

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20230906001

TiC 对亚共晶高铬铸铁堆焊合金组织及 磨损性能的影响

马笑晗¹ 贺定勇^{1,2} 秦志恒¹ 王国红¹ 许一³ 于金满³

(1. 北京工业大学材料科学与工程学院 北京 100124;

2. 北京市生态环境材料及其评价工程技术研究中心 北京 100124;

3. 威海天润金钰新材料科技有限公司 威海 264400)

摘要: 农机触土部件在作业过程中会受到土壤中沙石、杂草、植物的秸秆、根茬及其他有机质物体的磨损和冲击, 极易发生失效报废。为解决农机触土部件耐磨性差、使用寿命短等问题, 采用药芯焊丝电弧焊的方法在 Q235 钢基体上进行堆焊, 制备含 TiC 的亚共晶高铬铸铁堆焊耐磨层。通过金相显微镜、洛氏硬度计、X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM)、能谱仪 (EDS)、MLS-225 型湿式橡胶轮磨粒磨损试验机和自制叶轮-滚筒冲击磨损试验装置, 分析原位合成 TiC 和粉芯中直接添加 TiC 两种方法对亚共晶高铬铸铁堆焊合金微观组织、硬度、抗磨粒磨损性能及抗冲击磨损性能的影响。结果表明: 耐磨堆焊合金主要由 γ -Fe、 α -Fe、 M_7C_3 和 TiC 组成, TiC 的加入细化了组织中的先析出奥氏体, 使得堆焊层宏观硬度增加, 磨粒磨损后共晶碳化物的开裂和剥落现象减少, 冲击磨损表面材料的脱落减少, 磨损失重降低。TiC 可以显著提高堆焊合金的抗磨粒磨损性能和抗冲击磨损性能, 其中原位合成方式添加 TiC 的堆焊层性能更加优异, 可为 TiC 在农机触土部件耐磨涂层中的研究和应用提供参考。

关键词: 药芯焊丝; 亚共晶高铬铸铁; 磨粒磨损; 冲击磨损; TiC

中图分类号: TG455

Effects of TiC on the Microstructure and Wear Resistance of Hypoeutectic Fe-Cr-C Hardfacing Alloy

MA Xiaohan¹ HE Dingyong^{1,2} QIN Zhiheng¹ WANG Guohong¹
XU Yi³ YU Jinman³

(1. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Engineering Research Center of Eco-materials and LCA, Beijing 100124, China;

3. Weihai Tianrun Jinyu New Material Technical Co., Ltd., Weihai 264400, China)

Abstract: Soil-engaging components of agricultural machinery are susceptible to physical degradation due to the long-term wear from sand, gravel, weeds, and plant stalks. In order to improve their wear resistance and prolong the service life, a hardfacing alloy of hypoeutectic high chromium cast iron containing TiC was made on the Q235 steel substrate via the flux-cored arc welding method. Effects of in-situ precipitation of TiC and direct addition of TiC to the powder core on the wear resistance of hardfacing alloy were studied by the MLS-225 wet rubber wheel wear tester and self-made impeller-roller impact-abrasion testing machine. In addition, after tests, the samples were characterized using optical microscope (OM), Rockwell hardness tester, X-ray diffraction (XRD),

基金项目: 泰山产业领军人才项目 (Tscx202306085)。

Fund: Taishan Industry Leading Talent Project (Tscx202306085).

收稿日期: 2023-09-06; 修改日期: 2024-03-12; 接受日期: 2024-04-17; 上线日期: 2024-07-22。

Received September 6, 2023; Revised March 12, 2024; Accepted in revised form April 17, 2024; Available online July 22, 2024.

引用格式: 马笑晗, 贺定勇, 秦志恒, 等. TiC 对亚共晶高铬铸铁堆焊合金组织及磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2024, 37(4): 142-150.

