

# 扩散焊固相增材制造技术与工程化应用\*

张 昊<sup>1</sup>,李京龙<sup>2</sup>,孙 福<sup>3</sup>,熊江涛<sup>2</sup>,张赋升<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室,西安 710072;

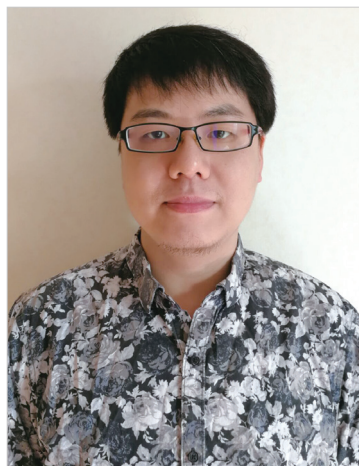
2. 西北工业大学摩擦焊接陕西省重点实验室,西安 710072;

3. 陕西智拓固相增材制造技术有限公司,渭南 714026)

**[摘要]** 扩散焊固相增材制造技术是采用分层实体制造(laminated object manufacturing, LOM)思想,用机加工、化学蚀刻等精密加工方法制作出二维层板结构,然后将层板按照三维结构顺序装配堆叠,通过固相扩散焊连接整体成形,是工业化应用最成熟的固相增材制造方法。介绍了该方法针对不同材料在航空航天、核能、精细化工、船舶、注塑模具等领域已实现工程化的典型应用以及设备制造现状,并预测了未来扩散焊工艺开发与设备制造的发展方向。

**关键词:** 扩散焊;固相增材制造;铁基合金;钛合金;铝合金;叶片

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.08.068



张 昊

博士研究生,主要研究方向为扩散焊界面消失与孔洞闭合机理、扩散焊固相增材制造多层焊接工艺、流道结构扩散焊焊接工艺与无损检测。

增材制造技术(Additive Manufacturing, AM)是传统“去材制造”工艺的逆向思维,利用微积分的

\* 基金项目:凝固技术国家重点实验室自主研究课题(141-TZ-2016)。

思想,将实体结构分层、离散,再逐层堆叠成形的制造技术<sup>[1-2]</sup>。随着智能制造等先进制造技术的发展,增材制造技术在实际工业生产中的地位越来越重要,技术也由早期的快速原型制造(Rapid Prototyping, RP)逐渐发展为整体工程化零件的快速制造(Rapid Manufacturing, RM)<sup>[3-10]</sup>。增材制造技术可能成为引领新一轮工业革命的核心制造技术。预计到2025年,世界范围内增材制造的市场规模将达到2000~6000亿美元<sup>[11]</sup>。

金属增材制造技术按照其形成的方法可以分为液相与固相增材制造技术。液相增材制造技术是通常大众认知的“3D打印”技术,采用激光、电弧、电子束等热源,将金属粉末或者丝材熔化再凝固,由零维到三维的分层、逐点堆叠成形零件<sup>[12-14]</sup>,其成形方法的本质是熔焊。由于在成形过程中金属熔化产生液态物质,因此属于液相增材制造技术。相应

地,固相增材制造技术则在成形过程中没有液态物质产生。它一般是采用固相连接方法,将二维金属平板堆叠连接成为三维的结构件,或者是采用冷喷涂等方法直接成形三维零件。液相增材制造技术主要适于制造外形结构复杂的零件,成形速度快、单个零件制造周期短、尺寸受限制较小,因此适合原型、定制化高等零件的制造;固相增材制造技术通常具有更高的结构精度与强度,适用于内型腔结构复杂、工况条件苛刻的零件制造与批量化生产。

## 固相增材制造技术介绍

固相增材制造技术的主要成形方法有扩散焊、摩擦焊、冷喷涂等。扩散焊是在真空环境中将待焊工件施加一定的压力使其紧密接触,然后加热到一定温度并保温一定时间,使界面处原子充分扩散形成冶金结合的连接方法。焊后,焊缝处没有残余

应力,组织与母材一致,焊缝是面与面的连接,强度也能够达到母材的强度,且焊接过程中变形小,能够保证焊接结构精度,适用于大部分金属材料及玻璃、陶瓷等非金属材料<sup>[15-19]</sup>,扩散焊是目前工业应用中最成熟的固相增材制造方法。

摩擦焊在增材制造的应用主要是搅拌摩擦焊。搅拌摩擦焊是将高速旋转的搅拌头插入工件后沿焊接方向运动,在搅拌头与工件的接触部位产生摩擦热,使金属塑化软化,塑化金属在搅拌头的旋转作用下填充搅拌针后方的空腔,并在搅拌头轴肩与搅拌针的搅拌与挤压作用下实现材料固相连接的焊接方法<sup>[20]</sup>,主要应用于铝合金的增材制造。其优点是焊缝热影响区小、无须添加焊丝与表面保护、设备简单、易于实现自动化、安全环保等<sup>[21-22]</sup>,但其焊缝通常是直线或曲线,限制了可制造零件的结构,通常用于大尺寸板材的拼接。

冷喷涂是通过加速金属粒子到超音速并使其直接撞击基体表面发生物理形变并附着沉积的过程。在整个喷涂过程中金属粒子不熔化,基体表面瞬间温度一般不高于150℃,喷涂致密性好,可在金属、陶瓷、玻璃等基体上喷涂,有效避免金属颗粒的氧化、分解、相变、晶粒长大等缺陷<sup>[1,23]</sup>。目前冷喷涂可沉积大部分金属与合金,可

