冷金属过渡技术在异质连接及增材制造中的应用

付毅帅[1, 2]，樊磊[1]，常云峰[2]，秦建[2]，魏通达[1, 2]，张冠星[2]，钟素娟[2]

1.郑州航空工业管理学院材料学院　河南郑州　450046
2.郑州机械研究所有限公司新型钎焊材料与技术国家重点实验室　河南郑州　450001

摘要：冷金属过渡（CMT）技术是在传统MIG/MAG焊基础上开发的一种改进型熔化极气体保护焊，具有热输入低、飞溅小、成形美观、绿色高可靠等一系列优点，广泛应用于航空航天、海工装备、车辆工程等领域。概括了冷金属过渡技术的原理及特点，重点介绍了冷金属过渡技术在异种金属焊接、薄板焊接、增材制造等的研究应用，以及目前存在的一些问题及未来需要研究的重点和方向。

关键词：冷金属过渡；异种金属焊接；增材制造

Application of cold metal transfer technology in heterogeneous bonding and additive manufacturing

FU Yishuai[1, 2], FAN Lei[1], CHANG Yunfeng[2], QIN Jian[2], WEI Tongda [1, 2], ZHANG Guanxing[2], ZHONG Sujuan[2]

1. School of Materials Science, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, Henan, China
2. State Key Laboratory of Advanced Brazing Filler & Technology, Zhengzhou Research Institute Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, Henan, China

Abstract: Cold metal transfer (CMT) technology has a series of advantages such as low heat input, small splashing, and beautiful forming. This article reviews the research status of cold metal transfer technology in different fields. This article introduces the principles and characteristics of cold metal transfer technology, summarizes the research status and some existing problems in the fields of dissimilar metal welding, thin plate connection, additive manufacturing, etc., and finally summarizes the development direction and research focus of cold metal transfer technology.

Keywords: cold metal transfer; dissimilar metals welding; additive manufacturing

1　序言

MIG/MAG焊是一种低成本、高效率，应用广泛的焊接方法，但是单一MIG/MAG焊热输入较高，基体变形量较大，基体对熔覆层稀释率较为明显，1mm以下薄板难以焊接，容易变形，焊缝易成形不良，使其在一些实际应用方面受到了限制。而冷金属过渡（Cold Metal Transition，CMT）技术是在传统MIG/MAG焊基础上研制的改进型熔化极气体保护焊。CMT技术是在短路过程中采用数字化控制并且能够机械地回抽焊丝，引燃电弧，当焊丝进

第一作者：付毅帅，硕士研究生，研究方向为电弧增材制造，E-mail：297038774@qq.com。
通信作者：樊磊，博士，副教授，研究方向为高性能陶瓷材料设计制备与性能优化，包括场辅助烧结技术及机理研究，以及氮化硅、碳化硼等高性能陶瓷材料的设计制备，E-mail：fanlei396@163.com。

给、熔滴进入熔池后，电弧熄灭，短路信号产生，此时电流会被截断，焊丝回抽使熔滴脱落，电流接近于零，焊丝恢复到进给状态并循环这一过程。CMT熔滴脱离方式相较于传统短路过渡，是通过提高电流来增大电磁力促进熔滴过渡的方式，可以减少飞溅[1-4]。CMT的基本原理如图1所示。

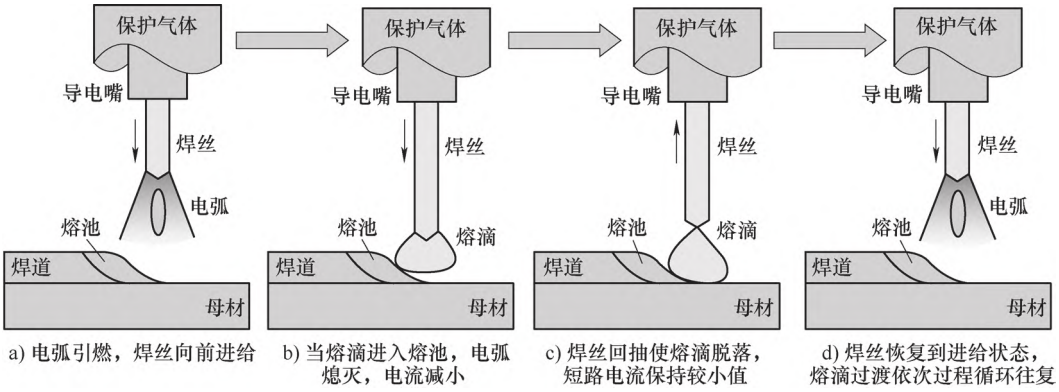


图1　CMT的基本原理示意[5]

冷金属过渡技术具有以下特点[6-9]：热输入低、飞溅小、成形美观；效率高、成本低、绿色高可靠；送丝运动与熔滴过渡过程协调统一；电弧稳定，搭桥能力好；能实现毫米级以下薄板连接；CMT焊枪空间可达性好，适应性强；弧长控制精确，电弧更稳定。

1991年开始，Fronius公司致力于研究钢与铝的焊接，之后开发出CMT（冷金属过度）技术，改善了MIG/MAG焊熔滴过渡的形式，为MIG/MAG焊的应用拓宽了新的领域[10]。CMT 焊接系统具有多种电弧焊接方式，可以同时满足不同焊接的需求，目前主要应用于异种材料的焊接、薄板焊接、增材制造及表面堆焊。

