laser metal deposition system with blue diode lasers for additively manufacturing of copper rod [J]. Journal of Laser Applications, 2021, 33(4): 042014.

[58] XIA C, PAN Z, ZHANG S, et al. Model predictive control of layer width in wire arc additive manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58: 179-186.

[59] SINGH A, KAPIL S, DAS M. A comprehensive review of the methods and mechanisms for powder feedstock handling in directed energy deposition [J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101388.

[60] WU B, PAN Z, DING D, et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35: 127-139.

[61] DHARMENDRA C, SHAKERIN S, JANAKI RAM G D, et al. Wire-arc additive manufacturing of nickel aluminum bronze/stainless steel hybrid parts-interfacial characterization, prospects, and problems [J]. Materialia, 2020, 13: 100834.

[62] HÖNNIGE J R, COLEGROVE P A, GANGULY S, et al. Control of residual stress and distortion in aluminium wire+arc additive manufacture with rolling [J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 775-783.

[63] LOPES J G, MACHADO C M, DUARTE V R, et al. Effect of milling parameters on HSLA steel parts produced by wire and arc additive manufacturing (WAAM) [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 739-749.

[64] DEREKAR K S. A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium [J]. Materials Science and Technology, 2018, 34(8): 895-916.

[65] TREUTLER K, WESLING V. The current state of research of wire arc additive manufacturing (WAAM): a review [J]. Applied Sciences, 2021, 11(18): 8619.

[66] CHEN W, CHEN Y, ZHANG T, et al. Effects of location on the microstructure and mechanical properties of Cu-8Al-2Ni-2Fe-2Mn alloy produced through wire arc additive manufacturing [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(7): 4733-4744.

[67] GRECA L G, LEHTONEN J, TARDY B L, et al. Biofabrication of multifunctional nanocellulosic 3D structures: a facile and customizable route [J]. Materials Horizons, 2018, 5(3): 408-415.

[68] BAI Y, WILLIAMS C B. An exploration of binder jetting of copper [J]. Rapid Prototyping Journal, 2015, 21(2): 177-185.

[69] NYBORG L, CAO Y. Surface chemical and geometrical properties of pure copper powder intended for binder jetting and sintering [J]. Surface and Interface Analysis, 2022, 54(9): 944-953.

[70] ROMANO T, MIGLIORI E, MARIANI M, et al. Densification behaviour of pure copper processed through cold pressing and binder jetting under different atmospheres [J]. Rapid Prototyping Journal, 2022, 28(6): 1023-1039.

[71] MIYANAJI H, MA D, ATWATER M A, et al. Binder jetting additive manufacturing of copper foam structures [J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 100960.

[72] LI W, WU D, HU K, et al. A comparative study on the employment of heat treatment, electric pulse processing and friction stir processing to enhance mechanical properties of cold-spray-additive-manufactured copper [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 409: 126887.

[73] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: a review [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1917-1928.

[74] BAUFELD B. Wire electron beam additive manufacturing of copper [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2443(1): 012001.

[75] QU M, GUO Q, ESCANO L I, et al. Controlling process instability for defect lean metal additive manufacturing [J]. Nature Communications, 2022, 13: 1079.

[76] VASYLYEV M O, MORDYUK B M, VOLOSHKO S M. Wire-feeding based additive manufacturing of the Ti-6Al-4V alloy. part I. microstructure [J]. Progress in Physics of Metals, 2023, 24(1): 5-37.

[77] CONSTANTIN L, FAN L, PONTOREAU M, et al. Additive manufacturing of copper/diamond composites for thermal management applications [J]. Manufacturing Letters, 2020, 24: 61-66.

[78] IKESHOJI T T, NAKAMURA K, YONEHARA M, et al. Selective laser melting of pure copper [J]. JOM, 2018, 70(3): 396-400.

[79] SPEIDEL A, WADGE M D, GARGALIS L, et al. The interaction of volatile metal coatings during the laser powder bed fusion of copper [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 299: 117332.

[80] PAN L, ZHANG C L, LIU T, et al. Molten pool structure and temperature flow behavior of green-laser powder bed fusion pure copper [J]. Materials Research Express, 2022, 9(1): 016504.

[81] OZASA R, GUPTA M, ISHIMOTO T, et al. Fabrication of copper alloys as conductive materials via laser beam powder bed fusion [J]. Journal of Smart Processing, 2021, 10(4): 265-269.

[82] TIBERTO D, KLOTZ U E, HELD F, et al. Additive manufac-

turing of copper alloys: influence of process parameters and alloying elements[J]. Materials Science and Technology, 2019, 35(8): 969-977.

[83] KUMAR A, BAI Y, EKLUND A, et al. Effects of hot isostatic pressing on copper parts fabricated via binder jetting[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 10: 935-944.

[84] LEDFORD C, ROCK C, CARRIERE P, et al. Characteristics and processing of hydrogen-treated copper powders for EB-PBF additive manufacturing[J]. Applied Sciences, 2019, 9(19): 3993.

[85] WONG K S, YAN M, GU R. Laser additive manufacturing of typical highly reflective materials—gold, silver and copper[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2020, 50(3): 034204.

[86] 胡晓娟. 铜抗菌作用的生物物理学研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院, 2016.
HU X J. Biophysical study on the antibacterial effect of copper [D]. Shanghai: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2016.

[87] 杨彤, 王振卫, 钱胜强, 等. 铅酸电池板栅的轻量化[J]. 自然杂志, 2020, 42(1): 59-65.
YANG T, WANG Z W, QIAN S Q, et al. Lightweight grids for lead-acid batteries[J]. Chinese Journal of Nature, 2020, 42(1): 59-65.

基金项目: 国家自然科学基金(51605311); 汕头大学科研启动经费项目(NTF22002)

收稿日期: 2024-05-18; **录用日期**: 2024-07-12

通讯作者: 来佑彬(1988—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为增材制造和表面工程, 联系地址: 广东省汕头市金平区大学路243号汕头大学(515063), E-mail: yblai@stu.edu.cn

(本文责编: 王 晶)