

# Mo对Fe-B-C系堆焊合金组织及性能的影响

龚建勋,肖志强,黄洪江,董海龙

(湘潭大学 机械工程与力学学院,湖南 湘潭 411105)

**摘要** 采用“复合粉粒+H08A实心焊丝”埋弧焊方法制备了 $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ 和 $\text{Fe}_2\text{B}$ 双相增强的Fe-Mo-B-C系耐磨合金,用X-射线衍射仪、扫描电镜、附属电子能谱仪和磨损试验机研究了钼含量对其组织及性能的影响。结果表明:该合金的基体为铁素体( $\alpha\text{-Fe}$ ),硬质相包含 $\text{Fe}_2\text{B}$ 、 $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ 、 $\text{M}_3(\text{B,C})$ 等相;随钼含量提高,初生 $\text{Fe}_2\text{B}$ 相的体积分数降低,而 $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ 相的数量明显提高,其显微硬度可至1 781HV,形态从共晶( $\alpha\text{-Fe}+\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ )树枝状逐渐向初生硬质相的方块状转变,尺寸增加,这使该堆焊合金层的显微硬度升至1 200HV以上。磨损试验表明该堆焊合金的耐磨性先改善,后降低;9%Mo(质量分数)时,耐磨性最佳, $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ 相大小对合金耐磨性至关重要。

**关键词** 复合粉粒;堆焊;显微组织;耐磨性;双相增强

中图分类号 TG422.1

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2023)01-0063-05

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20230110.005

## Effects of molybdenum on microstructure and properties of Fe-B-C hardfacing alloys

GONG Jianxun, XIAO Zhiqiang, HUANG Hongjiang, DONG Hailong

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

**Abstract** Fe-Mo-B-C hardfacing alloys reinforced with dual phases including  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$  and  $\text{Fe}_2\text{B}$  were prepared by submerged arc welding with composite powder particles (CPPs) and H08A solid wire. The effects of Mo content on their microstructure and the properties were investigated by X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscopy (SEM), attached energy dispersive spectrometer (EDS) and wear tester. The results show that the matrix is  $\alpha\text{-Fe}$  and hard phases include  $\text{Fe}_2\text{B}$ ,  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ ,  $\text{M}_3(\text{B,C})$ , etc. With the increase of Mo content, the volume fraction of primary  $\text{Fe}_2\text{B}$  phase significantly decreases and the number of  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$  increases greatly, whose micro-hardness can be advanced to above 1 781HV. It changes from a dendritic shape of the eutectic of ( $\alpha\text{-Fe}+\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ ) into a blocky or square one with the increase of the size, which makes that the micro-hardness of hardfacing layers can be advanced to above 1 200HV. The results of wear tester show that their abrasion resistance firstly improves and then decreases. The optimal abrasion resistance is obtained at 9%Mo (mass fraction). It indicates that proper size of  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$  phase has an important effect on their abrasion resistance.

**Keywords** composite powder particles; hardfacing; microstructure; abrasion resistance; dual-phase strengthening

硼合金兼具良好的耐磨性和经济性,适合作为低应力磨粒磨损工况的耐磨合金<sup>[1-2]</sup>。硼原子在铁素体、奥氏体等基体中的质量分数仅为0.000 4%和0.02%<sup>[3-6]</sup>。合金所含绝大部分硼原子均以硼化物的形式析出,对于提高合金的耐磨性具有积极意义。硼合金的耐磨相有 $\text{Fe}_2\text{B}$ 和 $\text{FeB}$ ,其中 $\text{FeB}$ 相所需硼含量高,主要析出于渗硼层,普通硼合金难以析出。与高铬合金的 $\text{M}_7\text{C}_3$ 型碳化物等耐磨相相比, $\text{Fe}_2\text{B}$ 型硼化物的脆性偏大。为此,国内外不少学者对 $\text{Fe}_2\text{B}$ 相进行合金化处理,以析出M包括Cr、Mn、V等过渡簇金属元素的复合 $\text{M}_2\text{B}$ 型硼化物,提高其断裂韧性和显微硬度从而改善合金耐磨性。不仅如此,硼还与过渡合金元素结合形成 $\text{M}_3\text{B}_2$ 、 $\text{M}_5\text{B}_3$ 等相,其中M主要为原子半径较大的重元素,如Mo、W及原子半径相对较小的Cr等<sup>[7]</sup>。这

些相可作为陶瓷涂层的高温强化相,对于提高硼合金的耐高温磨损性能具有积极意义,这方面国内外已开展基础研究<sup>[8]</sup>,但与 $\text{Fe}_2\text{B}$ 相的研究相比,远远偏少。Jin等<sup>[9]</sup>采用粉块氩弧熔敷方法制备 $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ 相强化的显微硬度可达1 052HV的涂层,结果表明,其具有良好的高温稳定性。李子豪等<sup>[10]</sup>采用药芯焊丝氩弧焊方法制备了 $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ 相强化的Mo-Cr-Fe-B系堆焊合金,结果表明,其耐磨性接近YG8的水准。以上结果表明,制备 $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ 相强化的堆焊合金,可有效提高硼合金的耐磨性。然而, $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ 相增强的陶瓷或耐磨涂层多以粉末烧结方式为主<sup>[11-12]</sup>。堆焊硼合金则需在粉块或药芯焊丝加入数量占绝对优势的Mo和B组分,这极大限制所制备合金的成分调控范围。且粉块熔敷残渣多,焊缝成型性有待改善。钼铁组分昂贵,研发该

系列药芯焊丝必然消耗大量组分,使研制成本过高。

目前,国内外对  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$  相强化的堆焊合金研究极少。因此,本文作者采用复合粉粒和实心焊丝埋弧焊方法制备  $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$  和  $\text{Fe}_2\text{B}$  双相强化的 Fe-Mo-B-C 系堆焊合金,研究 Mo 含量对其组织和性能的影响。

