

引用格式: 龚建勋, 刘书同, 张明华, 等. 水玻璃波美度对复合粉粒和实心焊丝堆焊合金组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2024, 53(19): 138-142.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20222125
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

水玻璃波美度对复合粉粒和实心焊丝堆焊合金组织及性能的影响

龚建勋, 刘书同, 张明华, 艾孝文

(湘潭大学 机械工程和力学学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要:采用“复合粉粒+H08A实心焊丝”自保护明弧焊方法制备了高铬耐磨合金,借助X射线衍射仪、扫描电镜、电子能谱仪和磨损试验机,研究了硅酸钠型水玻璃的波美度对其组织及性能的影响。结果表明,混合粉末经水玻璃粘结造粒后,电弧燃烧稳定且飞溅减少;随着水玻璃波美度的提高,合金组元的过渡系数明显提升,组织从典型的亚共晶转变为过共晶结构,其中初生 M_7C_3 的体积分数显著提升。当水玻璃波美度为25时,堆焊合金耐磨性最好,是波美度为0时的7.6倍。随着水玻璃波美度的提高,合金耐磨性显著改善,磨损机制由微切削和微剥落的共存方式转变为以微剥落为主。

关键词:复合粉粒;堆焊;显微组织;耐磨性;波美度

中图分类号: TG422.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)19-0138-05

Effects of Baume Degree of Sodium Silicate on Microstructure and Properties of Hardfacing Alloys with Composite Powder Particles and Solid Wire

GONG Jianxun, LIU Shutong, ZHANG Minghua, AI Xiaowen

(School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: High chromium wear resistant alloys were prepared by self-shielded open arc welding with composite powder particles (CPPs) and H08A solid wire. The effects of baume degree of sodium silicate on the microstructure and the properties were investigated by X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS) and wear tester. The results show that, the arc gets stabilized and the spatter decreases with the introduction of sodium silicate into powder mixture for granulating. With the increase of baume degree of sodium silicate, the transition coefficients of alloying elements increase and the microstructure is transited from hypoeutectic structure to hypereutectic structure, in which the volume fraction of primary M_7C_3 phases increases dramatically. The optimal abrasion resistance is obtained at 25 baume degree, which is 7.6 times of the one at zero degree. The abrasion resistance has improved obviously with the increase of the baume degree and the wear mechanism has changed from a coexisting style of micro-cutting and micro-spalling to a dominant one of micro-spalling.

Key words: composite powder particles; hardfacing; microstructure; abrasion resistance; baume degree

堆焊作为一种经济且可靠的耐磨合金制备工艺,其工艺主要有药芯焊丝电弧焊、焊条电弧焊、粉块电弧熔覆、粉末等离子弧熔覆、粉-丝复合电弧堆焊等^[1-4]。其中,药芯焊丝电弧焊为主流工艺,特点是操作连续性好,已经被应用于混凝土输送管内壁、布料溜槽等耐磨件的堆焊。所用堆焊材料包括药芯焊

丝、药皮焊条、实心焊丝和粉末等,其中,实心焊丝可过渡合金组元量极为有限,仅能熔敷低合金钢;药皮焊条和药芯焊丝可过渡的合金元素虽然较多,成分调整方便,但是研发周期长,制备工艺复杂;粉末等离子弧熔覆以气流送粉和预置粉末方式供给,但气流送粉对粉末颗粒的球形度要求高^[5],目前市场可供的球形粉末种类偏少,所用粉末多以雾化技术制备,价贵,致使该法以试验研究和小批量作业方式为主。上述材料难以满足堆焊制造快速且经济的发展要求。为此,国内外学者尝试以粉-丝复合堆焊耐磨合金^[6-8],这是近十年来国内外重点探索的一种耐

收稿日期:2022-07-31

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30669)