2　异种金属连接

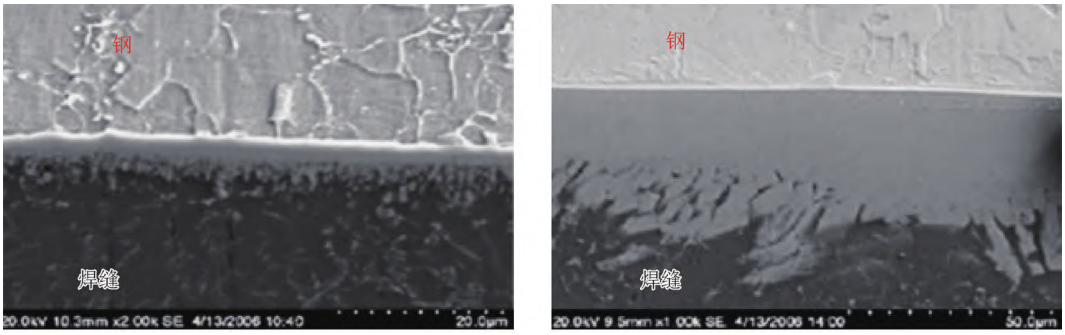
随着先进装备制造向高性能、高可靠、结构功能一体化方向发展，单一金属无法满足现代工业发展的需求，两种或两种以上金属的连接受到广泛的关注，结合异种材料性能和经济上的优势，选择不同特性的材料可以为许多工程问题提供全新的解决方案。CMT技术在异种金属连接中存在一些问题，尤其是抑制金属间化合物的形成和生长至关重要。目前，控制金属间化合物（IMC）层的生长主要有以下几种方法：一是在界面处添加合金元素改变IMC相，从而降低界面区域的脆性，增加断裂载荷；二是降低热输入，从而有利于抑制 IMC 生长和提高接头强度；三是采用激光-电弧复合的方法或外加辅助装置，可有效降低脆性化合物的含量，对微观结构的控制有显著影响，会影响冶金现象 ，例如再结晶、晶粒生长和相变[11]。但由于激光与电弧协同作用的物理过程极其复杂，因此关于激光-电弧协同作用的研究仍处于起步阶段。激光-电弧复合外加辅助装置仍存在一些不足，例如过大的线圈电流和交流频率的增加导致 IMC 层更厚且不均匀[12]。

2.1　钢-铝连接

钢与铝的物理和化学性能不相容，这导致了一些问题，即在Fe-Al金属间相组成的界面上形成硬脆层，熔合区出现孔隙，形成热裂纹，因此将铝与钢连接起来具有挑战性。

AGUDO等[13]研究发现，Fe-Al脆性IMC层厚度应控制在10μm以下，以保证接头强度。ZHANG等[14]采用CMT技术连接钢和铝，IMC的微观结构如图2所示。在较低的热输入下（见图2a），IMC呈现出面向焊缝金属的锯齿状；当热输入增加时（见图2b），反应层变厚，并长入焊缝金属中，形成舌状穿透。由于CMT热输入低，因此降低了钢-铝之间界面脆性IMC的厚度，从而提高了异种金属搭接接头的强度。

KANG等[15]在6061铝合金和304不锈钢的CMT焊接中外加了轴向磁场，研究了磁强度和频率对微观组织和力学性能的影响。磁场可以促进铝焊缝金属在钢表面的扩散，从而增加铝-钢对接接头的黏结面积。线圈电流影响熔融填料的铺展性，剧烈搅拌



a）较低热输入　　b）较高热输入

图2　钢与焊缝金属界面显微组织[14]

的熔池凝固后，焊缝表面出现波浪状特征。过大的线圈电流和交流频率的增加导致IMC层变厚且不均匀，进而指明了磁场对熔池动力学行为的影响因素是未来探索的方向。

KANG等[16]采用CMT工艺将 Al5052 合金连接到镀铝钢板上。研究发现，使用镀铝钢板时，虽然润湿性比镀锌钢相对较差，但异种金属之间的IMC层厚度较低，因此接头强度较高。填充金属的Si成分限制了IMC层的生长。Zn涂层容易挥发，这会导致母材加热不足，焊接工艺不稳定，在这种情况下，很容易出现气孔等缺陷。

WEN等[17]研究了Ni/Zn双涂层对激光-电弧混合热源连接钢-铝的影响。在制备Ni/Zn双涂层后液态铝与固态钢之间的界面反应部分阻塞并且IMC层的厚度减小，Ni涂层也抑制了裂纹的出现。采用激光-电弧复合的方法显著改善了焊缝外观，而且有效地改善了界面反应。

在钢-铝的连接过程中，抑制IMC的形成和生长是一个关键问题，IMC的过度生长显著影响了焊后的力学性能，由于CMT热输入较低，因此降低了IMC层的厚度。此外，在钢表面镀层并减少钢的熔化是连接铝-钢的关键，所以填充材料的选择是连接铝-钢需要考虑的因素之一，即使选择合适的复合焊接工艺也将影响钢-铝的焊接质量。

2.2　镁合金-钢连接

镁合金与钢的混合结构因其独特的特点，如轻量化、高性能、节能等，广泛应用于各个领域。Mg和Fe 元素之间既不能形成固溶体，也几乎不能形成IMC，镁合金与钢在物理、化学和力学性能上存在显著差异。