## 1 试验过程

### 1.1 堆焊试样的制备

复合粉粒包含碳化硼( $\text{B}_4\text{C}$ )、钼铁( $\text{FeMo50-A}$ )、硅铁( $\text{FeSi45-A}$ )、钛铁( $\text{FeTi30-A}$ )、超细化铝粉( $\text{Al}$ )和还原铁粉( $\text{Fe}$ ),经粉末组分称量、干混、添加硅酸钠型水玻璃湿混、湿粉体旋转粘结造粒、粉粒烧结和粉粒筛分等步骤,制备出 0.6~2.0 mm 的复合粉粒。改变复合粉粒的钼铁含量,不足 100% 的余量以还原铁粉补充,制备 1~6# 复合粉粒。将 6 种复合粉粒置于长宽厚为 200 mm×75 mm×16 mm 的 Q235A 钢板,粉粒层宽约为 20 mm,厚为 10~12 mm,其上覆盖厚约为 15 mm 的熔炼焊剂 HJ260 颗粒,以直径为 2.5 mm 的 H08A 实心焊丝作为电弧载体,在 ZD5-1000E 直流埋弧焊机上,使复合粉粒和实心焊丝熔化形成堆焊合金,空冷,焊渣脱落;焊缝表面光滑,无气孔和粘渣等缺陷。按同样规范堆焊第二层,制备焊缝宽约为 25 mm 和高约为 15 mm 的 1~6# 堆焊合金试样。堆焊工艺参数:电压为 30 V;电流为 410 A;小车行走速度为 16 m/h;焊丝干伸长为 30 mm;层间温度为 100~150 °C。所堆焊合金的化学成分(质量分数,下同):B 为 4.6%;C 为 1.3%;Si 为 0.7%;Ti

为 0.4%;Al 为 0.5%;Fe 为余量;分别制备 1#(3.0%Mo)、2#(4.5%Mo)、3#(6.0%Mo)、4#(7.5%Mo)、5#(9.0%Mo)、6#(10.5%Mo) 等 6 组试样,即 Fe-Mo-B-C 系合金。

### 1.2 堆焊合金性能测试与表征

线切割尺寸为 20 mm×25 mm×14 mm 的金相试样,经抛光不腐蚀,作为 D/MAX2550VB 型 X-射线衍射仪测试物相分析样品。以质量分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀,用扫描电镜 JSM-6360LV 观察组织,附属电子能谱仪 Oxford 7854 分析探测微区成分。

用 HV-1000 维氏硬度计测量金相试样特征相的显微硬度,载荷为 1.96 N,加载时间为 10 s,取 10 次测量结果平均值;用 HR-150 洛氏硬度计测量堆焊合金宏观硬度,加载为 1 471 N,取 10 次测量结果平均值。

线切割尺寸为 57 mm×25 mm×6 mm 的耐磨试样,磨平,砂纸打磨到表面光滑。用 MLS-225 型湿砂橡胶轮式磨损试验机,试验参数:磨浆为 1.5 kg 的 2~3 mm 石英砂和 1 000 mL 的自来水的混合液;橡胶轮直径 178 mm,邵氏硬度 60HA;加载砝码质量为 2.45 kg。耐磨性试样先预磨 1 000 转,冲洗、酒精擦拭并吹干后,用 FA2104 型电子天平测量试样的初始质量  $M_0$ ,重复相同的试验流程,得到试样磨损后的质量  $M_1$ 。试样磨损绝对失质量为  $\Delta M = M_0 - M_1$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 堆焊合金的相组成

