

# 长石对明弧堆焊合金的组织及耐磨性影响

刘超<sup>1,2</sup>, 龚建勋<sup>2</sup>

(1.襄阳科技职业学院 智能制造学院,湖北 襄阳 441106;2.湘潭大学 机械工程与力学学院,湖南 湘潭 411105)

**摘要** 采用侧向添加活性剂的方法研究了长石含量对复合粉粒和实心焊丝明弧堆焊合金的组织及耐磨性影响。借助高速摄像机分析电弧形态;通过X射线衍射仪、扫描电镜及其附属电子能谱仪和磨损试验机研究堆焊合金的组织及耐磨性。结果表明:添加含长石活性层的挡块后,电弧扩张,形态由钟罩形改变为半球形,这使电弧覆盖面积增加,堆焊合金的粉粒填充量提高,初生 $M_7C_3$ 相先从细条状转变为板条状,耐磨性显著增加,但长石过量后,电弧往外扩展过多,对实心焊丝的预热增强而提高其熔放量,粉粒填充量轻微下降,初生 $M_7C_3$ 相减小,耐磨性下降。

**关键词** 活性剂;复合粉粒;堆焊

中图分类号 TG422.1

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2024)06-0053-06

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20241010.001

## Effects of feldspar on microstructure and abrasion resistance of open arc surfacing alloys

LIU Chao<sup>1,2</sup>, GONG Jianxun<sup>2</sup>

(1.School of Intelligent Manufacturing, Xiangyang Vocational College of Technology, Xiangyang 441106, China;  
2.School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract** The effect of feldspar content on microstructure and wear resistance of composite powder and solid wire open-arc surfacing alloy was studied by adding active agent on the side. The arc shape was analyzed by high speed camera. The microstructure and wear resistance of surfacing alloy were studied by X-ray diffractometer, scanning electron microscope and its accessory electron spectrometer and wear testing machine. The results show that after the stopper containing feldspar active layer, the arc expands and its shape changes from bell shape to hemispherical shape, which increases the arc coverage area, increases the powder filling amount of the surfacing alloy, and the primary  $M_7C_3$  phase first changes from thin strip to sheet strip, which significantly increases the wear resistance. However, after excessive feldspar, the arc expands too much, and the melting amount of the solid welding wire is enhanced by the preheating of the solid welding wire. The particle filling decreases slightly, the primary  $M_7C_3$  phase decreases, and the wear resistance decreases.

**Keywords** active flux; composite powder particles; surfacing

在低碳钢等基板上熔敷高铬合金等耐磨层,可快速恢复和补强零件的耐磨性,延长其生命周期<sup>[1-2]</sup>。堆焊材料主要有焊条、焊丝和复合粉末等<sup>[3-4]</sup>,其中焊条和焊丝的合金过渡系数高,工艺简单,为常用的堆焊材料,复合粉末主要用作激光焊等熔敷材料<sup>[5-6]</sup>。但复合粉末需采用雾化技术制备<sup>[7]</sup>,由于制备工艺复杂,且需求总量小,导致可供的粉末种类偏少<sup>[8]</sup>。此外,激光熔敷工艺存在粉末利用率低等问题<sup>[9-11]</sup>,不仅如此,作为一种昂贵的粉末熔敷热源,激光束偏小,熔敷效率不理想,无法与电弧堆焊方法相媲美。近年来,新的复合粉粒堆焊法得到探索研究<sup>[12]</sup>。区别于已有的复合粉末堆焊工艺,该工艺将复合粉末掺入水玻璃后造粒并烘干,形成“复合粉粒”,堆焊时将其预置在待焊区,以

电弧为热源进行堆焊。复合粉粒比复合粉末的雾化制备工艺灵活,成本低,且可根据需要快速制备一系列不同成分和性能的耐磨合金。但该法与药芯焊丝电弧焊比,堆焊合金的粉粒填充量偏低。研究显示,焊前在焊道上涂刷活性剂,可提高焊缝熔深和改善其性能<sup>[13-15]</sup>。然而有关活性剂对堆焊焊缝及其性能的影响,尚未见到国内外相关研究文献。