作者简介:龚建勋(1973-),男,湖北崇阳人,副教授,博士,从事电弧增材制造工艺及材料方向的研究;E-mail:gong309@tom.com

磨合金新型制备工艺。与药芯焊丝电弧焊相比,该工艺显著简化,灵活性好,但是,只适用于偏重的粉末颗粒。对轻质粉末,如片状石墨,在电弧吹力的作用下,大部分飘散,可过渡到焊缝金属的碳量偏少,而碳含量直接影响堆焊合金的耐磨性。因此,该方法可制备的耐磨合金种类及成分范围受到了极大限制。针对以上情况,国内学者探索研究出一种名为“复合粉粒”的新型焊接材料,实质上为烧结焊粒,由若干粉末经干混、添加水玻璃湿混、造粒、烧结、筛分等工序制备而成。焊前将之预置于焊道,以实心焊丝为电弧载体,使粉粒和焊丝共同熔化而形成焊缝,可制备高铬等耐磨合金^[9]。该方法需造粒,所用硅酸钠型水玻璃的浓度-波美度,不仅影响粉末颗粒的结合情况,而且改变混合粉末的电弧作用属性,从而减小母材的稀释率。研究显示,母材对堆焊合金的成分稀释作用直接影响其组织和性能^[10]。鉴于复合粉粒所用硅酸钠型水玻璃的影响程度尚不清楚,本文研究了其波美度对复合粉粒和实心焊丝堆焊合金组织及性能的影响。

1 试验材料及方法

1.1 复合粉粒制备

复合粉粒的粉末组分包括高碳铬铁(70%Cr, 8%C,质量分数,下同)、银片石墨(95%C)、钒铁(50%V)、钛铁(30%Ti)、硅铁(45%Si)、还原铁粉(Fe)等。上述粉末经过称量干混、添加硅酸钠型水玻璃湿混、湿粉体粘合造粒、粉粒烧结和粉粒筛分等工序制成粒度为10~20目的复合粉粒备用。

保持水玻璃容量与混合粉末质量的比值不变,并使混合粉末的组成不变,改变硅酸钠型水玻璃的波美度,分别制备了6种复合粉粒,复合粉粒的水玻璃波美度见表1。

表1 复合粉粒的水玻璃波美度
Tab.1 Baume degree of water glass in composite powder particles

试样	1#	2#	3#	4#	5#	6#
波美度	0	5	15	25	35	40

1.2 复合粉粒和实心焊丝堆焊高铬合金

将尺寸为160mm×75mm×16mm的Q235母材打磨干净,将复合粉粒预置于该平板上的待焊焊道,采用直流焊机ZD5-1000E进行自保护明弧堆焊,使复合粉粒熔体和H08A实心焊丝熔滴共同熔合为堆

焊熔池,空冷凝固即形成焊缝;然后以同样的方式堆焊第二层,形成宽30~40mm、厚12~15mm的焊缝。堆焊工艺参数为电流410A、电压27V、小车行走速度26cm/min,极性为直流反接。采用上述6种复合粉粒依次制备了1#~6#堆焊试样。经测试,堆焊合金的化学成分范围(质量分数%,下同)为16~20Cr,2.5~4.0C,1.0~2.5V,0.2~1.0Ti,0.5~0.7Si,Fe余量。

1.3 堆焊合金的性能测试

水冷截取规格为12mm×20mm×25mm的试样为金相试样,经打磨抛光,4%的硝酸酒精腐蚀,用JSM-6360LV扫描电子显微镜观察其组织和碳化物形貌,配合Oxford7854能谱仪对试样微区进行成分探测。

从堆焊试样表层割取10mm×10mm×5mm的块体并磨平表面,采用D/MAX2550VB型X射线衍射仪进行样品的物相分析,测试参数为铜靶,电流250mA、电压40kV,步长0.02°,扫描角度20°~90°,扫描速度为1(°)/min。

采用HR-150洛氏硬度计测试堆焊合金的宏观硬度,取10个测试点的平均值,载荷为1470N,加载时间15s。采用HV-1000型显微硬度计测量块状相的显微硬度,载荷1.96N,加载时间为10s。

制备尺寸为57mm×25.5mm×6mm的试块作为耐磨试样,采用MLS-225型湿砂橡胶轮式磨损试验机测试其耐磨性,试验参数为:橡胶轮直径为φ178mm,硬度邵尔60HA,每次磨损转数1000r、转速220r/min、载荷24.5N。第一次磨粒磨损试验结束后测量其初始质量 M_0 ,根据同样步骤进行第二次磨粒磨损实验,再次称量得到磨损后质量 M_1 ,试样磨损量 $\Delta M=M_0-M_1$ 。用无水乙醇将磨损试样洗净吹干,使用光学显微镜观察表面磨损形貌。

2 结果与分析

2.1 水玻璃波美度对堆焊合金工艺性能的影响

作为复合粉粒的粘结剂,硅酸钠型水玻璃为硅酸钠的水溶液,其浓度,即波美度对粉粒成型、电弧形态及其稳定性具有直接影响。波美度越高,也就越稠。试验结果显示,虽然复合粉粒制备工序相同,可获得同一粒度范围内的粉粒,但电弧形态及工艺性能差异明显。