作为近净成形直接制备零部件,但考虑到生产效率、装备与性能要求,目前其主要应用还是基于增材制造的装备修复与再制造<sup>[2,24]</sup>。

本文主要针对扩散焊固相增材制造方法,介绍其典型应用与装备制造现状,并预测其工艺与设备制造的未来发展方向。

### 扩散焊固相增材制造的典型应用

固相增材制造属于广义增材制造<sup>[2]</sup>,扩散焊固相增材制造(扩散焊分层实体制造)的概念由西北工业大学李京龙教授团队在《10000个科学难题——制造卷》中首先提出<sup>[25]</sup>,其工艺流程如图1所示,是分层实体制造(laminated object manufacturing, LOM)的设计思想与扩散焊成形工艺的结合。

分层实体设计思想是将三维实体微分切片,用机加工、化学蚀刻等精密加工方法制作出二维层板造型结构,然后将层板按照三维结构顺序堆叠装配,通过扩散焊工艺实现整体成形<sup>[26-28]</sup>。分层方法取决于零件结构二维化,是层板制造最简便的方法,多层层板一次成形,与层板数量无关。可成形零件的尺寸主要取决于设备能力、层板制造与焊接工艺。此方法具有扩散焊强度高、变形小的

特点,可以制造高精度、高强度零件,在许多领域的应用中具有不可替代性,以不锈钢、模具钢等铁基合金,以及钛合金、铝合金应用最为广泛。

#### 1 铁基材料的典型应用

铁基材料,以不锈钢、模具钢等材料为主,是应用最早且目前应用比较广泛的材料,针对其扩散焊工艺的研究也比较成熟。扩散焊固相增材制造最早的应用是由美国 Aerojet 于 20 世纪 70 年代制造的不锈钢火星探测器喷注器<sup>[29]</sup>,利用光刻、蚀刻将微细气体流道制作在不锈钢薄板上,再按照设计的顺序堆叠焊接成形。目前在航天领域,发动机喷注器仍是十分重要应用,且结构越来越复杂。图2所示为陕西智拓固相增材制造技术有限公司制造的较早期的喷注器,该公司生产了国内首套上面级卫星姿控发动机喷注器。其结构精密复杂,内部有0.2~0.5mm的气体精细三维流道,是由69层不锈钢薄片焊接制成,其中最薄的层板只有0.05mm,对焊接精度的要求非常高,成形后焊缝的强度与母材相当。

印刷电路板式微通道换热器(printed circuit heat exchanger,

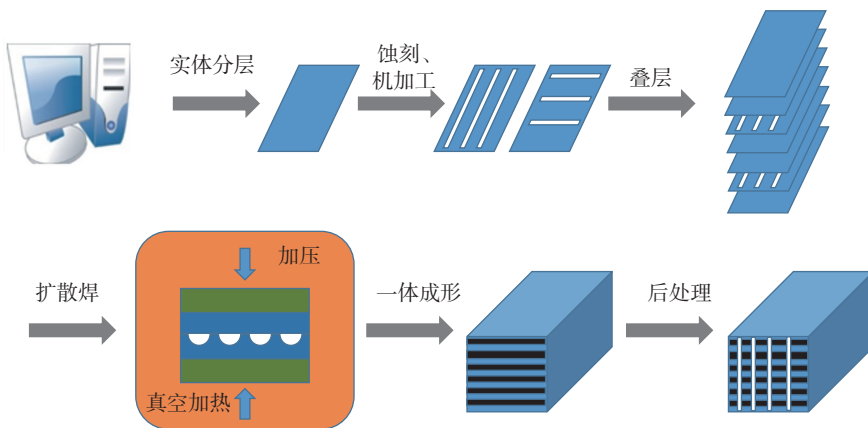
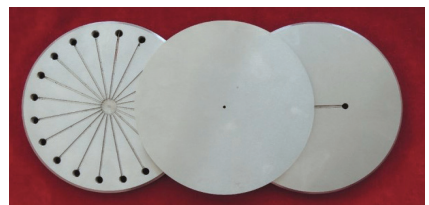
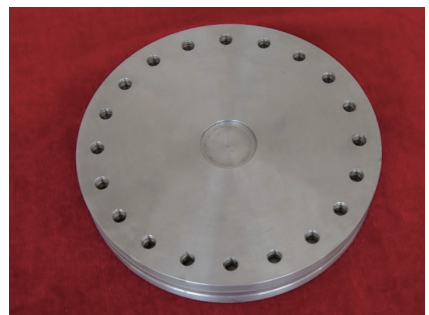


图1 扩散焊固相增材制造工艺流程

Fig.1 Manufacturing process of diffusion bonding solid-state additive manufacturing



(a) 成形前



(b) 成形后

图2 不锈钢喷注器

Fig.2 Stainless steel injector

PCHE)/反应器(printed circuit reactor, PCR)是目前扩散焊固相增材制造的最典型的重要应用。PCHE因其制造过程与印刷电路相似而得名,包括光刻、蚀刻、堆叠等过程,是20世纪80年代初由悉尼大学的学者研发的,随后在1985年由Heatric公司将其商业化,制造出工业化产品<sup>[30-31]</sup>。通常将直径当量在3mm以下的称为微通道<sup>[32]</sup>,更细致的划分则是小于0.2mm的流道为微流道(microchannel),而0.2~3mm的流道则为细流道(minichannel),PCHE的流道一般在0.7~1.5mm<sup>[31]</sup>。

