

# 无熔滴电弧热丝 GTAW 自润滑耐磨 堆焊层组织及性能

田春英<sup>1</sup>, 王军<sup>1</sup>, 庄明辉<sup>2</sup>, 李慕勤<sup>2</sup>, 杨小兵<sup>2</sup>

(1.天津中德应用技术大学, 天津 300350; 2.佳木斯大学, 黑龙江 佳木斯 154002)

**摘要:** **目的** 采用无熔滴电弧热丝 GTAW 堆焊技术, 在 Q235 钢表面堆焊具有自润滑功能的含石墨相耐磨合金。**方法** 设计含有镍包石墨粉的药芯焊丝, 并使用无熔滴电弧热丝 GTAW 堆焊技术和传统 GMAW 两种方法进行对比堆焊。焊后, 采用销盘式摩擦磨损试验机对堆焊层进行对比摩擦磨损性能测试, 利用光学显微镜、SEM 和 EDS 研究堆焊层的微观结构及成分, 并对磨损面形貌进行对比分析, 探究自研焊接系统制备含石墨相堆焊层的工艺特点和堆焊层自润滑耐磨性能。**结果** 无熔滴电弧热丝 GTAW 可以有效降低母材的稀释率, 保证药芯焊丝自润滑石墨相过渡, 且能提高熔敷率。堆焊层形成了 Fe-Cr-B 耐磨基体, 并在晶界处分布大量的颗粒状石墨相。摩擦磨损实验中, 堆焊层摩擦系数可低至约 0.65, 随着摩擦时间的延长, 摩擦系数进一步减小, 磨损面未发现典型犁沟, 表面平滑且呈黑色, 堆焊层具有自润滑功能, 且摩擦系数与焊接参数有关。传统 GMAW 方法制备的堆焊层的摩擦系数为 1.4 左右, 且随着磨损时间的延长, 摩擦系数略有增大。**结论** 无熔滴电弧热丝 GTAW 堆焊技术低热输入和高熔敷率的工艺特点适合堆焊, 尤其适合防止焊丝化学成分烧损的堆焊。在合理控制工艺参数, 焊接稳定的前提下, 选择低辅助电流, 可以成功制备含石墨相的自润滑耐磨堆焊层。

**关键词:** 电弧热丝; GTAW; 堆焊; 组织; 自润滑; 摩擦磨损

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)07-0199-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.07.025

## Microstructure and Performance of Self-lubricating Anti-abrasion Composite Layer by Non-droplet Arcing Wire GTAW

TIAN Chun-ying<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, ZHUANG Ming-hui<sup>2</sup>, LI Mu-qin<sup>2</sup>, YANG Xiao-bing<sup>2</sup>

(1.Tianjin Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China; 2.Jiamusi University, Jiamusi 154002, China)

**ABSTRACT:** The work aims to overlay the self-lubricating anti-abrasion alloy with graphite phase on the Q235 steel by non-droplet arcing wire GTAW. The nickel-coated graphite flux-cored wire was designed and introduced into the overlay by the

收稿日期: 2019-08-20; 修订日期: 2020-05-18

Received: 2019-08-20; Revised: 2020-05-18

基金项目: 黑龙江省自然科学基金 (E2016067); 佳木斯大学博士专项资金资助 (22Zb201518)

Fund: Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (E2016067), Special Fund for Doctor of Jiamusi University (22Zb201518)

作者简介: 田春英 (1974—), 女, 硕士, 高级实验师, 主要研究方向为材料加工工程。

Biography: TIAN Chun-ying (1974—), Female, Master, Senior experimentalist, Research focus: materials processing engineering.

通讯作者: 王军 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为再制造工程。邮箱: 175492265@qq.com

Corresponding author: WANG Jun (1975—), Male, Doctor, Professor, Research focus: remanufacturing engineering. E-mail: 175492265@qq.com

引文格式: 田春英, 王军, 庄明辉, 等. 无熔滴电弧热丝 GTAW 自润滑耐磨堆焊层组织及性能[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 199-206.

TIAN Chun-ying, WANG Jun, ZHUANG Ming-hui, et al. Microstructure and performance of self-lubricating anti-abrasion composite layer by non-droplet arcing wire GTAW[J]. Surface technology, 2020, 49(7): 199-206.

non-droplet arcing wire GTAW and the traditional GMAW for comparison. After welding, the pin-and-disc friction and wear tester were used to compare the anti-abrasion and wear resistance of the overlay. OM, SEM and EDS were accomplished to study the microstructure and component of the overlay and analyze the wear morphology. The processing characteristic of preparing overlay with graphite phase by welding system and the self-lubricating anti-abrasion performance of the overlay were analyzed. Non-droplet arcing wire GTAW could effectively inhibit the dilution ratio of the substrate, ensure the transition of the graphite phase in fluxed cored wire and improve the deposition rate. Fe-Cr-B anti-abrasion substrate was formed on the overlay and a lot of granular graphite phase was observed at the boundary. The friction coefficient under the friction and wear test could be as low as 0.65 and decreased further with increasing friction time. No typical furrow was found on the wear surface which was smooth and black and belonged to self-lubricating wear type, and the friction coefficient was related to welding parameters. The friction coefficient of the overlay prepared by the traditional GMAW method was about 1.4, and slightly increased with the prolonging of wear time. Non-droplet arcing wire GMAW has the characteristics of low heat input and high deposition rate, which is suitable for overlay, especially for overlay to prevent the chemical composition of welding wire from burning out. Under the premise of reasonable control of process parameters and stable welding, self-lubricating anti-abrasion overlay containing graphite phase can be successfully prepared by selecting low auxiliary current.

