

基于三维焊接熔覆的快速成形技术及其系统的发展

向永华, 吕耀辉, 徐滨士, 姜 伟, 夏 丹

(装甲兵工程学院 装备再制造技术重点实验室, 北京 100072)

摘要: 快速成形技术发展至今, 基于焊接熔覆的直接金属快速成形已成为其研究热点和一个重要发展方向。总结了焊接熔覆快速成形技术的国内外研究现状, 阐述了目前该技术研究存在的一系列问题, 最后针对焊接熔覆快速成形工艺的特点, 对进一步的研究提出了建议。

关键词: 三维焊接熔覆; 直接金属快速成形; 成形材料

中图分类号: TG438.2; TP273.5

文献标志码: B

0 前言

以电子计算机为核心的信息技术的迅猛发展为新制造技术的发展提供了前所未有的物质基础, 先进快速零件制造技术应运而生^[1]。三维焊接熔覆快速成形技术作为快速零件制造技术的一种, 目前得到了迅猛发展。该技术是先进 CAD 技术与现有成熟焊接技术有机结合的产物, 与其他直接金属快速成形技术相比, 它提供了一种相对低成本的直接快速制造功能金属零件的技术^[2]。该技术的优势在于, 在金属零件快速制造的金属堆积方法选择方面, 有多种成熟并高效的焊接工艺方法可供选择, 并且强度及其他性能完全能够满足使用要求。因此, 一旦焊接熔覆快速成形若干关键技术得到更好的解决, 其应用前景将更加广阔。本文总结了该技术的研究现状, 并对该技术研究存在的问题进行了剖析, 对其今后的发展方向进行了探讨。

1 三维焊接熔覆快速成形技术研究现状

基于三维焊接熔覆快速成形工艺的基本原理, 其本质上是采用各种弧焊热源使金属熔化与过渡沉积的焊接工艺, 利用 CAD 所提供的实体三维数据控制焊接设备, 采用分层扫描和分层堆焊的方法来制作

零件。根据快速成形系统所使用的焊接熔覆工艺的不同, 该技术可分为激光焊 (LAW)、等离子弧焊 (PAW)、熔化极气体保护焊 (GMAW)、非熔化极气体保护焊 (GTAW)、电子束焊 (EBW) 等。

熔焊快速成形技术起源于上世纪 60 年代末, 当时被称为成形焊接 (shape welding), 这种方法是由德国的 Krupp Thyssen 和 Shulzer 公司用来制造大型 (500 t) 形状简单的压力容器。1985~1991 年期间, 美国 Babcock & Wilcox 公司总共投入上千万美元用于开发成形熔化 (shape melting) 技术, 使用 GMAW 和等离子 MIG 混合焊, 生产出了材料为奥氏体不锈钢或者是 Ni 基大型零部件^[3]。此后, 随着快速成形技术的出现, 将焊接工艺与快速成形的基本原理相结合用于产品零部件的原形制造或者直接制造成为新的研究热点, 上世纪 90 年代初期, 美国 Rools ROYCE 航空集团致力于三维焊接 (3D Welding) 技术的研究。使用该技术制造昂贵的高性能合金零部件可以避免浪费材料, 该公司利用三维焊接技术成功地制造了各种 Ni 基或 Ti 基材料的飞行器零部件^[4]。英国 Nottingham 大学 J D Spencer 等利用 gantry 6 轴焊接机器人和 GMAW 工艺实现了零件的三维焊接成形, 机器人和焊接工艺参数由 Siemens RCM 可编程数字机器人控制器控制, 通过简单的温度控制装置对焊接热输入进行控制, 从而降低了成形零件的表面粗糙度^[5]。美国肯塔基大学的 Yuming Zhang 等对焊接熔覆成形过程中的 CAD 建模、文件处理、分层切片、加工矢量路径规划进行了较详细的研究, 此外着重研究了焊接过程的热量和质量流动机理及其控制措施, 对焊接电弧

收稿日期: 2009-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50735006, 50675223); 国家973计划项目 (2007CB607601); 国家科技支撑计划项目 (2008BAK42B03); 再制造重点实验室资助项目 (9140C8502026JS9105)

的引弧、熄弧进行控制,以获得最佳焊接熔覆成形效果^[6-7]。

美国 Souther Methodist 大学 Radovan Kovacevic 教授领导的 Souther Methodist 大学先进制造研究中心开发了用于制造金属零件的基于焊接工艺(包括 LAW, GMAW, GTAW 等)和数控技术相结合的直接金属快速成形技术^[8-11]。同时建立了基于 6 自由度机器人和 5 自由度操作机的快速成形系统,分别如图 1, 2 所示。该研究首次尝试通过控制快速成形焊接熔覆工艺中的熔深和热输入,以期实现分层制造。并对基于 GTAW 焊接成形的三维部件由于热量吸收率不同造成对沉积层微观组织的影响进行了研究。