PCHE可以根据不同的应用场合,采用不同的材料,其中不锈钢PCHE是应用最为广泛的一种。首先通过光刻与蚀刻工艺在不锈钢板上成形流道结构,再将板片堆叠通过固相增材制造成形(图3<sup>[31]</sup>)。与传统管壳式换热器相比,在同样的换热效率及压降情况下,PCHE是传统换热器体积与质量的1/5~1/10<sup>[30-33]</sup>。因此,PCHE特别适合应用于海基的核电站、油气平台、舰船、核动力潜艇等对空间和质量要求严格的场合,同时大型PCHE也是超临界流体核反应堆的核心换热部件<sup>[34-36]</sup>。

PCR与PCHE制造工艺相同,只是在结构上能够将两种或者多种物质混合,在其内部发生化学反应生成需要的产物。其结构设计独特,与传统的釜式反应器相比,PCR能够使反应物更快速、充分地混合,反应效率高,同时更安全、环保,而且可以进行模块化的生产管理。因此,PCR已经成功应用于集成化的微反应工厂、海上油气开采(费托反应)、精细化工等领域<sup>[37]</sup>。

目前,PCHE/PCR在世界范围内仅有如Heatric、Alfa Laval等数家企业有能力设计与生产,而我国已经掌握了其核心的制造技术。图4为国内首台自主研发的工业级超临界流体PCHE,可在超过30MPa/650℃的

严苛环境下可靠运行。

扩散焊也适合于模具钢的高强度连接,因此扩散焊固相增材制造在注塑模具领域也有非常广泛的应用前景,最典型的是热分流板(Hot runner)与随形冷却流道(Conformal cooling channel),是高端模具的重要零件<sup>[38]</sup>。热分流板一般采用对开式结构,即将流道分别加工在上下板片上再焊接成整体,其特点是在流道设计上可以采用平滑过渡,无死角、分流均匀、分流更多,且通过机加工制作的流道内壁表面粗糙度小、流阻小、不易堵塞。图5为热流道分流板,可以确保每个模穴完全自然平衡。随形冷却流道是根据具体的产品外形与冷却部位需求设计的三维冷却流道,可以针对产品需要进行定制化冷却,从而提高冷却效率与温度均匀性,扩展传统加工方法无法达到的换热区域,从而提高产品质量、减小废品率(图6)。

其他不锈钢材料的固相增材制造产品在通信、电子、气体检测等诸多领域有大量应用,如5G平板天线(微波通信)、不锈钢掩模板以及各种复杂内型腔结构件等(图7)。从耐高温和防锈角度出发,这些产品也有选用钛合金制造的。

## 2 钛合金的典型应用

钛合金具有较高的强度、卓越的耐腐蚀性能以及较轻的质量,广泛应用于航空航天等领域。扩散焊固相增材制造的钛合金零件在航空航天、船舶、化工等领域发挥着不可替代的重要作用<sup>[39-42]</sup>。

与铁基材料相比,钛合金零件对

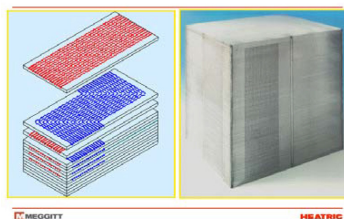


图3 PCHE示意图

Fig.3 Schematic of PCHE

结构与焊接精度要求更高。钛合金的焊接温度一般接近超塑性的

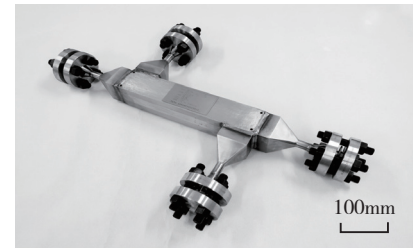


图4 超临界流体微通道换热器

Fig.4 PCHE for supercritical fluid

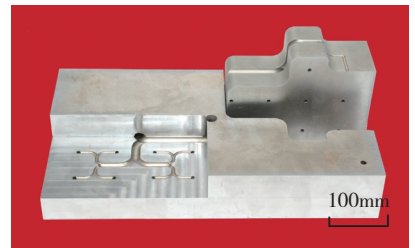


图5 一出三十二分流板

Fig.5 One out of thirty-two hot runner

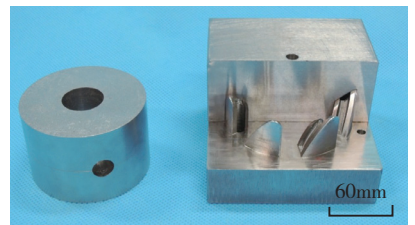
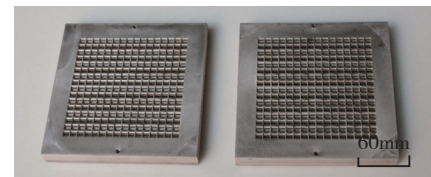
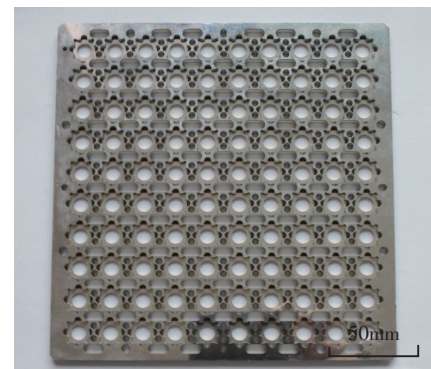


图6 三维随形冷却模具

Fig.6 3D conformal cooling mold



(a) 微波通信平板天线



(b) 掩模板

图7 不锈钢结构件

Fig.7 Stainless steel parts

温度,此时钛合金在焊接压力下容易发生较大的变形而导致结构失效,若采用小焊接压力则会影响接头的质量,因此在结构与工艺设计时必须充分考虑结构的可焊性以及接头质量与焊接工艺的平衡。

