

# Cr<sub>8</sub>Nb<sub>3</sub>CSiMnTi 系堆焊合金的组织及耐磨性研究

艾孝文, 龚建勋, 刘书同, 肖志强, 董海龙

(湘潭大学机械工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105)

**[摘要]** 为解决中铬合金耐磨性不足的问题,采用“复合粉粒+H08A 实心焊丝”埋弧焊方法制备 Cr<sub>8</sub>Nb<sub>3</sub>CSiMnTi 系中铬耐磨合金,借助 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电镜(SEM)及附属能谱仪(EDS)等手段,研究了碳含量对该合金组织和耐磨性的影响。结果表明:中铬堆焊合金的基体由  $\alpha$ -Fe 构成,硬质相包括 (Fe,Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>、(Fe,Cr)<sub>3</sub>C 碳化物和 (Nb,Ti)C 等相;随着碳含量升高, $\alpha$ -Fe 固溶的铬含量持续减小,沿晶 (Fe,Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 型碳化物数量增多,形态从孤立状依次改变为树枝状、定向聚集态等,与 (Nb,Ti)C 相的间距随之减小。湿砂橡胶轮式磨损试验结果显示,随碳含量提高,堆焊合金的耐磨性先显著改善然后降低,这主要与沿晶碳化物 (Fe,Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 数量提高以及其与 (Nb,Ti)C 相的间隔距离改变有关;堆焊合金的韧性则先持续下降,然后上升,这不仅决定于基体数量,而且与沿晶碳化物的形态及其分布有关;其磨损机制包括显微切削和剥落,以显微切削为主。

**[关键词]** 复合粉粒; 实心焊丝; 堆焊; 耐磨性; 组织; 磨损机制

**[中图分类号]** TG44; TH117.1 **[文献标识码]** A **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2023.0053

**[文章编号]** 1001-1560(2023)03-0006-07

## Research on the Microstructure and Abrasion Resistance of Hardfacing Alloys of Cr<sub>8</sub>Nb<sub>3</sub>CSiMnTi System

AI Xiao-wen, GONG Jian-xun, LIU Shu-tong, XIAO Zhi-qiang, DONG Hai-long

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

**Abstract:** For solving the problem of insufficient wear resistance of medium chromium alloy, medium chromium wear-resisting alloys belonging to Cr<sub>8</sub>Nb<sub>3</sub>CSiMnTi system were fabricated by submerged arc welding using composite powder particles (CPPs) and H08A solid wire as filler materials. The effects of carbon content on the microstructure and abrasion resistance of the as-prepared hardfacing alloys were investigated by X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and attached energy dispersive spectrometer (EDS). Results showed that the matrix of such medium chromium hardfacing alloys consisted of  $\alpha$ -Fe and contained such hard phases as (Fe,Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, (Fe,Cr)<sub>3</sub>C and (Nb,Ti)C. With the increase of carbon content, chromium content in the solid solution of  $\alpha$ -Fe matrix decreased continuously and the quantity of intra-granular (Fe,Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> phase increased, whose morphology changed from an isolated shape into a dendritic one, and then a directional aggregation one. Meanwhile, the gap between intra-granular (Fe,Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> and (Nb,Ti)C became narrower. From the results of wet sand rubber wheel wear testing, it could be obtained that with the increase of carbon content, the alloys' abrasion resistance increased first and then decreased, which was mainly attributed for the increase of the quantity of intra-granular (Fe,Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> and the change of the gap between intra-granular (Fe,Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> and (Nb,Ti)C. Moreover, the toughness of hardfacing alloys decreased firstly and then increased, which was not only determined by the quantity of the matrix, but also related to the morphologies and the distribution of intra-granular carbides. Their wear mechanisms included micro-cutting and micro-spalling, and the former was the dominant.

**Key words:** composite powder particles; solid wire; hardfacing; abrasion resistance; microstructure; abrasion mechanism

## 0 前言

作为一种表面工程技术,堆焊可用来制造或者再

制造表面磨损或者腐蚀的机械零件<sup>[1-3]</sup>,可使之快速恢复使用性能,具有绿色、环保和经济的优点,开发优质高效化的耐磨堆焊材料显得尤为重要。在目前的堆焊

[收稿日期] 2022-09-18

[基金项目] 湖南省自然科学基金项目(2021JJ30669)资助

[通信作者] 龚建勋,博士,副教授,主要从事焊接材料及电弧增材制造工艺研究,电话:13187327502, E-mail: gong309@tom.com

材料中,Fe-Cr-C系高铬合金兼具较好的耐磨性和经济性,已成为普及面最广的一种耐磨合金。选择合适的碳化物与基体比例,优化合金成分而细化碳化物,以改善其生长形态等而改善耐磨性<sup>[4-6]</sup>。小直径药芯焊丝,如 $\phi 1.6$  mm及以下的焊丝,堆焊电流较小,便于应用焊缝自动跟踪等技术而获得高质量的焊缝,适宜用作机器人焊接用材料,具有较高的熔敷效率和良好的综合性能;但是,该规格的药芯焊丝的外表钢带多选择H08A低碳钢带,粉末填充率低于30%,粉量不足以制备高铬合金,多为中铬合金<sup>[7-9]</sup>。通常,中铬合金的性能介于高铬合金和低铬合金之间,耐磨性较高铬合金仍显不足,韧性不如低铬合金,国内外对之研究及应用偏少。对于中铬系列耐磨合金来说,通常沿胞状基体晶界析出网状或者树枝状分布的碳化物的结构组织,其中胞状基体尺寸偏大,而网状碳化物对磨粒切削运动的阻碍作用不强,一般需添加钼、钛、铌、硅、锰等合金组分<sup>[10-13]</sup>而使之合金化,以强化基体及沿晶碳化物而提高耐磨性。研究显示,通过析出NbC相可降低堆焊熔体的碳含量,减少蜂窝状莱氏体共晶的体积分数而提高抗裂性<sup>[14-16]</sup>。同时,配合析出TiC相,根据凝固理论,TiC的吉布斯自由能低于NbC,易成为NbC相的形核中心,促进NbC相形核结晶而改善其形态<sup>[17-19]</sup>。以上研究结果对于改善中铬合金的耐磨性和抗裂性具有参考作用。但是,与 $\phi 3.2$  mm普及性高的高铬堆焊药芯焊丝相比, $\phi 1.6$  mm的中铬药芯焊丝成型设备较为特殊,轧辊调试要求高,对于需要大量试验样本的新产品研制工作来说,时效性不强,成本偏高。本工作采用最近出现的一种新概念材料——“复合粉粒”<sup>[20]</sup>,以H08A实心焊丝作为电弧载体进行埋弧堆焊。该方法所制备耐磨合金的组分源形式与药芯焊丝基本相同,以复合粉粒代替药芯提供合金组分,H08A实心焊丝与药芯焊丝外表所用H08A钢带的化学成分基本相同,将粉粒填充率控制在30%以下,即可制备 $\phi 1.6$  mm药芯焊丝所堆焊的耐磨合金。该工艺制备速度快,成本低,完全不受药芯焊丝成型设备的限制,配方可转换为药芯焊丝。鉴于中铬合金的铬含量多在10%以下,一般难以析出六边形初生 $(Fe,Cr)_7C_3$ 相,耐磨性不足,为此,本工作向复合粉粒添加铌组分,以析出NbC而改善该系合金的耐磨性,并添加少量钛以促进NbC的均匀析出,提高抗裂性,采用“复合粉粒+H08A实心焊丝”埋弧堆焊了Cr<sub>8</sub>Nb<sub>3</sub>CSiMnTi系中铬堆焊合金,研究了碳含量对该系中铬合金组织及耐磨性的影响,并考察了其韧性。