鉴于此,本文作者以复合粉粒电弧焊为基础,拟在焊道两侧增设挡块及其侧面活性层,利用电弧的热-力耦合作用,将挡块侧面的活性层成分带入弧柱空间或堆焊熔池,即活性剂从侧面加入,以影响电弧形态,藉此以影响堆焊合金的粉粒填充量,重点研究挡块及其侧面活性层的长石含量对电弧形态及堆焊合金的组

收稿日期:2024-01-05;修回日期:2024-10-03

基金项目:湖南省自然科学基金(2021JJ30669)

第一作者:刘超,男,硕士。E-mail:947278671@qq.com。

通信作者:龚建勋,男,博士,副教授。E-mail:gong309@tom.com。

织和耐磨性的影响。

## 1 试验方法

### 1.1 复合粉粒和活性挡块制备

复合粉粒包含高碳铬铁(FeCr70C8.0)、石墨、钛铁(FeTi30A)、钒铁(FeV50-A)、碳化硼、硅铁(FeSi45-A)、钼铁(FeMo50-A)、还原铁粉等组分。各组分粉末过筛后进行混匀,随后添加液态 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 搅匀造粒,保证粒度在 $1\ 000\sim 1\ 700\ \mu\text{m}$ ,最后放入干燥箱烧结成型。

活性挡块分为两层:一层为HJ260熔炼焊剂的粉体;另一层为活性粉层。压制尺寸 $70\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ 的双层方块,如图1所示。选用 $48\ \mu\text{m}$ 的长石作为活性层,其化学成分如表1所示。试验仅改变活性挡块表面活性层长石的含量,制备了1~4#活性挡块,其长石质量分数分别为0%、10%、18%、25%。

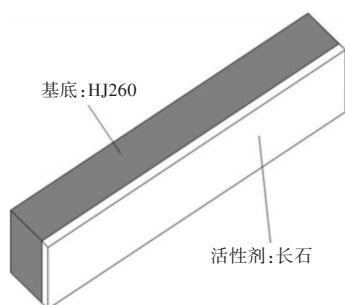


图1 活性挡块结构

Fig.1 Structure schematic image of active block

表1 长石化学成分表

Table 1 Chemical compositions of feldspar

成分	质量分数/%	成分	质量分数/%
$\text{SiO}_2$	64.50~65.20	$\text{Na}_2\text{O}$	2.30~2.60
$\text{Al}_2\text{O}_3$	17.80~19.30	$\text{CaO}$	0.28~0.45
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.19~0.30	$\text{MgO}$	0.38~0.64
$\text{K}_2\text{O}$	9.60~16.90		

### 1.2 堆焊试样

在长宽厚为 $180\ \text{mm}\times 52\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}$ 的Q235A钢板上,将挡块放置在焊道两侧,使侧面活性层面向焊道。将复合粉粒预置在待焊区。将不放置挡块的堆焊试样作为0#对比试样,堆焊工艺相同。然后,以H08A实心焊丝作为电弧载体,进行自保护明弧焊,工艺参数如表2所示。以同样的方式堆焊第二层。制备了0~4#系列堆焊试样,堆焊试样的化学成分见表3。

焊接前后,分别称取实心焊丝和堆焊试板的质量,计算堆焊合金的粉粒填充量 $\Psi$ :

$$\Psi = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

表2 堆焊工艺参数

Table 2 Hardfacing parameters

参数	数值	参数	数值
电流 $I/\text{A}$	410	层间温度 $T/^\circ\text{C}$	低于 $100\sim 150$
电压 $U/\text{V}$	40	冷却方式	空冷
干丝伸长 $L/\text{mm}$	30	极性	反接
焊接速度 $v/(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$	16		

表3 堆焊试样的化学成分

Table 3 Chemical composition of surfacing specimens

试样	C	Cr	Si	Mo	Ti	V	Fe
0#	3.10	13.10	1.32	0.46	0.55	1.57	余量
1#	3.13	13.18	1.41	0.49	0.66	1.62	余量
2#	3.51	15.60	1.40	0.53	0.91	1.91	余量
3#	3.32	15.20	1.42	0.50	0.83	1.86	余量
4#	3.24	14.90	1.38	0.48	0.78	1.82	余量

