

文章编号: 1005-0523(2003)05-0098-03

自蔓延高温合成技术及其在焊接领域的应用

何柏林, 于影霞

(华东交通大学 机电工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:较全面地介绍了燃烧合成技术及其在焊接领域的应用原理、特点、应用现状及存在问题等, 并就燃烧合成技术及其在一般金属材料 and 新型材料焊接以及实际工程中的应用前景进行了综述和展望。

关键词:燃烧合成技术; 新型材料; 焊接

中图分类号: TP39

文献标识码: A

0 自蔓延高温合成技术

自蔓延高温合成(Self-propagating High-temperature Synthesis, 缩写 SHS) 技术也称为燃烧合成(Combustion Synthesis, 缩写 CS) 技术, 它是利用化学反应自身放热制备(合成)材料的新技术^[1]。自1967年由前苏联科学家 Merzhanov 等发现固体火焰的30多年以来, 自蔓延高温合成技术受到物理学、化学、冶金学和材料科学与工程领域的科研工作者的广泛重视, 无论在理论方面还是在应用方面, 都得到广泛的研究和迅速发展, 自蔓延高温合成已发展成为一个介于燃烧科学与材料科学之间的新学科^[2]。

1 SHS 焊接技术

SHS 焊接是利用 SHS 反应的放热及其产物来加热受焊母材的焊接技术。根据反应过程中有无液相出现可分为 SHS 焊接和 SHS 连结。根据被焊母材来源不同, SHS 焊接又可分为一次焊接和二次焊接。一次焊接是指被焊接的母材或部件是在焊接过程中同时原位合成的焊接工艺, 而二次焊接则是指焊接现有的母材或部件的工艺。根据燃烧波的传播方式, SHS 焊接又可分为自蔓延焊接和热爆焊接。由于

燃烧波的自蔓延传播模式得到的反应产物大多多孔、疏松, 因此 SHS 焊接大都采用热爆焊接模式。

2 SHS 焊接的工艺特点及影响因素

首先根据母材或接头的性能要求, 配置粉末焊料, 也可采用混合粉末构成 FGM 焊料以及在原料中加入起增强作用的添加剂或降低燃烧温度的惰性添加剂, 以构成复合焊料或控制高温对母材、增强相的损伤。然后加热引发 SHS, 同时施加一定的压力。反应产物及接头的致密度与是否出现液相和焊接过程中施加的压力大小有关。最佳的焊接温度应高于反应的激发温度, 以便在反应过程中出现液相, 获得致密的接头^[3]。如果焊接过程中出现液相, 焊接压力可适当小些, 但无液相出现时, 只要不使反应停止, 焊接压力应越高越好。与传统焊接技术相比, SHS 焊接工艺具有以下特点^[4]:

1) 焊接时可利用反应原料(配置的梯度焊料)合成梯度材料(FGM)来焊接异型材料, 以克服母材间的化学、力学和物理性能的不匹配。

2) 焊料中可以加入增强相, 如增强粒子、短纤维、晶须等, 以构成复合焊料, 从而增加可焊材料的种类和焊接接头的强度。

3) 在反应中产生用于焊接的能量, 节约能源。

收稿日期: 2003-05-27

作者简介: 何柏林, 男, 1962年生, 华东交通大学副教授, 工学博士。

4) 可方便地进行一次焊接和二次焊接。

5) 对于某些受焊母材的焊接,可采用与制备母材工艺相似的焊接工艺,从而可使母材与焊料有很好的物理、化学相容性。

6) SHS 焊接过程中的局部快速放热,可减小母材的热影响区,避免热敏感材料微观组织的破坏,有利于保护母材的性能。

SHS 焊接的影响因素很多,包括反应原料的组成、反应原料的粒度及其分布、原坯相对密度;焊接过程中的加热方式和速率;反应的点燃温度和燃烧温度;燃烧波的传播模式;焊料层厚度;加压的大小和时间;母材的温度和表面处理状态;反应气氛、反应产物的均匀化过程以及接头的冷却速度等^[6]。

3 SHS 焊接研究进展及应用

SHS 焊接作为一种特殊焊接工艺,主要用于焊接 1) 同种或异种一般金属材料;2) 同种或异种难熔金属材料;3) 同种或异种陶瓷材料;4) 同种或异种金属间化合物;5) 金属或金属间化合物与陶瓷材料。对于 1) 的应用研究较多且得到了广泛的应用,对于 2)~5) 则基本处于实验室研究阶段。