**KEY WORDS:** arcing wire; GTAW; overlay; microstructure; self-lubrication; friction and wear

摩擦磨损件相对运动所产生的摩擦热,会使摩擦表面温度升高。采用液体润滑会导致摩擦零件的工作环境更加恶劣,而固体润滑因其在高温工作环境下良好的稳定性,近年来被广泛应用于耐磨领域<sup>[1-5]</sup>。

采用表面技术将含有固体润滑材料的耐磨层制备在原始工件表面,在摩擦副之间可形成低剪切强度的润滑膜,不仅能提高工作层的耐摩擦磨损性能,同时可以降低摩擦系数,进一步延长工件的使用寿命,大大节约了原材料和生产时间<sup>[6-9]</sup>。石墨润滑剂因具有优异的润滑性能而受到研究人员的关注<sup>[10-13]</sup>。然而,如何将易烧损的石墨相过渡到堆焊层内部,成为了此种固体润滑材料耐磨层制备的难点。

鉴于以上分析,本文利用自行研制的无熔滴电弧热丝 GTAW 技术,并采用自行设计的含有镍包石墨粉的药芯焊丝,制备自润滑 Fe-Cr-B 耐磨基体的堆焊层,研究了在不同焊接电流下,堆焊层固体自润滑石墨相的分布、形貌及堆焊层的微观组织、摩擦磨损性能,并采用传统熔化极氩弧(GMAW)作堆焊效果对

比。该焊接方法可实现低热输入堆焊<sup>[14-15]</sup>,可以在很大程度上减少石墨相的烧损。同时,所设计的镍包石墨粉作为固体润滑过渡相,镍既能提高石墨的过渡系数,又能改善石墨与基体的结合。

## 1 试验

### 1.1 堆焊层制备

试验采用自制的电弧热丝 GTAW 焊接系统和自行设计的含镍包石墨成分的药芯耐磨焊丝,在 6 mm 厚的 Q235 钢板上制备自润滑 Fe-Cr-B 耐磨基体的堆焊层,镍粉能够在一定程度上保护石墨颗粒不被烧损<sup>[16]</sup>。为进行堆焊效果对比,还采用了传统的熔化极氩弧堆焊。药芯焊丝横截面照片及成分分析如图 1 所示,直径为 1.6 mm,钢带为碳钢带,填充率为 25%,粉体粒度为 80 目,药芯粉体成分比如表 1 所示。堆焊工艺参数如表 2 所示。

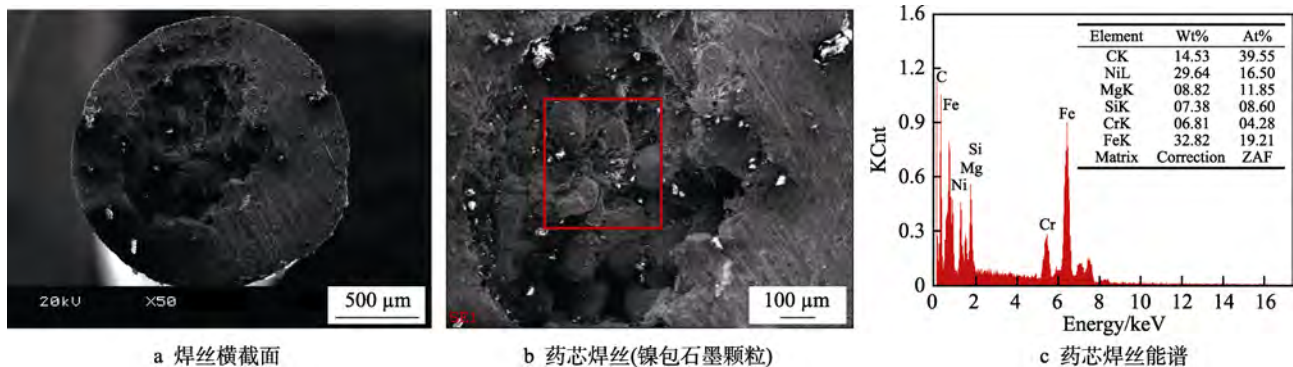


图 1 药芯焊丝横截面扫描照片及能谱图

Fig.1 Cross section images and energy spectrum of the flux-cored wire and energy spectrum : a) cross section of the flux-cored wire; b) wire core (nickel coated graphite particles wire); c) wire core energy spectrum

表 1 镍包石墨药芯焊丝合金粉体成分

Tab.1 Alloy powder composition of the flux welding wire containing nickel-coated graphite

| Component | Fe | Chromium iron | Boron iron | Aluminum | Rare earth | Silicon iron | Manganese iron | Nickel package graphite |
|-----------|----|---------------|------------|----------|------------|--------------|----------------|-------------------------|
| Content   | 57 | 20            | 8          | 0.5      | 2.5        | 4            | 4              | 4                       |

wt.%

表 2 堆焊工艺参数

Tab.2 Overlaying parameters

| Method                       | Welding voltage/V | Main arc current/A | Assistant arc current/A | Wire feeding rate/(m·min <sup>-1</sup> ) | Welding speed/(mm·s <sup>-1</sup> ) | Distance between the torch and base/mm | Distance between the torch and wire/mm | Gas feed rate/(L·min <sup>-1</sup> ) |
|------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|--|-------------------------------------|--|--|--------------------------------------|
| Non droplet arcing wire GTAW | 22~26             | 120                | 120                     | 2.4                                      | 3.5                                 | 7~8                                    | 2~3                                    | 15                                   |
|                              | 22~26             | 120                | 140                     | 2.4                                      | 3.5                                 | 7~8                                    | 2~3                                    | 15                                   |
|                              | 22~26             | 120                | 160                     | 2.4                                      | 3.5                                 | 7~8                                    | 2~3                                    | 15                                   |
| GMAW                         | 22~26             | 120                | 240                     | 2.4                                      | 3.5                                 | 7~8                                    | 2~3                                    | 15                                   |
|                              | 22~26             | 240                | Non                     | 2.0                                      | 3.5                                 | —                                      | —                                      | 15                                   |
|                              | 22~26             | 280                | Non                     | 2.0                                      | 3.5                                 | —                                      | —                                      | 15                                   |