## 1 试验

### 1.1 复合粉粒制备

复合粉粒包含鳞片石墨(98%以上C,质量分数,下同)6%~14%、高碳铬铁(70Cr,8%C)50%、硅铁(45%Si)2%、中碳锰铁(80%Mn,1.5%C)4%、铌铁(60%Nb)24%、钛铁(70%Ti)4%、铝粉(Al)2%和还原铁粉(Fe)余量等粉末。将所有粉末组分过60目筛,按照配比称量并混合均匀,然后向该混合粉末添加波美度30和模数3.0的硅酸钠型水玻璃进行湿混,静置15 min,使之均匀浸润;接着将该湿粉体旋转,粘合为颗粒,再在300~400℃低温烧结2~4 h,然后筛分,获得粒度10~15目的复合粉粒。

### 1.2 复合粉粒和H08A实心焊丝堆焊耐磨合金

在160 mm×75 mm×16 mm的Q235A钢板上,将上述复合粉粒预置于待焊焊道,调整好 $\phi 2.5$  mm的H08A实芯焊丝位置,采用接触引弧,配合烧结焊剂HJ260,以ZD5-1000E焊机进行埋弧堆焊,工艺参数如下:电流420 A,电压30 V,焊丝干伸长30 mm,小车行走速度16 m/h,层温100~150℃,焊后状态空冷,极性为反接。调控复合粉粒和H08A实心焊丝堆焊合金的粉粒填充量为28%~30%,粉粒填充量=复合粉粒质量/(实心焊丝熔化量+粉粒填充量)。焊后,空冷至室温,轻敲试样,焊渣即松动脱落,露出银白色焊缝。按照同样规范堆焊第2层,获得厚7~10 mm的堆焊合金。改变复合粉粒的石墨含量,余量以还原铁粉补充,制备了1~5号堆焊合金(碳质量分数分别为1.5%,1.8%,2.1%,2.4%,2.7%)。

经测试,制备的堆焊合金的成分(质量分数,下同)如下:C(1.5%~2.7%)、Cr(8.3%~8.5%)、Nb(3.4%~3.6%)、Si(0.7%~0.9%)、Mn(0.5%~0.7%)、Ti(0.2%~0.4%),Fe余量,即为Cr<sub>8</sub>Nb<sub>3</sub>CSiMnTi系中铬合金。

### 1.3 组织表征及性能测试

堆焊试样磨平,采用HR-150A型洛氏硬度计测试宏观硬度,加载1 470 N,保持15 s,测试10次,去掉最大最小值后计算其平均值。在堆焊试样中间,线切割制备尺寸10 mm×10 mm×5 mm的方形试样,抛光,用D/MAX2550VB型X射线衍射仪(XRD)分析合金相组成。同样,切取12 mm×10 mm×20 mm的金相试样,磨平抛光,4%的硝酸酒精溶液腐蚀,用HFX-II A型尼康金相显微镜观察金相组织,采用JSM-6360LV扫描电镜(SEM)观察堆焊试样组织形貌,以其附带的电子能谱仪Oxford7854探测试样微区成分。

在堆焊试样中间部位,切割制备 57 mm×25 mm×6 mm 的耐磨试样,用 MLS-225 型湿砂橡胶轮式磨损试样机测试其磨损性能,试验条件如下:橡胶轮直径 176 mm,硬度 60 邵尔,磨损面载荷 72 N,橡胶轮转速 240 r/min,砂浆比为 1.0 kg 水配 1.5 kg 石英砂。试样预磨 1 000 r,清洗干净,酒精擦拭吹干,称初重  $m_0$ ,之后再磨 1 000 r,清洗吹干,称重  $m_1$ ,用  $\Delta m = m_0 - m_1$  表示试样绝对失重,取 3 个试样的平均值。采用 VHX-2000C 型超景深三维显微系统观察其表面磨损形貌,分析磨损机制。

同理,分别按照堆焊层 7 mm 和基体 3 mm 的方式截取冲击试样,将深 2 mm 缺口开于基体,制备符合 GB/T 229-2007 规格(10 mm×10 mm×55 mm) V 型缺口的标准夏比冲击试样,采用 CBD-300 电子式摆锤冲击试验机测量室温冲击韧性,取 3 个试样的测试平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 堆焊合金的相组成