3.1 一般金属材料的焊接

将长度为 125 m~500 m 的钢轨轨条运到铺设现场,再用铝热剂焊将轨条连接成无缝线路。不仅可以降低行车阻力、提高列车运行速度、增加列车牵引重量;还可以减少钢轨损伤、延长钢轨使用寿命。此外,无缝线路还可使旅客乘坐平稳舒适,铁路线路的维修费用亦可大为减少。热剂焊使用的材料包括热剂、型砂和铸型、封箱材料以及高温火柴等。热剂主要由铝粉、氧化铁、铁屑和铁合金、石墨等组成。我国在焊剂合金化方面进行了大量的研究并取得了一些可喜的成果^[5]。

导线的热剂焊是一种轻便、可携和不需要外来能源的理想野外应用的有效方法。导线热剂焊所用的热剂多用氧化铜和铝粉导线的热剂焊广泛用于铝线电缆、铜线电缆、母线、地线等导体的连接。特别在架空输配电线、电缆,农用地下电力、通信电缆,飞机场地线网络,建筑及铁路通信网络的敷设中^[6]。

3.2 难熔金属的焊接

采用扩散焊焊接难熔材料时,长时间的加热使得母材发生再结晶,性能降低。SHS 焊接方法是快速、均匀的放热,可以克服以上缺点。Shcherbakov 等人利用

金属 Ti、Mo 和非金属 C、B 的适当配比组成焊料,采用热爆模式研究了 $\Phi 10\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的石墨、钨、钼、高温合金以及工具钢的 SHS 焊接工艺^[7]。

3.3 陶瓷材料的焊接

常规焊接方法不仅很难实现陶瓷材料的焊接,而且由于长时间的加热,将导致陶瓷性能下降,甚至分解。特别是对于增韧陶瓷,加热会极大地损害陶瓷的强度。Rabin^[8]详细地研究了 SiC 陶瓷及其纤维增强陶瓷的 SHS 焊接,采用 Ti-C-Ni 粉末作为焊料实现了 SiC 陶瓷的焊接。焊料中加入 Ni 的目的是为了降低反应的激发温度和燃烧温度。反应过程中不仅生成了 TiC-Ni,而且由于 Ti、Ni 是活性比较强的元素,在界面处可以与陶瓷反应,生成一些复杂的化合物($\text{Ni}_{16}\text{Ti}_6\text{Si}_7$ 、 Ti_3SiC_2 等),增加了接头的强度。此外,Rabin^[9]还采用熔融硅渗入含碳物质中发生 Si+C 反应来焊接 SiC 陶瓷,并通过焊缝区显微组织分析,比较了两种方法的优劣。

3.4 高温合金和金属间化合物的焊接

SHS 焊接技术对于金属间化合物、高温合金的连接具有较大的优越性。文献^[10]对 NiAl 的 SHS 焊接进行了研究。在试验中采用了两种反应混合粉末:一种是在 Ni 和 Al 的粉末中加入 Al_2O_3 粉末 2.8%;另一种是在 Ni 和 Al 的粉末中加入 NiAl 粉末 10%。试验结果表明,加 Al_2O_3 粉末 2.8% 稀释的接头中 Al_2O_3 均匀弥散分布,类似于母材,没有明显的气孔。而加入 NiAl 粉末 10% 稀释的接头中出现了大量的气孔。其原因与焊接时的燃烧温度有关,前者的燃烧温度为 $1\ 827^\circ\text{C}$,后者的燃烧温度为 $2\ 077^\circ\text{C}$ 。NiAl 的熔点为 $1\ 638^\circ\text{C}$,液态 NiAl 大量过热,导致广泛的凝固缩孔以及反应物中 Al 蒸发引起的大量气孔。严格控制燃烧温度是获得无缺陷接头的关键。文献^[11]采用 Ni-Al 元素混合粉末,利用 Gleeble-1500 热力模拟试验机,对加压燃烧原位合成 NiAl 连接 Ni 基高温合金进行了研究并成功实现了 Ni 基高温合金和 Ni_3Al 基高温合金的连接,获得了较为均匀的单相 NiAl 焊缝且与母材结合良好。

3.5 异种材料的焊接

日本的 Miyamoto 等人^[12]首次利用 SHS 焊接技术,研究了金属 Mo 与 TiB_2 和 TiC 陶瓷的焊接。试验利用 Ti+B 或 Ti+C 粉末作为反应原料,预压成坯后加在两个 Mo 片之间,利用石墨套通电发热来引发反应,成功地获得了界面结合完整的焊接接头。Ohyanagi 等人^[13]利用 Ti+C 粉末的 SHS 反应热作为热源来引发 Ag-Cu-Ti 与金刚石和 Cu-W 合金的界面反应,

快速地焊接了金刚石与金属. 孙德超等人^[14]以 FGM 焊料成功实现了 SiC 陶瓷与 GH-4146 合金的 SHS 焊接. 异种材料之间的焊接, 特别是金属与陶瓷之间的焊接的关键问题是界面润湿和缓解焊接残余应力. 一般可以通过选择活性元素与陶瓷发生界面反应来改变陶瓷的表面状态而提高两者之间的润湿性. 缓解由于母材之间热膨胀系数不匹配而产生的残余热应力的发展方向之一是通过 SHS 合成功能梯度材料 (FGM) 作为焊料, 从而可以大大缓解陶瓷与金属之间 SHS 焊接接头的残余热应力.