式中: $m_1$ 为堆焊金属的质量; $m_2$ 为实芯焊丝消耗量。

不考虑飞溅和烟尘等损耗。将堆焊试样垂直焊缝切开,处理后,计算试样的熔合比。

### 1.3 组织表征和性能测试

用HR-150洛氏硬度计测试堆焊层表面的宏观硬度,沿焊接方向在焊缝中心连续测试10个点,取平均值;用D/MAX2550VB型X射线衍射仪表征堆焊层表面的相组成;JSM-6360LV扫描电镜观察堆焊层物相形貌;附属电子能谱仪Oxford7854分析微区成分;以HV-1000型显微维氏硬度计测量特定相的显微硬度。

用MLS-225型湿砂橡胶轮式磨损试验机进行耐磨性测试,磨损介质为水和石英砂( $250\sim 380\ \mu\text{m}$ ),分别制备了0~4#耐磨试样,尺寸为 $57\ \text{mm}\times 25.5\ \text{mm}\times 6\ \text{mm}$ ,先预磨1000转,然后正式磨损1000转,以试样磨损失质量 $\Delta M$ 来评价堆焊合金的耐磨性。试验结束后,用显微镜观察表面磨损形貌。

### 1.4 焊接电弧和电流电压采集

焊前搭建图2所示电弧采集系统。电弧采集速率为 $10\ 000\ \text{f/s}$ 。电流电压采集频率为 $50\ \text{kHz}$ 。

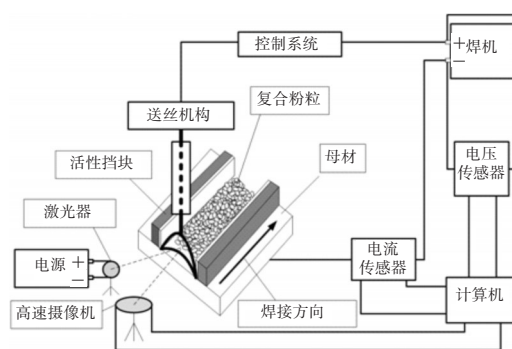


图2 电弧采集系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of arc collection system

## 2 结果与讨论

### 2.1 长石对电弧形态和电流电压的影响

图3为设置活性挡块前后的电弧形态。对比发现,未设置挡块时,电弧为钟罩形,有较清晰的电弧边缘(图3a)。设置无活性层的挡块后,电弧的形态稍向外扩张,但仍为典型钟罩型(图3b)。当挡块增设长石活性层后,电弧明显向上及两侧扩张,形态由典型钟罩形转变为半球形,几乎笼罩了整个焊道(图3c)。由于长石中含有较多易电离的物质,如 $K_2O$ 、 $Na_2O$ 等,挡块侧面表层的长石粉末在电弧热-力耦合作用下发生分解,产物进入电弧空间,改善了该空间的电离度,促使电弧向外扩张<sup>[16-17]</sup>。由图3c~e可知,随长石含量增加,电弧体积增加,且向上扩张,使电弧覆盖面积增加,可完全覆盖预置于焊道的全部复合粉粒。

图4为长石对电流、电压的影响。由0~4#试样的堆焊电流和电压的数据可知,设置挡块前后,电流基本不变;电弧电压有明显上升,幅度约为3.7 V。通常,电弧稳定燃烧时,电压与电弧长度成正比<sup>[18]</sup>,说明电弧长度增加,与图3电弧变化吻合。

