

便携式无电焊接技术的研究与应用

龚寅卿¹, 蒋相森², 高霆², 肖亚东², 张建强¹, 张国栋¹

(1. 武汉大学, 武汉 430072; 2. 成都银河动力有限公司, 成都 610505)

摘要: 简述了无电焊接技术的原理, 从无电焊笔的燃烧过程、熔渣与焊缝金属的分离及保护、焊缝金属与焊接母材的界面强化这3大关键性问题展开叙述, 结合目前无电焊接工艺的优化及应用, 综述了无电焊接技术当前的研究进展, 分析了无电焊接技术面临的问题并展望其前景。在无电焊接技术的核心问题, 即焊笔燃烧过程研究中, 已形成了以铝/氧化物放热体系为热源的焊笔配方。在此基础上, 作者课题组成功引入了铝/硫酸盐放热体系加大无电焊接热输入, 对进一步拓展无电焊接技术的应用领域提供了理论基础及技术支撑。

关键词: 自蔓延高温合成技术; 钎料成分; 组织; 焊接修复; 应急抢修

中图分类号: TG456.9 文献标识码: A doi: [10.12073/j.hj.20220530002](https://doi.org/10.12073/j.hj.20220530002)

Research and application of portable non-electric welding technology

Gong Yinqing¹, Jiang Xiangsen², Gao Ting², Xiao Yadong², Zhang Jianqiang¹, Zhang Guodong¹

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Chengdu Yinhe Power Co., Ltd., Chengdu 610505, China)

Abstract: Principle of non-electric welding technology was described briefly. It was introduced from three key problems of burning process of non-electric welding pen, separation and protection of slag, and weld alloy and interface strengthening between weld metal and welding base metal. Combined with optimization and application of non-electric welding technology at present, current research progress of non-electric welding technology was summarized, and problems faced by non-electric welding technology were analyzed and its prospect was prospected. In the research of the core problem of non-electric welding technology, that was burning process of non-electric welding pen, formula of welding pen with Al/oxide exothermic system as heat source has been formed. On this basis, the author's group has successfully introduced Al/sulfate exothermic system to increase heat input of non-electric welding, which provided theoretical basis and technical support for further expanding application field of non-electric welding technology.

Key words: self-propagating high-temperature synthesis, composition of solder, microstructure, repair welding, emergency repair

0 前言

焊接技术是野外紧急抢险作业和装备应急维修的一项关键技术。近年来, 随着机械精密化的发展与野外大型器械作业的增多, 人们对大型器械特定位置下材料的连接与修复提出了更高的要求。目前, 便携式气焊或者外加发电机伴随的焊条电弧焊仍是野外紧急抢险作业的主要方式, 但这些焊接方法都

受制于传统电源、气焊瓶等辅助设备, 很难在短时间内快速完成焊接作业^[1]。便携式无电焊接技术因其使用方便, 操作灵活的特点, 能够为重大自然灾害抢修, 战场装备应急维修等重要关口争取宝贵的时间, 这直接关系到人民的生命安全和国家的经济效益, 是各国研究者重点关注的研究方向。

作为新一代武器装备应急维修和野外工程器械等快速应急维修的理想焊接手段, 便携式无电焊接

收稿日期: 2022-05-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1103900); 湖北省自然科学基金资助项目(2014CFB707)。

技术具有巨大的战略意义,各国研究者都对其研究进展进行了一定程度的封锁。国外,俄罗斯率先在该领域展开研究,并生产制造有针对厚度 3 mm 内钢板的无电焊笔在国际上销售。国内,军械工程学院辛文彤教授团队于 2008 年成功研发出用于无电焊接的燃烧型焊条并投入生产应用,填补了国内在该领域的空白,随后国内多位焊接专家继续在该领域深入研究,取得了丰硕的成果。目前,无电焊接技术研究主要围绕无电焊笔的焊接过程展开,进而对焊接工艺的优化,焊接接头组织分析与性能的提升,特定条件及位置下的无电焊接等相关问题进行探索。

1 便携式无电焊接

1.1 便携式无电焊接原理

便携式无电焊接技术(亦称手工自蔓延焊接技术)是自蔓延高温合成技术(Self-propagating high-temperature synthesis, SHS)与传统焊条电弧焊相结合的一种新型焊接方法^[2]。SHS 技术是一种依靠化学反应自身放出的热量来维持反应持续进行,并且合成材料的技术,因其放热量大,升降温迅速等优点,被广泛用于研究难熔金属材料、陶瓷材料、金属间化合物等之间的焊接^[3-7]。SHS 燃烧示意图如图 1^[8]所示。

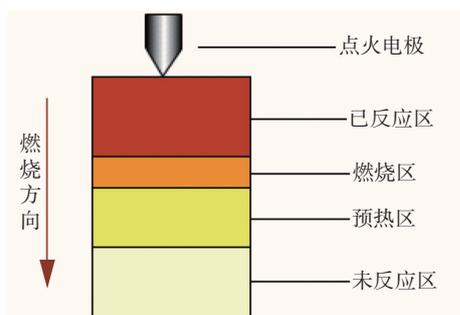


图 1 SHS 燃烧示意图^[8]

相比于 SHS 技术,便携式无电焊接技术采用先进的燃烧型焊条制成的便携式手持无电焊笔对材料进行焊接,改进了 SHS 焊接技术的点火模式,成功克服了真空压力等工艺参数对焊接过程的影响,简化了材料的焊接过程。该技术的原理是将能够发生自蔓延反应的焊接材料制成便携式手持焊笔,采用焊条电弧焊的操作方法,利用焊接材料本身自蔓延反应放出的热量作为热源,使母材局部熔化,并与反应产生的金属熔液扩散后填充于母材间形成焊缝,反应生成的金属氧化物及其他杂质形成焊渣浮于焊缝