钛合金的固相增材制造在航空发动机上的重要应用是空心叶片的制造。空心叶片主要采用的是扩散焊/超塑成形(DB/SPF)的4层板结构工艺,其结构如图8所示。这种结构在叶片筋处存在无法避免的空腔缺陷,并且超塑成形过程工艺控制复杂,容易产生裂纹等缺陷,严重影响叶片的使用寿命,并且与支板头还要进行一次氩弧焊接,增加了焊接缺陷与变形风险。

为了避免上述风险,美国普惠公司生产的空心叶片改用了对开式结构(图9),叶片结构由叶盆、叶背两块型板焊接组成,即2层板结构。与多层结构类似,是将叶片内型腔结构对半分为两层,为了焊接加压方便,焊缝一般为直线,且平行于上下表面,因此对于外表面为曲面的叶片结构,需先将叶片的内部型腔加工在钛合金板或块体上,然后通过扩散焊连接成形内部结构,随后加工出叶片的外形。如果叶片需要弯曲或扭转,则再通过热加工来实现。这种空心叶片的空心度较罗罗公司采用的带蜂窝芯以及桁架的夹层结构要小,应用于F119发动机中。风扇进口处采用了可变弯度的进口导流叶片,其结构类似于F100。三级静子均采用了弯曲设计,可以大大缩小常规直静子叶片上下端的分离损失区。采用弯曲静子叶片后可提高风扇、压气机效率与喘振裕度。弯曲静子叶片也用于F119的高压压气机及民用的PW4084发动机中。目前,具有空心结构的宽弦风扇叶片已成为先进大涵道比涡轮风扇发动机的标准配置,应用在国外许多型号的发动机上<sup>[41]</sup>。采用对开式结构扩散焊制造的叶片

工艺模拟件如图10所示。

钛合金材料的其他固相增材制造的重要应用与不锈钢类似,在航天领域有喷注器、冷板、波纹管等,化工领域有PCR等,以及在船舶、海上油气开采等用的PCHE、PCR等(图11),主要就是针对具体的工况,利用钛合金优异的耐腐蚀或质量较轻等特性,采用多层板结构。不过钛合金优异的耐腐蚀性给层板的蚀刻制造带来一定的困难,也限制了结构的精密性,增加了制造成本。

### 3 铝合金的典型应用

铝的化学性能活泼,容易与氧迅速反应生成致密稳定的氧化膜,从而影响铝基材料的扩散连接,因此成形前对铝合金表面处理十分关键。通常可以通过机械打磨、化学清洗等方法来去除铝合金表面氧化膜,但是铝合金易在处理后再次与空气中的氧反应生成二次氧化,因此需要较大的焊接压力来破碎氧化膜,或者是在表面处理完成后采用有机薄膜对金属表面进行保护<sup>[43-44]</sup>。

6系铝合金的焊接性较好,是扩散焊固相增材制造中主要应用的材料。铝合金固相增材制造最广泛的应用是以层板结构为主的复杂内腔结构的冷板、平板热管等,应用于电子、汽车、航空航天以及其他需要精密热控的行业中。冷板的结构如图12所示,是将流道加工在铝合金板上,再盖上盖板扩散焊接而成,其流道分布通常针对冷却位置,呈不规则形状。与传统的钎焊工艺做成的水冷板相比,扩散焊固相增材制造的水冷板避免了钎料熔化阻塞流道的问题,大幅提高了成品率与焊接强度。对于电子冷却等精密应用,冷却器件需要镶嵌在流道的筋板上以减少换热距离,从而获得最佳的换热效率,这对焊接精度、焊缝强度与密封性的要求非常高,因此扩散焊固相增材制造是这类冷板的最佳制造方法。

多层板结构的铝合金零件的制

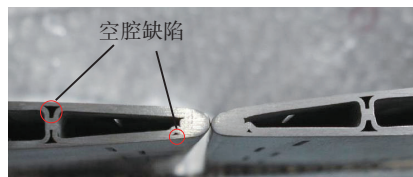


图8 4层板工艺叶片

Fig.8 Four-layer structure blade



图9 对开式结构空心叶片示意图

Fig.9 Two-layer structure hollow blade



图10 叶片工艺模拟件

Fig.10 Blades for processing simulation



图11 大型舰载高温高压PCHE

Fig.11 High-temperature high-pressure shipborne PCHE

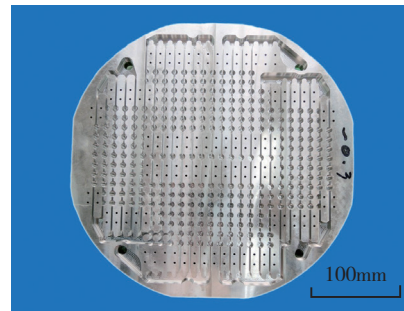


图12 铝合金水冷板

Fig.12 Aluminum alloy cooling plate

造难点还是在氧化膜的去除上。铝合金软连接铝巴是电池组串联时的连接件,常用于新能源汽车电池组的连接,其结构比较简单,是由多层铝合金铝箔在特定位置处焊接后冲压成形,如图 13 所示。零件中间凸起部分没有焊接,可以随意弯折,以吸收由于汽车行驶过程中的颠簸对电池组的冲击。传统制造方法采用电阻焊,生产效率低且成品率低。采用固相增材制造方法,产品质量稳定、力学性能好,并且能够大批量生产。