图 1 为堆焊合金的 XRD 图。可知,该堆焊合金的

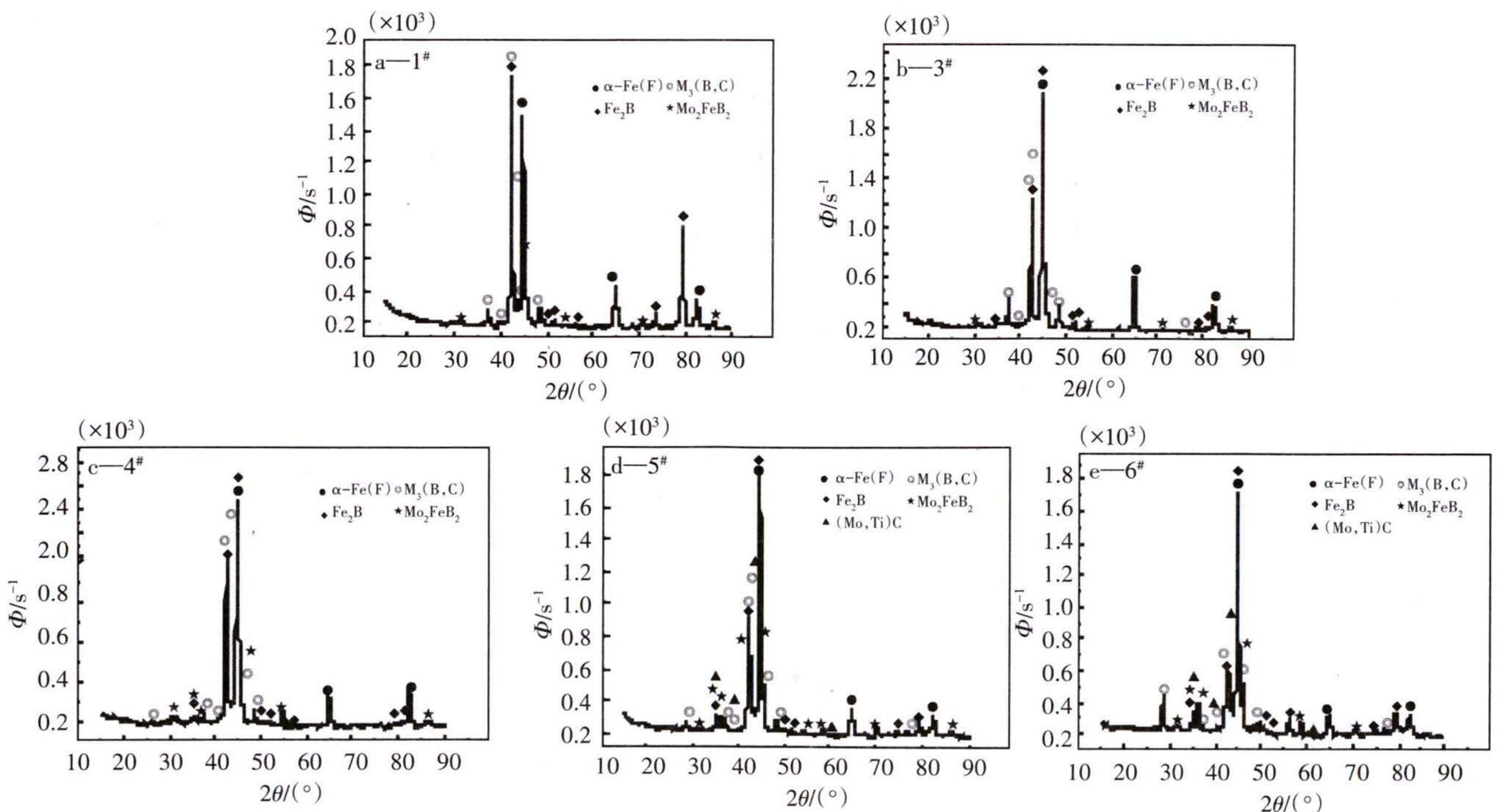


图 1 堆焊合金的 XRD 图

Fig.1 XRD patterns of hardfacing alloys

基体为铁素体( $\alpha$ -Fe),硬质相包含 $Fe_2B$ 、 $Mo_2FeB_2$ 、 $M_3(B,C)$ 等相。 $Mo_2FeB_2$ 相的析出,说明复合粉粒和实心焊丝埋弧焊方法可制备粉块熔敷和药芯焊丝电弧焊等方法制备的特殊相,该方法具有更高的灵活性和快捷性。复合粉粒添加的Si、Ti、Al等组分,除5、6#试样出现了(Mo,Ti)C等相关相外,无其他组织,说明这些组分起到脱氧等作用。

由图1可知,随堆焊合金的钼含量提高,其 $\alpha$ -Fe基体的特征峰先强后弱,整体减弱,说明堆焊合金的硬质相数量提高;尽管主耐磨相 $Fe_2B$ 的个别特征峰强度有所波动,但整体减弱,说明其体积分数降低; $Mo_2FeB_2$ 相的特征峰强度逐渐增强,这表明其数量明显提高,整体上形成由 $Mo_2FeB_2$ 和 $Fe_2B$ 组成的双相强化的耐磨合金。由 $Fe_2B$ 和 $Mo_2FeB_2$ 相的分子结构看, $Mo_2FeB_2$ 相的硼含量显然更高,因而该相析出消耗堆焊熔体更多的硼原子,促使 $Fe_2B$ 相的析出减少。

由图1可知, $M_3(B,C)$ 的特征衍射峰先稍增强,然后减弱,再增强,即随堆焊合金的钼含量提高起伏波动。显然,堆焊熔体钼组分不断加入,改变了相组织的种类及数量,尤其 $Mo_2FeB_2$ 相的析出提高及 $Fe_2B$ 相的减少,使参与 $M_3(B,C)$ 相的硼原子变化较大。

### 2.2 堆焊合金的组织

图2为堆焊合金的显微组织。对1、3、4、5、6#堆焊试样的微区进行EDS能谱分析,结果如表1所示。但EDS对B、C等轻原子的探测结果误差较大。

由图2可知,堆焊合金组织主要由四边形块状相、

胞状相及围绕胞状相四周的网状或枝状相组成。随堆焊合金的钼含量提高,首先在四边形块状间析出不同于一般硼合金的树枝状白色相,数量不断增多,部分呈块状分布,随后该白色块状不断增多,且尺寸增多。分析认为,该白色相与钼有关。与之相对应的是,灰色的四边形块状相数量不断减少,尺寸减小。

图2微区 $a_1$ 、 $c_1$ 、 $d_1$ 、 $e_1$ 、 $f_1$ 的EDS测试结果表明,轻元素含量较高,Mo的原子数分数低于1.5%,Ti、Si和Al含量均较低,根据图1结果,并结合其形态,可判断该四边形相为 $Fe_2B$ 相,但该相固溶了较低含量的Mo,即 $(Fe,Mo)_2B$ 。

图2微区 $a_2$ 、 $c_2$ 、 $d_2$ 、 $e_2$ 、 $f_2$ 的EDS测试结果表明,Mo的原子数分数低于0.9%,Ti含量低,而Si和Al含量均偏高,尤其Si含量最高,可至7%,而Si通常起固溶强化作用,主要分布于基体。鉴于探测区域呈胞状形态,根据图1结果,可知该区域为 $\alpha$ -Fe,含较高的轻元素,但EDS点扫描时,C、B等轻元素显示比重元素探测区域大,这些轻元素含量还与该微区四周的相组织种类有关。

图2微区 $a_3$ 、 $c_3$ 、 $d_3$ 、 $e_3$ 、 $f_3$ 的EDS测试结果表明,该区域的B含量明显比微区 $a_1$ 、 $c_1$ 、 $d_1$ 、 $e_1$ 、 $f_1$ ( $Fe_2B$ 相的B含量)高得多,且Mo的原子数分数从6.32%提至16.84%,根据图1结果,结合其显微组织中白色块状相<sup>[10-11]</sup>,可确认这些白色相为 $Mo_2FeB_2$ 相。微区 $a_3$ 的白色相呈树枝状,与其他试样的块状特征区别明显,表明其含有 $\alpha$ -Fe,因而Mo含量偏低,即为 $(\alpha$ -Fe+ $Mo_2FeB_2$ )共晶。