镁合金与钢CMT焊接接头为熔钎焊接头，通过在基体表面镀层、优化工艺参数、开坡口的角度来提高与基体之间的润湿性，进而增强焊缝金属与基体之间的冶金结合，使接头的强度得到提升。ZHANG等[18]采用CMT焊接工艺连接镁合金和Al-Si涂层钢异种搭接接头。研究发现，由于Al-Si涂层的存在，熔融镁合金填充材料在钢基体上的润湿和铺展行为得到了明显改善。Fe-Al金属间反应层在界面处形成，增强了镁合金与钢之间的冶金结合。靳广胜等[19]以 AZ31镁合金焊丝作为填充材料，AZ31B镁合金和Q235镀锌钢的CMT焊接，得到的接头为熔-钎焊接头，焊接速度会影响反应层厚度和物相组成。CAO等[20]采用CMT技术研究了Zn涂层对含镁-钢焊接工艺的影响，发现钢表面的锌涂层对于良好的焊接是必不可少的，Zn的主要作用是其蒸发可降低界面处的温度，防止钢熔化，Zn涂层改善了液态Mg在钢表面的润湿性。添加所选填充材料的成分会影响Al-Mg的 IMC层的形成，进而影响材料的性能。

曹睿等[21]采用AZ61镁焊丝作为填充材料，使用冷金属过渡技术实现3mm厚镁板和3mm厚钢板的对接焊，接头是熔-钎焊接头，焊缝金属和镀锌钢板表面的钎焊界面生成（α-Mg+MgZn）共晶相反应层和 Fe-Al 相反应层，而焊缝金属和钢板坡口之间的钎焊界面是通过 Fe-Al相连接，焊接接头的钎焊界面处结合较熔合区和焊缝脆弱，断裂均发生在钎焊界面处，钢板开60° 坡口时坡口面积增加，焊接接头的强度也随之增加。

2.3　镁-铝的连接

铝和镁两种合金因其密度低、强度/重量比高、

铸造性好、易于回收等优点而被广泛应用于汽车工业。镁-铝焊接易形成热力学稳定的脆性IMC，对焊接强度十分不利。由Mg-Al-Si相图可看出，在焊接过程中凝固时会形成一系列IMC。

通过适当控制焊接参数来降低热输入，改变焊缝金属的成分，采用中间过渡层，并最大限度地减少IMC，从而使镁-铝的连接更加可靠，JING等[22]研究了AZ31B镁-6061铝合金CMT焊接，基底两侧显微硬度均匀，镁侧熔合区显微硬度最高；随着IMC的减少，焊缝从镁侧到铝侧的显微硬度呈下降趋势。结合强度低的接头在镁侧熔合区的IMC层发生脆性断裂，Mg_2Si、Mg_2Al_3和$Mg_{17}Al_{12}$的IMC连续分布在熔合区内，是导致其焊接断裂的原因。SHANG等[23]研究了镁AZ31和铝1060合金的CMT焊接并观察到没有焊接缺陷，因为低热输入和在焊缝中添加Si有效抑制了脆性IMC的产生，镁基体附近的熔合区决定了接头的强度和显微组织，焊接区形成了由固溶层、共晶组织层、铝侧$Mg_{17}Al_{12}$区和铜基固溶体组成的4个连续层，而镁侧熔合区形成了Cu_2Mg和Al-Cu-Mg三元共晶组织。LI等[24]采用镀锌钢作为过渡连接层，进行了镁AZ31B与铝Al6061-T6之间异种金属的CMT连接，结果表明，采用镀锌钢作为连接过渡层的方法，可以实现镁铝合金的连接，采用镀锌钢过渡连接层抑制了镁铝脆性金属间化合物$Al_{12}Mg_{17}$和Al_3Mg_2，通过对焊接参数的优化，提高了镁-铝CMT接头的性能。

2.4 钢-铜的连接

铜和钢的复合结构因铜的高导热性和导电性以及钢优异的力学性能，而广泛应用于航空航天，汽车和传热工业。铜与不锈钢在导热系数、熔点、热膨胀系数等方面的差异，容易引起焊缝中热应力和凝固裂纹缺陷，大大削弱了焊缝的力学性能。

杨卫鹏等[25]采用CMT焊接方法对铜-钢异种金属熔-钎焊工艺进行试验研究。实现铜-钢异种金属的熔钎焊连接，液态钎料在钢表面上润湿良好，避免了钢母材的熔化,抑制钢母材的晶间渗透现象。MIRSKI等[26]采用CMT制备了铜-钢管的钎焊接头，获得的接头质量良好，钎焊接头未出现裂纹。采用钎焊工艺，也会进行密集的扩散过程，但基材发生轻微的部分熔化，特别是在焊缝面和根部区域。采用钎焊的方法有效限制了热裂纹的产生。

MENG等[27]将激光-CMT焊接应用于T2铜/304不锈钢异种接头的对焊。在最佳激光偏移下，获得了表面形貌均匀且不可见缺陷焊缝。XIAO等[28]采用铜基和镍基填充材料制备了激光-CMT复合焊接铜-不锈钢焊接头。结果表明，铜基焊缝熔融区发生铁-铜液相分离，钢侧热影响区出现铜熔透裂纹。铜熔透裂纹的形成源于过饱和铜原子沿奥氏体晶界在钢侧熔融线上穿透、聚集与合并。镍基填充金属可以有效地消除熔透裂纹，这是因为铜在钢侧的扩散和钢侧的热影响区受到Ni含量增加的显著限制。