表面保护焊缝,待凝固后形成焊接接头,实现母材间的永久性牢固焊接,同时达到单面焊双面成形的效果,如图 2 所示。

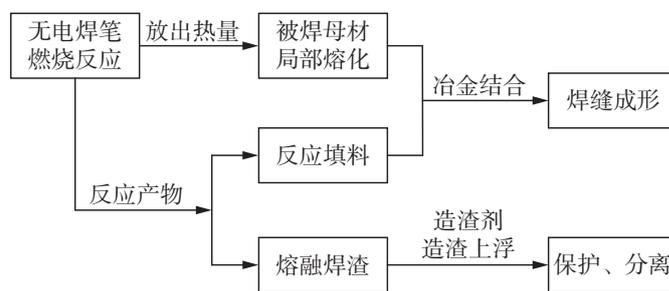


图 2 无电焊接原理

1.2 便携式无电焊笔

便携式无电焊笔是无电焊接技术的集中体现,其结构如图 3^[9]所示,主要由焊药药柱、纸筒、带有引线的引火帽、堵头和套筒 5 部分组成。其中,焊药由能够进行自蔓延反应的高热剂及必要的造渣剂、合金剂和稀释剂等添加剂组成,经混合后压实封装于纸筒内。纸筒用于保护焊药药柱,同时便于成形焊笔。堵头装于纸筒的末端,用于封装药柱及焊接时夹持焊笔。带有引线的引火帽装于纸筒前端,起到点燃的作用。便携式无电焊接手持焊笔外径一般在 $\phi 10 \sim \phi 25$ mm 之间,长度约 100 ~ 500 mm,具体尺寸根据使用时具体焊接要求确定,焊笔外径与长度越大,放热量越充足^[10]。焊接时,将套筒固定于纸筒末端的堵头上,用火柴点燃引火帽,达到点燃温度,进而引发焊药药柱的自蔓延合成反应。作为焊料中提供热量的重要成分,高热剂一般采用 CuO/Al 与 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 的高放热体系,具体放热反应^[11]如下:



这 2 个反应的绝热燃烧温度分别为 3 622 K 和 5 151 K,



图 3 无电焊笔示意图^[9]

完全可以使绝大多数的钢质金属构件熔化,而且反应生成的 Fe 与 Cu 能够满足作为焊缝填充材料的需要^[12]。

2 便携式无电焊接技术的机理研究

2.1 便携式无电焊接的燃烧过程

在实现无电焊接的途径中,首先要解决的是热量和焊接性的问题,SHS 反应燃烧模式多为非稳态螺旋燃烧,过程复杂且不好控制,无电焊笔内焊粉的燃烧受到狭小空间的约束,过程更加复杂。目前已确定铝热型 SHS 反应体系能够提供充足的放热量完成应急焊接,相关研究主要集中在探究高热剂燃烧体系的组成规律与焊笔燃烧速度的控制,力求能够更好的保证焊药的高放热量和稳定性,兼顾焊接质量的同时使得无电焊笔的制造、使用与储存更加方便且安全。

李志尊等学者^[13-15]对 CuO/Al 系和 Fe₂O₃/Al 系放热体系的无电焊笔进行了深入的研究。李志尊等学者^[13-14]通过大量试验研究发现:将 CuO/Al 系和 Fe₂O₃/Al 系高热剂以一定比例混合(前者质量分数为 50%~80%),焊笔燃烧速度基本保持稳定,为 13.5 mm/s 左右,燃烧产生的热量将试板焊透,且焊缝质量优良,达到单面焊双面成形的效果。进一步地,李志尊等学者^[15]对外部环境因素考察发现:无电焊接对环境温度的敏感性较高,如图 4^[15]所示,低温下流失到周围环境中的热量不可忽视,在 36 °C 和 -10 °C 环境中,燃烧速度分别为 14.3 mm/s 和 9.6 mm/s。

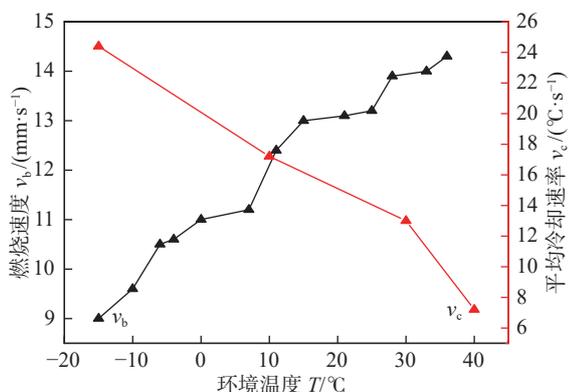
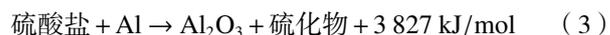


图 4 环境温度对燃烧速率与平均冷却速率的影响^[15]

为保证极端环境下无电焊笔的焊接质量,找寻高效稳定的热源至关重要。工艺改进方面,申超等学者^[16]研究发现采用二重热输入的方式能够在提供热

量的同时,保证焊缝的质量,焊接接头的抗拉强度能够达到 340 MPa。原料改进方面,铝/硫酸盐放热体系的热量远高于铝/氧化物放热体系,且该反应生成物均为熔渣,不会向焊缝中引入其他元素影响组织组成,是一种理想的无电焊接辅助热源,其反应通式^[17-18]为:



