多丝电弧增材制造研究现状

吴涛[1]，武子琴[1]，闫欢[1]，毛亚宁[1]，汪殿龙[1, 2]，梁志敏[1, 2]，王立伟[1, 2*]

1.河北科技大学材料科学与工程学院　河北石家庄　050018

2.河北省材料近净成形技术重点实验室　河北石家庄　050018

摘要：近年来，随着增材制造技术的蓬勃发展，越来越多的学者开始关注电弧熔丝增材制造技术，其中多丝电弧增材制造技术相比于传统的单丝电弧进一步提高了熔敷效率并易于多合金成分调控，得到了密切关注。主要介绍了为均衡多丝电弧增材制造技术熔敷效率与热输入之间的关系和控制熔滴平稳过渡而进行的创新与改进，总结了多丝电弧增材制造异质多丝合金化的研究现状，并分析了多丝电弧增材制造技术目前所面临的问题以及未来研究目标与发展趋势。

关键词：多丝增材制造；熔敷效率；热输入；异质合金化；金属材料

1　序言

从1925年BAKER[1]等首次在电弧热源的基础上进行金属“3D打印”开始，经过几十年的发展，增材制造技术在制造业中得到了广泛认可[2]。增材制造（Additive Manufacturing，AM）以数学模型为基础在计算机的协助下，通过逐层成形，分层堆积的方式，直接制造出复杂的结构件，跳过了生产步骤，这就使得产品开发周期更短，并能满足定制个性化产品需求[3-5]。金属材料的增材制造是增材制造领域的重要一环，也是增材制造领域的重点研究内

基金项目：国家自然科学基金资助项目（51875168），河北省重点研发计划资助项目（19250202D），河北省自然科学基金资助项目（E2019208089）。

通信作者：王立伟，副教授，博士，主要研究方向：电弧增材制造新工艺及微观组织调控，E-mail: wangliwei110127@163.com。

[25] HOPKINSON N，DICKNES P.Analysis of rapid manufacturing—using layer manufacturing processes for production[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，Part C：Journal of Mechanical Engineering Science，2003，217（1）：31-39.

[26] ATZENI E，SALMI A.Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2012，62（9-12）：1147-1155.

[27] PIILI H，HAPPONEN A，VäISTö T，et al.Cost estimation of laser additive manufacturing of stainless steel[J].Physics Procedia，2015，78：388-396.

[28] PINKERTON A J.Lasers in additive manufacturing[J].Optics & Laser Technology，2016，78：25-32.

[29] GAO W，ZHANG Y，RAMANUJAN D，et al.The status，challenges，and future of additive manufacturing in engineering[J].Computer-Aided Design，2015，69：65-89.

[30] QI Q，TAO F.Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0：360 degree comparison[J].Ieee Access，2018，6：3585-3593.

[31] LECUN Y，BENGIO Y，HINTON G.Deep learning[J].Nature，2015，521（7553）：436-444.

[32] HAGEDOORN J，LINK A N，VONORTAS N S.Research partnerships[J].Research Policy，2000，29（4-5）：567-586.

MW 20210327

容。根据金属增材制造所用材料的外形不同，可分为粉末材料、丝线材料和块状材料[6]。弧丝增材制造（Wire Arc Additive Manufacturing，WAAM）属于金属“3D打印”技术，它的基础单元是一段连续的“线”，以电弧为热源将丝材熔敷成设定的形状，在此基础上经过修剪即可达到要求，通过合理的空间设计可高效准确地制造出需要的构件[7-9]。近年来，WAAM因其具有高沉积率、低设备成本、高材料利用率和环境友好性等优点而日益受到工业制造领域的关注[10]。

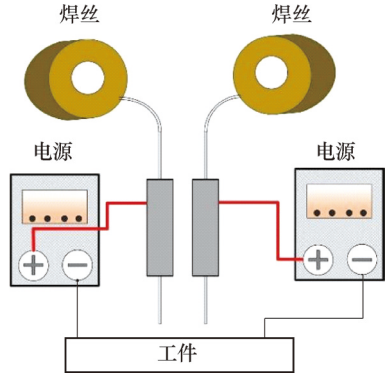
在全球工业4.0的背景下，越来越多的学者通过改进设备、新技术研发等手段改进或提高焊丝的熔敷效率提高产品制造效率[11]。一般来说，影响电弧增材制造成形效率的因素包括送丝量、送丝速度、熔敷速度、熔敷功率、路径规划、工装设计等，使用多丝电弧增材技术便是提高效率的一种选择。相比于单丝电弧增材系统（如TIG焊、MIG焊）使用单一焊丝增材，多丝电弧增材技术使用两根及以上的焊丝并在必要时配以多个电源进行增材。由于多丝电弧增材技术可以采用异质焊丝的特点，这就为增材成分调控提供了基础。