当波美度为0时,在电弧高温和吹力作用下,复

合粉粒即刻离散为粉末,不少粉末飞离弧柱区和熔池,不能过渡到焊缝金属。焊后,焊缝两侧飞溅物多且量大。同时,电弧吹力不足,即自生保护气体量偏少,电弧燃烧不稳定,焊缝成型差,有较多气孔和裂纹。随着水玻璃波美度的提高,飞溅、气孔数量减少,电弧趋于稳定,焊缝成型改善。当波美度为 25~35 时,焊缝成型好,飞溅少。但是,当波美度为 40 时,焊缝成型依然良好,但未熔粉粒增多。这是由于用于复合粉粒粘合的水玻璃黏度过大,致使堆焊熔体流动性变差,各粉粒熔体相互熔合进程不充分所致。

2.2 水玻璃波美度对合金组织的影响

图 1 为堆焊合金的 XRD 谱。由图可知,合金基体相为 γ -Fe、 α -Fe 相。其中 γ -Fe 的特征面(111)($d=2.08 \text{ \AA}$)、(200)($d=1.80 \text{ \AA}$)和(311)($d=1.27 \text{ \AA}$)的衍射峰强度随着水玻璃波美度的提高而减弱,而 α -Fe 的特征面(110)($d=2.02 \text{ \AA}$)、(200)($d=1.43 \text{ \AA}$)和(211)($d=1.17 \text{ \AA}$)的衍射峰强度则随之而增强,这说明 γ -Fe 相的体积分数随之减小,而 α -Fe 则随之提高。

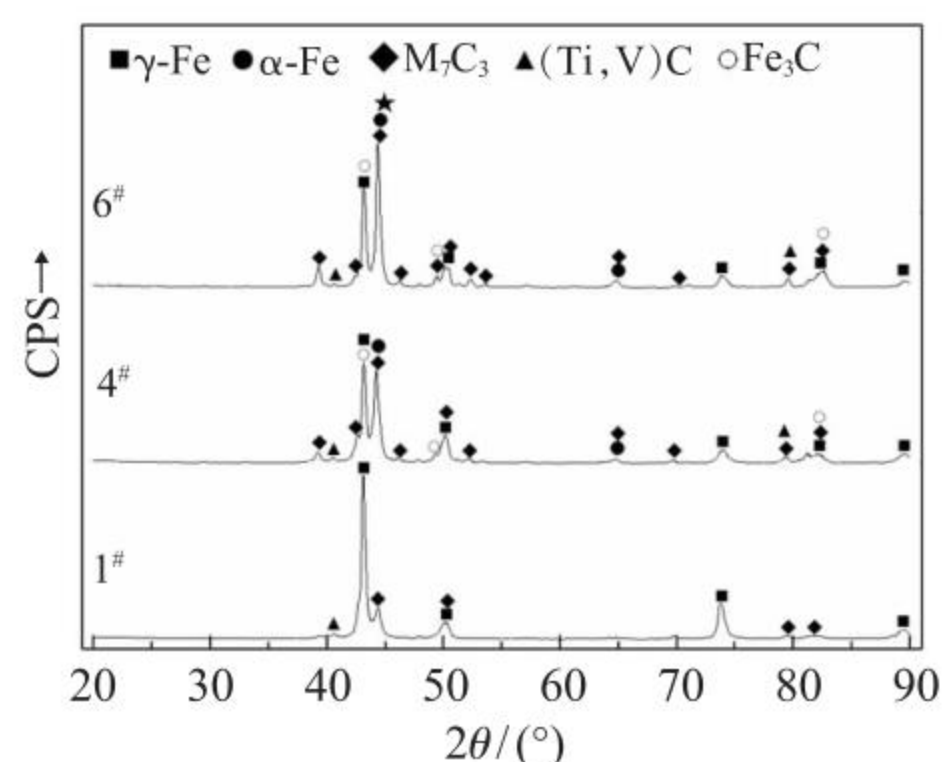


图 1 堆焊合金的 XRD 谱
Fig.1 XRD patterns of hardfacing alloys

由图 1 还可知,堆焊合金的硬质相主要由 M_7C_3 和 $(Ti, V)C$ 相组成,但 $(Ti, V)C$ 相的衍射峰强度弱,说明其数量少; M_7C_3 相的特征面(421)($d=2.30 \text{ \AA}$)强度随水玻璃波美度提高而明显增强,说明其体积分数提高。当波美度为 40 时,堆焊合金析出 M_3C 相,说明碳含量过高。