目前,关于无电焊笔中添加铝/硫酸盐作为辅助热源的相关研究鲜有报道,主要问题有 2 点:①Al/CaSO₄ 反应放热量大且更加剧烈,实际操作中对焊接人员提出了更高的要求;②该反应中硫化物的引入复杂了渣系,除渣更加困难。作者课题组以 Al/CaSO₄ 与 Al/CuO 复合高放热体系为基础,采用不锈钢套管和分离式结构重新设计了一款保护性更好,灵活性更高的无电焊笔。该焊笔结构如图 5 所示,焊笔主体采用不锈钢制套筒,增强焊笔保护性的同时吸收掉了 Al/CaSO₄ 放热体系的部分热量,使得焊接更加平稳。采用该焊笔成功焊接了 5 mm 厚的 Q235 钢板,研究发现:随着高热剂中 Al/CaSO₄ 比例的增加,焊缝成形性与抗拉强度均呈近似正态分布,如图 6 所示。



图 5 新型便携式无电焊笔成品

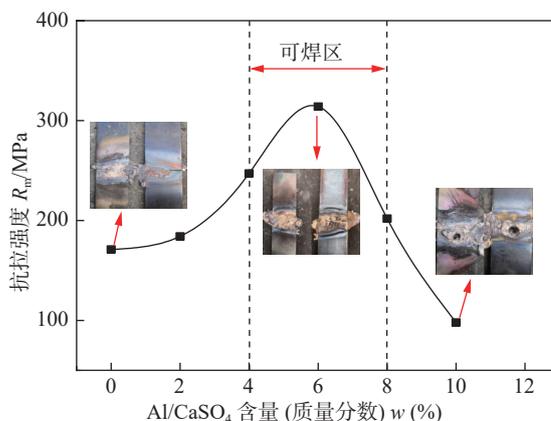


图 6 Al/CaSO₄ 含量对焊接接头抗拉强度的影响

相比于传统的粉末燃烧,无电焊笔中的粉末燃烧过程更加复杂。在无电焊笔制作过程中,焊粉被压缩到狭窄的密闭环境中,燃烧时,由于反应物受到管壁挤压与燃烧前沿各处粉末中反应物含量不同、密度不一等问题,焊笔燃烧前沿传播失去稳定性和周期性,燃烧波中各点几乎独立传播,一定程度上影响了焊笔的稳定燃烧。李志尊等学者^[19]测量不同规格的无电焊笔反应前端朝上和前端朝下的燃烧速度发现:2种情况下燃烧速率基本一致,证明了液相毛细渗透强烈促进燃烧的作用在无电焊接中并不太显著。现有研究表明:通过焊笔成形工艺的优化,焊笔燃烧更加平稳。袁轩一等学者^[20]通过对不同粒径的高热剂对燃烧速率的影响揭示了:在低粒径下,燃烧反应主要由传输过程控制,燃烧速率受反应物粒径影响大;在高粒径下,燃烧反应主要由毛细作用控制,燃烧速率受反应物粒径影响大,如图7^[20]所示。在基于大量试验的基础上,李志尊等学者^[21]研究发现:针对铝/氧化物体系为主的焊粉,粒度在平均粒径53.5 μm(260~300目)、混料时间30 min、药粉密度2.7 g/cm³时,焊接效果最佳。但是,各焊接工艺参数对焊笔燃烧的具体影响及规律仍未被揭示,比如焊笔直径对焊笔前沿燃烧波的影响、焊笔套筒厚度与焊笔前端传热模式及燃烧弧形状的影响等。

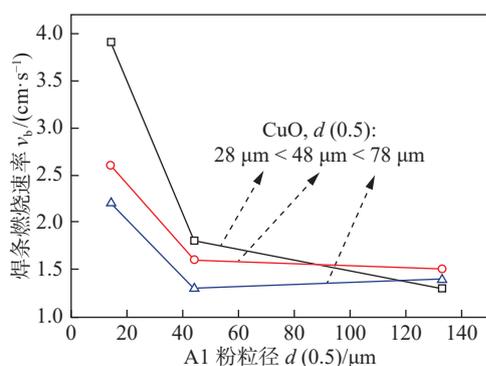


图7 反应物粒径对焊笔燃烧速率的影响^[20]

采用外加热力偶的方式进行测量发现:无电焊接在加热阶段的升温速度与冷却阶段的降温速度均显著小于电弧焊,且焊接热量沿横向的传热速度远大于其沿纵向的传热速度^[22]。有学者^[23-26]研究发现:无电焊接的热循环在800℃以上停留时间过长,导致热影响区组织的粗大生长,加之魏氏组织的长大,使得热影响区成为无电焊接接头的薄弱区域,经焊前预热、焊后热处理后,组织能够得到明显改善。

目前,对无电焊接燃烧过程的研究主要围绕焊接时的热输入、燃烧温度及燃烧速度与高热剂的组成、粒径、球磨工艺、外部环境等因素展开。由于大量试验的压力与某些极端条件下的高热量配方在实际焊接操作中的可操作性较低,研究少有涉及到焊接的热循环,焊笔内的具体燃烧模式与焊料组分、颗粒度、压实密度等影响因素具体关系的构建。采用计算机模拟的方式对无电焊接燃烧过程的深入研究是较为可行、且具有重大意义的研究方向,通过建立两者间的联系,将有利于进一步提升焊接质量,扩大无电焊接的应用领域。此外,当前无电焊接相关工作者在试验时均默认采用铝/氧化物放热体系来进行焊粉和焊笔的设计,在热源的最大放热量被限定的情况下,该技术很难在应用领域内进一步突破。作者课题组成功引入作为辅助热源的先例很好地证实了在不引入其他金属元素的前提下,通过引入辅助热源增大放热量的可行性。相关工作者可以在此基础上进一步拓展,高氯酸钾等优质热源都可以作为考虑范围。