本文综述了国内外学者为兼顾多丝电弧增材制造技术的高熔敷效率与低热输入和控制熔滴平稳过渡而做出的改进与发展，列举了异质多丝合金化研究现状，分析了其优缺点和存在的主要问题，并展望了未来多丝增材制造的发展趋势。

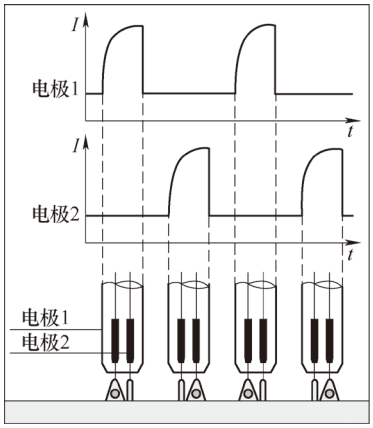
2　多丝电弧增材制造技术的发展与改进

2.1　高熔敷率和低热输入的兼顾

为了寻求更高的熔敷效率，1955年美国Union Carbide & Carbon Corp公司研制出了Tandem焊接方法。Tandem焊接系统是集合了两台焊接电源，在焊丝侧面安装了一个与焊丝共同行走的铜电极，在增材时产生双电弧，提高了熔敷效率[12]。1966年THOMAS等[13]在Tandem焊接的基础上，将铜电极改进成了焊丝，使用两台送丝机产生双电弧的焊接方法。在Tandem焊系统增材时，两根焊丝的电流由两个互相独立控制的电源提供，两焊丝相互绝缘，由电源波形控制交替过渡。图1所示为Tandem焊增材系统。



a）设备示意



b）熔滴过渡[12]

图1　Tandem焊增材系统

石俊彪等[14]采用 Tandem-GMAW 系统电弧增材制造试验，选用直径1.2mm的ER2319焊丝，选用6060铝合金增材基板，探究了不同的基板厚度、预热温度和边缘距离对网格壁板基层成形宽度的影响。这三个关键的温度因素影响了Tandem-GMAW电弧增材制造单层的形貌，在边缘一侧产生热量积累，致使温度升高产生高温区，降低局部的性能。

Time twin是与Tandem类似的一种双丝焊接系统，是通过将两根分别控制的焊丝集成在同一焊枪喷嘴上来实现更好焊接的过程。与Tandem的双焊丝交替过渡不同的是，Time twin采用双丝同时过渡，形成共同的熔池[15]，可以根据需要，前丝和后丝采用不同直径不同类别的焊丝改善增材结构件的表面形貌。前丝选用粗焊丝，实现高的熔敷效率，后丝选用细焊丝进行修饰。邹鹏远等[16]采用福尼斯Time twin系列焊机，采用直径1.2mm的MG70S-6 和QD266两种焊丝经过参数摸索与优化，制备出了7层的试样。图2为福尼斯Time twin焊机焊枪。由于试样底部受到热积累作用，散热具有方向性，导致晶

粒生长具有方向性，显微组织为粗大的树枝晶及胞状晶。

林方略[17]采用附加保护气体的双丝MIG焊进行增材制造研究，增材平台如图3所示，选用不锈钢焊丝，通过调整MIG电源的电流波形、增材速度和气体流量进行试验，并比较各个参数下的成形组织和力学性能。在综合比较后选用均值335A、基值电流差值60A的电流参数下完成了4组直壁墙试样，如图4所示。试样整体表面粗造，有周期性的鱼鳞纹存在。虽然采用335A大电流，提高了熔敷效率，但也导致热输入较大，显微组织粗大。

图2　福尼斯Time twin焊枪[16]

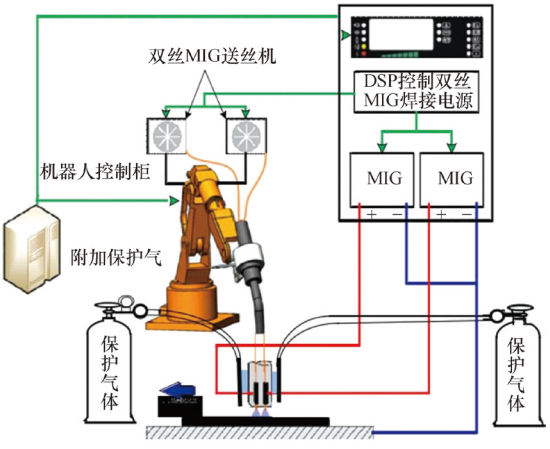


图3　双丝MIG焊增材制造系统平台[17]