图 1 是 1~5 号试样 XRD 谱。由图 1 可知:该中铬

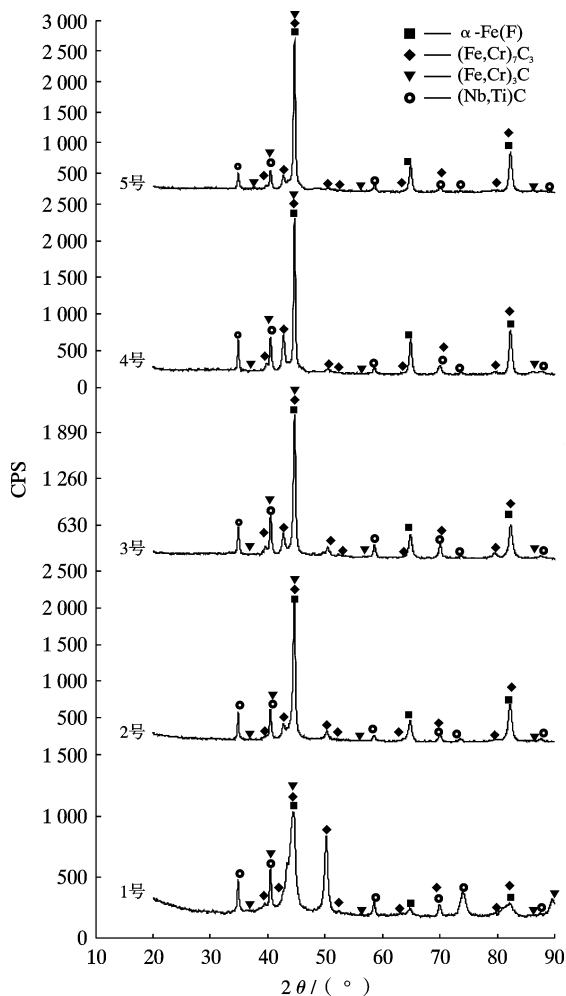


图 1 堆焊合金的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of hardfacing alloys

堆焊合金基体由  $\alpha$ -Fe 构成,硬质相包括  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Nb,Ti})\text{C}$  和  $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$  相;随着堆焊合金碳含量的提高, $\alpha$ -Fe 基体衍射峰增强,说明该相数量有增多的趋势; $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$  的 (202) 晶面 ( $d = 0.212$  nm) 特征衍射峰强度明显增强,这是最为突出的特征,说明该相显著提升,可提高耐磨性; $(\text{Nb,Ti})\text{C}$  合金碳化物衍射峰先升高后降低,说明该相数量随着  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$  相析出而增多,之后有所降低; $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$  相的衍射峰本身就微弱,未见明显变化,这说明该相的数量偏少。从图 1 的衍射峰来看,只检索到铁素体的特征衍射峰,未见马氏体 (101) 面 ( $d = 0.206$  nm) 的衍射峰。这是由于 Cr8Nb3CSiMnTi 系堆焊合金加入数量较多的铌组分,基体贫碳能力强,不易发生马氏体相变,这也是该中铬合金系较为突出的特点。

### 2.2 堆焊合金的显微组织

图 2 是 1~5 号试样的显微组织。由图 2 可知,随着堆焊合金碳含量的提高,胞状基体由白色逐渐转为黑色,被灰色的沿晶碳化物隔开;沿晶碳化物呈孤立树枝状逐渐至定向聚集态分布,数量呈增多的趋势。从 1 号试样的沿晶碳化物孤立分布,依次改变至树枝状、聚集树枝状、定向树枝状和定向聚集态树枝状等。依据图 1 所示 XRD 谱的结果可以看出,沿晶碳化物主要为  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$  相,其生长方式与铁、铬和碳反应的吸热导致的温度梯度有关。白色的块状相尺寸先较为稳定,接着明显细化,然后再增大,但数量先增多后减少,依据图 1 所示的 XRD 谱结果,可知该白色相为  $(\text{Nb,Ti})\text{C}$ 。显然,该相随着碳含量的提高,尺寸明显改变。这是由于沿晶碳化物增多改变了局域区域的铌和碳原子的扩散路径,从而使之形态改变。优化合金碳含量,使硬质相与基体良好配合,可以获得较好的综合性能。

图 3 是 1~5 号堆焊合金在背散射条件下的硬质相形貌,表 1 为其微区成分 EDS 探测结果。图 3 以及表 1 显示,微区  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $e_1$  和  $f_1$  所指白色梅花状或块状相所含碳与铌量高,且有一定量的钛,据此判断该相为  $(\text{Nb,Ti})\text{C}$ 。对比图 3a~图 3f 可知,  $(\text{Nb,Ti})\text{C}$  的尺寸先稳定,然后减小,再增大,数量增多后减少,与沿晶碳化物的间隔距离减小。

微区  $a_2$ 、 $b_2$ 、 $e_2$  和  $f_2$  所指示的区域均是灰色沿晶碳化物区域,根据图 3 和表 1 所示结果,可以确定为  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$  相,但其中有少量的  $\alpha$ -Fe。显然,这些区域的碳含量先提高,后基本稳定,并不是随着合金碳含量提高而持续增加,这表明沿晶碳化物种类未变,只是数量增多,即  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$  碳化物数量不断增加。但是,这

些区域的铬含量波动较大,这是由于其先呈沿晶网状或者树枝状分布,然后呈沿晶聚集态分布,形态改变大而导致铬含量起伏。

微区  $a_3$ 、 $b_3$ 、 $e_3$  和  $f_3$  所指示域均为胞状先析出相,所示区域最为明显的特征是硅含量较高,其铬含量持续下降,而其碳含量先增加,然后减少。鉴于其中还有灰