2.2 焊渣与焊缝金属的分离及保护

无电焊接的主要反应为放热量大,燃烧速度快的Al/CuO等铝热系反应,该反应在放出热量的同时生成大量的Al₂O₃,质量分数约为焊笔产物的30%,在熔渣中可达50%。在铝热系反应中,如何实现Al₂O₃与熔融金属的分离与利用是成功的关键。由于Al₂O₃是玻璃体系中的重要氧化物,通过在焊药中添加SiO₂,CaO,CaF₂和MgO等造渣剂或Si-Ca粉反应造渣的方式,形成以Al₂O₃玻璃为基和以含Al₂O₃尖晶石中间陶瓷相为第二相的焊接渣系,能够有效降低熔渣的粘度、凝固点及密度,改善渣的流动性,使其具有适宜的表面张力,实现焊接熔渣与焊缝液态金属的有效分离^[27-29]。

有学者^[30-34]研究发现:熔渣的主要成分为玻璃态的CaO-Al₂O₃-SiO₂,同时具有部分的2CaO·3SiO₂,CaO·Al₂O₃和FeO·Al₂O₃的低熔点晶体状组织及少量未分离的金属熔滴。在添加剂中,FeO能够与Al₂O₃反应结晶出FeO·Al₂O₃的晶体状组织,大大减少玻璃态熔渣中的Al₂O₃含量;适量B₂O₃能够与Al₂O₃反应生成低熔点的Al₁₈B₄O₃₃与Al₄B₂O₉相降低Al₂O₃的熔点;CaCO₃对燃烧速度和绝热燃烧温度的影响最明显,CaF₂能够有效促进熔渣与金属的分离,其效果与CaO和SiO₂同时加入相当。为了保证焊接时充足的热量,

在高热剂中加入 Si-Ca 粉或一定比例的 Si 与 CuO, 通过反应造渣除去焊缝中的 Al_2O_3 也具有较为理想的效果^[35-37]。

目前, 渣系的研究受制于有限放热量的限制, 过多的造渣剂会吸收更多的热量, 影响焊缝的成形; 过少的造渣剂则会导致排渣不充分, 焊缝金属中出现夹杂等缺陷。当下热门的反应物造渣方式本质上是对焊接热输入的保护, 对渣系的研究仍然停留在, 如何在焊透的情况下获得更加纯净的焊缝。因此, 找寻更加高效的热源并配置相应的造渣剂或采用更合理的方式保护现有的热输入, 最终整理出对应不同板厚、不同热输入下, 何种造渣方式与粉料配比更加合适是需要进一步深入研究的方向。

2.3 焊缝金属与焊接母材的界面强化

无电焊笔采用自蔓延粉末作为主放热体系, 放热量高但持续时间短, 在较高的冷却速度下 Fe 与 Cu 发生液相分离, 最终所得焊缝组织由富铜相与富铁相组成, 如图 8 所示^[38], 由于焊缝中富铜相的存在, 焊接接头的抗拉强度较低, 需要辅以添加一定量的合金元素强化焊接质量^[39-42]。Ni 能够与铁在熔合区形成大量固溶体, 加强熔合区和母材的结合, 提高焊接接头的力学性能, 起到关键的过渡作用^[43]。目前, 已确

定焊缝组织以 Cu-Fe-Ni 三元合金系为主, ($w_{Ni} \leq 7.86\%$, 质量分数)^[44], 通过继续添加 W, Cr, Mn, Zn 及稀土材料等组元, 优化组织及性能。有学者^[45-47]研究发现: W 能够起到细化晶粒的作用, 且能与少量 Ni 形成 Ni(W) 固溶体, 提高熔合区与焊接母材和焊缝金属之间的结合力及焊接接头的力学性能; Cr 能强化富 Fe 相, 抑制焊接热裂纹的产生; B 能改善熔融金属的流动性, 降低焊接温度, 提高焊接的可控性, 且可在一定程度上细化晶粒。

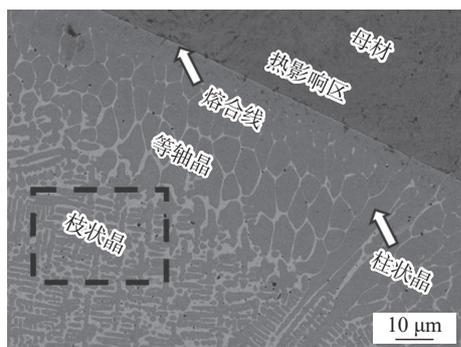
3 无电焊接工艺与应用

无电焊接技术以手持便携式无电焊笔为核心技术, 对操作人员要求不高, 操作具有极强的灵活性。对无电焊笔形式及结构进行改进, 加强对焊笔外壳的保护措施同时使其更加轻便易携带, 一直是各大企业关注的热点。同时, 针对不同种类、厚度及结构的被焊母材及不同环境下的无电焊接, 其焊接工艺各不相同, 焊笔结构各式各样。因此, 不同环境下及不同母材焊接的研究对拓展其应用领域具有重大的研究价值。

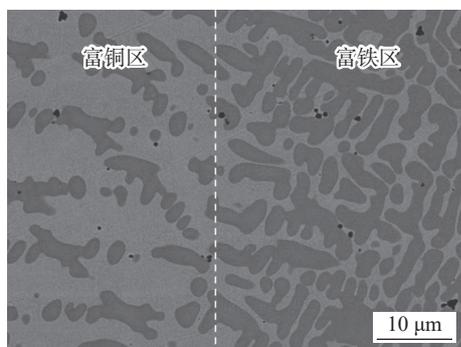
3.1 钢的焊接

针对低碳钢、低合金钢及中碳钢等常用钢种的无电焊接研究比较成熟, 尤其是针对 45 钢与 Q235 钢的焊接, 已根据钢的厚度配置出 15 mm 厚度以下的能够一次焊接成功的不同的便携式无电焊笔, 并通过改进焊接工艺对厚度高于 15 mm 的厚板进行了尝试焊接。