### 1.2 微观结构表征及耐磨性能测试

截取堆焊层试样（长约 20 mm、宽 20 mm），以其横截面制备金相试样，采用 DM200 金相显微镜对堆焊层的微观组织进行观察。利用 JSM-6360LV 型扫描电子显微镜观察堆焊层显微组织和磨损形貌。利用 EDAX-FALCON-60S 能谱仪测试被测样品的微区成分。采用 SFT-2M 销盘式摩擦磨损试验机测试摩擦系数，试样尺寸为 10 mm×10 mm×8 mm，试验方式为球盘旋转磨损，旋转半径  $r$  为 3 mm，转速为 200 r/min，使用直径为 5 mm 的 GCr15 钢球（硬度为 55HRC），法向加载载荷 100 g，使用 100 g 摩擦力传感器，磨损长度 3 mm，磨损时间 30 min。根据摩擦系数大小

衡量焊缝的耐磨性能及摩擦系数变化趋势，进而判断其是否具有自润滑特性。

## 2 结果及分析

### 2.1 无熔滴电弧热丝 GTAW 堆焊热传输特性分析

#### 2.1.1 母材热输入与电弧能量解耦关系

利用无熔滴电弧热丝 GTAW 技术进行堆焊试验，焊缝宏观横截面如图 2a、c 所示。采用传统的 GMAW 进行堆焊试验，焊缝宏观横截面如图 2b、d 所示。在总电流相同的情况下，两种焊接方法的稀释

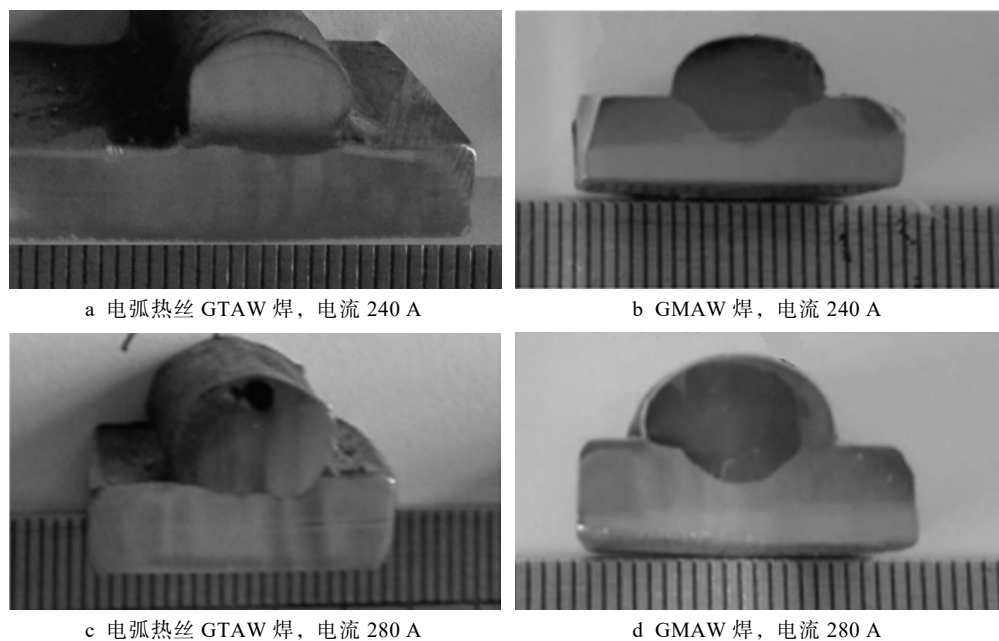


图 2 焊缝宏观形貌

Fig.2 Macro morphology of the weld seam: a) arcing wire GTAW(240 A); b) GMAW(240 A); c) arcing wire GTAW(280 A); d) GMAW(280 A)

率有很大的不同：GTAW 技术堆焊的稀释率极低，小于 5%，且稀释率与焊接电流大小关系不大；而 GMAW 堆焊的稀释率较大，大约为 25%。从焊缝横截面轮廓形状可以看出，无熔滴电弧热丝 GTAW 技术获得的焊缝左右两侧面与母材基本垂直，而传统的 GMAW 堆焊的焊缝呈扁平状，即宽高比有很大不同。在堆焊实际生产应用时，GTAW 技术堆焊的焊缝形状可以明显减少施焊层数，也可以避免堆焊金属反复熔化与凝固，影响材料的性能。

无熔滴电弧热丝 GTAW 焊接原理如图 3a 所示。焊接时，焊丝端头与钨极之间形成点对点型辅助电弧，通过解耦主电弧能量和送丝速度的关系，焊丝熔敷率容易调节，不需要考虑工件表面的热输入，可以不通过增加主电弧能量而提高熔敷率，打破了增加熔敷率，就必须增加主电弧的能量的耦合关系，在某一熔敷率情况下，有效降低了母材热输入。无熔滴电弧热丝 GTAW 焊接的主弧电流为 120 A，辅弧电流为 120 A，送丝速度达 2.4 m/min，可以实现稳定焊接，堆焊层如图 2a 所示。这种解除了母材热输入与焊丝熔敷率耦合关系的热传输特性，深度契合堆焊工艺要求——低热输入、高熔敷率。传统 GMAW 焊接原理如图 3b 所示，堆焊时，电弧在焊丝与工件之间燃烧。