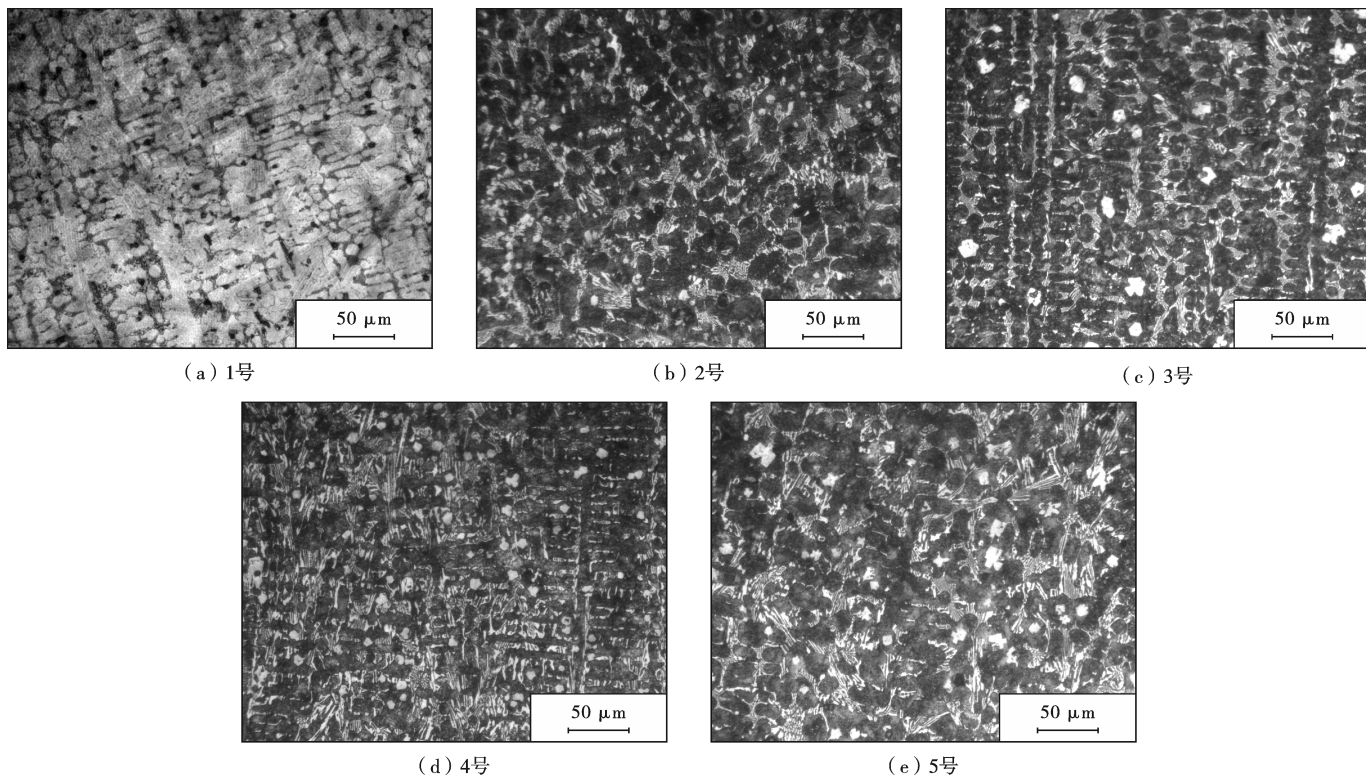


图2 堆焊合金的显微组织

Fig. 2 The microstructure of hardfacing alloys

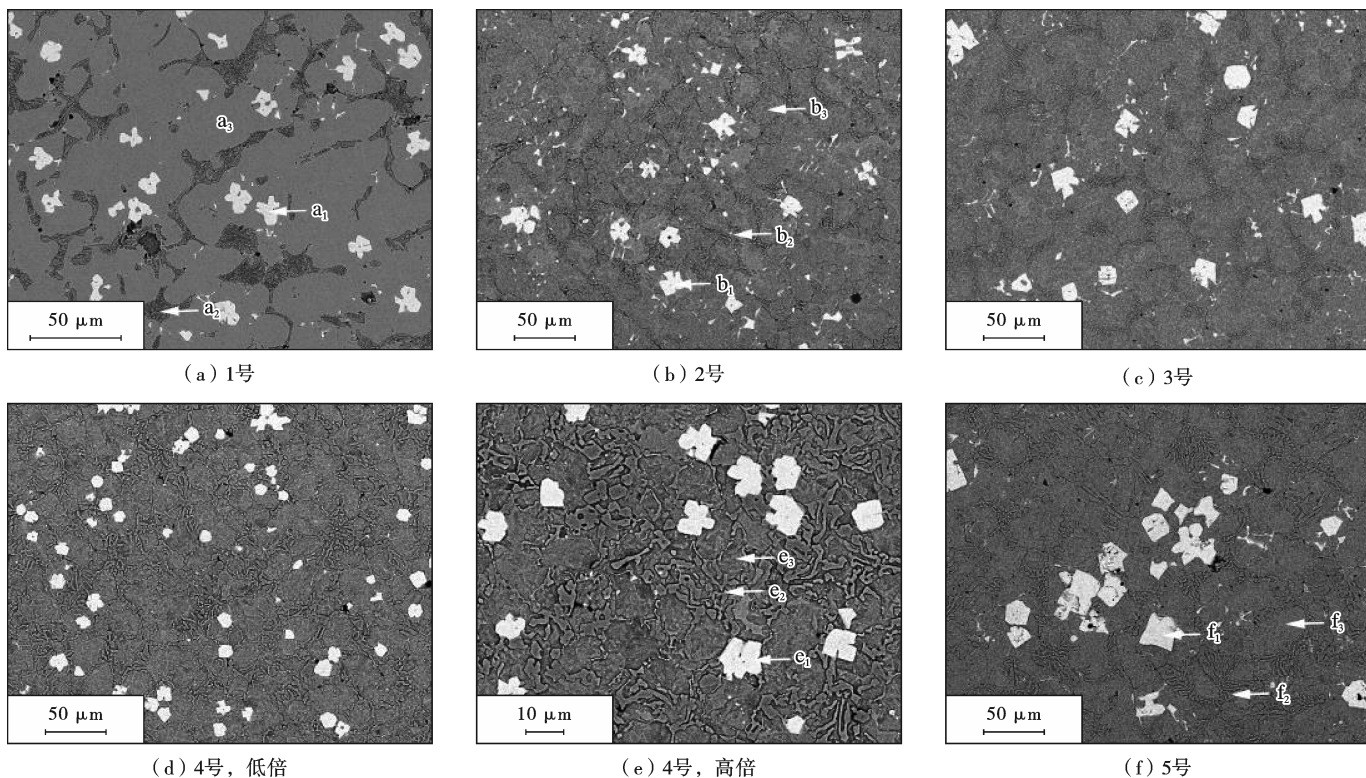


图3 堆焊合金的硬质相形貌

Fig. 3 The morphologies of hard phases of hardfacing alloys

表 1 堆焊合金的微区化学成分(原子分数) %  
Table 1 Chemical composition in micro-area of  
hardfacing alloys (atomic fraction) %