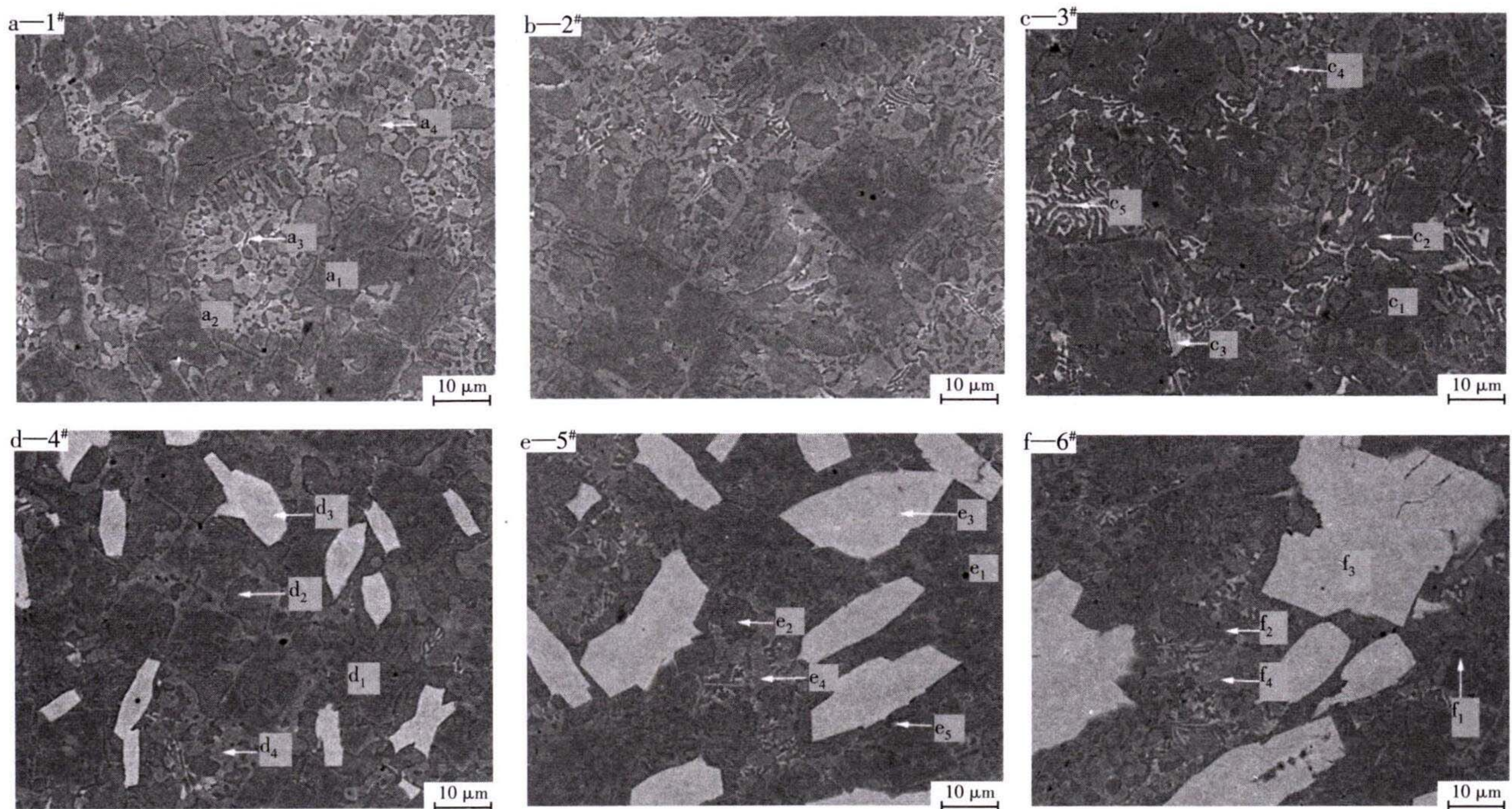


图2 堆焊合金的显微组织  
Fig.2 Microstructure of hardfacing alloys

表1 堆焊合金的微区化学成分

Table 1 Micro-area chemical composition of hardfacing alloys

试样	微区	a(Mo)/%	a(B)/%	a(C)/%	a(Ti)/%	a(Si)/%	a(Al)/%
1#	a <sub>1</sub>	0.72	17.66	26.93	0.28	0.80	0.47
	a <sub>2</sub>	0.66	18.07	25.55	0.16	7.08	1.02
	a <sub>3</sub>	6.32	32.91	28.05	0.20	3.04	0.22
	a <sub>4</sub>	2.35	15.18	31.06	0.33	0.97	0.82
	c <sub>1</sub>	1.13	19.95	27.99	0.28	1.03	0.81
3#	c <sub>2</sub>	0.44	15.44	27.89	0.10	4.89	0.52
	c <sub>3</sub>	16.03	24.83	33.47	0.61	0.39	—
	c <sub>4</sub>	2.07	19.52	28.91	0.10	0.74	0.63
	c <sub>5</sub>	8.70	35.55	31.08	0.29	1.00	0.38
	d <sub>1</sub>	0.66	20.40	26.95	0.25	0.60	0.74
4#	d <sub>2</sub>	0.89	14.09	27.99	0.74	6.91	1.01
	d <sub>3</sub>	16.28	29.22	32.09	0.76	0.27	—
	d <sub>4</sub>	2.31	14.15	31.96	0.24	1.00	0.67
	e <sub>1</sub>	1.05	21.43	27.98	0.18	1.00	0.55
	e <sub>2</sub>	0.57	14.49	27.43	0.17	5.51	1.03
5#	e <sub>3</sub>	16.51	32.95	31.72	0.53	0.37	—
	e <sub>4</sub>	2.30	18.93	29.63	0.16	1.23	0.83
	e <sub>5</sub>	9.04	28.39	41.69	10.92	0.80	0.24
	f <sub>1</sub>	0.76	20.48	26.98	0.31	0.55	0.45
	f <sub>2</sub>	0.65	21.33	27.18	0.07	0.86	0.18
6#	f <sub>3</sub>	16.84	30.60	34.14	0.46	0.59	0.28
	f <sub>4</sub>	2.62	14.81	31.53	0.25	0.96	0.62

图2微区a<sub>4</sub>、c<sub>4</sub>、d<sub>4</sub>、e<sub>4</sub>、f<sub>4</sub>的EDS测试结果表明,其轻元素含量较高,Mo的原子数分数均约为2%,Si和Al含量中等,根据图1结果,并结合其凝固形态,可判断这些网状或枝状晶主要为M<sub>3</sub>(B,C),相间具有一定数量的 $\alpha$ -Fe,因而其Si、Al含量中等,即为( $\alpha$ -Fe+M<sub>3</sub>(B,C))共晶。同时,鉴于上述结果显示 $\alpha$ -Fe所含Mo较低,可知M实际上包含Fe、Mo等相,即其中固溶了一定数量的Mo,在背散射条件下明显偏白。