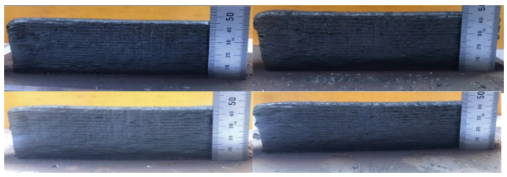


图4　双丝MIG焊增材试样[17]

为了解决电弧增材时熔敷效率和热输入之间的矛盾关系，哈尔滨工业大学的耿正等[18]提出了一种高熔敷率、低热输入的Tri-Arc双丝电弧系统。Tri-Arc是一种采用三台焊接电源、两根焊丝产生三电弧的焊接方法。如图5所示，VPPS、PPS1、PPS2分别是一可变极性电源和两个直流脉冲电源，通过三台电源之间进行相互协调，控制电源的极性和脉冲关系，可以建立三条电弧。三条电弧分别是焊丝E1与工件所产生的电弧A1、焊丝E2与工件所产生的电弧A2，以及焊丝E1和焊丝E2产生的电弧M。部分电流会从两根焊丝之间流过，降低了热输入，M弧的存在也保证了熔敷率。

张杰等[19]采用直径1.6 mm的Fe-Cr-C-B系焊丝，对Tri-Arc双丝电弧堆焊工艺进行了研究，探究了不同焊接参数对堆焊成形形貌和组织的影响，并用高速摄像对M弧形态进行观察，如图6所示。研究发现，Tri-Arc 双丝三电弧Fe-Cr-C-B系焊丝堆焊时熔滴过渡稳定，堆焊组织均匀，有弥散分布的加强相，并具有出色的耐磨性。

Tandem、Time twin、双丝MIG、Tri-Arc在提高熔敷率的同时必然会增加对母材的热输入，从而对增材制造结构件的力学性能和微观组织存在不利的影响。为了解除传统电弧在增材时传热、传质和传力方面固有的约束，近几年又出现众多新型的间接电弧焊接方法。与Tri-Arc所采用三台电源，通过控制使部分电流从双焊丝之间流过不同的是，间接电弧是直接在双焊丝之间建立电弧，电流直接从两个

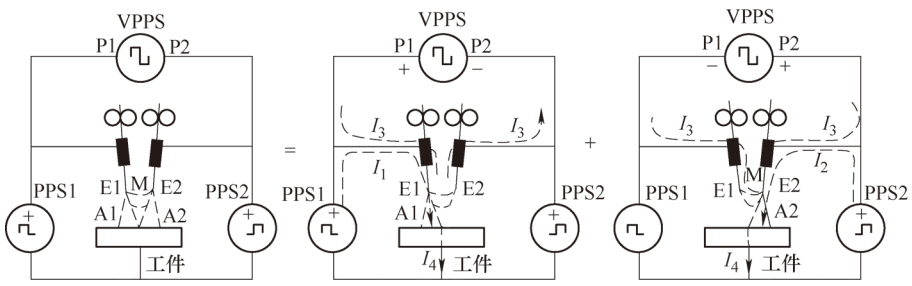


图5　Tri-Arc增材系统示意[18]

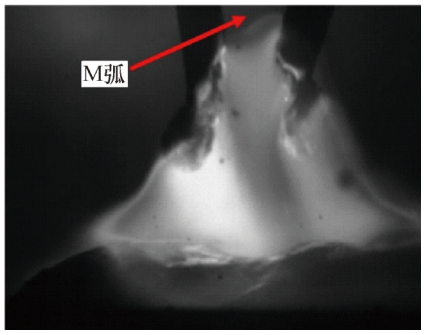


图6　高速摄像拍摄的M弧形态 [19]

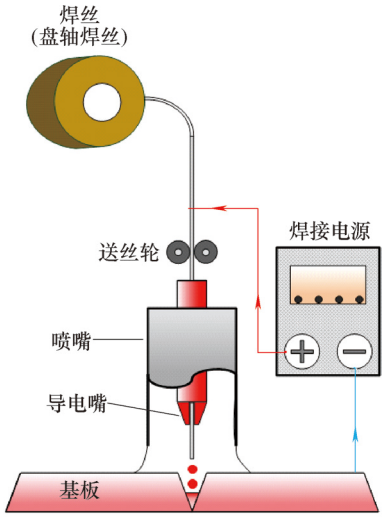
焊丝之间流过的一种焊接方法。通过调节工件与双焊丝之间的距离来调节间接电弧的热输入，图7为传统电弧焊和双丝间接电弧焊的对比。