能谱点	Cr	Nb	C	Ti	Si	Mn	Fe
a <sub>1</sub>	-	35.52	60.02	3.06	-	-	余量
a <sub>2</sub>	15.72	0.42	37.79	0.14	1.05	1.07	余量
a <sub>3</sub>	5.81	0.27	31.12	0.27	2.21	1.21	余量
b <sub>1</sub>	1.46	29.86	62.41	3.55	0.53	0.63	余量
b <sub>2</sub>	10.61	0.41	41.27	0.17	1.20	1.05	余量
b <sub>3</sub>	4.56	0.68	36.03	0.44	2.45	1.27	余量
e <sub>1</sub>	2.05	29.93	61.35	4.19	0.40	0.44	余量
e <sub>2</sub>	13.22	0.36	45.04	0.21	1.01	1.51	余量
e <sub>3</sub>	4.17	0.77	34.80	0.24	3.05	1.05	余量
f <sub>1</sub>	1.10	31.15	62.07	4.32	-	-	余量
f <sub>2</sub>	10.08	2.89	44.09	0.22	1.10	1.18	余量
f <sub>3</sub>	3.71	0.22	31.81	0.21	2.83	0.91	余量

色的点状或者条状相,可认为该区域为 $\alpha$ -Fe和 $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$ 的混合物,即有共析反应: $\gamma\text{-Fe}\rightarrow\alpha\text{-Fe}+(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$ 。另外,还可见其中少量的点状 $(\text{Nb,Ti})\text{C}$ 析出,加快了上述反应。该区域的组织形态与传统的珠光体不同,光学显微镜下呈黑色,主要因 $\alpha$ -Fe固溶铬含量偏低且尺寸偏小所致。

对比图 3a,3b,3d,3f 可知,随着合金碳含量提高,沿晶碳化物 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 析出量增大,这导致 $\alpha$ -Fe固溶的铬含量降低;还可以看出, $(\text{Nb,Ti})\text{C}$ 相先基本分布于胞状 $\alpha$ -Fe内,然后分布于沿晶区域和胞状 $\alpha$ -Fe内,基本被沿晶网状或树枝状 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 隔开;隔距随碳含量提高而减小,甚至紧邻,相邻胞状 $\alpha$ -Fe间出现贯通区域。 $(\text{Nb,Ti})\text{C}$ 相与沿晶碳化物 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 越接近,相互影响增大。这是因为,堆焊熔体冷却速度快,只有数十秒,尽管 $(\text{Nb,Ti})\text{C}$ 相析出领先于沿晶碳化物 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ ,但二者的生长过程并不是按照顺序依次完成,而是有所重叠。大量碳化物沿晶析出,而 $(\text{Nb,Ti})\text{C}$ 相生长需要大量的碳原子供给,导致这些碳原子的扩散路径已被沿晶碳化物 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 阻隔,这表明沿晶 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 数量及形态明显影响 $(\text{Nb,Ti})\text{C}$ 相的尺寸及分布。

### 2.3 堆焊合金的耐磨性

图 4 是 1~5 号堆焊合金的宏观硬度以及磨损失重图。由图 4 可知,随着碳含量的增加,合金宏观硬度先上升后下降,磨损失重先显著下降,然后上升,即耐磨性先改善,然后下降。1 号试样硬度值 45.8 HRC,最低,这是因为基体主要以胞状 $\alpha$ -Fe为主,沿晶碳化物

偏少所致。2 号试样的硬度值提高到 50.4 HRC,这是因为沿晶 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 碳化物呈网状或者树枝状的分布形态且数量增加,对磨粒显微切削运动的阻碍作用强,因而磨损失重降低。3 号试样的宏观硬度增加至 57.9 HRC,这主要是沿晶碳化物体积分数提高和原位弥散析出基体的 $(\text{Nb,Ti})\text{C}$ 相数量增加所致,这使得磨损失重下降。当碳含量继续提高时,尽管沿晶碳化物的数量有所增加,但 5 号试样的宏观硬度下降至 56.7 HRC,磨损失重增大。这是因为,图 2 和图 3 均显示,4 号和 5 号试样的不少胞状 $\alpha$ -Fe之间有较大的贯通区域,而沿晶 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 型碳化物不少呈定向聚集分布,且 $(\text{Nb,Ti})\text{C}$ 相数量减少,因而硬度下降。这些区域对磨粒的显微切削运动阻碍减小,致使其耐磨性下降。

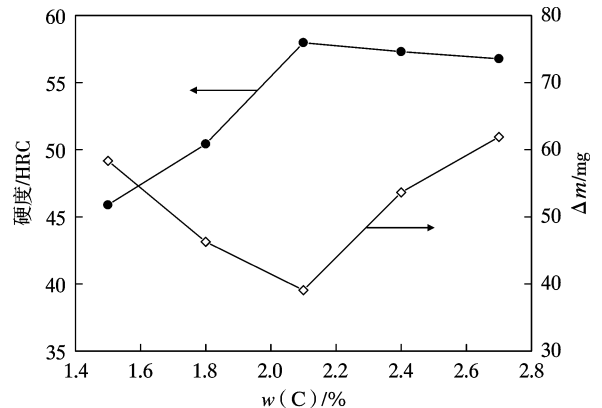


图 4 碳含量对堆焊合金的宏观硬度和磨损失重的影响  
Fig. 4 Effects of carbon content on macro-hardness and wear mass loss of hardfacing alloys

图 5 是 1~5 号试样的磨损形貌。由图可见,试样磨损表面残留有划痕或切削沟槽,走向基本一致,还可见较大的剥落坑。显然,划痕和切削沟均为磨粒的显微切削运动所留,剥落坑主要为 $(\text{Nb,Ti})\text{C}$ 相脱落所致。对比图 5a,5b,5c 可知,随着堆焊合金的碳含量提高,划痕明显减少,切削沟槽变深,但磨损失重降低,这说明 1 号试样的整体呈现为均匀磨损,主要因为沿晶碳化物数量偏少;随着沿晶碳化物的数量增加,对磨粒尖端楔入阻碍作用提高,而 $(\text{Nb,Ti})\text{C}$ 相的弥散分布,使之与韧性基体形成良好配合,因而改善了耐磨性。但是,局域区域的胞状 $\alpha$ -Fe尺寸偏大,而 $(\text{Nb,Ti})\text{C}$ 相脱落所形成的深坑,均利于磨粒楔入而残留较深的切削沟槽。