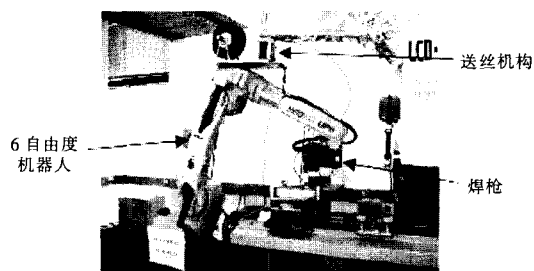


图1 基于机器人控制的 3D 焊接快速成形系统

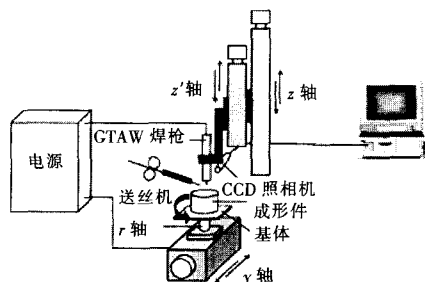


图2 基于操作机控制的 3D 焊接快速成形系统

韩国 Institute of Science and Technology CAD/CAM 研究中心 Yong-Ak Song 等将三维焊接(GMAW)与铣削技术相结合,将熔化极气体保护焊作为加法,铣削加工作为减法,综合两者优势实现金属零件的直接成形^[12-13]。其成形原理如图 3 所示。

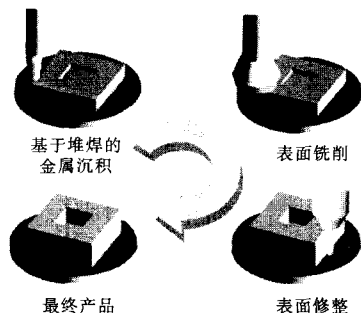


图3 基于 GMAW 焊接与铣削的快速成形系统原理图

近年来,基于激光熔焊的快速成形工艺以其使用材料广泛、能获得高致密度零件、成形件力学性能良好,且不存在未熔颗粒影响表面质量等特点受到广泛关注,成为目前国际上的研究热点,许多大学和研究机构都在进行研究和开发。Stanford 大学采用 6 kW 激光器熔粉焊接,再用 5 坐标加工中心进行铣削,特点是可以达到机械加工相媲美的精度。美国 Los Alamos 国家实验室在美国能源部的支持下,与 SyntheMet 合作,开发了被称作“直接光学制造(Directed Light Fabrication, DLF)”的金属零件快速成形技术^[14-15]。DLF 应用在金属零件的成形方面,其原理是:以激光作为能源,将金属粉末熔化、在计算机的控制下逐层沉积、直至制造出整个金属零件。DLF 工艺是直接由 CAD 模型分层获得数控加工路径格式的文件,避免了生成庞大的 STL 文件时所产生的数据冗余和错误,提高了零件成形的效率和精度。

国内现已有多家研究机构对基于弧焊的快速成形技术展开了研究。华中科技大学张海鸥等建立了基于等离子-激光综合的快速成形系统^[16]。试验装置原理图如图 4 所示,重点研究了激光对沉积层的微观组织及物理性能的影响。

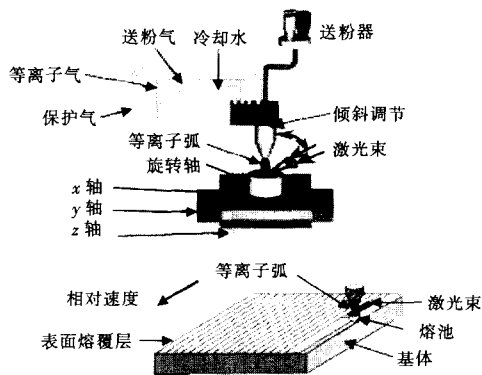


图4 等离子弧-激光快速成形系统示意图

试验表明,激光束能优化成形工件的表面质量,沉积层内的成分分布更均匀,成形件的物理性能要好于等离子直接成形件。该技术的优点:相比于传统的堆焊成形技术,能够一次成形更厚的熔覆层;能够直接沉积不同材料的熔覆层,甚至可以沉积高温合金和难熔材料;所获得的熔覆层具有更好的微观结构和力学性能;该技术既适用于金属零件的直接成形,也能用于模具的制作。另外,他们还建立了采用等离子弧