哈尔滨工业大学的王军等[20]改造了传统的TIG焊，设计出了一套非熔化极（钨极）-熔化极间接电弧焊系统并对其过渡特点进行了研究。当电流增大到一定程度并且熔化极焊丝的送丝速度也达到最佳时，熔滴便会稳定、快速过渡完成增材过程。但由于钨电极对电流的承载能力不足，该系统仍然局限在有限的熔敷效率之中。在对焊接过程中传热、传质及传力可控的研究中，山东大学邹增大、曹梅青和史传伟等[21-25]提出了图7b所示的直流双丝间接电弧焊工艺，虽然熔敷效率提升了，但由于双丝之间直接通电会产生较大的热输入，电磁力会影响熔滴过渡的形态，阴极与阳极产生的熔滴会相互排斥，从而产生并列的熔滴，将其用于增材制造中会产生过渡不稳、成形过程较差，以及增材试样形貌不好的问题，距离该方法大规模应用到增材制造领域还有很大的差距。

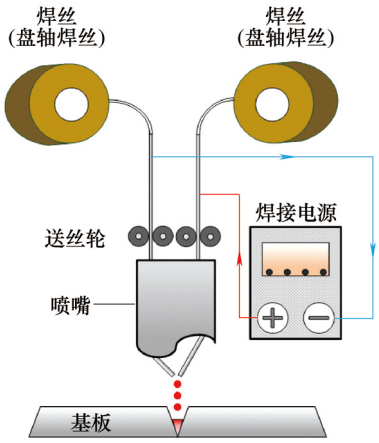
2.2　熔滴稳定过渡的调控

虽然间接电弧的出现平衡了电弧增材时传热、传质的矛盾，但存在着熔滴过渡不稳的问题，为了寻求更稳定的过渡，许多学者通过添加磁场、添加等离子弧和添加激光辅助的方法对间接电弧进行改良。山东建筑大学谢岳良等[26]从外加磁场改变电弧形态及熔滴过渡行为角度出发，对加磁场的直流间接电弧的电弧行为和熔滴过渡进行了研究。在双丝末端加入了可控的磁场，对熔滴施加磁场力。在磁场作用下，熔滴过渡更加平稳，电弧更紧凑，并且成形形貌更好。谢岳良的方案虽然能有效地控制熔滴过渡，但是熔滴带给母材的热输入量不足。

北京工业大学张亮等[27]提出了交叉耦合电弧焊



a）传统电弧焊



b）双丝间接电弧焊

图7　传统电弧焊和双丝间接电弧焊

（见图8），采用双电源，建立两个电弧即非熔化极（即钨极）与基板之间建立电弧，在双焊丝之间添加等离子弧进行调控，双焊丝之间产生间接电弧，间接电弧与底部没有电路。等离子弧和间接电弧参数可单独调节，实现了工件热输入、金属传质和电弧力的解耦控制。

北京工业大学王立伟[28]采用激光辅助交流双丝间接电弧焊的方法进行改善过渡。由于阴阳两极极性的差异，产热条件不同，两极的焊丝熔化速度不同。通过计算并匹配双丝同步送进，使两焊丝产生的熔滴交替过渡并经过相同的位置（激光焦点处）。图9所示为激光辅助交流双丝间接电弧增材系统，通过改变激光的脉冲，在激光的照射下，过渡的熔滴受到蒸汽反冲力的作用，促使熔滴沿激光照射的方向过渡。并且激光照射产生的功率也可以对