如果增加焊丝熔敷率，必须增加送丝速度，从而增加焊接电流，试验电流采用 240 A，送丝速度只能达到 2.0 m/min，堆焊层如图 2b 所示。电流与熔敷率之间的耦合关系造成工件母材吸收更多的电弧热量，导致稀释率上升，这与堆焊时要求焊丝高熔敷率、工件母材低热输入的工艺要求相矛盾。

### 2.1.2 焊丝受热分析

采用无熔滴电弧热丝 GTAW 方法，由于焊丝的送丝速度与主电弧电流不再是耦合关系，因此可以在一定的焊接电流下，根据需要，增加送丝速度，从而使焊丝熔化由有熔滴状态调整至无熔滴状态，如图 4 所示。无熔滴产生的情况下，辅助电弧作用于钨极尖端和一小段焊丝处，焊丝既可以得到充分的预热，又可以防止预热温度过高破坏焊丝成分。根据上述特点，将含有石墨成分的药芯焊丝用该技术进行堆焊，可使石墨尽可能在较低的温度下通过焊丝熔化进入熔池的过程中，不受电弧的集中加热而烧损，使堆焊金属中自润滑功能石墨相得以存在。在传统 GMAW 焊接中，由于熔滴的产生，电弧的一端会集中加热焊丝端部，如图 3b 所示。电弧高效加热使得焊丝端头熔滴处于过热状态，甚至处于气化状态，因此在堆焊中对于合金元素的烧损会比较严重。

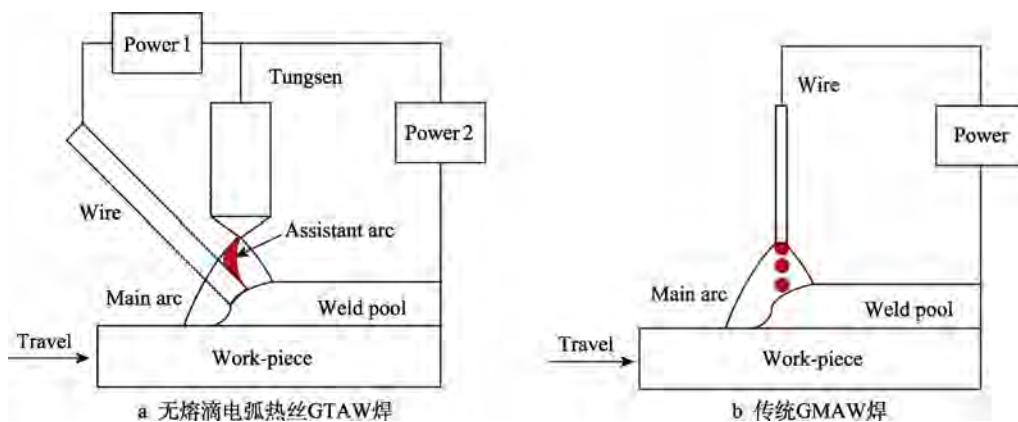


图 3 无熔滴电弧热丝 GTAW 和传统 GMAW 焊接原理示意图

Fig.3 Schematic mechanism between non-droplet arcing wire GTAW and traditional GMAW: a) non droplet arcing wire GTAW; b) traditional GMAW

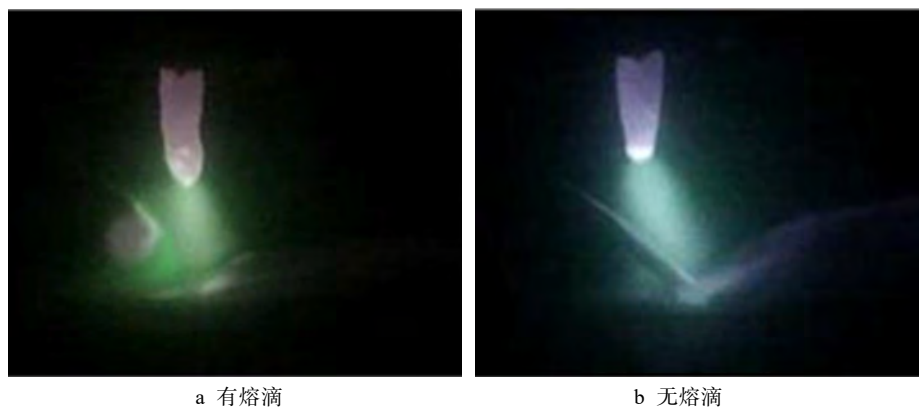


图 4 耦合电弧预热焊丝 GTAW 焊两种熔滴过渡形式

Fig.4 Two droplet transitions in GTAW with coupled arc preheating wire: a) with droplet, b) without droplet

## 2.2 堆焊层微观组织及成分分析

两种堆焊方法（总电流 240 A）下制备的堆焊层的金相照片如图 5 所示。图 5a 为未浸蚀的焊缝区，分布着许多细小的黑色颗粒。图 5b、c 为浸蚀后的焊缝区，典型的 Fe-Cr-B 耐磨基体已形成，为亚共晶组织（枝晶马氏体+共晶硼化物）<sup>[17-18]</sup>，焊缝平均硬度为 57HRC，黑色颗粒均匀分布在枝晶晶界处。图 5c 箭头所指位置处小颗粒外围颜色较浅，心部颜色较深，推断浅颜色的外围为镍，颜色较深的内部为石墨，与典型的镍包石墨颗粒形貌吻合。含石墨颗粒的焊丝

进入熔池之前，虽然经过电弧高效加热，但可以通过调整焊接参数和送丝速度，使得焊丝温度恰好能够保持在镍包石墨不被破坏的区间。焊丝通过电弧预热不仅可以进入熔池，还可以保持镍包石墨成分不被烧损殆尽。图 5d 为传统 GMAW 堆焊层金相照片，从图中可以看出，镍包石墨相烧损严重，残留量极少。对焊缝组织中较大的黑色颗粒进行成分分析，结果如图 6 所示。能谱分析结果显示，黑色颗粒状物质中碳的原子数分数高达 79.87%，因此可判断此黑色颗粒状物质为保留下来的石墨。