复杂结构的多层铝合金零件的代表性应用还有雷达天线等。这类零件一般要求表面精度高、通道壁厚薄、焊接面窄、形位精度高、密封性高、导电性高,并且是面与面连接<sup>[45]</sup>,因此扩散焊固相增材制造是最理想的制造方法。焊前表面处理与焊接压力的选择是制造这类零件的核心工艺,既要保证能够破碎表面氧化膜,又要保证零件结构不发生明显的变形,同时还要满足焊合率与强度的要求。

4 其他材料的重要应用

扩散焊方法适合连接非金属材料,如陶瓷、玻璃、塑料等,也适合异质材料、复合材料的连接,这些材料在化工、模具、电子等行业中发挥着重要作用<sup>[46-48]</sup>。图 14 展示了采用双层或多层结构设计的一些玻璃、陶瓷、复合材料、异质材料等的工程件,包括玻璃、陶瓷在内的材料也可以用固相增材制造方法做成 PCR,具有金属材料不具备的抗腐蚀性、反应可视化、实时控温等优势。此外,由扩

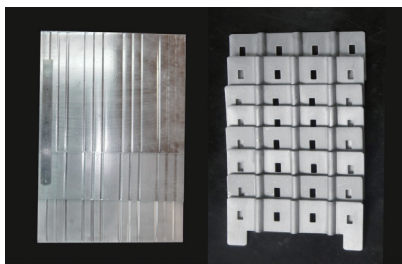


图13 铝合金软连接铝巴  
Fig.13 Aluminum alloy soft connector

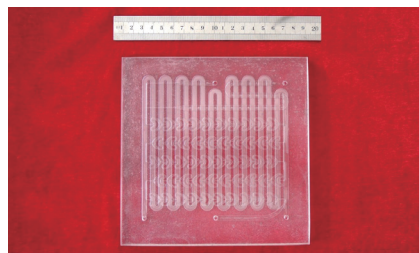
散焊制造的零件还有硬质合金与不锈钢连接做成的冲压头、单晶硅工程件、陶瓷与金属异质连接工程件等。

许多产品根据具体的应用需求,可以设计不同的复合材料和结构,以达到增加效率、减少成本等目的,例如用导热性更好的铜与不锈钢结合制作冷却结构,采用铜、铝的连接来代替纯铜做导体来减少材料成本,以及针对简单但是加工量巨大的结构件,采用分层的结构来减少加工、材料成本等。扩散焊固相增材制造方法的广泛材料适用性与结构设计灵活性,可以给许多产品应用带来结

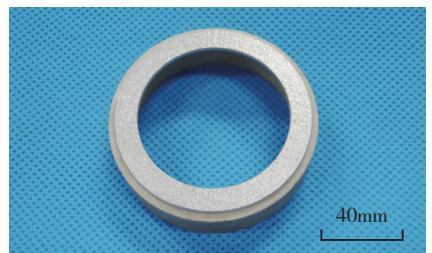
构、材料、成形方法上的革新,具有非常巨大的应用潜力。

扩散焊固相增材制造装备

扩散焊固相增材制造装备主要是真空扩散焊设备,主要由 4 部分组成:加热系统、加压系统、保护(真空)系统与控制系统,如图 15 所示。设备的加热方式通常采用辐射加热,要求焊件受热均匀,可按照不同工艺精确控制加热温度。加压系统可采用有液压系统、气压系统、机械系统、热膨胀系统等,最常用的是液压系统,自动控制的设备上一般都装有压力



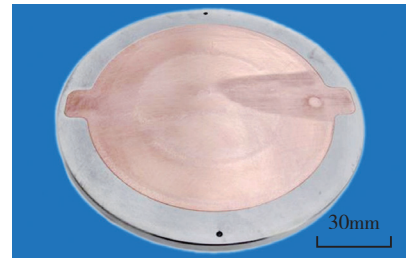
(a) 玻璃可视化微通道反应器



(b) 陶瓷与铝合金复合件



(c) 单晶硅结构件



(d) 铜与不锈钢复合冷板

图14 其他材料固相增材制造产品

Fig.14 Other solid-state additive manufacturing products

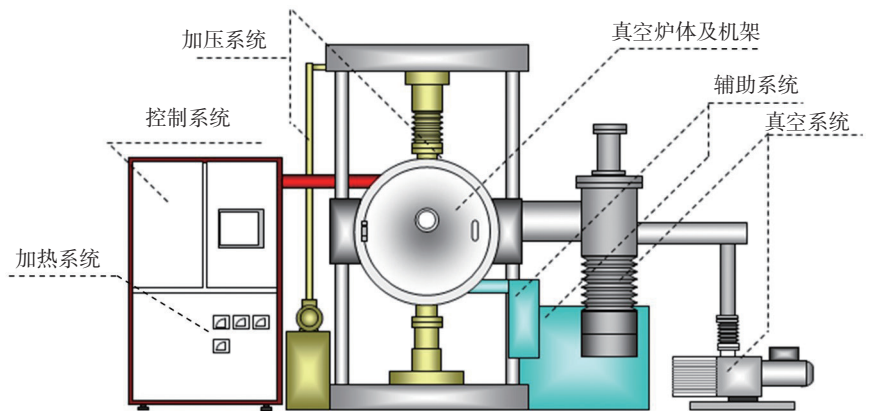


图15 扩散焊设备结构示意图

Fig.15 Schematic of diffusion bonding furnace

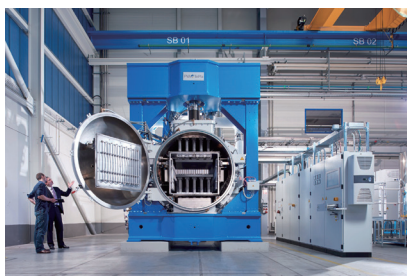
传感器,加压过程中必须要精确控制焊件的变形量,同时要保证压头的平行度与焊件受力均匀。系统一般采用真空保护,炉腔在焊接时真空度在 $10^{-3}\sim 10^{-6}\text{Pa}$ 。控制系统要实现温度、压力、真空度、位移(变形量)、焊接时间等基本工艺参数的控制。