武斌等学者^[48]用颗粒度为 $48 \mu m$ (300 目) 的 CuO, Fe_2O_3 与 Al 粉对 5 mm 厚的 Q235 钢进行了无电焊接, 发现焊接接头冶金结合良好, 具有明显的过渡区。焊接试件抗拉强度达到 350 MPa 以上, 抗弯强度达到 1 000 MPa 以上, 能够满足应急焊接的需要。徐锦飞等学者^[49]以 3 mm 厚 Q235 钢板为焊接母材, 研究发现: 采用后倾约 70° 角、焊接弧长 5 mm、焊接速度 $7 \sim 9 \text{ mm/s}$ 的工艺参数焊接, 焊缝成形良好, 能够达到单面焊双面成形的效果。中厚钢板在机械装备中应用最为广泛, 针对中厚度钢板的焊接抢修问题, 刘宏伟等学者^[50]在选择高放热体系基础上, 通过提高焊药体系放热量、增大焊接笔直径、减小反应物链度、提高混粉均匀性、增大压坯密度等工艺方法, 减少焊接过程中的热量损失, 成功实现 12 mm 厚度 45 钢板的无电焊接。针对大厚度钢板的无电焊接问题, 刘



(a) 焊缝



(b) 图 8a 中的枝状晶

图 8 无电焊接焊缝组织^[38]

宏伟等学者^[51]采用“开坡口、多道焊”工艺方法,实现了16 mm厚45钢板的无电焊接,为大厚度钢板的无电焊接提供了一定的参考价值;结果表明:以焊接角度85°、燃弧长0~5 mm、焊接速度4 mm/s进行无电焊接,只需焊接2层即可完全填充焊缝,且焊接接头力学性能良好,拉伸强度为314 MPa,弯曲强度为367 MPa。

针对不同厚度的45钢与Q235钢的焊接,Hu等学者^[52]研究开发出一种新型Cu基无电焊接材料成功焊接了2~4 mm厚的45钢与Q235钢板,其焊缝抗拉强度均大于200 MPa,弯曲强度最高接近600 MPa,抗冲击性能可达Q235钢的51%,表面硬度可达120 HRB,满足金属间快速焊接的需要。通过进一步优化焊料组分,胡军志等学者^[53-54]利用新开发的Cu基无电焊笔成功焊接了10 mm厚的45钢与Q235钢板,焊接接头的抗拉强度达283 MPa,弯曲强度达628 MPa,均与Q235钢接近,但低于45钢,能够满足在野外应急情况下装备维修中的使用要求。

3.2 铜的焊接

曲利峰等学者^[55]针对铜及其合金的无电焊接问题进行了探讨,并尝试采用均匀设计法对已有的铜基无电焊笔配方进行优化,得出焊接最佳配方范围:高热剂为70%~72%,造渣剂 B_2O_3 为6%~10%,稀释剂CuO为4%~6%,合金剂Ni为2.5%~3.5%,Zn为3%~4%(质量分数)。Qu等学者^[56-58]研究发现:在铜的焊接中,高熔点的 Al_2O_3 除了形成玻璃渣系外,还能与CuO形成 $CuO \cdot Al_2O_3$ 陶瓷相降低熔点;向焊剂中添加一定量的Zn,对焊接接头抗拉强度和硬度有显著提高。

3.3 特殊环境及位置的焊接

3.3.1 水下无电焊接的研究

水下湿法焊接目前以焊条电弧焊和药芯焊丝电弧焊为主,Li等学者^[59]研究发现水下湿法药芯焊丝电弧焊中加入铝热剂能够提高湿法焊接过程的稳定性,当铝热剂添加量从0%增加到50%(质量分数)时,焊缝熔深从2 mm增加到4 mm,焊缝稀释率从22%增加到37%。因此,采用无电焊接的方式进行水下焊接具有一定的可行性。在此基础上,有学者^[60-63]借鉴湿法电弧焊的原理,研究了一种用于水下金属结构应急维修的新型焊接方法,即水下湿法无电焊接技术,并通过对焊条结构的重新设计与焊料组分的优化,研制出了一种水下无电焊笔,如图9^[60]所示。

用该焊笔对5 mm的Q235钢板在0.3 m水浴中进行了湿法焊接,其接头抗拉强度达到267 MPa,冲击吸收能量13.8 J。虽然无电焊接在水下能够顺利完成焊接作业,但水下焊接仍然存在扩散氢含量较高,焊缝组织气孔与夹杂较多,焊接烟尘过大难以精准焊接等问题,需要进一步的研究。

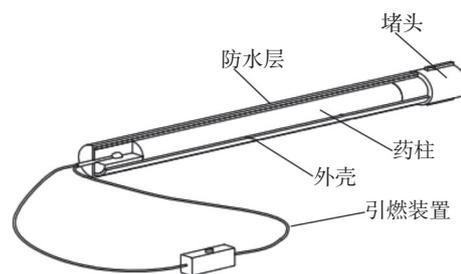


图9 水下无电焊笔示意图^[60]

3.3.2 无电焊接立焊工艺的研究

由于无电焊接反应放热量大不易控制,立焊时焊件上部容易烧穿,且熔融金属受重力影响下淌严重,焊缝成形困难。刘浩东等学者^[64]借鉴传统立焊经验,对无电焊接的立焊工艺进行了探究,提出添加活性剂焊接时形成短渣或加入造气剂产生吹力拖住熔渣2种思路制备用于立焊的燃烧型焊条,并采用均匀设计法研制出了一种无电焊接立焊焊条,成功对3 mm厚的Q235钢进行立焊,最佳焊条倾角为30°左右,形成的焊缝美观,具有良好的力学性能。其焊料组分:高热剂为71.5%~73.0%,稀释剂为14%~15%,造渣剂SiFe为2.5%~3.0%,合金剂MnFe为2.3%~2.6%,Ni为4.6%~5.6%,其他添加剂含量为1.8%~2.9%(质量分数)。