图2微区c<sub>5</sub>白色枝状相的EDS结果与微区a<sub>3</sub>相似,可知这些区域为( $\alpha$ -Fe+Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>)共晶,白色树枝相为Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>共晶。由这两者的分布区域看,为堆焊熔体最后凝固结晶的区域,与共晶结晶形态一致。由上述结果可知,当堆焊合金的Mo含量不足以析出块状Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>相时,而初生Fe<sub>2</sub>B相能固溶的Mo有限,多余的Mo被排挤到最后凝固的区域,即形成( $\alpha$ -Fe+Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>)共晶。该相呈树枝状,对合金的耐磨性贡献不大。

同时,图2灰色点状微区e<sub>5</sub>的EDS能谱结果显示,碳含量明显高于其他区域,且Mo、Ti含量较高,根据图1结果,可知该微区为(Mo,Ti)C,形态与原位析出的TiC相似,其中Mo的原子数分数约为50%。文献极少出现该相,在本研究的试样析出数量极少,有待进一步

研究。

### 2.3 堆焊合金的硬度及耐磨性

图3为堆焊合金相组织的显微硬度。可以看出,板条相的显微硬度为1 206.4HV<sub>0.2</sub>~1 325.7HV<sub>0.2</sub>,随钼含量增加,整体上略微增加;块体相的显微硬度为1 416.9HV<sub>0.2</sub>~1 517.5HV<sub>0.2</sub>,也是整体呈增加趋势。根据相组织的凝固特点及其量,可推测板条相和块体相为同一相的不同侧面,即Fe<sub>2</sub>B,该相实际呈长方体。

图3显示4~6#堆焊试样的方块相显微硬度为1 560.9HV<sub>0.2</sub>~1 781.1HV<sub>0.2</sub>,与图2d~f的白色方块相对应,随堆焊合金的Mo含量提高,其显微硬度明显增加,可由此可知方块相为Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>相。该相的显微硬度明显高于传统堆焊硼合金所含Fe<sub>2</sub>B相的显微硬度,可作为一种主耐磨相,与Fe<sub>2</sub>B相配合,形成双主耐磨相强化的堆焊合金,利于提高其耐磨性。

图4为堆焊合金层横截面的显微硬度分布。可知,堆焊母材的显微硬度约为200HV<sub>0.2</sub>。距离母材越远,堆焊第一层显微硬度急剧增加,但到第二层后,堆焊合金显微硬度起伏较大;且随Mo含量增加,起伏程度更明显。

1、3、4、5、6#第一层的平均显微硬度为913.8HV<sub>0.2</sub>、867.9HV<sub>0.2</sub>、849.8HV<sub>0.2</sub>、814.8HV<sub>0.2</sub>、812.0HV<sub>0.2</sub>,整体显微硬度约为810HV<sub>0.2</sub>~910HV<sub>0.2</sub>,随Mo含量提高,堆焊合金第一层显微硬度下降,这是由块体Fe<sub>2</sub>B相细化