扩散焊固相增材制造技术所针对的复杂结构的产品,对设备的均温区尺寸、真空度、压力与控制精度要求非常高。因此设备制造的难点就在于大尺寸温区温度均匀性与压力均匀性的保障。目前,国内的许多高校、研究所、工厂等使用的设备还是以进口为主,如图16所示。德国普发拓普的MOV系列,其最大工作区尺寸为 $900\text{mm}\times 1500\text{mm}\times 500\text{mm}$ ,温度 $1350\sim 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,压力 $800\text{t}$ 。美国VPE公司制造出世界最大的扩散焊设备,工作区尺寸达到 $1800\text{mm}\times 3000\text{mm}\times 3000\text{mm}$ ,最高温度 $1900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,采用双缸独立加压,单缸压力 $1200\text{t}$ 。经过多年研发与生产实践,我国制造能力已接近国外先进水平,能够设计生产均温区最小 $200\text{mm}\times 200\text{mm}\times 200\text{mm}$ 、最大 $600\text{mm}\times 600\text{mm}\times 600\text{mm}$ 的多系列扩散焊设备,并能够设计制造出 $800\text{mm}\times 1200\text{mm}\times 800\text{mm}$ 的6缸独立加压的超大设备(图17)。

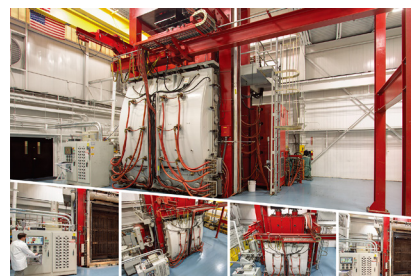
## 扩散焊固相增材制造未来发展方向

### 1 工艺研发方向

综上所述,扩散焊固相增材制造的应用前景十分广泛,并且随着各行业对技术革新的迫切需求,会有越来越多结构件的应用,常用金属材料的扩散焊工艺已经比较成熟。未来工艺研发的主要方向为:(1)精密焊接工艺。保证零件结构尺寸精度最重要的是变形量控制,而传统扩散焊研究中通常忽略对变形量的控制,实际生产中变形量的控制对设备压力系统、控制系统要求很高,同时需要结



(a) 普发拓普公司制造的扩散焊设备



(b) VPE公司制造的大型扩散焊设备

图16 国外扩散焊设备

Fig.16 Foreign diffusion bonding furnace

合相应的工艺。(2)非金属材料、较难焊金属材料的扩散焊工艺。包括陶瓷,玻璃,高分子聚合物,硅,二、五、七系铝合金,高温合金以及复合材料,以及异质连接等扩散焊工艺的研发。(3)外场辅助扩散焊工艺。在焊接过程中施加电场、磁场、超声波、脉冲压力等外场,研究外场辅助对材料与接头性能的影响与相应工艺、设备开发。

### 2 设备制造方向

我国自主研发的中、小型温区设备的性价比已经高于进口设备,能够满足学术研究与小型零件生产的需求,但大型设备制造与国外还存在一定差距。随着“中国制造2025”的提出,设备制造业面临着智能化需求的挑战,未来设备制造的主要发展方向为:(1)大尺寸设备制造。大尺寸温区设备是满足大型零件制造的必要条件,在核能、能源化工、航海等领域有着重要应用与需求。设备均温区越大,对温度、压力控制要求越高,制造难度越大。(2)气体加压(热等静压)设备。气体加压的优势在于各方向上压力分布均匀,设备结构相对简单、成本较低,但是工艺控制较难,并且在生产上增加了真空包壳的工序,增加了产品制造的成本。(3)专家系统。扩散焊专家系统是能够根据材料、目标焊接质量等通过计算推理给出合适制造工艺的系统,是实现自动化、智能制造的重要软件。未来的设备需要实现自动积累、分析生



图17 国产6缸独立加压大型扩散焊设备  
Fig.17 Domestic large diffusion bonding furnace with six independent cylinder

产数据,智能调整工艺参数,接头质量评价等功能。

### 参考文献

- [1] LI W Y, YANG K, YIN S, et al. Solid-state additive manufacturing and repairing by cold spraying: a review[J/OL]. Journal of Materials Science & Technology, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2017.09.015>.
- [2] 关桥. 焊接/连接与增材制造(3D打印)[J]. 焊接, 2014(5): 1-8.  
GUAN Qiao. Welding/joining technologies and additive manufacturing (3D printing)[J]. Welding & Joining, 2014(5): 1-8.
- [3] EYERS D R, POTTER A T. Industrial additive manufacturing: a manufacturing systems perspective[J]. Computers in Industry, 2017, 92/93: 208-218.
- [4] GIBSON I, ROSEN D, STUCKER B. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition[J]. Johnson Matthey Technology Review, 2015, 59(3): 193-198.
- [5] VOJISLAV P, JUAN V H, OLGA J F, et al. Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case