Wu等学者^[65-67]设计出高热焊药段和低热造渣段交替的脉冲型立焊焊条,如图10^[68]所示,利用焊条

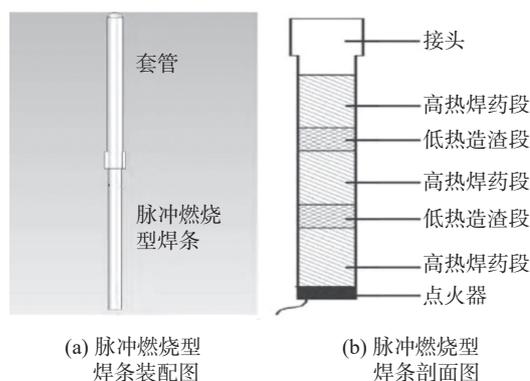


图10 脉冲燃烧型焊条装配及焊条剖面图^[68]

在低热渣段燃烧时产生的短渣托住熔融金属,提高填缝性同时起到保护焊缝的作用,最终得到的焊缝成形良好,采用该焊条对 Q235 钢进行焊接,焊弧长度约为 3 mm 时效果最好,其抗拉强度达 367 MPa。但相较于平地焊接试样,立焊接试样冲击韧性较低,断口内气孔及杂质较多,需要进一步优化配方及工艺,延长焊接熔池的凝固时间,提高焊接作业的质量^[68]。

4 结束语

无电焊接技术是一种用于装备应急抢修的新型焊接技术,具有简单、高效、节能等优势,深受军方的重视,目前其研究与应用已取得阶段性进展。针对陆地平地焊接,无电焊接技术已成功投入使用,且焊接质量较高。近年来,相关研究人员主要致力于无电焊接的立焊和 underwater 焊接的实现,借助于陆地焊接的基础,已取得一定的成果,但距离广泛投入使用仍存在较大差距。针对无电焊接技术的发展,可在以下几个方面进行突破与改进。

(1) 焊接热量的提高。目前无电焊接技术能一次成功焊接小于 10 mm 厚的钢结构件,对于高厚度的钢结构需采用多道焊或者二次热输入的方式进行焊接,且效果大打折扣。提高焊接热量,可以考虑引入高放热的新反应体系(比如铝/硫酸盐体系),进一步优化焊料的配方,配制出针对大厚度钢板、陶瓷、难熔合金的无电焊笔,拓展无电焊笔的应用领域。

(2) 焊接过程及热循环的研究。无电焊笔反应快且过程复杂,一旦发生反应无法停止,严重阻碍了无电焊接立焊,全位置焊接等工艺的实现,同时,焊笔的反应速度及温度直接影响着焊接的热循环,从而影响了焊接接头的质量。目前的研究主要围绕如何通过改良焊接材料的成分配比、颗粒度、颗粒密度与其混料方式等制备工艺展开,并辅以大量的试验,取得了一定的成果。受制于庞大的实验压力与极端条件下的焊接安全性问题,考虑引入计算机模拟手段,利用有限元仿真分析对无电焊接燃烧放热过程进行仿真模拟,尝试对焊笔燃烧过程进行还原,寻找焊接热循环与焊笔成分、焊接工艺之间的关系,同时可对反应过程中各项工艺参数的优化,进一步提高焊接质量。

(3) 建立焊缝金属力学性能与探究焊料的成分配比,焊接接头组织及力学性能三者间的对应关系。

目前的研究鲜有对无电焊接目前的研究成果进行整理,建立焊缝金属力学性能微观组织、焊接母材、焊接工艺等的对应关系。通过对目前研究的整理与补充,进一步辩证性地把握焊料中各组分的作用规律和相互影响规律,探究焊料的成分配比,焊接接头组织及力学性能三者间的对应关系,提升对焊接熔渣结构及排渣机理的深入认识,改善焊缝的综合力学性能是扩大无电焊接技术应用领域的一个重要研究方向。

(4) 无电焊接材料的进一步开发。目前无电焊接的研究主要集中于陆地平地焊接并已经能够投入生产应用,水下焊接及立焊也取得了一定的进展。进一步解决立焊熔融金属下趟,水下焊接能见度低且氢气等特定环境下的焊接缺陷等问题,提升焊接过程中熔池的凝固时间是下一阶段研究的重点方向。

参考文献

- [1] 李亚江,张永喜,王娟. 焊接修复技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] Li Shuzhen, He Bolin, Jiang Minhua. Review of present research situation and development of combustion synthesis welding[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 746: 155 - 160.
- [3] Li Shujie, Liang Xiaobo, Duan Huiping, et al. Joining of SiC ceramic to Ni-based superalloy with Cu intermediate layer[J]. *Key Engineering Materials*, 2002, 217: 101 - 110.
- [4] Merzhanov A G. Solid flames: discoveries, concepts, and horizons of cognition[J]. *Combustion Science & Technology*, 1994, 98(4-6): 307 - 336.
- [5] Merzhanov A G. Combustion and plasma synthesis of high temperature materials [M]. New York, USA: VCH Publication Inc, 1992.
- [6] Merzhanov A G. Combustion: new manifestations of an ancient process [M]. London, UK: Blackwell Scientific Publication, 1992.
- [7] Merzhanov A G. Theory and practices of SHS: worldwide state of the art and the newest results[J]. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 1993, 2(2): 113 - 158.
- [8] 胡玉华. 合金元素对自蔓延铝焊缝组织和导电性的影响[D]. 武汉: 武汉大学硕士学位论文, 2013.
- [9] 袁轩一. 一种新型热剂焊接方法及其应用研究[D]. 北京: 清华大学博士学位论文, 2011.
- [10] Wang Sen, Xin Wentong, Qu Lifeng, et al. Study on length of cartridge how to affects cutting capability of the comb-