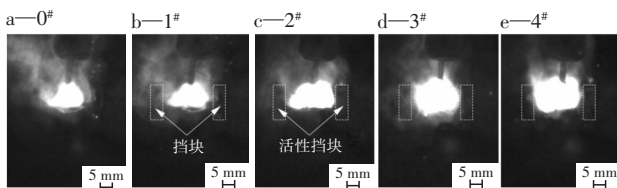


图3 电弧形态  
Fig.3 Shape of arc

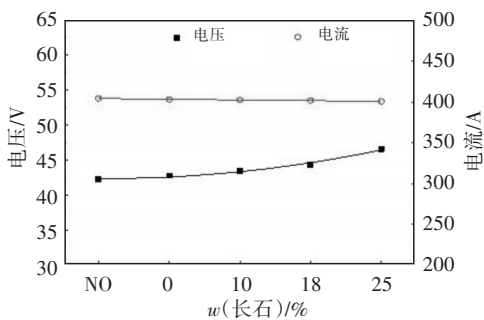


图4 长石对电流、电压的影响  
Fig.4 Effects of feldspar on current and voltage

### 2.2 长石对粉粒填充量和焊缝宏观形貌的影响

试验显示,未设置挡块时,总有少量复合粉粒或因预置的位置或飞溅而偏离电弧作用区域,未能熔化而残留,导致复合粉粒的利用率及堆焊合金粉粒填充量偏低。图5为长石含量对粉粒填充量及熔合比的影响。

由图可见,堆焊合金粉粒填充量由未设置挡块的0#试样的42.7%,提高到设置挡块的1#试样的44.1%,

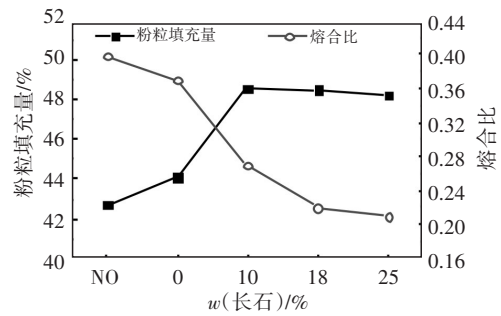


图5 长石含量对粉粒填充量及熔合比的影响

Fig.5 Effects of feldspar content on CPP filling rate and dilution ratio

再提升至增设长石活性层的2#试样的48.6%,然后稍有降低,粉粒填充量最高提高了5.9%。这表明,设置挡块及增设活性层,可有效提高堆焊合金的粉粒填充量,即预置于焊道的复合粉粒熔化量明显增加。一方面,挡块的机械阻挡作用,可将所有复合粉粒限制于两块挡块之间区域,另一方面,长石引起堆焊电弧扩张,使电弧完全覆盖焊道上的复合粉粒,使之熔化量增加,但由于电弧往实心焊丝四周扩张过多,对实心焊丝预热作用增强,使之熔化量增加,从而堆焊合金的粉粒填充量降低。

图6为系列堆焊试样焊缝宏观形貌。由图可知,单纯选用挡块,焊缝的熔深从3.87 mm降至3.03 mm,熔宽从18.17 mm增至18.66 mm,总体变化不大;但当挡块增加长石活性层时,熔深降至2.46 mm,熔宽增至20.84 mm,其中熔深降低至初始的64%,可谓明显改变。焊缝形貌从图6a、b的碗型变为图6c的椭圆弧型。这表明,电弧作用于焊缝的能量密度分布明显改变,母材受热更均匀。

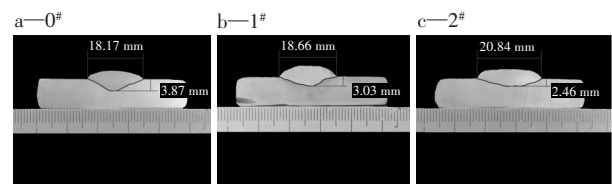


图6 焊缝宏观形貌

Fig.6 Macroscopic morphology of weld seam

对图6堆焊焊缝的熔合比测量结果显示,熔合比由图6a的49.4%降至图6c的33.39%,降低了1.5倍,这表明母材的稀释作用显著降低。电弧向外扩张后,电弧轴向压力减小,削弱了对熔池的冲击<sup>[19]</sup>;另一方面,复合粉粒填充量提高,有更多的热输入量作用于复合粉粒,影响了熔池向母材的热传递,从而导致熔深减小,熔宽提高。

### 2.3 长石对组织及性能的影响

图7为系列堆焊合金的XRD图。可以看出,堆焊合金由 $\gamma-Fe$ 、 $\alpha-Fe$ 、 $M_7C_3$ 、 $Ti(C, N)$ 等相组成。相较于