图 7 为不同辅弧电流下无熔滴电弧热丝 GTAW

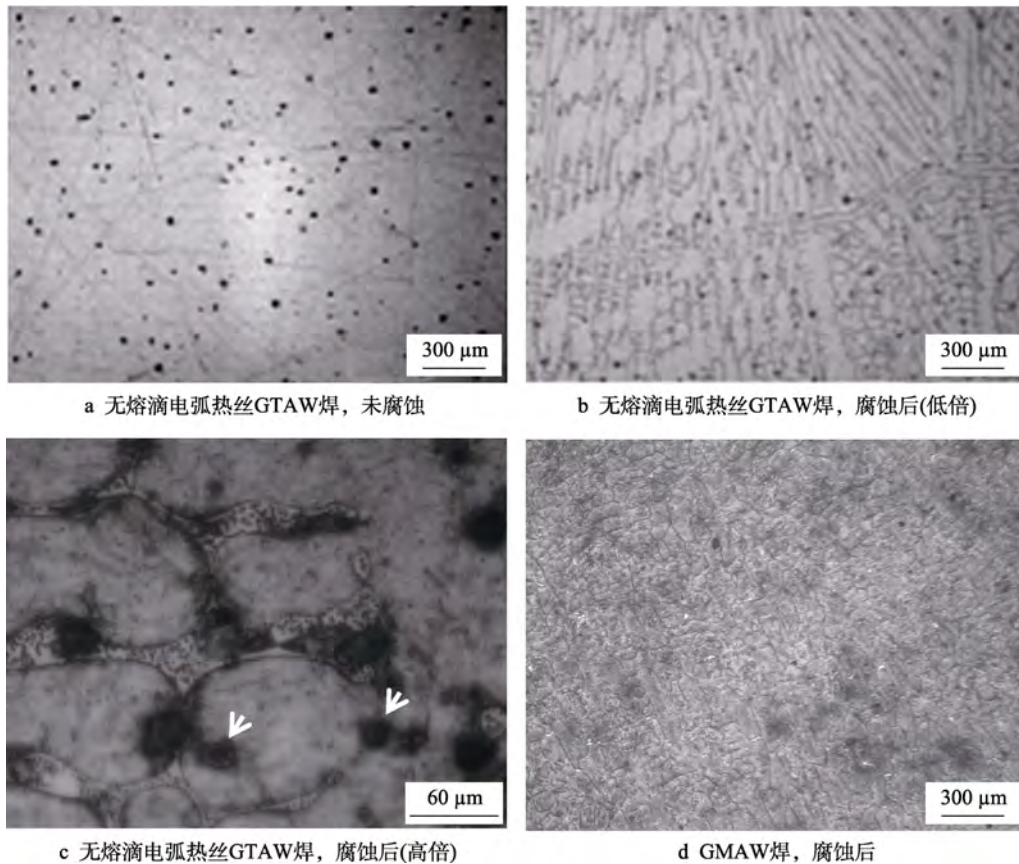


图 5 堆焊层金相照片

Fig.5 Metallograph of overlay: a) without erosion with non droplet arcing wire GTAW, b) after erosion with non droplet arcing wire GTAW (low magnification), c) after erosion with non droplet arcing wire GTAW (high power), d) after erosion with GMAW

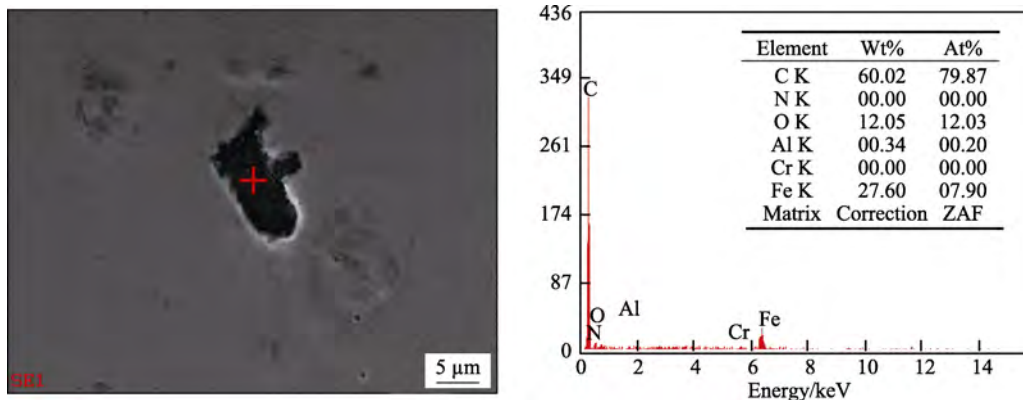


图 6 焊缝中黑色颗粒相能谱分析

Fig.6 EDS spectra of black granular phase in weld seam

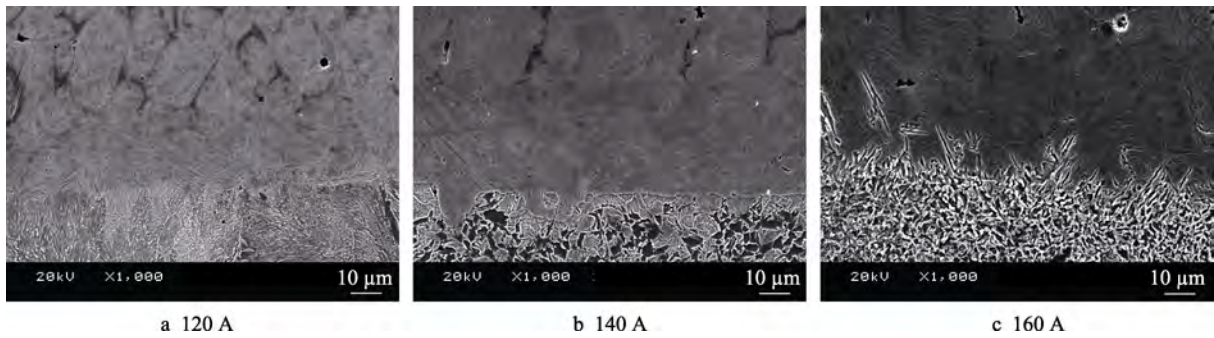


图7 不同辅弧电流下熔合区 SEM 显微组织  
Fig.7 SEM of bonding area with different assistant arc welding current