选择合适填充材料，研究其影响渗透裂纹的机理将是焊接铜-钢复合材料的方法。同时引入激光焊接，有利于通过有效控制铜与不锈钢的熔合比例来避免焊接缺陷。

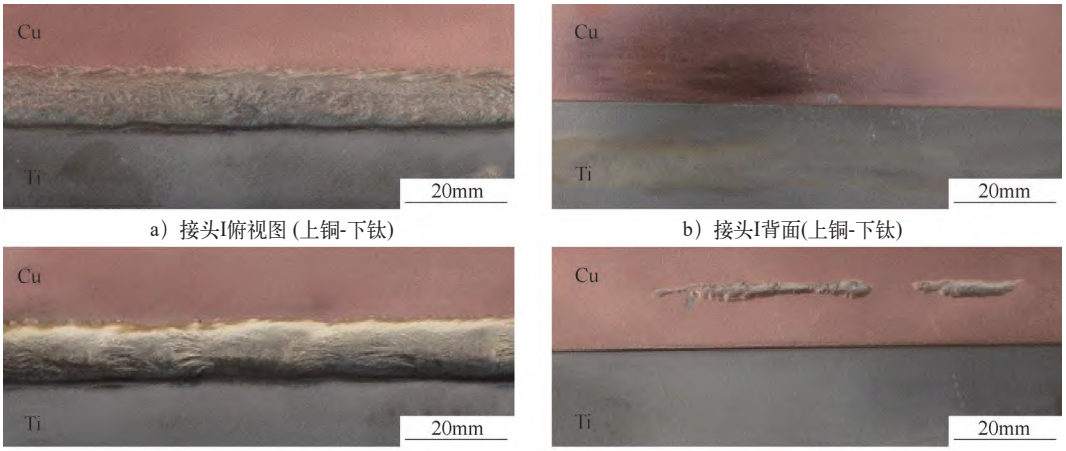
2.5 钛-铜的连接

钛与铜的连接既满足导热、导电、耐磨、耐腐蚀要求，又满足轻量化、高强度要求。而钛和铜的相互溶解度有限并且两种材料之间的热物理性能存在很大差异，特别是在高温下形成脆性钛-铜金属间化合物。

当焊接钛合金和铜时，一种是通过设计新型填充材料来抑制钛和铜之间的IMC层的生成；另一种是通过减少热输入调节IMC层的形成。此外搭接位置不同也会对材料的性能有所影响。

CAO等[29]采用CMT技术研究了两种金属间搭接位置对纯钛TA2与纯铜T2搭接接头组织和抗拉抗剪强度的影响，可得到润湿性和铺展性良好的焊接接头，如图3所示。接头I（上铜板-下钛板）和接头II（上钛板-下铜板）由焊缝金属、铜焊缝界面和钛焊缝界面组成。在钛焊缝界面中存在Ti_2Cu、TiCu和$AlCu_2Ti$等3种IMCs层，由于温度梯度和界面反应时间不同，因此IMCs层的显微组织和厚度也有所不同。陈涛等[30]研究发现，设计成钛上铜下的搭接方式，必须使处于下方的铜母材熔化才能得到力学性能较好的焊接接头。由此可见，搭接位置会影响接头的力学性能。

HUANG等[31]研究了TC4钛合金和T2纯铜板的CMT焊接，选择商用ERCuMnNiAl作为填充材料，发现填充材料促进合金元素在焊接过程中的协同扩散，提高焊接接头的强度和韧性。CAO等[32] 采用ERCuNiAl 铜焊丝进行钛和铜的CMT钎焊试验。热

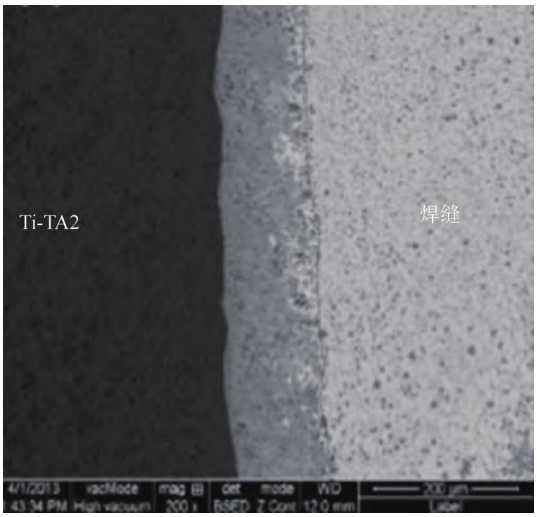


a）接头I俯视图 (上铜-下钛)　b）接头I背面(上铜-下钛)

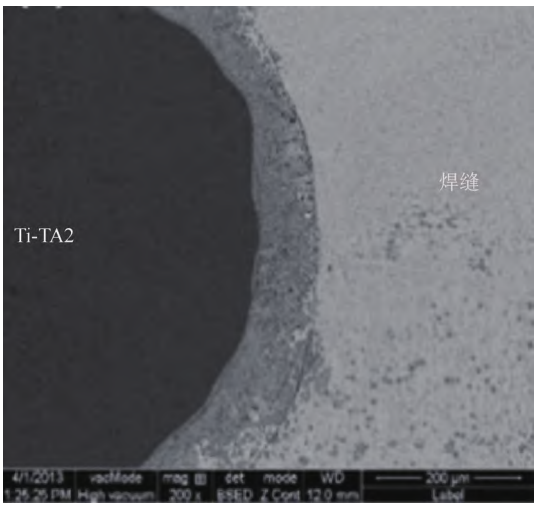
c）接头II俯视图 (上钛-下铜)　d）接头II背面(上钛-下铜)

图3　焊接接头宏观特征[30]

输入影响IMC层的厚度，界面中间117~129μm，界面根部80~100μm，如图4所示。填充材料使得CMT接头具有熔焊和钎焊的双重特性。



a）界面中间面



b）界面根部

图4　界面形貌[32]

2.6　钛-钢的连接

钛-钢部件因其重量轻、抗氧化、耐腐蚀等特点，被广泛应用于高速风洞、石化部件、生物相容性材料以及飞机发动机中，由于熔点高，连接过程需要大量的热量输入，因此会产生显著的残余应力，此外，容易生成Fe_2Ti及FeTi脆性金属间化合物。