与图 5a,5b,5c 相比,图 5d,5e 所示的 4 号和 5 号堆焊合金的划痕明显,切削沟槽偏宽,剥落坑数量增多。这表明,沿晶碳化物 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 碳化物数量虽然增加,却未能改善堆焊合金的耐磨性。这主要是由于

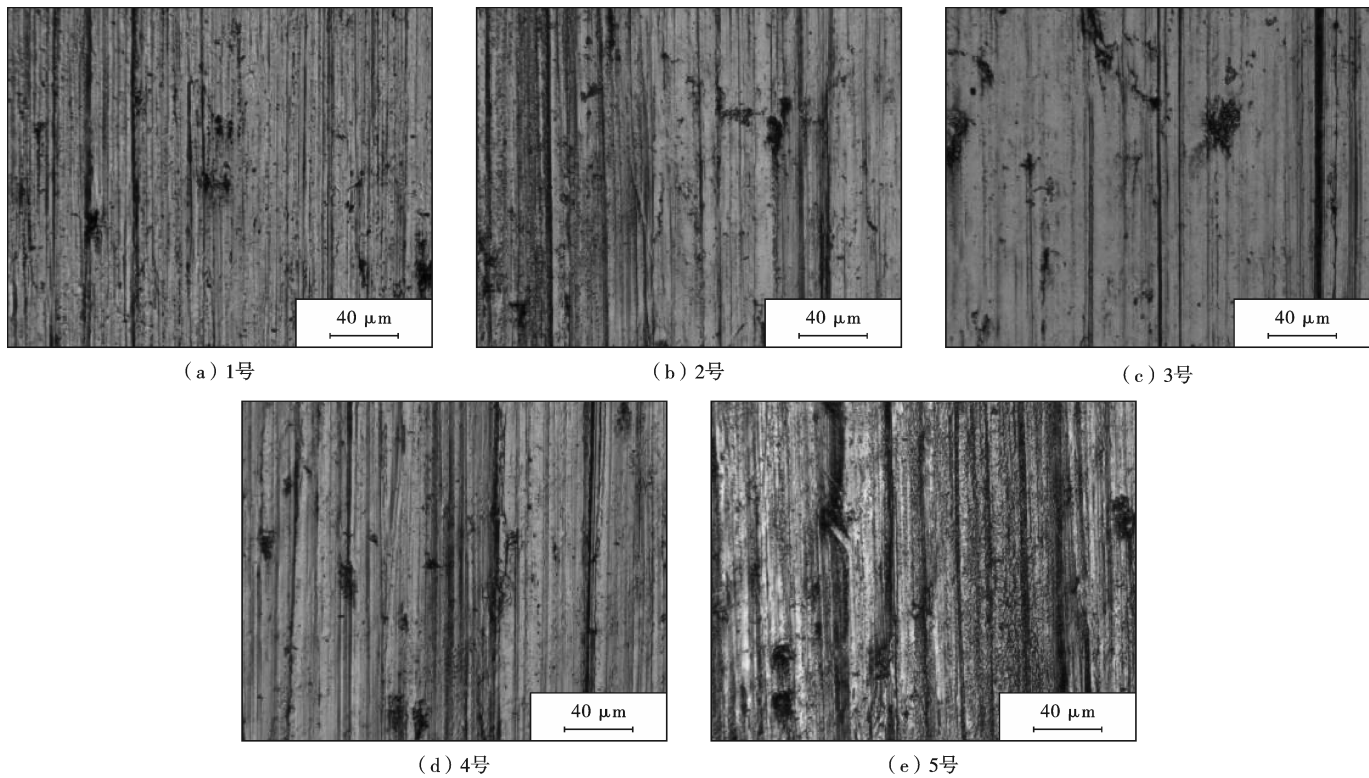


图5 堆焊合金的磨损形貌

Fig. 5 Worn morphology of hardfacing alloys

沿晶碳化物 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 和 $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{C}$ 相之间的间隔太小,导致支撑 $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{C}$ 相的韧性基体数量减少。因而,在外加磨粒冲击碾压下,这些相较易松动脱落而加剧磨损,导致耐磨性下降。与图5d相比,图5e所示切割沟槽内有凸点,这是沿晶碳化物断裂痕迹。以上结果表明,单纯的沿晶碳化物 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 碳化物对磨粒的切削运动阻碍作用偏小,耐磨 $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{C}$ 相需要良好的韧性基体支撑,才能发挥其耐磨质点的作用。整体而言,耐磨性属于合金的一项系统属性,耐磨相和韧性基体之间需要协同配合,才能充分发挥作用。该合金的磨损机制主要为磨粒的微切削,包含少量显微剥落。

## 2.4 堆焊合金的冲击韧性

图6是1~5号试样的冲击韧性。由图可知,随着碳含量的增加,合金冲击韧性 $a_{KV}$ 值先从1号试样的 $4.50 \text{ J/cm}^2$ 下降至4号试样的 $2.85 \text{ J/cm}^2$ ,这是由于合金碳化物不断增多,基体数量减少。随后, $a_{KV}$ 提高,这主要是沿晶 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 型碳化物晶粒呈聚集态分布,因而胞状基体具有相通的区域,这使之受到冲击作用时,相通区域基体可以协同作用,但导致磨损失重提高,即耐磨性下降。上述结果表明,堆焊合金的冲击韧性不仅与基体数量有关,而且与沿晶碳化物的形态及分布有关。