由上述结果可知,随着水玻璃波美度提高,堆焊合金的 M_7C_3 型碳化物体积显著提升,这说明合金组分含量随之明显提升,即合金组元过渡系数显著提高。

图 2 为复合粉粒和实心焊丝堆焊合金的显微组织。对比图 2(a)~(f)可知,随着水玻璃波美度从 0 提高至 5,堆焊合金的白色胞状相数量减少,沿胞状晶分布的灰色树枝状相明显增多;当波美度为 15 时,出

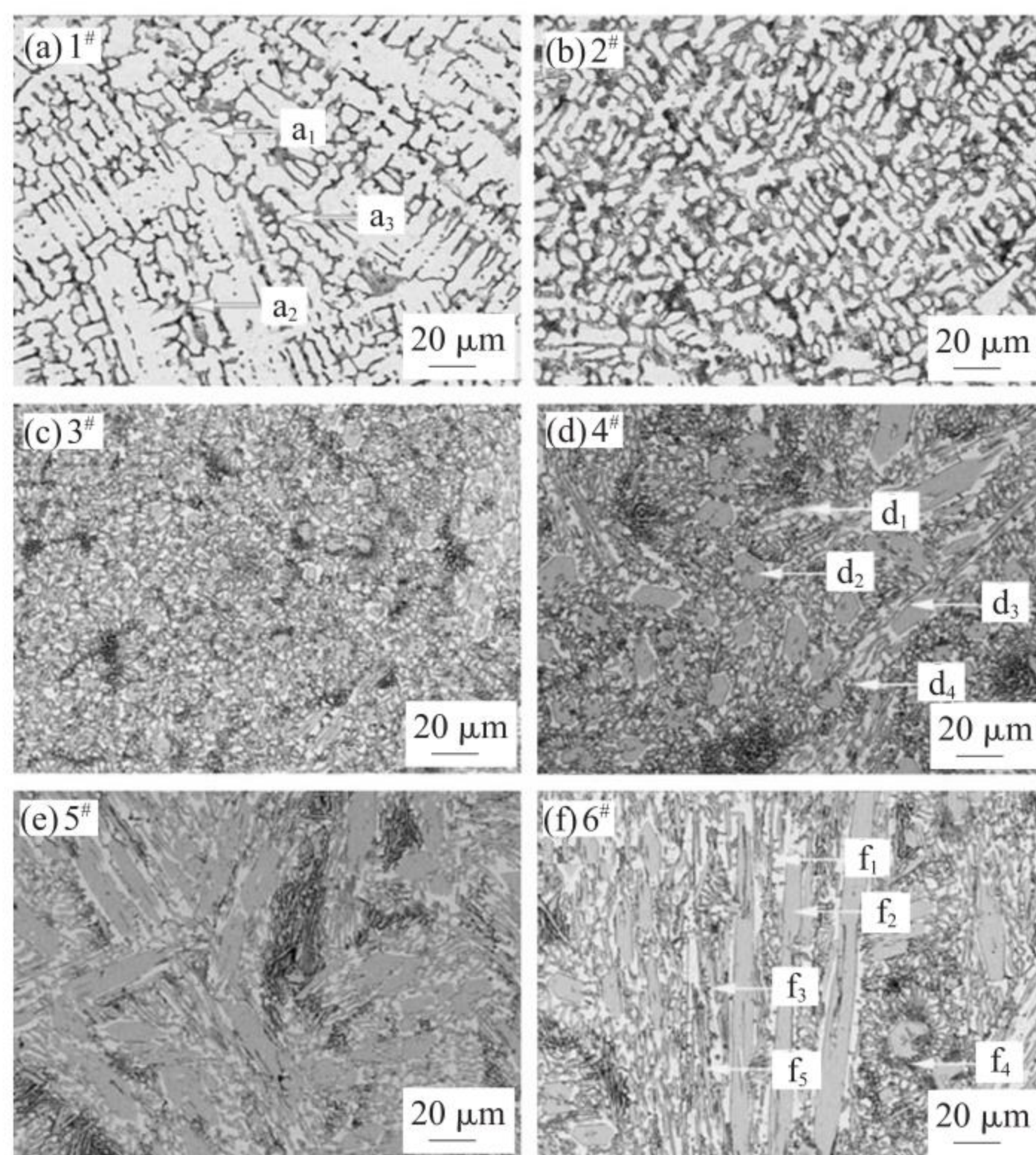


图 2 堆焊合金的显微组织
Fig.2 Microstructure of hardfacing alloys

现灰色的块状相,而白色胞状相基本消失;继续提高水玻璃的波美度,灰色块状相增多,形态从块状向板条状转变,尺度增大;但当波美度为 40 时,灰色板条状尺度和数量均减小。对灰色块状或者板条状相进行测试显示其显微硬度为 978~1029HV0.2,属于一种碳化物。图 2(c)~(f)中均出现一些深灰色即腐蚀较深的区域,数量随水玻璃波美度增大而增多。