JIN等[33]在CMT 连接 TC4-304不锈钢中使用$CuSi_3$作为填充金属，分析了液态$CuSi_3$在304不锈钢和TC4板上润湿过程中的铺展限制因素，Si等界面活性元素的加入可以显著提高沉积金属的铺展性，润湿性随着热输入的增加而逐渐提高，Fe在液态Cu中的扩散提供了扩散驱动力。XIA等[34]研究了Ti6Al4V与316 L不锈钢连接时，Ni含量对填充材料铺展性的影响，随着Ni含量的增加，液态Cu-Ni-Ti合金在Ti合金表面的铺展逐渐改善，而Ni元素的加入导致钢板上的铺展性较差。

虽然填充金属不同会影响铺展性，但更多地关注界面微观结构演变与铺展动力学之间的关系，可以更好地理解并实现钛-钢的可靠连接。

ZHU等[35]采用激光-电弧复合的方法进行了钛-钢的连接，研究了热输入对IMC层的影响。结果表明，当热输入较低时，金属间化合物层越小，接头处理后的残余应变也越小，主要分布在IMC层的晶界处。即使脆性IMC的数量减少了，但不能消除，因此采用新工艺是研究探索的新方向。JIN等[36]研究了采用CMT辅助混合磁场连接TC4-304不锈钢的润湿机理及微观结构演化。研究发现，磁场可以有效

促进液态Cu在TC4和 304不锈钢板表面的润湿，IMC层的厚度有效减小。磁场影响会扩散限制因素和界面微观组织。磁场对填充材料铺展性和界面微观结构演变的影响不明确，因此，在钛-钢的连接中，润湿机制值得进一步研究。

3 电弧增材制造

电弧增材制造技术相较于其他增材工艺（如激光增材制造、电子束增材制造等）沉积效率更高，不受零件尺寸的限制，在大型和超大型结构件的制造中具有突出优势[37]。

CMT电弧增材制造具有稳定的沉积速率和更低的热输入，在航空航天、汽车制造等领域中用于生产复杂的组件，这些组件难以制造或需要多种零部件组装。 为CMT电弧增材制造提供了近净成形或净成形生产的可能性[38，39]，并且能够沉积多种材料，如铝合金、钛合金、镍合金、不锈钢和双相不锈钢等。近些年来，一些新型电弧增材制造工艺，如激光-电弧复合、超声波电弧增材制造等[40]。

HU等[41]通过外加磁场辅助CMT电弧增材制造Al-5%Mg合金沉积，纵向直流磁场通过改变电弧形貌影响液态金属的流动，提高了成形质量、微观组织和力学性能。纵向直流磁场在试样孔隙率缺陷的产生和形貌形成中起着显著的优化作用。引入外部装置来改善缺陷的形成和力学性能，意义重大。MA等[42]将超声波振动应用于Inconel 625零件的CMT电弧增材制造，超声波振动下，在横向方向上抗拉强度提高到（677.1±4.6）MPa。所有样品断裂均以跨晶延展模式发生，但在超声波振动下，拉伸样品断裂表面的凹坑更致密、更均匀。超声波振动下抑制了CMT焊缝中粗柱状晶粒的定向生长。HE等[43]采用新型激光和冷金属转移脉冲电弧混合增材制造（LCAHAM）技术制备了高强度铝合金的薄壁结构。结果表明，送丝速度和激光功率的综合效应在降低孔隙率方面起着明显的作用。LAHAM结合了两种技术的优点，成为制造铝合金结构件的另一种方法，在高强度铝合金生产中具有进一步探索的巨大潜力，为CMT电弧增材制造提供了新的思路。WANG等[44]采用纳米TiC/Ti晶粒细化剂CMT电弧增材制造铝镁合金，纳米TiC/Ti晶粒细化剂可有效细化铝镁合金的晶粒尺寸，提高其力学性能。TiC颗粒作为异质成核位点，提高了成核速率且抑制了晶界的生长。电弧增材制造是典型的重复熔融和凝固过程，因此受到热积累和循环热效应的影响，导致微观结构（如晶粒、第二相等）在沉积过程中变粗，晶粒细化剂的使用为增材制造出现的相关问题提供了方向。

在实际工作中，为了满足稳定性和疲劳方面的要求，可能需要更复杂的结构，这会使焊接组件变得复杂。VISHNUKUMAR等[45]提出了一种利用电弧增材制造修复船用复杂铝结构腐蚀表面的新方法。采用CMT和CMT+P工艺在AA5052基体上增材制造铝合金。在CMT+P模式下，微观结构呈现出更为细小的等轴枝晶，试样的腐蚀速率在0.18~0.21mm/a之间，证实了其优异的耐蚀性。提升材料力学性能，开发新的电弧模式尤为重要。ZHANG等[46]研究了采用基于冷金属过渡（CMT）的电弧增材制造技术，利用不同热输入制备了3个薄壁Inconel 625合金结构，并进行了主动层间冷却以限制热量积聚。热输入增加会降低表面粗糙度，并且随着热输入的增加，枝晶臂间距的大小增大，从而导致力学性能的恶化。LERVÅG等[47]采用电弧增材双相钢制造不同热输入的薄壁。研究发现，由于层沉积过程中多次加热和冷却循环，会形成脆性的二次相，如金属间 σ 相，低层间温度较低，加上所应用的焊丝中Ni含量高，没有形成金属间相，铁素体体积分数低、CrN的析出和二次奥氏体的形成，高热量输入导致了力学性能较差。降低热输入和主动层间冷却是细化微观结构和减少各向异性的有效方法。开发主动冷却技术，避免热量积聚，是解决问题的有效途径。HWAN [48]研究了热积累对基于CMT的316L不锈钢电弧增材制造多层镀层的影响，对多层沉积过程进行了全面的试验和数值研究。结果表明，在沉积后冷却过程中，除峰值温度外，模拟温度曲线与实测温度曲线基本一致，误差约为8%，比较了沉积物的实测和模拟SDAS，以研究热积累。结果表明，在冷却速率为50K/s时，关于SDAS尺寸和冷却速率的方程更为准确。通过数值模拟可以预测电弧增材制造的硬度和屈服强度等力学性能。