- ustion cutting ammunition[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 275-277: 2248 – 2251.
- [11] 殷声. 燃烧合成[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [12] Collins E S, Pantoya M L, Daniels M A, et al. Heat flux analysis of a reacting thermite spray impinging on a substrate[J]. *Energy & Fuels*, 2012, 26(3): 1621 – 1628.
- [13] 李志尊, 辛文彤, 武斌, 等. 高热剂对低碳钢手工自蔓延焊接的影响[J]. *焊接学报*, 2007, 28(2): 79 – 81, 117.
- [14] Li Zhizun, Xin Wentong, Wu Yongsheng, et al. Manual self-propagating high-temperature synthesis welding of 45 steel[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 189-193: 3484 – 3487.
- [15] 李志尊, 韩凤起, 孙立明, 等. 环境温度对手工自蔓延焊接的影响[J]. *焊接*, 2016(11): 53 – 56.
- [16] 申超, 李志尊, 孙立明, 等. 二重热输入对手工自蔓延焊接质量的影响[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(5): 141 – 144.
- [17] Xiong Yanping. Study on microstructure and property of cast aluminum from the reaction of new SHS aluminum welding powder[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 320: 216 – 221.
- [18] Abnara B, Ghafouria P S, Aghajani H. SHS joining of aluminum conductors in the presence of copper[J]. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, 2018, 27(2): 81 – 84.
- [19] 李志尊, 辛文彤, 胡仁喜, 等. 手工自蔓延焊接燃烧机理研究[J]. *焊接*, 2011(11): 36 – 39.
- [20] 袁轩一, 陆华飞, 陈克新, 等. 不同燃烧速率对热剂焊接焊缝显微组织的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(S1): 440 – 442.
- [21] 李志尊, 辛文彤, 胡仁喜, 等. 焊条成形工艺对手工自蔓延焊接的影响[J]. *焊接学报*, 2010, 31(12): 81 – 84.
- [22] 刘宏伟, 刘吉延, 马世宁, 等. 无电焊接热循环测试研究[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2011, 25(5): 88 – 90.
- [23] 李占明, 马世宁, 孙晓峰, 等. 装备战场抢修中的无电焊接技术[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(15): 19 – 23, 27.
- [24] 吴永胜, 王建江, 辛文彤, 等. 手工自蔓延焊接热循环测试与分析[J]. *电焊机*, 2012, 42(3): 86 – 88.
- [25] 辛文彤, 马世宁, 李志尊, 等. 焊后热处理对手工自蔓延焊接接头组织性能的影响[J]. *焊接学报*, 2009, 30(6): 83 – 86.
- [26] 吴永胜, 辛文彤, 姚军刚, 等. 焊前预热对40Cr钢手工自蔓延焊接接头质量的影响[J]. *热加工工艺*, 2009, 38(5): 116 – 117.
- [27] Yu Zhigang, Leng Haiyan, Wang Lijun, et al. Computational study on various properties of CaO-Al₂O₃-SiO₂ mold flux[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(6): 7180 – 7187.
- [28] Shi Guanyong, Zhang Tingan, Dou Zhihe, et al. Dissolution behavior of Al₂O₃ inclusions in CaO-Al₂O₃ based slag representing aluminothermic reduction slag[J]. *Crystals*, 2020, 10(11): 1061.
- [29] Choi J Y, Lee H G, Kim J S. Dissolution rate of Al₂O₃ into molten CaO-SiO₂-Al₂O₃ slags[J]. *ISIJ International*, 2002, 42(8): 852 – 860.
- [30] Li Zhizun, Han Fengqi, Sun Liming, et al. Influence of addition of Fe₂O₃ and CaO on the performance of manual SHS welding slag[J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 697: 741 – 744.
- [31] 李志尊, 韩凤起, 孙立明, 等. 添加剂对手工自蔓延焊接高Al₂O₃熔渣性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2015, 44(S1): 320 – 323.
- [32] Li Zhizun, Xin Wentong, Han Fengqi, et al. Influence of slagging elements on manual SHS welding of low-carbon steel[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 314-316: 1214 – 1217.
- [33] 李志尊, 辛文彤, 胡仁喜, 等. 手工自蔓延焊接Al₂O₃-SiO₂-CaO渣系研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(S1): 627 – 630.
- [34] Yuan X Y, Zhan C B, Jin H B, et al. Novel method of thermite welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2010, 15(1): 54 – 58.
- [35] de Souza K M, de Lemos M J S. Detailed numerical modeling and simulation of Fe₂O₃/Al thermite reaction[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2021, 46(5): 806 – 824.
- [36] Luo Chuanhong, Liu Maopin, Mao Yan, et al. Effect factors of SHS combustion system in thermit welding[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 560-561: 100 – 106.
- [37] 徐锦飞, 张国栋, 张建强, 等. Si-Ca造渣型自蔓延焊条焊接接头显微组织分析[J]. *焊接*, 2011(3): 30 – 34.
- [38] 龚寅卿. 复合高放热体系无电焊笔研制及组织性能研究[D]. 武汉: 武汉大学硕士学位论文, 2022.
- [39] Chuang Y Y, Schmid R, Chang Y A. Thermodynamic analysis of the iron-copper system I: the stable and metastable phase equilibria[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1984, 15A: 1921 – 1930.
- [40] Chen Q, Jin Z P. The Fe-Cu system: a thermodynamic evaluation[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1995, 26A: 417 – 426.
- [41] Xin Wentong, Li Zhizun, Wu Yongsheng, et al. Study on a Cu-Fe weld metal of manual SHS welding[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 189-193: 3541 – 3544.
- [42] Xin Wentong, Li Zhizun, Li Baofeng, et al. Liquid phase separation of Cu-Fe weld metal of manual SHS welding[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 291-294: 945 – 948.