增材基板加热，调节热输入，改善成形质量。

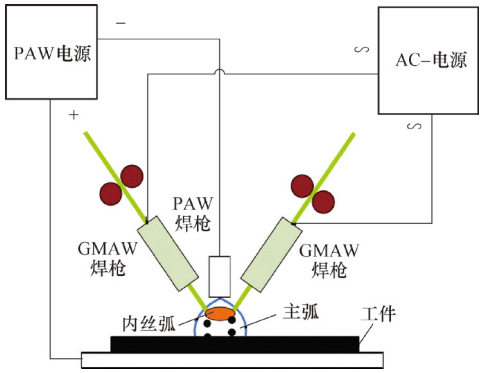
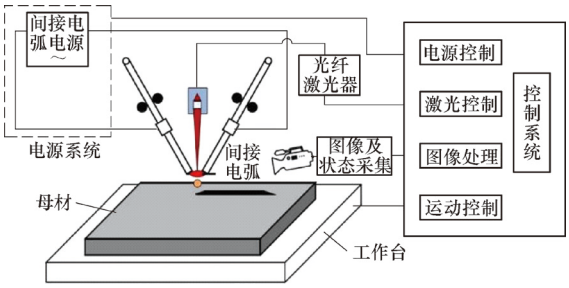
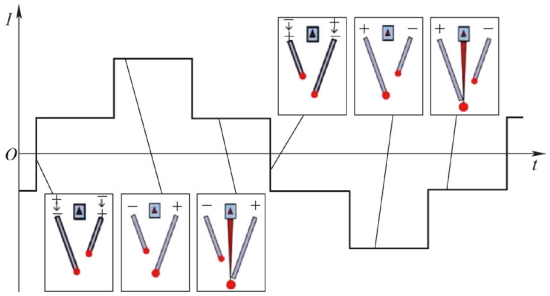


图8　交叉耦合电弧增材系统示意[27]



a）设备示意



b）熔滴度过渡示意

图9　激光辅助交流双丝间接电弧增材系统示意[28]

上述工艺针对熔滴过渡不稳的情况，采用磁场、等离子弧和激光束对熔滴过渡进行调控，改善了熔滴过渡，稳定了电弧，但对等离子弧和激光准确度要求较高，整体设备复杂，成本较高，依旧不适合大规模应用。

3　异质多丝合金化研究现状

随着社会的发展，科技的进步，现代工业对零部件有了更高的要求，由于多丝增材技术采用两根及以上的焊丝进行增材，因此为增材成分调控提供了可能。许多学者通过改进、设计各种增材机构，采用异质双多丝焊丝进行增材制造。为了得到高性能的铝合金增材组织，众多学者对异质Ti-Al、Al-Cu、AL-Mg-Cu、Al-Mg-Cu-Zn合金以及高熵合金的增材制造进行了研究。

钛铝合金性能独特，是航空航天行业的重要材料，但由于其室温塑韧性低，无法拉拔为丝材进行增材制造。为了得到钛铝合金，刘齐等[29]采用双丝WAAM，以直径1.2mm的纯钛丝和纯铝丝成功增材出Ti-48Al试样，图10为堆积试样。经过XRD分析，该试样由较高含量的 γ-TiAl相和较低含量的 α_2-Ti_3Al 相组成。试样的横向抗拉强度为380MPa，纵向抗拉强度为275MPa，并具有不错的抗氧化性能。

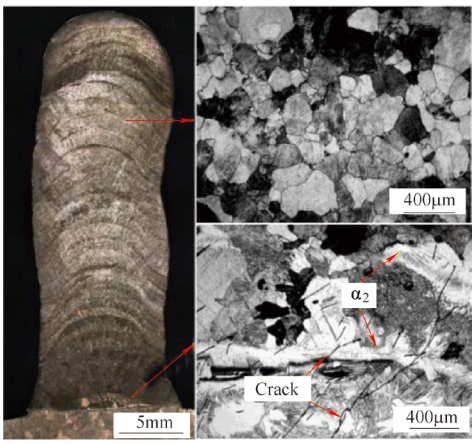


图10　Ti-48Al堆积试样整体及局部位置的光镜组织照片[29]

刘焜[30]设计了一套双丝CMT增材装置，在原有CMT焊枪基础上的加装副焊枪，如图11所示。主焊枪采用CuSi28L焊丝，副焊枪采用ER4043焊丝增材出了Al-Cu合金。用该方法所增材制造的试件，经XRD分析存在Cu、Cu_9Al_4、$CuAl_2$和SiO_2四种相，显微硬度均值达到220HV。试样的拉伸性能存在方向性，垂直方向的极限抗拉强度达到444.1MPa、伸长率11.6%，高于水平方向的极限抗拉强度287.4MPa和伸长率8.2%。

北京航空航天大学祁泽武等[31]采用钨极为热

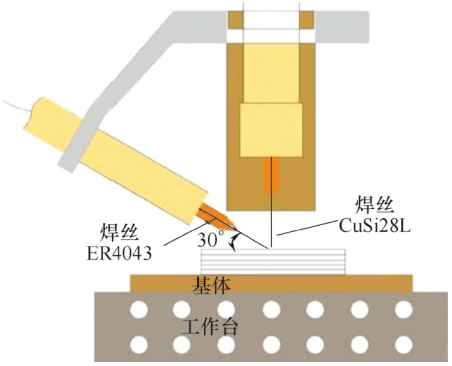


图11　双送丝结构单元[30]