堆焊层横截面熔合线的组织形貌。图 7a—c 中，由于母材与焊缝金属的化学成分不同，在熔合区附近可以清晰地看出焊缝组织和母材有很大的差别。该微区是整个熔池中温度梯度最大和凝固速率最快的区域，致使界面结合区组织以短柱状晶形态沿热传递方向生长，且焊缝与热影响区之间的界面近似平直。随着辅弧电流的升高，熔合线由光滑向参差不齐变化，说明母材的熔化量随着热输入的增加而增大。

随着凝固过程的进行，温度梯度逐渐降低，后凝固部分的合金熔体稀释程度也在降低，致使焊缝区凝固组织组成和形态也发生变化，形成了较为粗大的树枝状初晶+共晶组织，如图 8 所示。在焊缝金属凝固过程中，树枝状初晶组织首先形核长大，将石墨、B 等合金元素以及杂质物等排挤在晶界处，随着树枝

晶组织的长大，剩余液相中 Cr、C、B 等元素的含量不断增加，当其达到一定浓度时，形成硼化物共晶组织<sup>[19]</sup>。镍包石墨相分布于树枝状晶晶界处的共晶组织中。从图 8a—d 中可以看出，随着热输入的增加，树枝状初晶逐渐粗大，在晶界处分布的黑色石墨颗粒数量逐渐减少。

### 2.3 堆焊层摩擦磨损性能

对无熔滴电弧预热焊丝 GTAW 焊和传统熔化极气保焊两种方法所获得的堆焊层进行了摩擦磨损对比实验，摩擦系数如图 9 所示。实验结果表明，在焊接总电流为 240 A 条件下，采用无熔滴电弧热丝 GTAW 堆焊时，其堆焊试件的摩擦系数平均为 0.65 左右，如图 9a 所示，且随着磨损时间的延长，摩擦

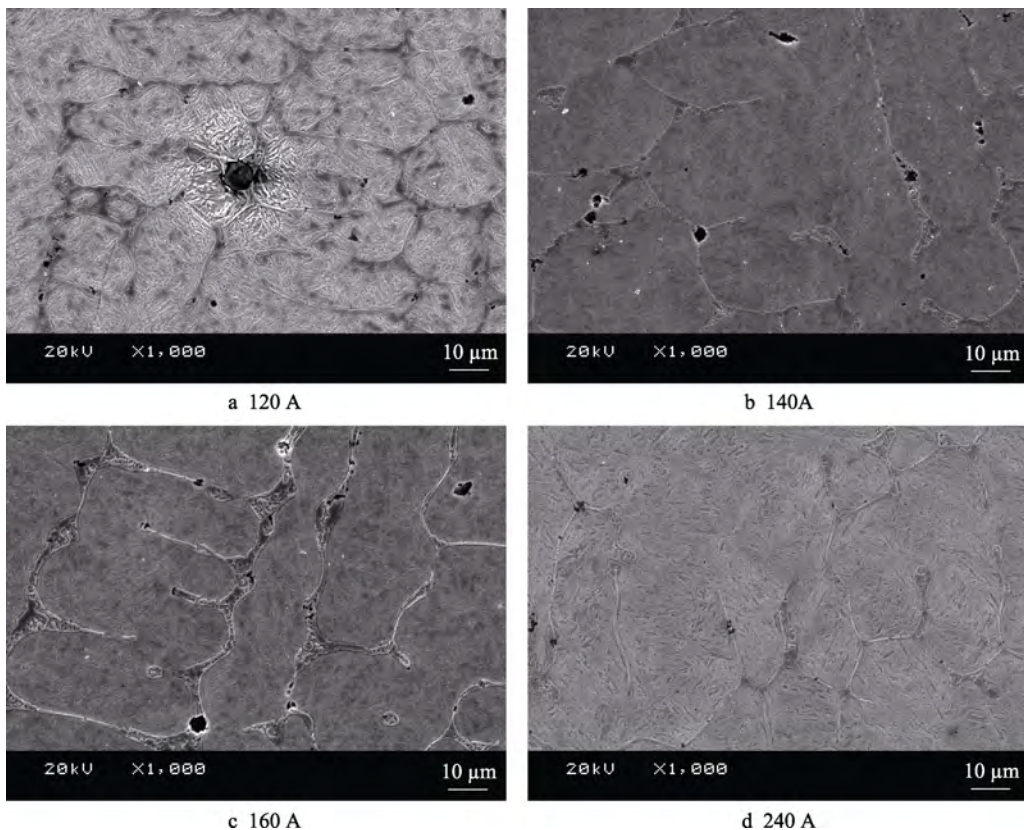


图8 不同辅弧电流堆焊层的 SEM 显微组织  
Fig.8 SEM of overlay with different assistant arc welding current