- [43] Shcherbakov V A. SHS welding of hard alloy and steel[J]. *Key Engineering Materials*, 2002, 217: 215 – 218.
- [44] Li Baofeng, Xin Wentong, Liu Fengwen, et al. The effect of the element of Ni on the crack of manual SHS welding joint[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 214: 513 – 516.
- [45] 辛文彤, 马世宁, 张保元, 等. 元素W对手工自蔓延焊接接头组织性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2008, 37(13): 9 – 10, 14.
- [46] 辛文彤, 马世宁, 李志尊, 等. 元素Cr对手工自蔓延焊接接头组织性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2009, 38(17): 5 – 7.
- [47] 杨辉, 张国栋, 张建强, 等. 元素B对自蔓延焊条焊接工艺及接头显微组织影响[J]. *焊接*, 2015(11): 22 – 26.
- [48] 武斌, 辛文彤, 王建江, 等. 手工自蔓延焊接焊缝组织性能研究[J]. *热加工工艺*, 2006, 35(6): 21 – 23.
- [49] 徐锦飞, 张国栋, 张新佳, 等. 手工自蔓延焊条的焊接工艺性[J]. *电焊机*, 2013, 43(1): 42 – 45.
- [50] 刘宏伟, 马世宁, 刘吉延, 等. 无电焊接中厚度钢板焊接接头的组织结构与性能研究[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2010, 24(2): 74 – 78.
- [51] 刘宏伟, 马世宁, 朱胜, 等. 多道焊工艺实现大厚度钢板手工自蔓延焊接的研究[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(23): 36 – 40.
- [52] Hu J Z, Ma S N, Chen X R. Structure and properties investigation about a copper-base SHS welding material[J]. *Key Engineering Materials*, 2008, 373-374: 505 – 508.
- [53] 胡军志, 马世宁, 辛文彤. 一种Cu基自蔓延焊条焊接Q235和45钢焊缝的组织与性能[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2007, 21(5): 91 – 94.
- [54] Hu Junzhi, Wang Sumei, Zhao Xiaoli, et al. Structure and performance of welding joint of Q235 steel welded by SHS welding[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 2010, 5(2): 189 – 193.
- [55] 曲利峰, 辛文彤, 吴永胜, 等. 基于均匀设计法的铜及铜合金手工自蔓延焊接配方优化[J]. *电焊机*, 2011, 41(9): 33 – 36.
- [56] Qu Lifeng, Xin Wentong, Wu Yongsheng, et al. Mechanism and experimental research on copper and copper alloy's manual SHS welding technology[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 314-316: 923 – 926.
- [57] Qu Lifeng, Xin Wentong, Wu Yongsheng, et al. Study on copper and copper alloy's manual SHS welding technology[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 80-81: 96 – 99.
- [58] 曲利峰, 辛文彤, 李志尊, 等. Zn含量对铜合金手工自蔓延焊接Cu-Zn焊缝金属凝固组织的影响[J]. *热加工工艺*, 2012, 41(3): 137 – 138, 141.
- [59] Li H L, Liu D, Guo N, et al. The effect of alumino-thermic addition on underwater wet welding process stability[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 245: 149 – 156.
- [60] 韩凤起, 李志尊, 孙立明, 等. 水下湿法手工自蔓延焊接技术[J]. *焊接学报*, 2019, 40(7): 149 – 155.
- [61] 马云鹤, 李志尊, 孙立明, 等. 水下湿法手工自蔓延焊接缺陷分析[J]. *价值工程*, 2019, 38(5): 99 – 102.
- [62] 李志尊, 孙立明, 韩校粉, 等. Q235钢水下湿法手工自蔓延焊接探索性研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2020, 43(5): 65 – 70.
- [63] Li Zhizun, Sun Liming, Han Xiaofen, et al. Influence of water environment on wet underwater manual self-propagating high-temperature synthesis welding[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1885: 032025.
- [64] 刘浩东, 张龙, 辛文彤, 等. 基于均匀设计法的燃烧型焊条立焊配方优化[J]. *材料导报*, 2012, 26(8): 125 – 128.
- [65] Wu Yongsheng, Wang Jianjiang, Xin Wentong, et al. Microstructure and properties of joints by manual self-propagating high-temperature synthesis vertical weld[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 785-786: 985 – 988.
- [66] 吴永胜, 王建江, 王问斯, 等. 脉冲燃烧型焊条焊弧长度对立焊效果的影响[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(5): 234 – 235, 238.
- [67] 吴永胜, 王建江, 辛文彤, 等. 手工自蔓延立焊Q235钢接头冲击韧性与断口微观形貌[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(1): 219 – 220, 222.
- [68] 吴永胜, 秦学文, 汪晓崇, 等. 脉冲燃烧型焊条立焊焊缝组织[J]. *焊接技术*, 2018, 47(5): 65 – 69.

第一作者: 龚寅卿, 硕士研究生; 主要从事特种焊接技术方面的研究; gongyinqing@whu.edu.cn。

通信作者: 蒋相森, 高级工程师; 主要从事车辆工程、特种焊接等方面的研究; 1025024812@qq.com。

(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

龚寅卿, 蒋相森, 高霆, 等. 便携式无电焊接技术的研究与应用[J]. *焊接*, 2023(10): 38 – 46.

Gong Yinqing, Jiang Xiangsen, Gao Ting, et al. Research and application of portable non-electric welding technology[J]. *Welding & Joining*, 2023(10): 38 – 46.