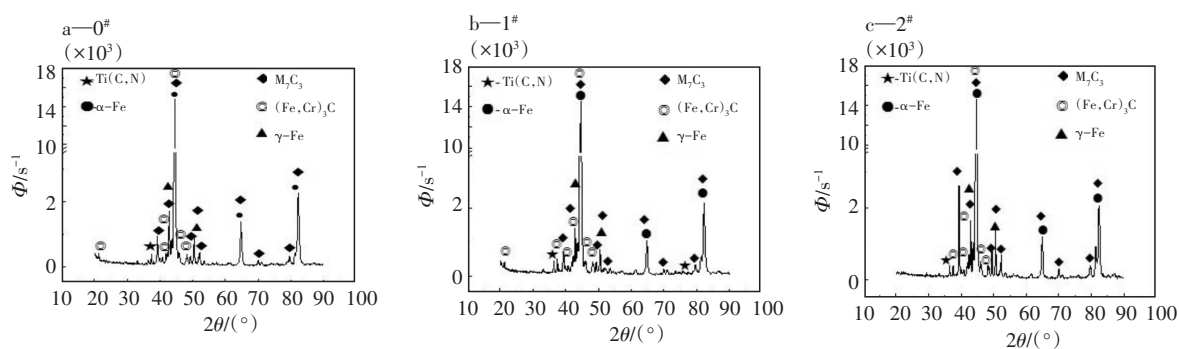


图7 堆焊合金的XRD图

Fig.7 XRD patterns of surfacing alloys

0#试样,设置无活性层挡块后衍射峰整体变化不明显(图7b),当挡块增设长石活性层后,相组成上没有变化,但 $\gamma$ -Fe和 $M_7C_3$ 相的低角度衍射峰强度增强(图7c),说明组织中其含量增多,结合上文分析可知,这与粉粒填充量的提升及熔合比的降低有关,堆焊熔池中合金成分含量提高,不仅有利于初生碳化物的析出长大,还有利于提高过冷 $\gamma$ -Fe的稳定性,使之保留至室温,从而 $\gamma$ -Fe及 $M_7C_3$ 相数量增多。

图8为堆焊层物相形貌图。由图可知,设置含有长石活性层的挡块后,组织中块状和板条状物相的尺度和数量明显增多(图8c、d、e)。对图8a、c特征性微区的物相进行EDS探测,结果见表4。

图8中微区 $a_1$ 、 $c_1$ 其C、Cr含量均偏低,结合胞状形态及其位置,可知其为 $\alpha$ -Fe。和微区 $a_1$ 、 $c_1$ 比,2#试样的微区 $c_2$ 的C、Cr含量较高,结合XRD表征结果,可知其为 $\gamma$ -Fe。图8c中2#试样微区 $c_3$ 呈板条状,且C、Cr含量较高,其显微硬度约为1087HV<sub>0.2</sub>,可确定其为 $M_7C_3$ 相,其中M为Fe、Cr等。微区 $a_3$ 、 $c_4$ 的EDS结果显

示其Ti、C、N含量较多,根据其物相形态及其在组织中的分布,结合XRD表征结果,判定其为Ti(C,N)相。表4、图8c各微区探测结果中的N含量,低于图8a同一物相微区探测结果。由于复合粉粒配方中未加入含N成分的组分,N是自保护明弧焊时由空气引入,这表明,设置挡块,提高了对熔融金属的保护效果。

图9为堆焊合金的宏观硬度及磨损失质量。由图可知,设置挡块后,堆焊合金的宏观硬度先升后降,从0#试样的55.5HRC升至2#试样的59.1HRC,然后降至4#试样的56.9HRC,硬度仍比0、1#试样高。综合图7、8的分析结果可知,宏观硬度提高的原因在于,堆焊合金的组织中初生碳化物 $M_7C_3$ 尺度增大及数量增加,对外加载荷的抵抗能力强。随后3、4#试样的宏观硬度又降低,这是由于 $M_7C_3$ 细化的直接结果。

由图9可以看出,设置挡块及其活性层后,堆焊合金的磨损失质量先显著下降,然后小幅上升,从0#试样的51.9 mg降至1#试样的42.7 mg,接着降至2#试样的23.3 mg,后再增至4#试样的37.7 mg,即耐磨性先增加