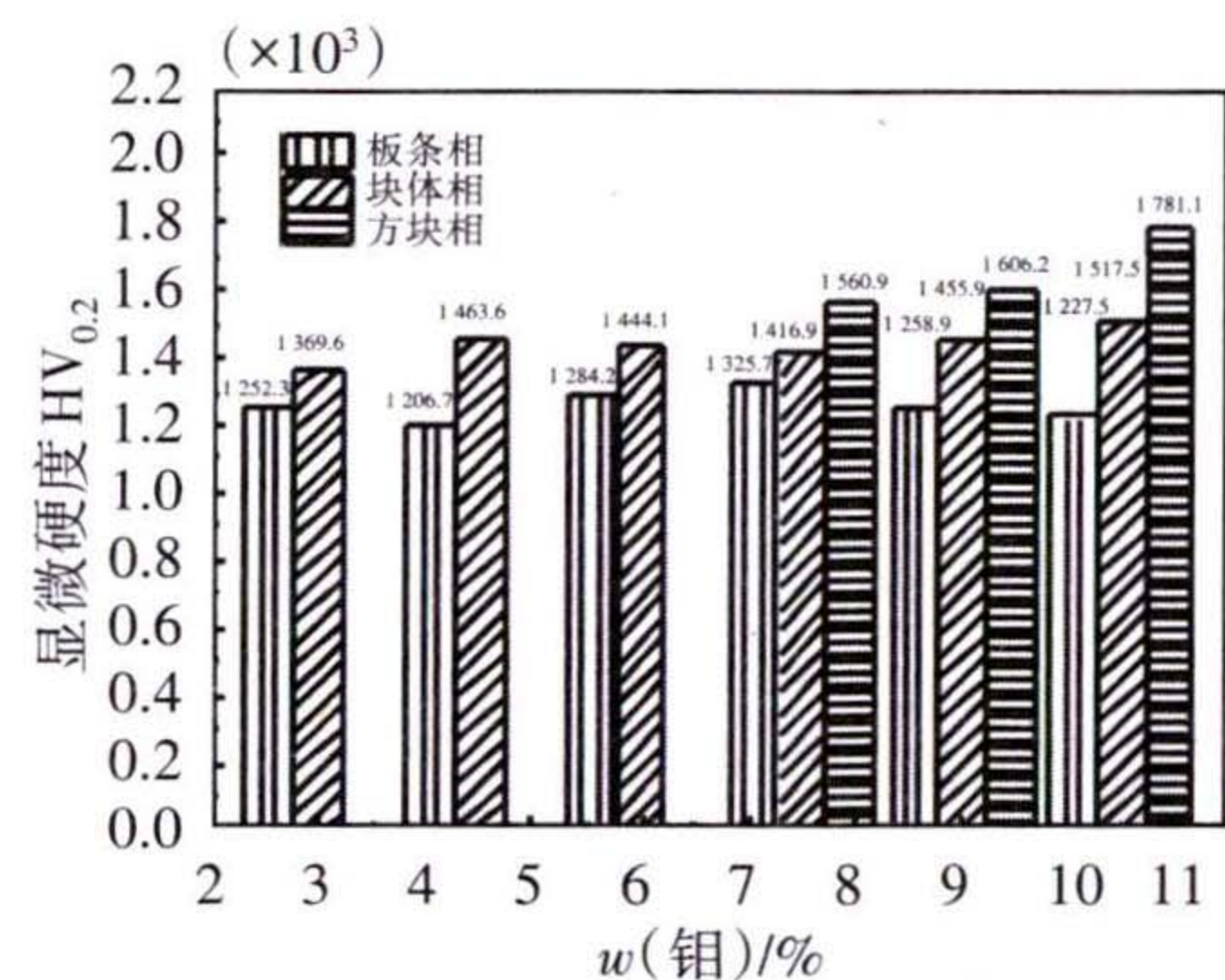


图3 堆焊合金相组织的显微硬度

Fig.3 Phase micro-hardness of hardfacing alloys

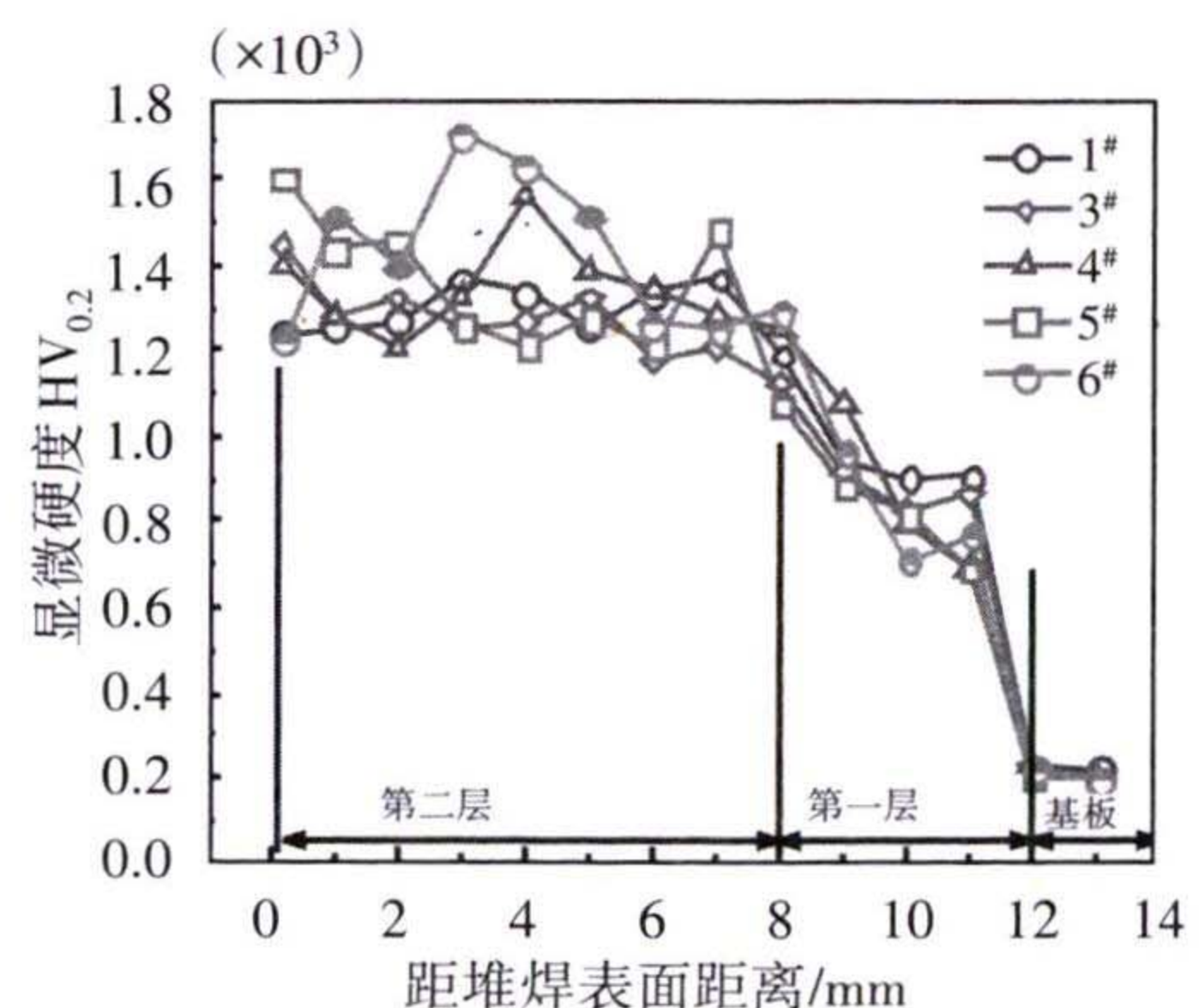


图4 堆焊合金层横截面的显微硬度

Fig.4 Micro-hardness in cross section of hardfacing alloy layers

所致。

堆焊合金第二层的显微硬度均值大于1 200HV<sub>0.2</sub>,达到陶瓷涂层的水准。尤其5、6#的显微硬度较1、3#明显偏高,这主要由于Mo的质量分数为7.5%时,堆焊合金层析出一定数量的方块Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>相,其硬度高达1 781HV<sub>0.2</sub>,作为耐磨骨架,有利于提高合金耐磨性,这明显高于现有高硼合金M<sub>2</sub>B相的显微硬度。

图5为Mo含量对堆焊合金宏观硬度和磨损失质量的影响曲线。可知,随Mo含量增加,堆焊合金宏观硬度先提高后减小,而磨损失质量先减后增。当Mo的质量分数为9%时,硬度最高,磨损失质量从1#试样的0.030 4 g降至5#试样的0.006 5 g,耐磨性是1#试样的4.68倍,即净增加3.68倍,这表明该堆焊合金的耐磨性显著改善。