图 2(a)、(d)和(f)所示微区的 EDS 检测结果见表 2。可见微区 a_1 为白色胞状相,由于有较高含量的

表 2 堆焊合金微区的化学成分(原子分数,%)
Tab.2 Chemical composition of micro-area of hardfacing alloys (at%)

试样	点	V	Cr	C	Ti	Fe
1#	a ₁	0.33	5.24	37.24	0.23	余量
	a ₂	2.89	16.20	59.37	-	余量
	a ₃	2.00	12.46	15.38	0.16	余量
4#	d ₁	0.27	7.83	30.28	-	余量
	d ₂	3.16	27.22	45.80	0.17	余量
	d ₃	10.15	14.16	46.07	19.67	余量
	d ₄	2.15	20.69	48.09	0.17	余量
6#	f ₁	0.71	7.17	26.47	-	余量
	f ₂	3.67	31.41	37.11	-	余量
	f ₃	10.26	22.47	35.39	14.29	余量
	f ₄	3.18	26.98	44.25	0.15	余量
	f ₅	4.11	33.09	22.00	0.62	余量

碳,且为该试样的主要相,结合图 1 所示的 XRD 物相组成可知该相为 γ -Fe。微区 a_2 所指沿胞状晶分布的灰色相,EDS 显示 Cr、V 和 C 元素含量高,根据图 1 所示 XRD 谱图和其呈沿晶网状、树枝状形态特点,可知该相为沿晶 M_7C_3 相,其中 M 代表 Fe、Cr、V 等金属元素,即为 $(Fe, Cr, V)_7C_3$ 。微区 a_3 所指黑色点状相,但 EDS 探测是包括黑色点状的较大区域,根据碳含量偏低的特点,可确认为 $(Ti, V)C$ 相与 α -Fe 的混合区。由以上结果可知,波美度为 0 时,即 1# 试样的显微组织为典型的亚共晶结构,主要由胞状的 γ -Fe+ 沿晶 $((Fe, Cr, V)_7C_3 + \alpha-Fe)$ + 少量的原位析出 $(Ti, V)C$ 相组成。

图 2(d)所示微区 d_1 和图 2(f)所示微区 f_1 所指均为白色相,主要分布于灰色块状相四周,其 Cr 含量明显偏低,但碳含量较高,结合图 1 所示物相结果,可以确认该相为 γ -Fe。 γ -Fe 具有良好的塑性和韧性,分布于初生块状碳化物四周,可提高该相抵抗外加冲击载荷的作用,从而改善合金耐磨性。

图 2(d)所示微区 d_2 和图 2(f)所示微区 f_2 所指均为灰色块状相,其中 Cr、C 和 V 含量较高,由于其显微硬度约为 1000HV,根据图 1 的 XRD 物相表征结果,可确认该灰色块状相为 $(Fe, Cr, V)_7C_3$ 。与波美度为 0 和 5 时的试样相比,其尺度和数量明显增加,组织呈现典型的过共晶结构特征。图 2(f)所示 f_5 微区为灰色条状相,但 C 含量有所降低,这主要是该相宽度偏小,而 EDS 所示碳谱反映了更大范围的碳含量,即该结果还反映其四周的白色 γ -Fe 相的碳含量,这使其碳含量降低,再结合块状、板条状形态,可确认其为 $(Fe, Cr, V)_7C_3$ 相。

图 2(d)所示微区 d_3 和图 2(f)所示微区 f_3 所指均为黑色点状相,EDS 结果显示其中的 Ti、V、C 含量均高,结合图 1 所示 XRD 谱表征结果,可判断该相为 $(Ti, V)C$,主要分布于白色块状相内或其四周。先期原位析出的 $(Ti, V)C$ 可作为 $(Fe, Cr, V)_7C_3$ 相的异质形核核心,降低其形核功。由于 V 的原子半径(1.35 Å)要大于 Cr 和 Fe 的原子半径(1.27 Å),若过多固溶于 $(Fe, Cr, V)_7C_3$ 相,将引起该相更大的晶格畸变,因而该相的钒溶解度有限,多余的钒原子被排斥到该相四周而析出 $(Ti, V)C$ 相。