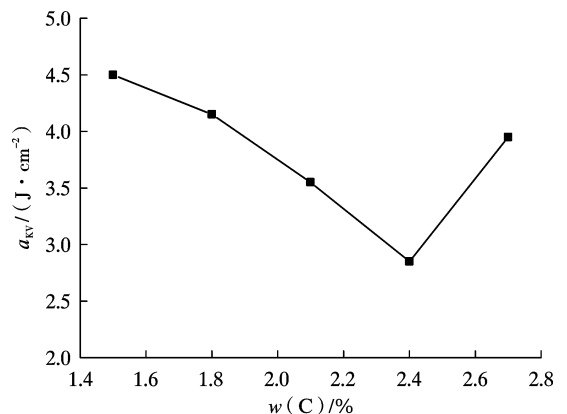


图6 堆焊合金的冲击韧性

Fig. 6 Impact toughness of hardfacing alloys

## 3 结论

(1)  $\text{Cr8Nb3CSiMnTi}$ 系堆焊合金的基体由 $\alpha\text{-Fe}$ 构成,硬质相包括 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{C}$ 和 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 相。随着碳含量的提高,沿晶碳化物 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 数量增多,形态从孤立分布依次改变至树枝状、聚集树枝状、定向树枝状和定向聚集态树枝状; $\alpha\text{-Fe}$ 固溶的铬含量持续减小, $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{C}$ 相数量先增多后减少,与 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 相的隔离距离不断减小,使得胞状 $\alpha\text{-Fe}$ 间出现相通区域。

(2)  $\text{Cr8Nb3CSiMnTi}$ 系堆焊合金,随着碳含量的增

加,其宏观硬度先上升后下降,耐磨性先显著改善,然后下降,这与沿晶碳化物 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 数量的提高以及与 $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{C}$ 相的间隔距离变化有关。

(3)  $\text{Cr}_8\text{Nb}_3\text{CSiMnTi}$  系堆焊合金中,单纯的沿晶碳化物 $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ 碳化物对剥落的切削阻碍作用偏小,耐磨 $(\text{Nb}, \text{Ti})\text{C}$ 相需要良好的韧性基体支撑。堆焊合金的冲击韧性不仅与基体数量有关,而且与沿晶碳化物的形态及分布有关。

### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] 徐滨士.再制造工程的现状与前沿[J].材料热处理学报, 2010,31(1):10-14.  
XU B S. Current Situation and Frontiers of Remanufacturing Engineering[J].Journal of Materials Heat Treatment, 2010, 31(1):10-14.
- [ 2 ] 秦翔,杨军,邹德宁,等.轧辊再制造及其表面强化技术的研究进展[J].材料保护,2019,52(2):119-125.  
QIN X, YANG J, ZOU D N, et al. Research progress on roll remanufacturing and surface strengthening technology [J]. Materials Protection, 2019, 52(2):119-125.
- [ 3 ] 张立成,龚建勋,姚惠文.Si元素对明弧堆焊奥氏体合金组织及耐磨性的影响[J].材料保护,2018,51(3):26-30.  
ZHANG L C, GONG J X, YAO H W. Effect of Si element on microstructure and wear resistance of open arc hardfacing austenitic alloys [J]. Materials Protection, 2018, 51(3):26-30.
- [ 4 ] 杨庆祥,周野飞,杨育林,等. Fe-Cr-C系耐磨堆焊合金研究进展[J].燕山大学学报,2014,38(3):189-196.  
YANG Q X, ZHOU Y F, YANG Y L, et al. Research progress of Fe-Cr-C wear-resistant hardfacing alloys[J].Journal of Yanshan University, 2014, 38(3):189-196.
- [ 5 ] SOUSA J, LOBATO M Q, GARCIA D N, et al. Abrasion resistance of Fe-Cr-C coating deposited by FCAW welding process[J].Wear, 2021, 476:203-688.
- [ 6 ] KAUSHIK N, MAITRA A, VAMSI J A, et al. Understanding elastic/plastic nature of phases in Fe-13Cr-1C hardfaced coating through accelerated property mapping technique[J]. Materials Letters, 2022, 320:132-335.
- [ 7 ] 兰志宇,赵旭,孟贺超.  $\phi 1.6$  mm 焊丝在机器人焊接液压支架结构件上的应用[J].焊接,2017(11):47-50.  
LAN Z Y, ZHAO X, MENG H C. Application of  $\phi 1.6$  mm welding wire in robotic welding of hydraulic support structural parts[J].Welding, 2017(11):47-50.
- [ 8 ] 武丹,刘政军,苏允海,等.夹杂物对高强钢焊缝金属组织和冷裂纹影响分析[J].热加工工艺,2018,47(23):246-249.  
WU D, LIU Z J, SU Y H, et al. Analysis of the influence of inclusions on the metal structure and cold cracks of high-strength steel welds [J]. Hot Working Technology, 2018, 47(23):246-249.
- [ 9 ] PAWAR S, JHA A K, MUKHOPADHYAY G. Effect of different carbides on the wear resistance of Fe-based hardfacing alloys [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 78:288-295.
- [ 10 ] 雷声,李帅,马世豪,等.两种中铬堆焊合金组织及性能的研究[J].热加工工艺,2019,48(21):160-162.  
LEI S, LI S, MA S H, et al. Research on the microstructure and properties of two medium chromium hardfacing alloys [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(21):160-162.
- [ 11 ] 朱官朋,郭纯,孔红雨.药芯焊丝Cr含量对低合金钢焊缝金属性能的影响[J].金属热处理,2018,43(1):81-85.  
ZHU G P, GUO C, KONG H Y. Effect of Cr content of flux-cored wire on metal properties of low alloy steel welds [J]. Metal Heat Treatment, 2018, 43(1):81-85.
- [ 12 ] 刘奇聪,马振,吕鹏等. Cr含量对Fe-B-C系耐磨合金堆焊层组织和硬度的影响[J].焊接,2022(2):26-31.  
LIU Q C, MA Z, LV P, et al. Influence of Cr content on the microstructure and hardness of Fe-B-C wear-resistant alloy hardfacing layer [J]. Welding, 2022(2):26-31.
- [ 13 ] SRIKARUN B, MUANGJUNBUREE P. The effect of iron-based hardfacing with chromium powder addition onto low carbon steel [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(3):9272-9280.
- [ 14 ] 行舒乐,余圣甫,邓宇,等.铌和氧化铈对堆焊金属耐磨性及冲击韧性影响[J].华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(6):24-28.  
XING S L, YU S F, DENG Y, et al. Effects of niobium and cerium oxide on wear resistance and impact toughness of hardfacing metal [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 40(6):24-28.
- [ 15 ] 周威,朱协彬,程敬卿. Fe-Cr-C-Nb药芯焊丝堆焊合金组织与耐磨性能研究[J].安徽工程大学学报,2019,34(3):17-21.  
ZHOU W, ZHU X B, CHENG J Q. Microstructure and wear resistance of Fe-Cr-C-Nb flux-cored wire hardfacing alloy [J]. Journal of Anhui Engineering University, 2019, 34(3):17-21.
- [ 16 ] LIU S, SHI Z J, XING X L, et al. Effect of Nb additive on wear resistance and tensile properties of the hypereutectic Fe-Cr-C hardfacing alloy [J]. Materials Today Communications, 2020, 24:101-232.