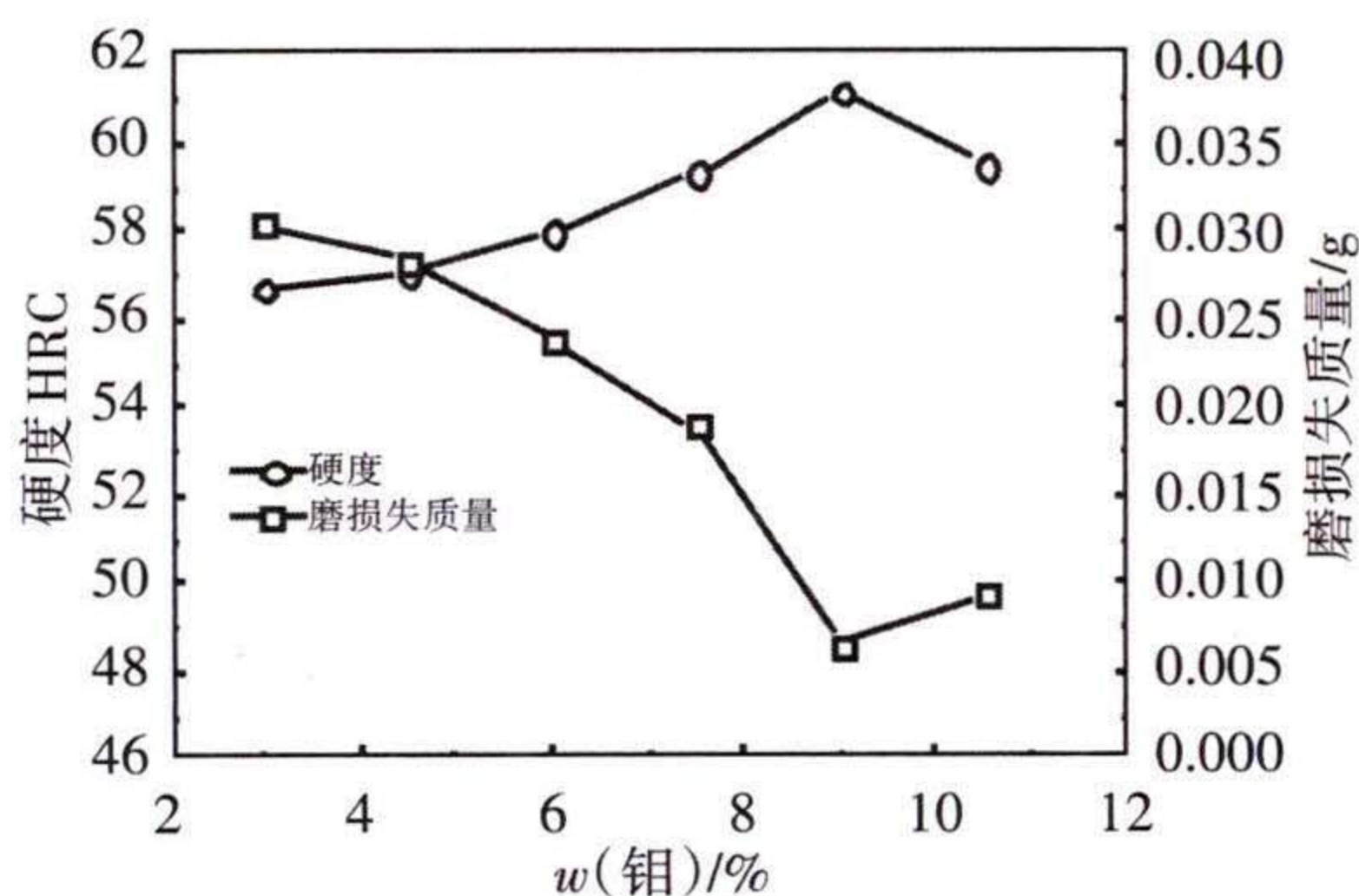


图5 钼含量对堆焊合金硬度及磨损失质量的影响

Fig.5 Effects of molybdenum content on bulk hardness and wear mass loss of hardfacing alloys

由图2e可知,白色方块Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>相的数量较多,且分布较均匀,有利于抵抗磨粒的楔入,获得高耐磨性。6#试样的宏观硬度和耐磨性均下降,尽管图2f显示Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>相更大,但过大的Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>相表面出现裂纹,说明其内应力随尺寸增大累积较多,使其开裂,在外加磨粒的碾压下,裂纹扩张导致剥落性开裂,因而磨损失质量下降。这说明Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>相尺寸对堆焊合金的耐磨性至关重要。

### 3 结论

1) Fe-Mo-B-C系堆焊合金的基体为铁素体( $\alpha$ -Fe),硬质相包含Fe<sub>2</sub>B、Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>、M<sub>3</sub>(B,C)等相。随堆焊合金的Mo含量提高,Fe<sub>2</sub>B相的体积分数降低,相数量明显提高,并出现(Mo,Ti)C相,形成由Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>和Fe<sub>2</sub>B双相强化的耐磨合金。

2) 随Mo含量的增加,Fe-Mo-B-C系堆焊合金的FeMo<sub>2</sub>B<sub>2</sub>相从( $\alpha$ -Fe+Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>)共晶树枝状形态逐渐向块状、方块状初生相转变,尺寸增加,体积分数越来越高。使堆焊合金层的显微硬度明显提升,可至

1 200HV<sub>0.2</sub>以上。

3) 随Mo含量增加,Fe-Mo-B-C系堆焊合金宏观硬度先提高后减小,而磨损失质量先减后增。当堆焊合金钼的质量分数为9%时,硬度最高,耐磨性最佳。Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>相尺寸对其耐磨性至关重要。