图 2(d)所示微区 d_4 和图 2(f)所示微区 f_4 所指均为深灰色相,该相主要分布于初生 $(Fe, Cr, V)_7C_3$ 四周,根据其腐蚀较深的特点,并结合图 1 所示

XRD 谱,可知该相主要为 α -Fe 和 M_3C 组成的变态共晶,其中 M 代表 Fe、Cr、V、Ti 等金属元素。

对比图 2(a)~(f)可知,随着水玻璃波美度值的升高,该复合粉粒和实心焊丝堆焊合金的碳化物体积分数增大,形态由断续网状、树枝状转为颗粒状、块状、板条状和片状分布。如表 2 所示,波美度提高,不论是基体还是碳化物,相组织的合金元素含量均提高,即堆焊层合金化程度更高。这表明,水玻璃波美度对复合粉粒的合金元素过渡系数有明显提升作用,促使其堆焊合金组织从典型的亚共晶转变过共晶结构,碳化物数量及形貌随之显著改变。

2.3 波美度对堆焊合金性能的影响

图 3 为水玻璃波美度对复合粉粒和实心焊丝堆焊合金的宏观硬度和磨损失重的影响。随着波美度从 0 提高到 15,堆焊合金的宏观硬度从 41.4HRC 上升至 56.3HRC,然后稳定于 55.1~55.9HRC 之间,这表明水玻璃波美度显著影响堆焊合金的宏观硬度,但到了一定数值后影响不明显。

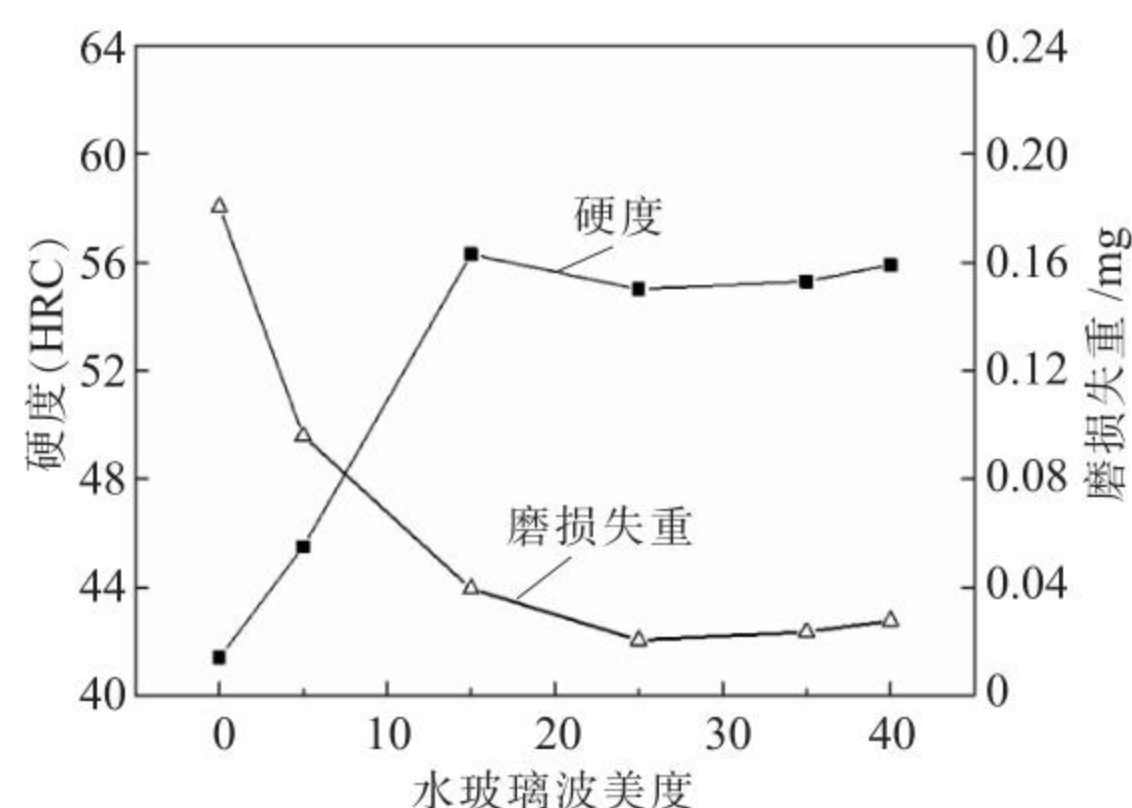


图 3 水玻璃波美度对堆焊合金的宏观硬度和磨损失重的影响
Fig.3 Effects of baume degree of sodium silicate on the macro-hardness and wear mass loss of hardfacing alloys