源，进行双丝填充增材（D-WAAM），双送丝机同时送入ER2319(Al-6.3Cu)焊丝和ER5356(Al-5Mg)焊丝，获得了三元Al-3.6Cu2.2Mg、Al-4Cu-1.8Mg、Al-4.4Cu-1.5Mg铝合金直壁墙，微观组织主要由α-Al和S相(Al_2CuMg)组成，其硬度分别达到86HV、90HV和95HV。拉伸性能表现出各向同性，水平方向和垂直方向的极限抗拉强度相差不大，达到280MPa。其钨极双送丝结构单元如图12所示。

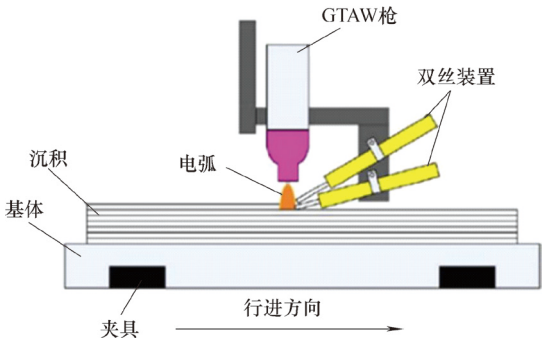


图12　钨极双送丝结构单元[31]

与钛铝合金类似，7系铝合金由于强度高，无法制成丝材进行增材制造，YU Zhanliang[32]采用钨极为热源，在祁泽武基础上进行三丝填充增材，如图13所示，分别选用ER2319焊丝、ER5356和纯Zn丝，制备出了7050 铝合金构件。分析结果表明，电弧增材的7050合金主要由α-Al、S (Al_2CuMg)、η ($MgZn_2$)相和θ ($CuAl_2$)相组成。各个元素的含量与标准7050铝合金相同。增材合金上下部分显微组织有明显差异，上部为等轴晶结构，下部主要由柱状晶组成。其力学性能优异，平均硬度为106HV，水平方向和垂直方向抗拉强度分别达241MPa和160MPa。断口表现出典型的脆性断裂特征，YU Zhanliang详细解释了其力学性能各向异性的原因。

高熵合金是航空航天发动机中的关键材料，为了得到性能优异的增材制造结构件，石家庄铁道大学的赵阳[32]将含有合金元素的金属带和金属粉制成了两根焊丝，以Tandem双丝电弧焊进行增材制造出了Al-Cr-Fe-Co-Ni-Mo、Al-Cr-Fe-Co-Ni-Nb、Al-Cr-Fe-Co-Ni-Mo和Al-Ti-Cr-Fe-Co-Ni-Mo共4种高熵合金，并对其性能进行了分析。SHEN Qingkai[33]采用缆线多丝电弧增材（见图14）的方法增材制造出了Al-Co-Cr-Fe-Ni高熵合金。由7根0.6mm的丝材制成的直径1.8mm焊丝用CMT焊机进行增材。由于CMT快速冷却的特点，所增材出的高熵合金表现出高的强度和延展性，其中压缩强度达到约2.8GPa，塑性应变达到42%。