目前，在CMT电弧增材制造方面也存在着不足和挑战，电弧热源的持续热输入会导致熔池中出现严重的温度梯度和非平衡凝固过程。此外，电弧增材制造生产的零件常出现层间气孔和微裂纹等缺陷。同时，不可避免的问题包括层间缺陷、粗晶粒尺寸和严重的微观组织各向异性，破坏了其力学性能，从而限制了电弧增材制造的广泛应用。为了提高部件的成形质量、调控微观组织和力学性能，目前的研究主要集中在优化工艺参数和引入外部辅助能源上。关于工艺参数的优化，主要集中在CMT 模式、热输入、保护气体、脉冲电弧和热处理等工艺参数对电弧增材制造中部件成形的影响[49]。研究发现，使用适当的工艺参数可以显著减少薄壁部件中的孔隙缺陷，并提高部件的整体性能。由于热输入可控范围的限制，要使具有理想微观结构和力学性能的沉积组件获得良好的成形质量是一项挑战。因此，基于单个 WAAM 热输入参数的优化引入外部辅助能量的复合材料过程的研究已成为一个热点。关于外部辅助能源的引入，各种复合增材制造方法已被证明可以有效优化部件的成形质量和力学性能，如增强纳米颗粒的层间添加 [50]、超声波辅助增材制造、层间滚动[51]、层间轧制[52]、层间搅拌摩擦和层间超声波冲击[53]等。此外，外部磁场辅助工艺也广泛用于电弧增材制造工艺。按照磁场方向可分为轴向磁场、纵向磁场、横向磁场及旋转磁场，按照励磁电源可分为直流磁场、交流磁场等[54-56]。现有研究表明，外部磁场可以通过与电弧中的带电粒子相互作用来产生洛伦兹力。洛伦兹力会影响熔融液滴的电弧形态和过渡模式，进而改变熔池内熔融金属的流动方向。液体熔池的这种搅拌促进了气孔的逸出，减少了缺陷。其结果是对固化微观结构的性能产生积极影响，最终减少缺陷并产生均匀细化的微观结构。

4　CMT存在的不足与面临的挑战

CMT是一种先进的焊接工艺，虽然具有许多优点，但也存在一些不足与挑战。在焊接方面，目前还缺乏系统的理论及机理分析，对于IMC层这一主要问题还需要对焊接工艺和机理进行更深入的研究。在增材制造方面，面对高性能要求的工件，电弧热源的持续热输入常会出现层间气孔和微裂纹等缺陷，面对有着高精度要求或复杂形状的工件，CMT还不能完美地胜任，需要结合或开发新的工艺。在焊接材料方面，受到一定的限制，CMT技术更适用于特定类型的金属，尤其是铝合金，对某些高强度钢材的焊接效果不佳。在热影响区（HAZ）方面，尽管CMT技术能够减少热输入，但仍可能在焊接过程中产生不均匀的热影响区，影响焊接接头的力学性能。在焊接过程控制方面，焊接过程中对焊接电流、电弧电压等参数的实时监控要求高，任何小的偏差都可能导致焊接缺陷。在焊接稳定性方面，在不同的工作条件下，焊接过程的稳定性可能受到影响，导致焊接质量不一致。在焊后处理方面，焊后处理可能需要额外的工序，如去除焊接污垢和氧化物，以保证焊缝质量。在经济性方面，虽然CMT技术相比其他设备（如激光设备）成本较低，在某些应用中可提高效率，但其初期投资和维护成本可能较高，限制了其广泛应用。尽管CMT技术在焊接领域展现了良好的前景，但在实际应用中仍需克服上述挑战，以提高其适用性和经济性。

5　结论与展望

CMT技术由于热输入低、熔覆层成形美观、成本低以及绿色高可靠等优势，所以CMT技术在异种金属连接、薄板连接、增材制造中应用广泛。目前，CMT技术在异质连接和增材制造上的研究不仅是对基础机理的研究，也体现在各种不同的CMT工艺中，目前对于CMT技术的发展和建议有以下观点。

1）在异质材料连接和增材制造过程中，一种是可以通过设计新型填充材料来抑制脆性IMC的生成，即冶金控制；另一种是通过设计新型焊接工艺，减少热输入来调节IMC层的形成，即过程控制；另外，也可以通过外部装置如外加磁场、超声波等辅助装置，进而进一步提升材料性能。

2）在电弧增材制造方面，要获得无缺陷、表面精度高，以及具有理想微观结构的部件仍存在挑战，亟需开发新的工艺或者外部辅助技术。

3）当前，CMT技术主要应用于常见金属及合金，因此探索新材料、难焊材料并扩大应用范围，是未来发展的重要方向。

4）CMT焊接技术已采用了数字化技术，应当开放多端口，便于数据提取与通信，满足数字化制造、智能制造的需求。

参考文献：

[1] 耿占一，胡连海，霍佳磊，等. 激光复合焊技术研究及应用进展[J]. 金属加工（热加工），2023（4）：1-9.