- studies[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(4): 1061-1079.
- [6] EYERS D, DOTCHEV K. Technology review for mass customisation using rapid manufacturing[J]. Assembly Automation, 2010, 30(1): 39-46.
- [7] KHAJAVI S H, PARTANEN J, HOLMSTRÖM J, et al. Risk reduction in new product launch: a hybrid approach combining direct digital and tool-based manufacturing[J]. Computers in Industry, 2015, 74: 29-42.
- [8] JAIRÓ C, JASON H, NATHAN C. 3D printed tooling for thermoforming of medical devices[J]. Rapid Prototyping Journal, 2011, 17(5): 387-392.
- [9] BERMAN B. 3-D printing: the new industrial revolution[J]. Business Horizons, 2012, 55(2): 155-162.
- [10] HOPKINSON N, HAGUE R, DICKENS P. Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
- [11] MANYIKA J, CHUI M, BUGHIN J, et al. Disruptive technologies: advances that will transform life, business, and the global economy[R]. New York: McKinsey Global Institute, 2013.
- [12] PACE M L, GUARNACCIO A, DOLCE P, et al. 3D additive manufactured 316L components microstructural features and changes induced by working life cycles[J]. Applied Surface Science, 2017, 418: 437-445.
- [13] BUSACHI A, ERKOYUNCU J, COLEGROVE P, et al. A review of additive manufacturing technology and cost estimation techniques for the defence sector[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science & Technology, 2017, 19: 117-128.
- [14] ZHAO Z, CHEN J, LU X F, et al. Formation mechanism of the  $\alpha$  variant and its influence on the tensile properties of laser solid formed Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 691: 16-24.
- [15] DERBY B, WALLACH E R. Theoretical model for diffusion bonding[J]. Metal Science Journal, 1982, 16(1): 49-56.
- [16] 张九海, 何鹏. 扩散连接接头行为数值模拟的发展现状[J]. 焊接学报, 2000, 21(4): 84-91.
- ZHANG Jiuhai, HE Peng. Numerical simulation for diffusion bonding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(4): 84-91.
- [17] 宋敏霞, 赵熹华, 郭伟, 等. 钛合金与非金属材料扩散连接研究现状与发展[J]. 焊接, 2005(10): 9-12.
- SONG Minxia, ZHAO Xihua, GUO Wei, et al. Present situation and developments of diffusion bonding titanium alloy and nonmetals[J]. Welding & Joining, 2005(10): 9-12.
- [18] 黄万群, 李亚江, 王娟, 等. 陶瓷/金属钎焊与扩散连接的研究现状[J]. 焊接, 2007(4): 11-13.
- HUANG Wanqun, LI Yajiang, WANG Juan, et al. Research status of brazing and diffusion bonding of ceramic and metal[J]. Welding & Joining, 2007(4): 11-13.
- [19] 郭伟, 赵熹华, 宋敏霞. 扩散连接界面理论的研究现状与发展[J]. 航天制造技术, 2004(5): 38-41.
- GUO Wei, ZHAO Xihua, SONG Minxia. Status and development of theory about interface of diffusion welding[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2004(5): 38-41.
- [20] 王忻凯. 铝合金搅拌摩擦增材制造工艺研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- WANG Xinkai. Process study on aluminum alloy by friction stir additive manufacturing[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
- [21] 何斌, 黄春平, 张海军, 等. 搭接量对LY12铝合金搅拌摩擦增材制造成形的影响[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2014, 28(3): 78-82.
- HE Bin, HUANG Chunping, ZHANG Haijun, et al. Influence of amount of overlap in friction stir additive manufacturing of LY12 aluminum alloy[J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology (Nature Science Edition), 2014, 28(3): 78-82.
- [22] 柯黎明, 魏鹏, 邢丽, 等. 双道焊对搅拌摩擦焊搭接界面及接头性能的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(7): 5-8.
- KE Liming, WEI Peng, XING Li, et al. Influence of double passes on interface migration and mechanical property of friction lap joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(7): 5-8.
- [23] 李雪飞, 李京龙, 李文亚. 冷喷涂在焊接工程中的应用与展望[J]. 焊接, 2008(9): 13-16.
- LI Xuefei, LI Jinglong, LI Wenya. Applications and prospect of cold spraying technique in welding engineering[J]. Welding & Joining, 2008(9): 13-16.
- [24] 李文亚, 张冬冬, 黄春杰, 等. 冷喷涂技术在增材制造和修复再制造领域的应用研究现状[J]. 焊接, 2016(4): 2-8.
- LI Wenya, ZHANG Dongdong, HUANG Chunjie, et al. State of the art of cold spraying additive manufacturing and remanufacturing[J]. Welding & Joining, 2016(4): 2-8.
- [25] 李京龙, 熊江涛, 李文亚. 固相焊接界面原子成键的物理学条件[M]//10000个科学难题—制造卷. 北京: 科学出版社, 2017.
- LI Jinglong, XIONG Jiangtao, LI Wenya. Physical condition for bonding formation of interfacial atoms[M]//10000 Selected Problems in Sciences: Manufacture. Beijing: Science Press, 2017.
- [26] 何艳丽, 李京龙, 孙福, 等. 扩散焊吸液芯结构对热管传热性能的影响[J]. 化工学报, 2014, 65(4): 1229-1235.
- HE Yanli, LI Jinglong, SUN Fu, et al. Effect of diffusion bonded wick structure on thermal performance of heat pipe[J]. CIESC Journal, 2014, 65(4): 1229-1235.
- [27] 赵科. 分层实体扩散连接制备中的局部屈曲行为[D]. 西安: 西北工业大学, 2013.
- ZHAO Ke. Local buckling in diffusion bonding of laminated object manufacturing[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2013.
- [28] 何艳丽. 平板热管扩散焊分层实体制造工艺及性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- HE Yanli. Thermal performance and diffusion bonding process of laminated object manufacturing on flat heat pipe[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.
- [29] MUEGGENBURG H H. Platelet injector design and development history[C]//Proceedings of 27th AIAA/SAE/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference. Sacramento, 1991.
- [30] 邓存存. 矩形流道分层实体制造中扩散焊焊合判据研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- DENG Cuncun. Study on diffusion bonding criterion in laminated objective manufacturing of rectangular flow channel[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [31] PUA L M, RUMBOLD S O. Industrial microchannel devices: where are we today?[C]//Proceedings of ASME 2003 1st International Conference on Microchannels and Minichannels. Rochester, 2003.
- [32] 康盈, 柳建华, 张良, 等. 微通道换热器的研究进展及其应用前景[J]. 低温与超导, 2012, 40(6): 45-48.
- KANG Ying, LIU Jianhua, ZHANG Liang, et al. The research progress and application prospect of the microchannel heat exchanger[J].