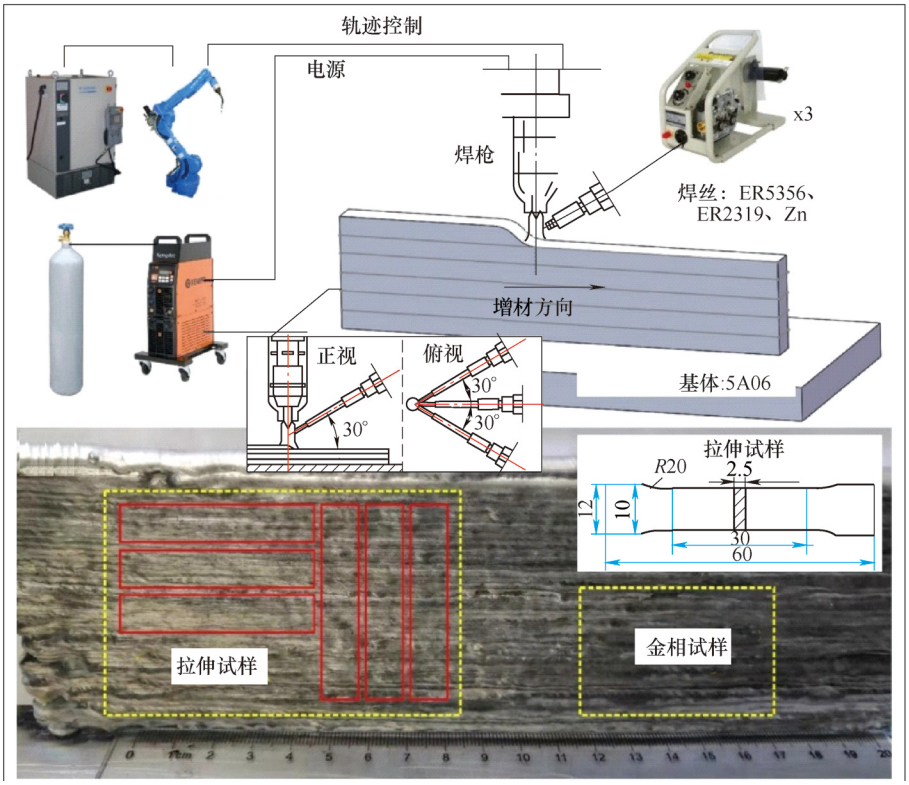
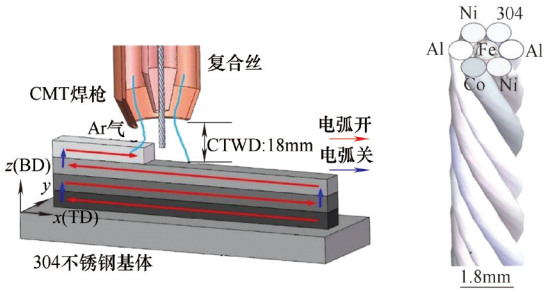


图13　钨极三丝增材系统和试样分析方法[32]



a）缆线多丝电弧增材制造　　b）缆线焊丝

图14　缆线多丝电弧增材制备高熵合金[33]

4　总结和展望

为了提高多丝电弧增材制造的熔敷率、降低热输入，众多学者对传统多丝电弧增材制造方法进行了改进，通过变换丝材与母材之间、多丝之间所构成的电流回路，从根本上剥离传统电弧传质与传热固有的依存关系。双丝或多丝间接电弧增材应运而生，其具有更高的熔敷率和更低的热输入，但双丝或多丝间接电弧增材仍旧存在成形不稳，过渡不好，成形形貌较差的问题，采用激光和等离子对熔滴进行调控，虽然改善了过渡情况，但由于设备复杂，无法大面积应用，所以这一问题的解决方法还有待研究。因此，如何控制在现有设备基础上通过熔滴的平稳过渡来获得高质量成形是亟待解决的问题。众多学者采用异质多丝电弧增材技术成功增材出了性能优异的合金化金属构件，解决了部分合金无法做成丝材进行增材制造的难题，为一些多元合金的增材提供了新的思路。

参考文献：

[1] BAKER R. Method of making decorative articles：United States Patent No.1533300[P]. 1925.

[2] DING D，PAN Z，CUIURI D，et al. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies，developments and future interests[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2015，81（1-4）：465-481.

[3] Gu D D，Shi X Y，POPRAWE R，et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. Science，2021，372：6545.

[4] THOMPSON M K，MORONI G，VANEKER T，et al. Design for additive manufacturing：trends，opportunities，considerations，and constraints[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology，2016，65（2）：737-760.

[5] ALTPARMAK S C，YARDLEY V A，SHI Z，et al. Challenges in additive manufacturing of high-strength aluminium alloys and current developments in hybrid additive manufacturing[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture，2020，4（2）：46-261.

[6] 冯毅，张鹏贤，贾金龙. 近两年丝材+电弧增材制造研究进展[J]. 热加工工艺，2018（21）：23-26，33.

[7] 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.

[8] 王庭庭，张元彬，谢岳良. 丝材电弧增材制造技术研究现状及展望[J]. 电焊机，2017，47（8）：60-64.

[9] 王钰，王凯，丁东红，等. 金属熔丝增材制造技术的研究现状与展望[J]. 电焊机，2019，49（1）：69-77，123.

[10] 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（OCT.）：127-139.

[11] 陈建平，陈开源，陆勇文，等. 焊接快速成形技术的研究现状与发展趋势[J]. 轻工科技，2018（3）：28-30.

[12] UNION Carbide，CARBON Corporation. Method and apparatus for tandem inert gas-shielded arc welding：United States，GB 764571A [P]. 1956-12-28.

[13] HOWLETT，THOMAS W，VERBEEK，et al. Tandem arc automatic welding：United States，3497667A [P]. 1970-02-14.

[14] 石俊彪，赵昀，陈树君，等. Tandem-GMAW电弧增材制造基层成型宽度研究及热过程分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版)，2020，53（9）：910-916.