熔积成形与铣削复合直接制造金属零件系统^[17]。

西安交通大学的胡晓冬等人建立了基于等离子弧焊和操作机控制的直接金属快速成形系统。并对成形工艺、成形件的组织及性能、成形件的变形与控制等方面展开了系统的研究^[18]。另外,大连理工大学、西北工业大学、南昌大学、装甲兵工程学院等对基于焊接熔覆快速成形技术的系统研制、软件开发、成形工艺研究、新型材料研究等方面也开展了大量的工作。

2 基于三维焊接熔覆快速成形技术存在的主要问题

2.1 材料问题

目前在三维焊接熔覆快速成形研究中,选用的材料按形状可分为丝材、粉末两大类。丝材一般使用低碳钢合金焊丝、不锈钢焊丝等;粉末材料则大多选用Fe基或Ni基等自熔剂合金粉末。这些材料基本都是针对金属零件表面焊接修复而开发的,并不适合于焊接熔覆快速成形。以合金粉末材料为例,在绝大多数的金属零件表面熔焊修复过程中,均需熔覆层具有较高的强度和耐磨性。因此,在成分设计时,采用固溶强化、弥散强化等多种手段,提高熔覆层的硬度和耐磨性等。如在成分设计时将碳含量提高,使熔覆层中形成金属碳化物强化相;或者加入一定量的WC和TiC等金属陶瓷颗粒等。这些合金粉末在快速成形多层熔覆的情况下,熔覆层具有较高的开裂倾向,会产生较大的应力积累和变形,不利于保证快速成形件的成形精度和成形质量,因此迫切需要研制快速成形的专用材料体系。

2.2 成形精度控制

焊接成形采用逐层熔覆堆积的方法来制造零件,会不可避免地产生残余应力、内应力,使零件发生翘曲变形。焊接应力不但可能引起热裂纹、冷裂纹、脆性断裂等工艺缺陷,而且其产生的变形累积会严重影响成形件的几何精度,这种累积误差到了一定程度甚至会使快速成形过程无法进行下去。

由于三维焊接熔覆快速成形工艺发展还不完善,特别是对快速成形制作工艺和软件技术等方面的研究还不成熟,目前快速成形件的精度及表面质量还不能很好地满足工程需要,不能作为功能性零件,为提高

成形件的精度和表面质量,必须改进成形工艺和成形软件。

2.3 成形组织和性能控制

三维焊接熔覆快速成形方法的本质是采用焊接技术,用逐层堆焊的方法制造零件。因此,三维焊接熔覆快速成形制造过程的热循环比一般焊接过程的热循环复杂得多,组织转变过程也更复杂,增加了零件性能控制的难度。采用不同的焊接工艺方法、不同的焊接工艺参数,零件几何尺寸的改变都将影响零件成形的热循环过程及零件的性能。系统研究焊接熔覆技术成形规律,研究多种因素对零件成形过程的影响,是焊接快速成形技术必须解决的问题。

3 基于三维焊接熔覆快速成形技术的发展趋势

3.1 加强基础理论研究

目前关于焊接的基础理论研究方面,针对单道单层熔覆的相关理论已比较成熟,但对快速成形多层熔覆条件下的基础理论研究还相对较少。因此有必要深入研究在快速成形多层熔覆条件下,熔覆材料的传热与多层堆积热量积累现象,揭示三维焊接熔覆快速成形工艺的传热学机理;研究快速成形过程中,传热与层间应力及成形后工件内部热应力的关系,揭示成形工件的传热、应力以及变形之间的关系;研究熔覆过程中,在不同工艺参数条件下,成形表面温度与熔敷层宽度、高度及熔深的关系,建立熔池体积的理论模型;加强微观力学研究,通过建立微观成分单独的力学行为与宏观的考虑损伤的本构关系,预测宏观原型性能,并控制其微观缺陷。

3.2 软硬件方面

三维焊接熔覆快速成形设备昂贵的价格严重制约了该技术的推广和应用,这使得各快速成形设备的供应商和研究机构将开发低成本的快速成形设备作为主要目标加以研究。

随着焊接熔覆快速成形技术研究与应用的不断深入,软件处理的精度和速度,软件对复杂模型的处理能力正成为该技术进一步发展的主要瓶颈。因此,需要针对焊接熔覆快速成形的特点设计专用软件,实现分层切片、焊接熔覆路径规划算法的优化等。国内外的相关研究机构对此都非常重视,并投入大量人力和