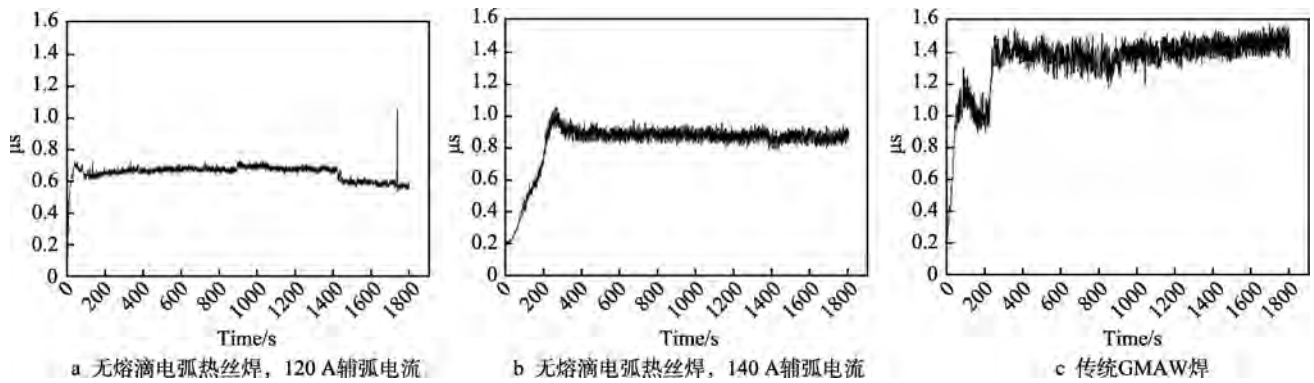


图 9 堆焊层摩擦系数与时间的关系曲线

Fig.9 Relationship curve between friction coefficient of overlay : a) non-droplet arcing wire with 120 A assistant welding current; b) non-droplet arcing wire with 140 A assistant welding current; c) traditional GMAW

系数略有下降,说明采用该技术所获得的耐磨堆焊层的自润滑能力随着耐磨实验的进行开始显现出来。当采用传统 GMAW 堆焊时,其堆焊试件的摩擦系数明显增大,约为 1.4,如图 9c 所示。

采用无熔滴电弧热丝 GTAW 堆焊时,辅弧电流不同,其摩擦系数也不同,如图 9a、b 所示。随着辅弧电流的增大,摩擦系数也增大,当辅弧电流由 120 A 增大到 140 A 时,堆焊层摩擦系数由约 0.65 增大到约 0.9。当辅弧电流为 140 A 时,随着摩擦时间的延长,摩擦系数有略降的趋势,说明自润滑作用不明显。原因是电流增大,焊接时焊丝中石墨相烧损严重,焊后堆焊层自润滑功能不能得到充分体现。

为进一步分析堆焊层摩擦磨损性能的内在机理,在扫描电镜下对其摩擦磨损表面进行了观察,如图 10

所示。从图 10a、b 可以看出,当总焊接电流均为 240 A 时,两种焊接方法下制备的堆焊层经干摩擦磨损试验后,其磨损表面形貌明显不同。图 10a 磨损面相对较为细腻光滑,且磨痕较浅、较细,磨痕纹路不清晰,有发黑的痕迹,说明磨损面基本形成了石墨润滑层。在堆焊中,焊丝中的石墨成分未被烧损,以游离态存在于堆焊金属中,当受到磨损时,游离石墨本质较软,容易形成石墨润滑膜,磨损表面摩擦系数较低,从而提升了耐磨能力。图 10b 磨损面相对较为粗糙,磨痕密集且明显,表面存在较多硬质点微凸物。所以,无熔滴电弧热丝 GTAW 焊堆焊层摩擦系数相对小很多,是由于摩擦磨损过程中形成石墨润滑层所致。

### 3 结论

采用无熔滴电弧热丝 GTAW 技术堆焊含镍包石墨颗粒的药芯焊丝,堆焊层成形良好,通过对堆焊层进行宏观成形、微观结构、成分和摩擦磨损性能研究,得出结论如下:

1) 由无熔滴电弧热丝 GTAW 堆焊技术与传统 GMAW 焊接原理及热传输特性对比分析可知,无熔滴电弧热丝 GTAW 堆焊技术工艺特点优势显著,深度契合堆焊工艺要求——低热输入、高熔敷率,既节能又高效。

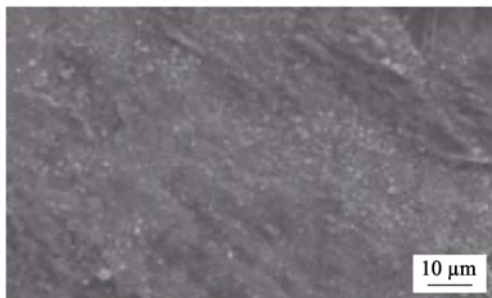
2) 通过分析无熔滴电弧热丝 GTAW 电弧能量解耦关系发现,无熔滴电弧热丝 GTAW 堆焊方法可以显著降低母材的热输入,降低稀释率至 5% 以下,且稀释率与焊接电流大小关系不大,焊缝形状适合有较高厚度要求的堆焊实际应用。

3) 由堆焊层的微观组织和成分分析可以得出,通过调整辅助电弧电流大小控制焊丝受热效果,保证焊丝中的石墨相不被烧损殆尽,能够以游离态的形式存在于堆焊层组织的晶界处,其留存数量与焊接电流大小成反比。

4) 由堆焊层摩擦磨损性能分析可以得出,无熔滴电弧热丝 GTAW 技术施焊的堆焊层的摩擦系数低



a 无熔滴电弧热丝GTAW焊



b 传统GMAW焊

图 10 两种堆焊方法堆焊层磨损 SEM 形貌

Fig.10 SEM of wear morphology of overlay in two methods: a) non droplet arcing wire GTAW; b) traditional GMAW