[2] 时尚，刘丰刚，黄春平，等. 激光复合热源焊接技术的研究进展[J]. 材料导报，2022，36（11）：170-177.

[3] 凌子涵，王利卿，张震，等. 镁合金电弧增材技术基本工艺及工艺因素影响综述[J]. 材料导报，2024，38（7）：1-15.

[4] 解瑞军，王祺星，陈芙蓉. 固溶时效处理对4043铝合金沉积层组织与性能的影响[J]. 精密成形工程，2022，14（8）：134-139.

[5] 胡彪，邓劲莲，蔡高参，等. 冷金属过渡电弧增材制造技术研究进展[J]. 机电工程，2022，39（3）：375-381.

[6] 胡玉. CMT焊接S32101双相不锈钢焊缝成形研究[J]. 金属加工（热加工），2024（3）：76-82.

[7] 赵俊鹏，刘子奇，刘长军. 激光-CMT复合焊接的研究现状[J]. 热加工工艺，2022，51（9）：7-12.

[8] 曹睿，冯振，陈剑虹. 紫铜薄板CMT搭接焊接接头组织与性能[J]. 兰州理工大学学报，2013，39（6）：24-27.

[9] 赵锴，杨成刚，易翔. CMT焊接技术的应用、发展与展望[J]. 电焊机，2022，52（5）：60-66.

[10] 杨修荣. 超薄板的CMT冷金属过渡技术[J]. 焊接，2005（12）：52-54.

[11] CHEN X，YAN J，REN S，et al. Microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V/Al1060 joints by ultrasonic-assisted brazing in air[J]. Materials Letters，2013，95：197-200.

[12] WANG Q，LI D G，WANG K，et al. Effects of high uniform magnetic fields on diffusion behavior at the Cu/Al solid/liquid interface[J]. Scripta Materialia，2007，56（6）：485-488.

[13] AGUDO L，EYIDI D，SCHMARANZER C H，et al. Intermetallic Fe_xAl_y-phases in a steel/Al-alloy fusion weld[J]. Journal of Materials Science，2007，42（12）：4205-4214.

[14] ZHANG H，FENG J，HE P. Interfacial phenomena of cold metal transfer (CMT) welding of zinc coated steel and wrought aluminium[J]. Materials Science and Technology，2008，24：1346-1349.

[15] KANG K，LIU Y，LI J，et al. Microstructure and mechanical properties of Al/Steel butt joint by hybrid CMT welding with external axial magnetic field[J]. Materials，2020，13（16）：3601.

[16] KANG M，KIM C. Joining Al 5052 alloy to aluminized steel sheet using cold metal transfer process[J]. Materials & Design，2015，81：95-103.

[17] WEN Z，YU G，LI S，et al. Influence of Ni/Zn double coating on the steel on penetration welding-brazing by CMT arc-laser hybrid heat source[J]. Optics & Laser Technology，2021，134：106602.

[18] ZHANG D，ZHANG X，WANG W，et al. Weld formation，microstructure and mechanical properties of magnesium alloy and Al-Si-coated steel dissimilar lap joints fabricated by the CMT weld-brazing process[J]. Materials Characterization，2023，204：113152.

[19] 靳广胜，许欣，刘颖. 镁合金与钢CMT电弧熔-钎焊微观组织及性能研究[J]. 热加工工艺，2019，48（3）：70-72.

[20] CAO R，CHANG J H，HUANG Q，et al. Behaviors and effects of Zn coating on welding-brazing process of Al-steel and Mg-steel dissimilar metals[J]. Journal of Manufacturing Processes，2018，31：674-688.

[21] 曹睿，林巧力，陈剑虹. 镁/钢异种金属CMT对接熔钎焊连接机理[J]. 焊接学报，2016，37（5）：37-40，130.

[22] JING S，KEHONG W，QI Z，et al. Microstructure characteristics and properties of Mg/Al dissimilar metals made by cold metal transfer welding with ER4043 filler metal[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2013，42（7）：1337-1341.

[23] SHANG J，WANG K，ZHOU Q，et al. Microstructure characteristics and mechanical

properties of cold metal transfer welding Mg/Al dissimilar metals[J]. Materials & Design，2012，34：559-565.

[24] LI W，CHANG J H，WEN B F, et al. Joining of dissimilar metals between magnesium AZ31B and aluminum A6061-T6 using galvanized steel as a transition joining layer[J]. Journal of Iron and Steel Research International，2022，29（4）：677-686.

[25] 杨卫鹏，李双吉，朱笑睿，等. 铜/钢异种金属CMT熔钎焊工艺研究[J]. 焊接，2015（4）：41-45，74-75.

[26] MIRSKI Z，WOJDAT T，HEJNA J. Assessment of structure and selected mechanical properties of braze welded joints of copper-lined steel tubes[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering，2020，20（1）：12.

[27] MENG Y，LI X，GAO M，et al. Microstructures and mechanical properties of laser-arc hybrid welded dissimilar pure copper to stainless steel[J]. Optics and Laser Technology，2019，111：140-145.

[28] XIAO P，WANG L，TANG Y，et al. Effect of wire composition on microstructure and penetration crack of laser-cold metal transfer hybrid welded Cu and stainless steel joints[J]. Materials Chemistry and Physics，2023，299：127480.

[29] CAO R，FENG Z，CHEN J H. Microstructures and properties of titanium–copper lap welded joints by cold metal transfer technology[J]. Materials & Design，2014，53：192-201.

[30] 陈涛，雒旭亮，马元学，等. 钛铜异种金属CMT焊接参数的优化[J]. 化工机械，2015，42（5）：639-642.