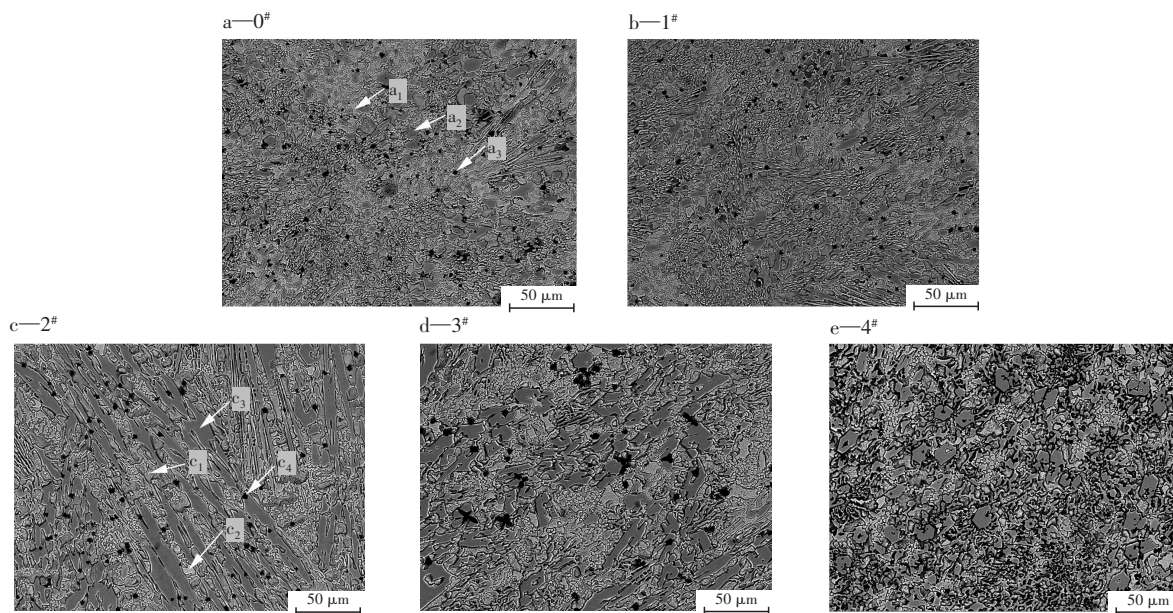


图8 堆焊层物相形貌

Fig.8 Morphology of surfacing alloys

表4 EDS结果(原子数分数/%)  
Table 4 EDS results (atom fraction/%)

点	C	N	Ti	V	Cr	Mo
a <sub>1</sub>	16.85	3.80	0.10	0.23	3.20	0.12
a <sub>2</sub>	34.53	3.00	0.20	2.70	20.20	0.18
a <sub>3</sub>	20.77	32.10	41.14	3.20	0.99	0.12
c <sub>1</sub>	21.02	1.66	0.11	0.30	5.30	0.05
c <sub>2</sub>	35.40	2.85	0.18	1.04	10.83	0.14
c <sub>3</sub>	32.60	2.54	0.23	2.80	24.73	0.16
c <sub>4</sub>	27.99	18.67	41.72	7.20	2.96	0.34

了1.23倍,再下降0.6倍,总体上较0、1#试样明显改善。

图10为堆焊合金的磨损形貌。由图10可知,未设置挡块的0#试样,犁沟明显,划痕数量多且连贯,剥落坑较大,因此磨损失质量较大,为典型的微观切削和微观剥落的磨损方式(图10a)。设置挡块的1#试样,切削犁沟仍然较深,但部分犁沟出现中断(图10b)。与1#