随着水玻璃波美度升高,堆焊合金的磨损失重 ΔM 从波美度 0 时的 180.4mg 急剧下降至波美度 25 时的 23.5mg,当波美度为 25 时,堆焊合金耐磨性最好,与波美度 0 的 1# 试样相比,耐磨性是其的 7.6 倍。当波美度高于 25 时,试样的磨损失重小幅增加,这是由于合金元素含量的提高,尤其碳含量增多,使得主耐磨相 M_7C_3 的体积分数增加且尺寸变大,同时变态共晶(α -Fe+ M_3C)数量增加,合金脆性随之增加,从而磨损失重增加。以上情况表明,混合粉末经水玻璃粘结造粒后,合金元素的过渡系数显著提升,从而堆焊合金的组织 and 耐磨性均明显改善。

由图 4 所示堆焊合金的磨损形貌可知,磨损表面皆有数量不等的划痕和剥落坑。图 4(a)所示波美

度为0的1#试样的划痕和沟槽连续且数量较多。图4(b)~(d)所示划痕数量较少,沟槽由连续变为断续分布,这说明磨粒的显微切削运动受到了耐磨相的有效阻碍,磨粒楔入难度增大,从而磨损失重减少。图4(e)和(f)显示划痕数量较少,但剥落坑数量增加且面积增大,对照图2(e)和(f),由于变态共晶(α -Fe+ M_7C_3)或者(α -Fe+ M_3C)的面积偏大,在外加冲击和磨粒碾压作用下,这些区域的共晶碳化物易开裂而剥落,同时较大尺寸的板条状 M_7C_3 型碳化物易萌生裂纹,增加剥落坑产生几率。由图4所示磨损形貌可知,堆焊合金的磨损机制包括微切削和微剥落两种机理,随着波美度的升高,微剥落为主要磨损机制。