[31] HUANG L，DONG H，MA Y，et al. Interfacial layer regulation and its effect on mechanical properties of Ti6Al4V titanium alloy and T2 copper dissimilar joints by cold metal transfer welding[J]. Journal of Manufacturing Processes，2022，75：1100-1110.

[32] CAO R，FENG Z，LIN Q，et al. Study on cold metal transfer welding–brazing of titanium to copper[J]. Materials and Design，2013，56：165-173.

[33] JIN P，SUN Q，LIU Y，et al. Microstructural evolution and mechanical property of TC4/304 stainless steel joined by CMT using a $CuSi_3$ filler wire[J]. Journal of Manufacturing Processes，2020，60：308-317.

[34] XIA Y，DONG H，ZHANG R，et al. Interfacial microstructure and shear strength of Ti6Al4V alloy/316 L stainless steel joint brazed with Ti33.3Zr16.7Cu50 xNix amorphous filler metals[J]. Materials & Design，2020，187：108380.

[35] ZHU Z Y，LIU Y L，GOU G Q，et al. Effect of heat input on interfacial characterization of the butter joint of hot-rolling CP-Ti/Q235 bimetallic sheets by laser+CMT[J]. Scientific Reports，2021，11（1）：10020.

[36] JIN P，LIU Y，SUN Q，et al. Wetting mechanism and microstructure evolution of TC4/304 stainless steel joined by CMT with an assisted hybrid magnetic field[J]. Journal of Alloys and Compounds，2020，819：152951.

[37] 伊浩，刘蒙霖，周进. 基于CMT的钛合金电弧增材制造技术研究现状与展望[J]. 中国表面工程，2021，34（3）：1-15.

[38] ALI Y，HENCKELL P，HILDEBRAND J，et al. Wire arc additive manufacturing of hot work tool steel with CMT process[J]. Journal of Materials Processing Technology，2019，269：109-116.

[39] 林清成，郭纯，李文清，等. 铝合金电弧增材制造研究现状[J]. 金属加工（热加工），2023（9）：20-26.

[40] 张兆栋，何胜斌，王奇鹏，等. 电弧增材制造工艺方法、增材焊料及后处理的研究现状[J]. 电焊机，2021，51（8）：1-10，176.

[41] HU Y，CHEN F，CAO S，et al. Preparation and characterization of CMT wire arc additive manufacturing Al-5%Mg alloy depositions through assisted longitudinal magnetic field[J]. Journal of Manufacturing Processes，2023，101：576-588.

[42] MA Q，CHEN H，REN N，et al. Effects of ultrasonic vibration on microstructure, mechanical properties, and fracture mode of Inconel 625 parts

fabricated by cold metal transfer arc additive manufacturing[J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2021，30（9）：6808-6820.

[43] HE S，ZHANG Z，LI H，et al. Multi-objective optimization for forming quality of laser and CMT-P arc hybrid additive manufacturing aluminum alloy using response surface methodology[J]. Actuators，2024，13（1）：23.

[44] WANG Q，GUO Y，LI F，et al. Microstructures and mechanical properties of nano-TiC/Ti-refined AlMg alloys prepared by wire arc additive manufacturing[J]. Materials Characterization，2024，208：113614.

[45] VISHNUKUMAR M，PRAMOD R，RAJESH KANNAN A. Wire arc additive manufacturing for repairing aluminium structures in marine applications[J]. Materials Letters，2021，299：130112.

[46] ZHANG C，QIU Z，ZHU H，et al. On the effect of heat input and interpass temperature on the performance of Inconel 625 alloy deposited using wire arc additive manufacturing—cold metal transfer process[J]. Metals，2022，12（1）：46.

[47] LERVÅG M，SØRENSEN C，ROBERTSTAD A，et al. Additive manufacturing with super duplex stainless steel wire by CMT process[J]. Metals，2020，10（2）：272.

[48] HWAN P J & L S. CMT-based wire arc additive manufacturing using 316L stainless steel (2): Solidification map of the multilayer deposit[J]. Metals，2021，11：1725-1725.

[49] CONG B，CAI X，QI Z，et al. The effects of ultrasonic frequency pulsed arc on wire + arc additively manufactured high strength aluminum alloys[J]. Additive Manufacturing，2022，51：102617.

[50] CHEN F，YANG Y，CHEN C，et al. Effect of La2O3 particle size on the microstructure and properties of AlSi alloys deposited via wire arc additive manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Processes，2021，68：523-533.

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

[52] GU J，WANG X，BAI J，et al. Deformation microstructures and strengthening mechanisms for the wire+arc additively manufactured Al-Mg4.5Mn alloy with inter-layer rolling[J]. Materials Science and Engineering：A，2018，712：292-301.

[53] ZHAO Z，YANG X，LI S，et al. Interfacial bonding features of friction stir additive manufactured build for 2195-T8 aluminum-lithium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes，2019，38：396-410.

[54] SHI X，JIN Y，WANG Y，et al. Enhancing wire arc additive manufacturing in vibrational environments with longitudinal magnetic fields[J]. Materials Today Communications，2024，38：108035.

[55] CHEN C，LI W，DU W，et al. Feasibility analysis of standing wave ultrasonic - Axial magnetic field hybrid for controlling GTAW arc characteristics[J]. Journal of Manufacturing Processes，2022，80：187-195.

[56] WANG L，WU C，CHEN J，et al. Experimental measurement of fluid flow in high-speed GMAW assisted by transverse magnetic field[J]. Journal of Manufacturing Processes，2020，56：1193-1200.

MW 20241224