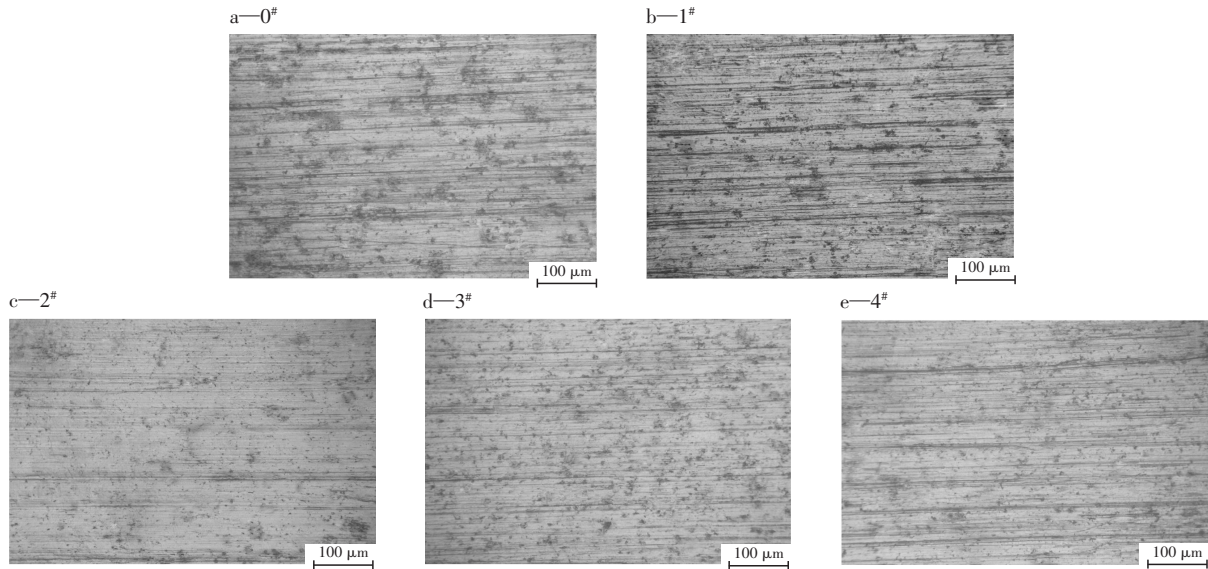


图10 堆焊合金的磨损形貌

Fig.10 Worn morphology of surfacing alloys

块碳化物,故划痕数量增加(图10d,e)。

### 3 结论

1) 设置含长石活性层的挡块,可使电弧明显扩张,形态由钟罩形转变为半球形,电弧覆盖复合粉粒的面积增加,堆焊合金的粉粒填充量增加。但长石含量太高时,电弧扩展太大,对焊丝的预热作用增强而使之熔化量稍微增加,粉粒填充量轻微降低。

2) 设置含长石活性层的挡块后,堆焊合金的宏观硬度和耐磨性先陡增后向下波动。耐磨性改善的主要原因是初生碳化物的尺度增大及数量增加;随后下降是由于组织中碳化物细化。

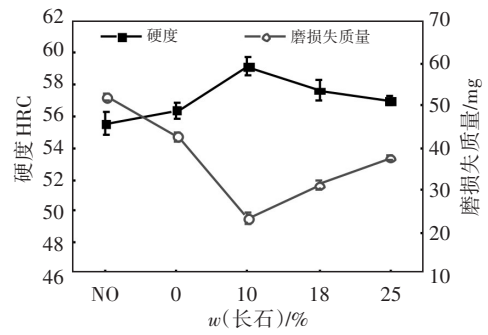


图9 堆焊合金硬度和磨损失质量

Fig.9 Bulk hardness and wear mass loss of surfacing alloys

试样比,设置长石活性层挡块的2#试样的划痕数量明显减少,犁沟更浅,不少划痕中途断档,剥落坑变小,磨损失质量降低。这表明2#试样组织中的大块状碳化物(图8c),起到抗磨骨架的作用,很好地保护了基体不被磨损;相较于2#试样,3、4#试样组织均明显细化(图8d,e)。细小碳化物对磨粒楔入的抵抗力明显不及大

### 4 参考文献

[1] MICHA B, PAVLO P, THAER S, et al. Microstructure and wear characterization of the Fe-Mo-B-C based hardfacing alloys deposited by flux-cored arc welding [J]. Materials, 2022: 5074-5095.