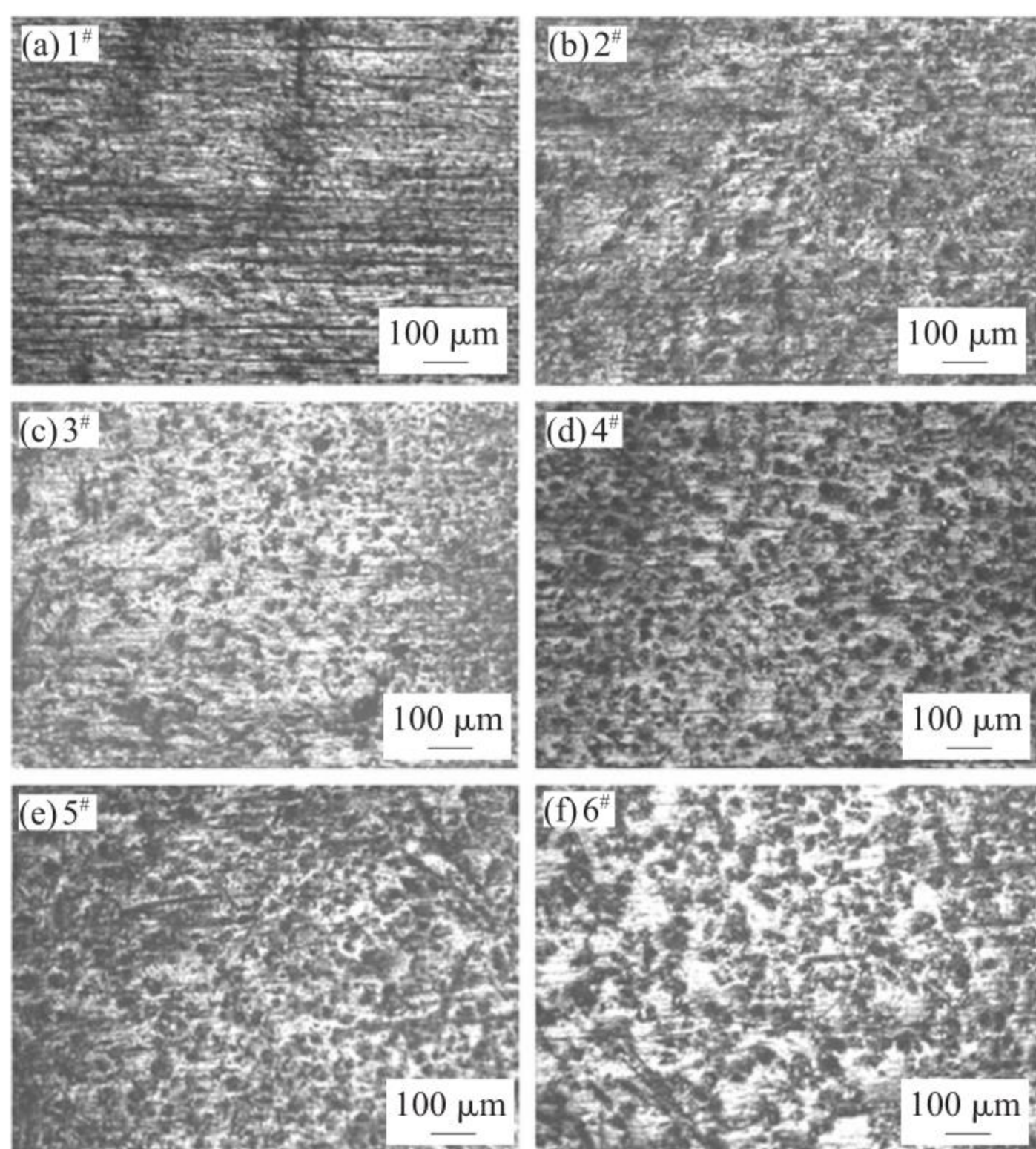


图4 堆焊合金的磨损形貌
Fig.4 Wear morphologies of hardfacing alloys

3 结论

(1) 混合粉末经硅酸钠型水玻璃粘结造粒后,电弧燃烧稳定,飞溅减小。随波美度提高,合金组元的过渡系数明显提升,其堆焊高铬合金的组织从典型的亚共晶转变为过共晶结构,初生 M_7C_3 的体积

分数显著提升。

(2) 随着硅酸钠型水玻璃的波美度提高,复合粉粒和实心焊丝堆焊合金的硬度先显著提升,然后基本稳定,耐磨性先明显改善,然后小幅波动。合金磨损机制由微切削和微剥落的共存方式转变为微剥落为主。

参考文献:

- [1] Lin C M, Chang C M, Chen J H, et al. Microstructure and wear characteristics of high-carbon Cr-based alloy claddings formed by gas tungsten arc welding [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205: 2590-2596.
- [2] Wang X H, Han F, Liu X M, et al. Microstructure and wear properties of the Fe-Ti-V-Mo-C hardfacing alloy [J]. Wear, 2008, 265: 583-589.
- [3] 庄明辉,李慕勤,王军,等. 碳化硼对粉/丝复合堆焊高硼铁基合金组织结构的影响[J]. 焊接学报, 2015, 36(10): 57-60.
- [4] Gnyusov S F, Degterev A S, Tarasov S Y. The effect of plasma torch weaving on microstructural evolution in multiple pass plasma-transferred arc Fe-Cr-V-Mo-C coating [J]. Surface & Coatings Technology, 2018, 344: 75-84.
- [5] Harun W S W, Kamariah M S I N, Muhamad N, et al. A review of powder additive manufacturing processes for metallic biomaterials [J]. Powder Technology, 2017, 327: 128-151.
- [6] Zahiri R, Sundaramoorthy R, Lysz P, et al. Hardfacing using ferro-alloy powder mixtures by submerged arc welding [J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 260: 220-229.
- [7] Moghaddam H Z, Sharifitabar M, Roudini G. Microstructure and wear properties of Fe-TiC composite coatings produced by submerged arc cladding process using ferroalloy powder mixtures [J]. Surface & Coatings Technology, 2019, 361: 91-101.
- [8] Srikarun B, Muangjunburee P. The effect of iron-based hardfacing with chromium powder addition onto low carbon steel [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5: 9272-9280.
- [9] 龚建勋,姚惠文,程诗尧,等. 填粉率对复合粉粒和实心焊丝堆焊合金组织及耐磨性的影响 [J]. 焊接学报, 2020, 41(7): 53-59.
- [10] Buntoeng Srikarun, Hein Zaw Oo, Salita Petchsang, et al. The effects of dilution and choice of added powder on hardfacing deposited by submerged arc welding [J]. Wear, 2019, 424-425: 246-254. 