3.6 SHS 焊接接头的应力分析

对 SHS 焊接过程中产生的热应力和接头在服役过程中产生的热应力的分析和计算, 有利于进行适当的接头和焊料设计以获得具有较低或无残余应力的焊接接头, 但目前这方面进行的工作较少. Messler 等人^[15]利用平板模型和热弹性理论、无源热传导方程, 分析了 SHS 焊接的呈阶梯变化的 FGM 接头在制备和服役过程中的应力分布. 接头中的应力与每层焊料的厚度、FGM 焊料的层数、温度的变化、接头中原有的温度梯度和每一层焊料的性质与温度的关系有关. Kudesia 等人^[16]考虑了焊接件的实际使用情况, 保持金属自由面为较低的恒温, 陶瓷自由面为高温工作面, 以总长为 0.023 m 的 TiC 陶瓷与 NiAl 焊接接头为例, 改变 TiC 和 NiAl 的含量构成 FGM 焊料, 分析了接头尺寸、工作温度、加热速率和材料性能参数对陶瓷/金属焊接接头中的温度和应力分布的影响. 结果表明, 当采用较厚的 FGM 焊料 (0.01 m) 与较薄的陶瓷层结合时, 得到的焊接接头中的残余热应力最小.

4 结束语

由于 SHS 焊接技术兴起和发展的历史比较短, 目前基本上还处于实验室研究阶段. 主要研究焊接工艺参数对焊接件性能的影响. 焊接工艺的稳定性以及反应原料配比、粒度、粒度分布、压坯的密度等

对焊接工艺的影响尚没有搞清楚, 还有待于进一步研究. 为使 SHS 焊接技术进早地应用于工业领域, 还必须加大对 SHS 焊接关键技术的研究和投入.

参考文献:

- [1] Merzhanov A G. Combustion and Plasma Synthesis of High-temperature Materials [M]. New York: VCH Publ. Inc. 1990.
- [2] Merzhanov A G. Inter Symposium on combust. And plasma syn. of High-temp. Mater., San Francisco, CA, 1988.
- [3] 殷声, 主编. 燃烧合成 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [4] Messler R W, Orling T T. Proceedings of the 1993 MRS Symposium on Joining and Adhesion of Advanced Inorganic Materials, Vol. 314, Pittsburgh, 1993, 177~182.
- [5] 中国机械工程学会焊接学会编. 焊接手册 (第一分册) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [6] 李致焕, 李华霖, 张勤宁, 编著. 电气工程中的焊接技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [7] Shcherbakov V A. Inter. J. of SHS, 1993; 2: 357~369.
- [8] Rabin B H, Korh G E, Williamson R L. Fabrication of titanium carbide-alumina composites by combustion synthesis and subsequent dynamic consolidation [J]. Journal of American Ceramic Society, 1990, 72(7): 2156~2157.
- [9] Rabin B H. J. Mater. Sci. & Eng., A130: 1~5.
- [10] Moore T J et al. Joining NiAl Using Simultaneous Combustion Synthesis and pressure [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1994, 30(4): 463~468.
- [11] 朱丹平, 刘伟平. 加压燃烧原位合成 NiAlNi 连接 Ni 基高温合金 [J]. 焊接, 2000, (3): 14~16.
- [12] Miyamoto Y, Nakamoto T, Kiozumi M. Ceramic-to-metal by a pressurized combustion reaction [J]. Journal of Material Research, 1986, 1(1): 7~9.
- [13] Ohyanagi M, Taketani Y, Nakamura Y, et al. Inter. J. of SHS, 1992, (1): 325~330.
- [14] 孙德超, 柯黎明, 邢丽等. 陶瓷与金属梯度过渡层的自蔓延高温合成 [J]. 焊接学报, 2000, 21(3): 57~62.
- [15] Messler R W, Jou J M. ibid, 1993, (2): 84~105.
- [16] Kudesia R. Inter. J. of SHS, 1984, (3): 58~78.

Combustion Synthesis Technology and Its Application in Welding Field

HE Bo-lin, YU Ying-xia

(School of Mechanical & Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013 China)

Abstract: In this paper, technology, application mechanism, characters, application status and problems of combustion synthesis and its application in welding field were introduced. The technology of combustion synthesis and its application in welding normal metal materials, new kind of materials and welding engineering were viewed and forecasted.

Key words: combustion synthesis technology; advanced materials; welding