[15] CHRISTOPH K，奥地利Fronius. TIME TWIN—双丝高速焊[R]. 北京：中国机械工程学会，2007.

（下转第19页）

25：545-550.

[9] 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.

[10] SCHULZ-BEENKEN A S.Martensite in steels: its significance, recent developments and trends[J].Le Journal de Physique IV，19977(C5)：C5-359.

[11] Arcelor Mittal. Steel solutions for plastic moulding[EB]. http://industeel.arcelormittal.com/wp-content/uploads/2016/01/INDUSTEEL_Steel-Molds-tools-die.pdf.

[12] Iron Foundry.Reasonable machining hardness range for iron and steel castings[EB]. http://www.iron-foundry.com/machining-hardness-range.html.

[13] Strength Examining Mold Hardness[EB].http://www.simpsongroup.com/media/usa/SandTestingCatalog.pdf.

[14] Wikipedia.Tool steels[EB].https://en.wikipedia.org/wiki/Tool_steel.

[15] Wikipedia.Surgical Stainless Steel[EB].https://en.wikipedia.org/wiki/Surgical_stainless_steel.

[16] CUNAT P J.The welding of stainless steels[M]. Luxemburg：Euro Inox，2021.

[17] KIM I S，SON J S，KIM I G，et al.A study on relationship between process variables and bead penetration for robotic CO2 arc welding[J].Journal of Materials Processing Technology，2003，136（1-3）：139-145.

MW 20210601

（上接第14页）

[16] 邹鹏远，程东海，刘小萍，等.双丝电弧增材梯度材料的工艺性能[J]. 焊接，2019（10）：12-16.

[17] 林方略.附加保护气双丝MIG焊增材制造工艺与控制[D].广州：华南理工大学，2020.

[18] 耿正，魏占静，韩雪飞，等.高熔敷率低热输入的Tri-Arc双丝电弧焊接方法[J].金属加工(热加工)，2014（22）：36-39，42.

[19] 张杰，王军，牟立婷，等.Tri-arc双丝电弧焊堆焊工艺研究[J].电焊机，2017，47（7）：61-64.

[20] WANG J， CAO J，FENG J C. Microstructure and mechanical performance of depositing CuSi3 alloy onto 30CrMnSi steel plate by the novel consumable and non-consumable electrodes indirect arc welding[J]. Material and Design，2012，31（7）：2253-2258.

[21] 邹鹏远，程东海，刘小萍，等.双丝电弧增材梯度材料的工艺性能[J].焊接，2019（10）：12-16.

[22] 韩彬. 双电极焊条单弧焊电弧特性及熔滴过渡研究[D].济南：山东大学，2002.

[23] 曹梅青，邹增大，杜宝帅，等.双丝间接电弧焊的电弧形态[J].焊接学报，2006，27（12）：49-53.

[24] SHI C W， Zou Y，ZOU Z D，et al. Physical characteristics of twin-wire indirect arc plasma [J]. Vacuum，2014，107：41-50.

[25] 史传伟，邹勇，邹增大，等.双丝夹角对双丝间接电弧特性的影响[J].焊接学报，2015，36（2）：59-62.

[26] 谢岳良.受控磁场作用下的双丝间接电弧及熔滴过渡行为研究[D].济南：山东建筑大学，2019.

[27] 张亮.交叉耦合电弧焊接方法及热力传输机制研究[D].北京：北京工业大学,2016.

[28] 王立伟.激光辅助交流双丝间接电弧熔滴过渡行为与机理[D].北京：北京工业大学,2017.

[29] 刘齐，张萌，付乐琪，等.原位合金化双丝电弧增材制造γ-TiAl组织性能研究[J].稀有金属材料与工程，2020，49（11）：3919-3924.

[30] 刘焜.双丝电弧增材制造铜铝合金的组织与性能[D].温州：温州大学，2019.

[31] Z W，CONG B Q，QI BJ，et al.Microstructure and mechanical properties of double-wire + arc additively manufactured Al-Cu-Mg alloy[J].Journal of Materials Processing Technology，2018，255：347-353.

[32] 赵阳.高熵高温合金双电弧熔丝协同制备与性能研究[D].石家庄：石家庄铁道大学，2019.

[33] SHEN Q，KONG X，CHEN X. Fabrication of bulk Al-Co-Cr-Fe-Ni high-entropy alloy using combined cable wire arc additive manufacturing (CCW-AAM): Microstructure and mechanical properties[J]. Journal of Materials Science and Technology，2021，74：136-142.

MW 20210608