资金进行软件的研究和开发。

3.3 材料方面

随着三维焊接熔覆快速成形技术的出现,与之对应的新型材料也就成为了研究的重点和热点,为此快速成形技术的开发者和相关技术的研究学者正在进行大量的研究和试验工作。新型熔覆材料要求在快速成形多层熔覆条件下,具有良好的成形性和抗裂性。目前,快速成形技术材料研究的主要目标是提高成形精度、成形效率并能满足后续应用的要求。

3.4 成形工艺方面

成形过程中零件的变形是影响形状精度及尺寸精度的最主要因素,而造成变形的主要原因是由于熔覆层在层层堆积时所产生的应力所致。这些应力包括:热应力、相变应力和拘束应力,热应力为主要应力。如何通过成形工艺手段降低成形件的应力水平,进而降低成形件的变形,学者们也正在进行大量的研究。

3.5 数值分析方法和辅助研究

焊接熔覆快速成形过程是多参数耦合作用的复杂过程,包括焊接方法、焊接工艺参数和成形零件的几何形状及尺寸等因素的影响。必须解决如何通过控制焊接工艺参数有效地控制零件的几何尺寸、金相组织转变、内应力变化及变形等诸多复杂问题。采用传统的工艺试验方法解决这些问题不仅试验周期长、费用高,更难于从理论上系统解决问题。采用计算机数值模拟仿真技术解决上述问题是可行的途径。利用电子计算机及数值分析方法等技术手段建立焊接熔覆成形过程模型并从理论上系统研究解决焊接过程参数与零件几何成形、显微组织相变、变形等关系的基础问题。在此基础上实现焊接净成形零件的虚拟设计与虚拟制造,并使之成为焊接熔覆快速成形技术不可缺少的组成部分。

4 结语

三维焊接熔覆快速成形技术是一种非常实用且制造成本较低的直接快速制造金属零件的方法,已成为快速成形技术中的一个重要分支,它将在快速制造和快速制模等领域发挥相当大的作用。目前,基于三维焊接熔覆的快速成形技术仍然只是停留在基础理论和初步试验的基础上。需在以下几个方面进行更深入的

研究:(1)加强快速成形多层熔覆条件下的基础理论研究;(2)研究适用于快速成形多层熔覆条件下的专用材料体系;(3)通过试验手段及数学分析,研究焊接工艺参数对成形精度控制的影响规律,建立适用于快速成形的焊接工艺参数专家数据库;(4)开发针对熔焊快速成形特点设计的专用成形软件,实现分层切片、焊接熔覆路径规划算法的优化及成形过程的计算机仿真;(5)结合试验过程中采集的焊接熔覆参数以及温度、应力等方面的数据,通过计算机进行焊接熔覆过程温度场、应力场方面的数值模拟,为后续研究提供指导。随着计算机技术、快速成形技术的不断发展和焊接技术的更加成熟与完善,三维焊接熔覆快速成形技术必将在汽车、航空航天及装备再制造等领域获得广泛应用。

参考文献:

- [1] 颜永年, 张伟, 卢清萍, 等. 基于离散/堆积成形概念的 RPM 原理与发展[J]. 中国机械工程, 1994, 5(4): 64-66.
- [2] 史耀武. 成型焊接快速零件制造技术的发展[J]. 中国机械工程, 1994, 5(6): 1-2.
- [3] Weiss L E, Merz R. Shape deposition manufacturing of heterogeneous structure[J]. Journal of Manufacturing System, 1997, 16(4): 239-248.
- [4] Doumanidis Charalabos. Three-dimensional welding update rapid prototyping report[R]. American Society of Mechanical Engineers, 1999, 17(6): 41-45.
- [5] Spencer J D, Dickens P M and Wykes C M. Rapid prototyping of metal parts by three-dimensional welding[J]. Journal of Engineering Manufacture, 1998, 212(B): 175-189.
- [6] Zhang Y M, Li P J, Chen Y W, et al. Automated system for welding-based rapid prototyping[J]. Mechatronics, 2002, 12(1): 37-53.
- [7] Zhang Y M, Chen Y W, Li P J, et al. Weld deposition-based rapid prototyping: A Preliminary Study[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135(2-3): 347-357.
- [8] Zeng B, Kovacevic R. A novel control approach for the droplet detachment in rapid prototyping by 3D welding[J]. The ASME Transactions, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123: 348-355.
- [9] Jandric Z, Labudovic M and Kovacevic R. Effect of heat sink on microstructure of three-dimensional parts built by welding-based deposition[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004, 44: 785-796.
- [10] Wu Y, Kovacevic R. Mechanically assisted droplet transfer pro-