- (10): 26-30.
- YANG T, LI K H, YAN T, et al. Corrosion Inhibition of Two Kinds of Corrosion Inhibitors Based on Amine Methylation Reaction for Carbon Steel [J]. *Materials Protection*, 2019, 52(10): 26-30.
- [16] STERN M, GEARY A. A theoretical analysis of the shape of polarization curves[J]. *Journal of the Electromical Society*, 1957, 104(1): 56-63.
- [17] SHI W, DONG Z H, KONG D J, et al. Application of wire beam electrode technique to investigate initiation and propagation of rebar corrosion [J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 48(1): 25-33.
- [18] SHI W, WANG T Z, DONG Z H, et al. Application of wire beam electrode technique to investigate the migrating behavior of corrosion inhibitors in mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 134(1): 167-175.
- [19] ANDRADE C. Propagation of reinforcement corrosion: principles, testing and modelling[J]. *Materials and Structures*, 2019, 52(1): 1-26.
- [20] 冯伟鹏. 钢筋通电加速锈蚀方法与锈蚀效率的研究及其应用[D]. 深圳: 深圳大学, 2015.
- FENG W P. Experimental research on the electric accelerated corrosion method and current efficiency[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015.
- [21] 石焕荣, 魏无际, 丁毅, 等. 热镀锌和锌铝合金镀层的微观组织及盐雾腐蚀行为[J]. *材料保护*, 2002(3): 35-36.
- SHI H R, WEI W J, DING Y, et al. Microstructures and Salt Spray Corrosion Behaviors of Hot-Dip Zn and 55Al-Zn Coatings [J]. *Materials Protection*, 2002(3): 35-36.
- [22] 郑帆, 史桂昀, 董必钦, 等. 钢筋混凝土通电加速锈蚀行为可视化表征[J]. *硅酸盐学报*, 2018, 46(8): 1 081-1 086.
- ZHENG F, SHI G Y, DONG B Q, et al. Visual Characterization on Current Accelerated Corrosion Profile of Reinforcements [J]. *Bulletin of The Chinese Ceramic Society*, 2018, 46(8): 1 081-1 086.
- [23] 干伟忠, 金伟良, 高明赞. 混凝土中钢筋加速锈蚀试验适用性研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(2): 41-47.
- GAN W Z, JIN W L, GAO M Z. Applicability study on accelerated corrosion methods of steel bars in concrete structure [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(2): 41-47.

[编校: 郑霞]

## (上接第 12 页)

- [17] YANG K, JIANG Y F, BAO Y F. Effect of Titanium Content on Microstructure and Wear Resistance of Hardfacing Alloy [J]. *Journal of Wuhan University of Technology - Mater Sci Ed*, 2018, 33(3): 669-673.
- [18] ZHAO C C, XING X L, GUO J, et al. Microstructure and wear resistance of (Nb, Ti) C carbide reinforced Fe matrix coating with different Ti contents and interfacial properties of (Nb, Ti)C/ $\alpha$ -Fe [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 494: 600-609.
- [19] WANG J B, LIU T T, ZHOU Y F, et al. Effect of nitrogen alloying on the microstructure and abrasive impact wear resistance of Fe-Cr-C-Ti-Nb hardfacing alloy [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2017, 309: 1 072-1 080.
- [20] 龚建勋, 艾孝文, 黄洪江, 等. 一种碳化钛相增强铁基堆焊合金的复合粉粒及其应用方法: ZL202011264588.3 [P]. 2020-11-03.
- GONG J X, AI X W, HUANG H J, et al. A composite powder of titanium carbide phase reinforced iron-based hardfacing alloy and its application method: ZL202011264588.3 [P]. 2020-11-03.

[编校: 郑霞]

## (上接第 19 页)

- [15] 梁和平, 王鑫, 薛召露, 等.  $Y_3Al_5O_{12}$  掺杂对 YSZ 热障涂层微观结构和高温相稳定性的影响 [J]. *热喷涂技术*, 2021, 13(1): 43-52.
- LIANG H P, WANG X, XUE Z L, et al. Effect of  $Y_3Al_5O_{12}$  Doping on Microstructure and High-temperature Phase Stability of YSZ Thermal Barrier Coatings [J]. *Thermal Spray Technology*, 2021, 13(1): 43-52.
- [16] HUANG Y H, JIANG D L, ZHANG J X, et al. Sintering kinetics of YAG ceramics [J]. *Journal of Rare Earths*, 2014, 32(5): 416-422.
- [17] 胡盼, 丁慧, 刘永福, 等. YAG:Ce<sup>3+</sup> 在激光照明应用中的研究进展 [J]. *发光学报*, 2020, 41(12): 1 504-1 528.
- HU P, DING H, LIU Y F, et al. Recent progress of YAG:Ce<sup>3+</sup> for White laser Diode Lighting Application [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(12): 1 504-1 528.
- [18] 曾鹏, 王卫泽, 王和慧, 等. 硝酸腐蚀对等离子喷涂 YAG:Ce 涂层发光性能的影响 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(1): 339-343.
- ZENG P, WANG W Z, WANG H H, et al. Effect of Nitric Acid Corrosion on the Luminescent Intensity of Plasma Sprayed YAG:Ce Coatings [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(1): 339-343. [编校: 郑霞]