### 4 参考文献

- [1] EROGLU M. Boride coatings on steel using shielded metal arc welding electrode: Microstructure and hardness [J]. Surface and Coatings Technology, 2009, 203(16): 2229-2235.
- [2] ENGIN Kocaman, BÜLENT Kılınc, ŞADUMAN Şen, et al. In-situ TiB<sub>2</sub> and Fe<sub>2</sub>Ti intermetallic assisted hard coatings by Fe-Ti-B based hardfacing electrodes [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 900: 163478.
- [3] GUO Changqing, KELLY P M. Boron solubility in Fe-Cr-B cast irons [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 352: 40-45.
- [4] HUANG Z, XING J, GUO C. Improving fracture toughness and hardness of Fe<sub>2</sub>B in high boron white cast iron by chromium addition [J]. Materials and Design, 2010, 31: 3084-3089.
- [5] JIAN Yongxin, NING Haiyue, HUANG Zhifu, et al. Three-body abrasive wear behaviors and mechanism analysis of Fe-B-C cast alloys with various Mn contents [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 14: 1301-1311.
- [6] JIAN Yongxin, HUANG Zhifu, XING Jiandong, et al. Effects of chromium additions on the three-body abrasive wear behavior of Fe-3.0 wt% B alloy [J]. Wear, 2017, 378-379: 165-173.
- [7] 马秀良, 胡肖兵. 高温合金中硼化物精细结构的高空间分辨电子显微学研究 [J]. 金属学报, 2018, 54(11): 1503-1524. MA Xiuliang, HU Xiaobing. High-resolution transmission electron microscopic study of various borides precipitated in superalloys [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(11): 1503-1524. (in Chinese)
- [8] LIANG Ye, YAN Wei, SHI Xianbo, et al. Study on W-rich M<sub>3</sub>B<sub>2</sub> borides in a 9Cr3W3CoB heat-resistant steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10: 594-604.
- [9] JIN Jun, SUN Junsheng, WANG Guangle. Effect of Mo content on microstructure and wear resistance of Mo-Fe-B claddings [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 81: 233-241.
- [10] 李子豪, 潘应君, 柯德庆, 等. 堆焊Mo-Cr-Fe-B合金覆层的组织及性能研究 [J]. 武汉科技大学学报, 2018, 41(4): 252-256. LI Zihao, PAN Yingjun, KE Deqing, et al. Microstructure and properties of Mo-Cr-Fe-B alloy coating by surfacing [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2018, 41(4): 252-256. (in Chinese)
- [11] IVANOV M B, VERSHININA T N, IVANISENKO V V. The effect of composition and microstructure on hardness and

# 玻璃纤维增强复合材料-钢组合桁架梁的力学性能

苗璐璐<sup>1</sup>, 屈青山<sup>2</sup>

(1. 洛阳职业技术学院 信息技术与城建学院, 河南 洛阳 471000; 2. 黄淮学院 建筑工程学院, 河南 驻马店 463000)

**摘要** 为分析玻璃纤维增强复合材料-钢组合桁架梁的力学性能,以GFRP和Q345钢为原料,制备由上、下弦杆、斜腹杆及上、下横联组成的4种不同方案的GFRP-钢组合桁架梁构件(方案1~4)。用Abaqus构建不同方案GFRP-钢组合桁架梁的有限元模型,通过应力云图分析其应力变化,通过均布堆载加载方式进行构件加载试验,分析GFRP-钢组合桁架梁构件力学性能。结果表明:基础载荷下方案4桁架梁变形最大、方案3桁架梁变形最小;4.14 kPa载荷下,方案3的桁架梁上、下弦杆的最大拉、压应力最小,不易变形;方案3跨中挠度、上、下弦杆应变、GFRP侧和钢侧的挠度在4种方案中最小,几乎不受温度、湿度等影响;综上可知,以上、下弦杆和腹杆为钢,上、下横联为GFRP结构的钢组合桁架梁力学性能最佳。

**关键词** GFRP-钢组合;桁架梁;力学性能;有限元模型;上、下弦杆;应力云图

中图分类号 TU311

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2023)01-0068-06

DOI:10.14024/j.cnki.1004-244x.20230104.002

## Mechanical properties of glass fiber reinforced composite steel composite truss beam

MIAO Lulu<sup>1</sup>, QU Qingshan<sup>2</sup>

(1. School of Information Technology and Urban Construction, Luoyang Polytechnic, Luoyang 471000, China;

2. Institute of Architectural Engineering, Huanghuai University, Zhumadian 463000, China)

**Abstract** In order to analyze the mechanical properties of glass fiber reinforced composite steel composite truss beam, GFRP steel composite truss beam members (schemes 1-4) consisting of upper and lower chords, diagonal webs and upper and lower transverse connections were prepared with GFRP and Q345 steel as raw materials. Abaqus was used to build finite element models of GFRP steel composite truss beams in different schemes, analyze their stress changes through stress nephogram, and conduct member loading tests through uniformly distributed surcharge loading to analyze the mechanical properties of GFRP steel composite truss beams. The results show that the deformation of truss beam in scheme 4 is the largest and that in scheme 3 is the smallest under basic load. Under the load of 4.14 kPa, the maximum tensile and compressive stress of the upper and lower chords of the truss beam are the lowest in scheme 3, which is not easy to deform. The mid span deflection, upper and lower chord strains, GFRP side and steel side deflections of scheme 3 are the smallest among the four schemes, and are almost not affected by temperature and humidity. In conclusion, the steel composite truss beam with the upper and lower chords and webs of steel and the upper and lower transverse connections of GFRP structure has the best mechanical performance.

**Keywords** GFRP-steel combination; truss beam; mechanical properties; finite element model; upper and lower chords; stress nephogram

玻璃纤维增强复合材料(glass fiber reinforced polymer, GFRP)桁架梁,是一种以玻璃纤维复合增强材料制成的杆件,可代替传统桁架梁杆件<sup>[1]</sup>。与传统钢材或混凝土材料比,GFRP具有轻质、高强、耐腐蚀、

抗疲劳等优点,可满足桥梁工程耐久性、快速施工等要求。GFRP型材属于各向异性材料,在桁架梁的轴向受力杆件中,可充分发挥材料的高纤维方向抗拉强度高的优势,且其抗压强度也能满足要求<sup>[2]</sup>。因此,这种

收稿日期:2022-11-22;修回日期:2022-12-13

基金项目:河南省重点研发与推广专项(222102320258);河南省高等学校重点科研项目(20B480004);

洛阳职业技术学院青年教师科研培育基金项目(QNPY201913)

第一作者:苗璐璐,男,硕士,高级工程师;主要从事建筑材料应用、工程设计与施工、防灾减灾与防护研究。E-mail:miaolulu101@163.com。

toughness of Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub> based cermets [J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 763: 138117.

[12] WU Hao, ZHENG Yong, ZHANG Jiajie, et al. Influence of Cr

and W addition on microstructure and mechanical properties of multi-step sintered Mo<sub>2</sub>FeB<sub>2</sub>-based cermets [J]. Ceramics International, 2020, 46(8): 10963-10970.