Cryogenics & Superconductivity, 2012, 40(6): 45–48.

[33] KEW P A, REAY D A. Compact/micro-heat exchangers—their role in heat pumping equipment[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(5): 594–601.

[34] AHN Y, BAE S J, KIM M, et al. Review of supercritical CO<sub>2</sub> power cycle technology and current status of research and development[J]. Nuclear Engineering & Technology, 2015, 47(6): 647–661.

[35] DENG Y, MENON S, LAVRICH Z, et al. Design, simulation, and testing of a novel micro-channel heat exchanger for natural gas cooling in automotive applications[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 327–334.

[36] LI Q, FLAMANT G, YUAN X G, et al. Compact heat exchangers: a review and future applications for a new generation of high temperature solar receivers[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(9): 4855–4875.

[37] 吴维武, 王东宝, 赵黎明, 等. 印刷电路板式 LNG 气化器换热试验研究[J]. 海洋工程装备与技术, 2016, 3(1): 20–24.

WU Weiwu, WANG Dongbao, ZHAO Liming, et al. Experimental investigation of printed circuit heat exchanger as LNG vaporizer[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2016, 3(1): 20–24.

[38] 夏园园. S136 模具钢扩散焊变形控制与质量评价[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.

XIA Yuanyuan. Deformation control on

diffusion bonding of S136 die steel and bonding quality evaluation[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017.

[39] VENKATESWARLU V, TRIPATHY D, RAJAGOPAL K, et al. Failure analysis and optimization of thermo-mechanical process parameters of titanium alloy (Ti-6Al-4V) fasteners for aerospace applications[J]. Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2013, 1(2): 49–60.

[40] TAO J H, HU S B, JI L B. Effect of trace solute hydrogen on the fatigue life of electron beam welded Ti-6Al-4V alloy joints[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 684: 542–551.

[41] 林左鸣. 世界航空发动机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2012.

LIN Zuomin. World aeroengine handbook[M]. Beijing: Aviation Industrial Press, 2012.

[42] 高雅. TC4 钛合金扩散焊界面孔隙洞闭合的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.

GAO Ya. Study on interface void closure in diffusion bonding of TC4 titanium alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017.

[43] ZHANG H, LI J L, WANG C S, et al. Equal-strength precision diffusion bonding of AA6063 aluminum alloy with the surface passivated by a self-assembled monolayer[J]. International Journal of Materials Research, 2017, 108(7): 571–577.

[44] 王昌盛. 铝合金精密扩散焊中的表面处理工艺研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.

WANG Changsheng. Study on surface

preparation in precision diffusion bonding of aluminum alloy[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.

[45] 李文东. 铝合金多层结构整体连接工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.

LI Wendong. Research on integral connection technology of aluminum alloy multilevel structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2017.

[46] 李鹏. 钛与不锈钢扩散连接中间层设计与实验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2011.

LI Peng. Interlayer design and experiments for diffusion bonding titanium to stainless steel[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2011.

[47] 解庆. 铜-钢扩散焊中间层设计及晶间渗入现象研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2011.

XIE Qing. Insert-layer design for copper-steel diffusion bonding and grain boundary penetration phenomenon[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2011.

[48] 袁砚科. Au-Si 共晶反应连接界面形貌与液相产生机理[D]. 西安: 西北工业大学, 2010.

YUAN Yanke. Joining interface morphologies of Au-Si eutectic reaction and mechanism of liquid forming[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2010.

通讯作者: 李京龙, 教授、博士生导师, 研究方向为扩散焊界面物理与成形工艺、固相增材制造技术、热喷涂技术, E-mail: lijinglg@nwpu.edu.cn.

## Diffusion Bonding Solid-State Additive Manufacturing Technology and Its Engineering Application

ZHANG Hao<sup>1</sup>, LI Jinglong<sup>2</sup>, SUN Fu<sup>3</sup>, XIONG Jiangtao<sup>2</sup>, ZHANG Fusheng<sup>2</sup>

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

2. Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. Shaanxi Zhituo Solid-State Additive Manufacturing Technology Company, Weinan 714026, China)

**[ABSTRACT]** Diffusion bonding solid-state additive manufacturing technology adopts the same idea as laminated objective manufacturing. Laminates fabricated by precision machining or chemical etching are aligned and diffusion bonded to form 3D complex structures. This forming method is the most mature solid-state additive manufacturing method in industrial applications. This paper reviews the key applications of the method for different materials in the fields of astronautics, aviation, nuclear, fine chemical industry, navigation, injection mold and etc. Furthermore, the development of diffusion bonding technology and equipment manufacturing in the future are forecasted.

**Keywords:** Diffusion bonding; Solid-state additive manufacturing; Iron-based alloy; Titanium; Aluminum alloy; Blade

(责编 逸飞)