[2] GARBADE R R, DHOKEY N B. Effect of mechanical alloying of Ti and B in pre alloyed gas atomized powder on carbide dispersed austenitic matrix of Iron based hardfacing alloy [J]. Materials Characterization, 2022, 191: 2134-2143.

[3] LAGO P R, NUTTER J, QI J, et al. Characterisation of the wear and friction behaviour of laser deposited cobalt and iron-based hardfacing alloys for nuclear applications [J]. Wear,

- 2023,524:29-47.
- [4] ALEKSANDRA S, VARBAI B, CHANDAN P, et al. Exploring the trends in flux-cored arc welding: Scientometric analysis approach[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 130:87-110.
- [5] AGRAWAL P, THAPLIYAL S, NENE S, et al. Excellent strength-ductility synergy in metastable high entropy alloy by laser powder bed additive manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 32:1098-1194.
- [6] 刘政军, 武丹, 苏允海. B元素对药芯焊丝焊缝金属针状铁素体形成的影响[J]. *焊接学报*, 2018, 39(12):19-24.  
LIU Zhengjun, WU Dan, SU Yunhai, et al. Effect of boron element on formation of acicular ferrite in weld metal with flux cored wire[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(12):19-24. (in Chinese)
- [7] RUI L, QIN M, LIU C, et al. Particle size distribution control and related properties improvements of tungsten powders by fluidized bed jet milling[J]. *Advanced Powder Technology*, 2017, 28(6):1603-1610.
- [8] SINGH S, RAMAKRISHNA S, SINGH R. Material issues in additive manufacturing: A review[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 25:185-200.
- [9] PINTO F C, SOUZA I R, SANDIM M J R, et al. Defects in parts manufactured by selective laser melting caused by  $\delta$ -ferrite in reused 316L steel powder feedstock[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 31:979-988.
- [10] WANG Di, WU Shibiao, FU Fan, et al. Mechanisms and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties[J]. *Materials & Design*, 2017, 117:121-130.
- [11] GIRNTH S, KOOPMANN J, GÜNTER K, et al. 3D hybrid-material processing in selective laser melting: Implementation of a selective coating system[J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2019, 4(4):399-409.
- [12] LIU C, GONG J, HUANG H. Effects of  $K_2CO_3$  flux on the microstructure and abrasion resistance of high-chromium hard-facing alloys[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2022, 75:3139-3148.
- [13] MEI L, YAN D, XIE S, et al. Effects of  $Cr_2O_3$  active agent on the weld process dynamic behavior and joint comprehensive properties of fiber laser welded stainless steel thick plate[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 128:106027-106040.
- [14] WU B, WANG B, ZHAO X T, et al. Effect of active fluxes on thermophysical properties of 309L stainless-steel welds[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 255:212-218.
- [15] YUE Shiqi, HUANG Yong, YU Xiaoquan, et al. Improving welding penetration and mechanical properties via activated-flux smearing by tungsten inert gas arc welding[J]. *Metals*, 2023, 13(12):2017.
- [16] SURINDER T, DINESH W R, AJAY B. A-TIG welding process for enhanced-penetration in duplex stainless-steel: Effect of activated fluxes[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2019, 34(15):1659-1670.
- [17] 李春凯, 席保龙, 石玓, 等. 氟化物活性TIG焊电弧特征的光谱分析[J]. *焊接学报*, 2021, 42(8):54-58.  
LI Chunkai, XI Baolong, SHI Yu, et al. Spectral analysis of a-TIG welding arc with fluorides activating flux[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(8):54-58. (in Chinese)
- [18] 綦秀玲, 刘维豪, 赵麒翔, 等.  $SiO_2$ 和 $CaF_2$ 活性剂增加304不锈钢TIG焊缝熔深机理研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2019, 42(3):91-94.  
QI Xiuling, LIU Weihao, ZHAO Qixiang, et al. Increasing penetration mechanism of 304 stainless steel weld bead with component surfactant  $SiO_2$  and  $CaF_2$  during TIG welding[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2019, 42(3):91-94. (in Chinese)
- [19] ZHANG Z D, CAO Q J. Study on metal transfer behaviour in metal inert gas arc welding with activating flux for magnesium alloy[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, 17(7):550-555.