文章编号:1002-025X(2009)07-0005-03

Al₂O₃ 陶瓷与金属 Ni 活性钎焊界面反应

李潇一, 罗震, 刘建, 袁书现, 薛志清, 敖三三, 宋凯磊

(天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘要: 使用 Ag 粉、CuO 粉、Ti 粉、Zr 粉等成分配置成的活性钎料在空气气氛中采用活性钎焊方法成功钎焊 Al₂O₃ 陶瓷与金属 Ni, 并借助扫描电镜 (SEM)、能谱分析仪 (EDS) 和 X 射线衍射仪技术 (XRD), 对界面元素分布及反应产物加以分析和研究。试验结果表明, 在活性钎焊接头界面中, Ag 在钎焊接头中部区域呈聚集态分布, Cu 元素的分布显示 CuO 在该区域也有所集中, 但也有大量的 Cu 与 Ti, Zr 一起出现在接头界面处, 说明这些元素与陶瓷中的成分发生界面反应形成新的产物。XRD 图谱结果显示 Cu, Ti, Al, O 发生反应在界面处生成复杂化合物。通过对接头界面组织微观分析得知, 接头中存在 2 种反应产物及金属间化合物。由此可以推断, 接头界面组织结构为 Al₂O₃/AlTi+CuAlO₂/TiAg+Ti₃Cu+AgZr₂+Ag+CuO/Ni。

关键词: Al₂O₃ 陶瓷; 金属镍; 活性钎焊; 界面反应

中图分类号: TG454

文献标志码: A

目前, 在陶瓷与金属的连接方法中, 活性钎焊方法应用最为广泛。活性钎焊中为了实现钎料对陶瓷的润湿, 必须向其中添加 Zr, Hf, Ti 等活性元素^[1-3], 使其与陶瓷发生反应。其中添加活性元素的 Ag 基钎料是比较常用的活性钎料^[4-5]。界面反应是活性钎焊研究中的重点问题, 活性钎料与陶瓷的界面反应是陶瓷和

金属连接的关键环节, 反应所形成的产物的性能直接决定了钎焊接头的性能。因此, 有必要对活性钎焊中的界面反应加以探讨, 从而为以后的研究提供指导。

本文主要针对 Al₂O₃ 陶瓷与金属 Ni 的高温钎焊连接界面反应进行研究。文献 [6-8] 采用在氧化铝表面涂覆金属, 通过中间层金属与待钎焊金属之间的连接, 实现氧化铝与金属之间的连接, 工艺比较复杂。而真空活性钎焊工艺由于设备和条件的要求苛刻, 成本偏高。本试验通过改进传统的 Ag 基活性钎料的成分, 在空气气氛中直接钎焊 Al₂O₃ 陶瓷与 Ni, 简化了工艺流程, 降低了生产成本, 并重点对活性钎

收稿日期: 2009-03-12

基金项目: 国家863高科技项目 (2008AA04Z136); 天津市应用基础研究计划面上项目 (06YFJMJC03 400); 广东省教育部产学研结合项目 (2007A090302 105); 天津市应用基础及前沿技术研究计划 (09JCZDJC24000)

cess in gas metal arc welding[J]. The Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Engineering Manufacture, 2002, 216 (B): 555-564.

[11] Wang H, Kovacevic R. Rapid prototyping based on variable polarity gas tungsten arc welding for a 5356 aluminium alloy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part B: Journal of Engineering Manufacture, London: 2001, 215(11): 1519-1527.

[12] Song Yong A, Park Sehyung and Choi Doosun. 3D welding and milling: Part I—a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2005, 45: 1057-1062.

[13] Song Yong A, Park Sehyung. Experimental investigations into rapid prototyping of composites by novel hybrid deposition process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 171: 35-40.

[14] Lewis Gary K, Schlienger Eric. Practical considerations and capabilities

ties for laser assisted direct metal deposition[J]. Material and Design, 2000, (21): 417-423.

[15] OMilewski J, KLewis G, D JThoma, et al. Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998 (75): 165-172.

[16] Qian Y P, Zhang H O and Wang G L. Research of rapid and direct thick coatings deposition by hybrid plasma-laser[J]. Applied Surface Science, 2006, 252: 6173-6178.

[17] 张海鸥, 徐继彭, 王桂兰. 等离子熔积直接快速制造金属原型技术[J]. 中国机械工程, 2003, 14(12): 1077-1079.

[18] 胡晓冬. 基于弧焊的直接金属成形技术研究[D]. 陕西西安: 西安交通大学, 2003.

作者简人: 向永华 (1977—), 男, 湖北公安县人, 博士研究生, 研究方向: 装备再制造工程, 等离子熔覆快速成形材料与工艺。