至 0.65 左右, 仅为传统 GMAW 的摩擦系数的 1/2, 并且随着磨损时间的延长, 摩擦系数略有下降, 说明堆焊层具有自润滑功能。

#### 参考文献:

- [1] 华希俊, 孙建国, 张培耘, 等. 激光微织构固体润滑表面高温摩擦学性能研究[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 112-118.  
HUA Xi-jun, SUN Jian-guo, ZHANG Pei-yun, et al. Tribological properties of the laser micro-texture surface filled with solid lubricant at elevated temperature[J]. Surface technology, 2016, 45(6): 112-118.
- [2] SCHARF T W, PRASAD S V, DUGGER M T, et al. Growth, structure, and tribological behavior of atomic layer-deposited tungsten disulphide solid lubricant coatings with applications to MEMS[J]. Acta materialia, 2006, 54(18): 4731-4743.
- [3] CHEN W Y, YU Y, CHENG J, et al. Microstructure, mechanical properties and dry sliding wear behavior of Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-graphite solid-lubricating coatings deposited by low-pressure cold spraying[J]. Journal of thermal spray technology, 2018, 279(8): 1652-1663.
- [4] BARADESWARAN A, ELAYA P A. Effect of graphite on tribological and mechanical properties of AA7075 composites[J]. Tribology transactions, 2015, 58(1): 1-6.
- [5] ZHANG X S, NIU W X, DAI Y J, et al. Rapid selection of environmentally friendly layered alkaline-earth metal phosphates as solid lubricants using crystallographic data[J]. Scientific reports, 2018, 8(1): 16210.
- [6] 单际国, 董祖珏, 徐滨士. 我国堆焊技术的发展及其在基础工业中的应用现状[J]. 中国表面工程, 2002, 15(4): 19-22.  
SHAN Ji-guo, DONG Zu-jue, XU Bin-shi. The development of surfacing welding technology and its application in basic industry in China[J]. China surface engineering, 2002, 15(4): 19-22.
- [7] BADISCH E, MITTERER C. Abrasive wear of high speed steels: influence of abrasive particles and primary carbides on wear resistance[J]. Tribology international, 2003, 36(10): 765-770.
- [8] LIU Y F, FENG Z C, PU F, et al. Microstructure and dry-sliding wear properties of TiC/CaF<sub>2</sub>/γ-Ni self-lubricating wear-resistant composite coating produced by co-axial powder feeding plasma transferred arc (PTA) cladding process[J]. Surface & coatings technology, 2018, 345: 61-69.
- [9] WU G Y, XU C H, XIAO G C, et al. An advanced self-lubricating ceramic composite with the addition of core-shell structured h-BN@Ni powders[J]. International journal of refractory metals & hard materials, 2018, 72: 276-285.
- [10] MIN H C, JU J, KIM S J, et al. Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, MoS<sub>2</sub>) for automotive brake friction materials[J]. Wear, 2006, 260(7): 855-860.
- [11] WEN Xiao-bin, YAO Huan-tao, YANG Shi-cai. Improvement of sliding performance for ball on disc tribo-partners using graphite like carbon solid lubricant coating[J]. Materials sciences and applications, 2018, 9(1): 191.
- [12] BAGHERI S, JAMAL N, HALILU A, et al. Novel rGO-T-C(n) Nanosheets developed via click chemistry as a lubricant anti-wear additive[J]. Scientific reports, 2018, 8(1): 6221.
- [13] LUO Ning, XIANG Jun-xiang, SHEN Tao, et al. Gas-liquid detonation synthesis of graphite coated copper nanoparticles and tribological performance as lubricant additives[J]. Fullerenes, nanotubes and carbon nanostructures, 2018, 26(2): 87-92.
- [14] WANG J, LI M Q, MA Z, et al. Cross touching behavior in arcing-wire gas tungsten arc welding[J]. Journal of materials processing technology, 2018, 260: 38-47.
- [15] 周智远, 王军, 杨小兵, 等. 耦合电弧热丝 GTAW 堆焊焊缝成形及稀释率研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2017, 35(3): 413-416.  
ZHOU Zhi-yuan, WANG Jun, YANG Xiao-bing, et al. Study of welding shape and dilution in coupling arc heating wire[J]. Journal of Jiamusi University (natural science edition), 2017, 35(3): 413-416.
- [16] 王昭, 范新会, 李炳, 等. 镀镍石墨颗粒增强耐磨 CuCrZr 基复合材料组织及性能研究[J]. 铸造, 2019, 68(3): 59-63.  
WANG Zhao, FAN Xin-hui, LI Bing, et al. Microstructure and properties of Ni-graphite particles reinforced wear-resistant Cu-Cr-Zr matrix composites[J]. Foundry, 2019, 68(3): 59-63.
- [17] 龚建勋, 李丹, 肖逸锋, 等. Fe-Cr-B-C 堆焊合金的显微组织及耐磨性[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(3): 136-141.  
GONG Jian-xun, LI Dan, XIAO Yi-feng, et al. Microstructure and wear resistance of Fe-Cr-B-C hardfacing alloys [J]. Transactions of materials and heat treatment, 2010, 31(3): 136-141.
- [18] 王琦环, 郭长庆, KELLY P M. Fe-Cr-B 合金的显微组织[J]. 金属热处理, 2004, 29(5): 30-32.  
WANG Q H, GUO C Q, KELLY P M. Microstructures of the Fe-Cr-B alloys[J]. Heat treatment of metals, 2004, 29(5): 30-32.
- [19] 周焯, 王国红, 贺定勇, 等. 铬含量对 Fe-Cr-B 堆焊合金显微组织及耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 88-92.  
ZHOU Ye, WANG Guo-hong, HE Ding-yong, et al. Effects of chromium content on microstructure and wear resistance of Fe-Cr-B surfacing alloys[J]. Surface technology, 2017, 46(1): 88-92.