Citation format: MA Xiaohan, HE Dingyong, QIN Zhiheng, et al. Effects of TiC on the microstructure and wear resistance of hypoeutectic Fe-Cr-C hardfacing alloy[J]. China Surface Engineering, 2024, 37(4): 142-150.

scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive spectroscopy (EDS). The results showed that the hardfacing alloy of hypoeutectic high chromium cast iron mainly consists of γ -Fe, α -Fe, M_7C_3 , and TiC, TiC can act as the heterogeneous nucleation core for precipitates austenite first in the organization, increasing their nucleation rate and preventing their growth during solidification, resulting in the refinement of the austenite organization. The TiC introduced by in-situ synthesis has a smaller size and a more diffusely homogeneous distribution than that introduced by direct addition to the powder core. In addition, TiC increased the content of eutectic carbides in the organization and improved the hardness of the hardfacing alloy. The wear forms of all three hardfacing alloys after the abrasive wear test are dominated by micro-cutting, and the grooves on the wear surface of the hardfacing alloy without added TiC are wider and deeper, in the hardfacing alloys with added TiC, the diffusely distributed TiC increased the resistance of abrasive particles cutting, made the grooves shallower, reduced the cracking and spalling of eutectic carbides during the wear process, significantly improved the resistance of hardfacing alloys to abrasive wear. The resistance to abrasive wear performance of TiC hardfacing alloy introduced by in-situ synthesis was 5.2 times higher than that of hardfacing alloy without TiC addition. The surfaces of three kinds of hardfacing alloys after the impact-abrasion test have similar characteristics, due to the periodic impact of abrasive particles leading to hardfacing alloys plastic deformation and work-hardening so that their strength and hardness rose, plasticity and toughness declined, with the continued impact of abrasive particles, cracking occurred in the material and the cracks continue to extend within the material causing it to spalled. The hardness of added TiC hardfacing alloys was higher, can more effectively resist the embedding of abrasive particles, and reduce the generation and expansion of cracks due to the abrasive particles impact on the surface of the material generated by the plastic deformation, the resistance to impact-abrasion performance is more excellent. The resistance to impact-abrasion of TiC hardfacing alloy introduced by in-situ synthesis was 1.2 times higher than that of hardfacing alloy without TiC addition. The resistance to abrasive wear and impact-abrasion of the hardfacing alloy with in-situ precipitation of TiC is better than that of the hardfacing alloy with the direct addition of TiC to the powder core. TiC significantly improved the resistance to abrasive wear performance and impact-abrasion performance of the hardfacing alloy, in which the performance of the hardfacing alloy with in-situ precipitation of TiC is more excellent, which can provide a reference for the research and application of TiC in wear-resistant coatings for Soil-engaging components of agricultural machinery.

Keywords: flux-cored welding wire; hypoeutectic high chromium cast iron; abrasive wear; impact-abrasion; TiC

0 前言

农机触土部件因其复杂及恶劣的工况消耗量巨大^[1-2], 其中因磨损而导致的部件报废占比高达80%^[3]。因此, 提高农机关键部件的耐磨性对于提高农机作业效率、节约成本具有重要意义。

堆焊作为一种重要的表面强化处理技术, 具有加工设备简单、操作方便且生产成本低廉等一系列优点。其中, 高铬铸铁因其优异的耐磨性被广泛应用在矿山、冶金、农机等领域^[4]。然而对于农机触土部件的复杂工况而言, 材料不仅须保持较高耐磨性还须兼备一定的抗冲击磨损性能^[5], 过共晶高铬铸铁虽然具有良好的耐磨性, 但其初生碳化物严重割裂基体, 使得合金的韧性下降, 严重时甚至产生开裂剥落的现象^[6]。高铬铸铁的组织 and 力学性能可以通过合金设计和微观结构控制技术得到改善^[7-8]。目前, 合金元素对高铬铸铁组织及性能的影响已经得到广泛研究^[9-10]。LIU 等^[11]研究了 Nb 对过共晶 Fe-Cr-C 合金组织性能的影响, 结果表明, NbC

可以作为初生 M_7C_3 碳化物异质形核的核心, 因此添加 Nb 的过共晶 Fe-Cr-C 堆焊合金中初生 M_7C_3 碳化物的尺寸远小于不添加 Nb 的堆焊合金中初生 M_7C_3 碳化物的尺寸。同时, 由于细化的初级 M_7C_3 碳化物减少了过共晶 Fe-Cr-C 堆焊合金在磨损试验中的裂纹数量, 从而提高了过共晶 Fe-Cr-C 堆焊合金的耐磨性。齐晓文等^[12]采用手工电弧焊的方法在 Q235 钢板上制备高铬铸铁堆焊层, 分析了 V 对堆焊合金微观组织的影响, 结果表明, 组织中的初级碳化物呈块状六边形, 共晶和次级碳化物分别为长杆状和细球状, 3 种碳化物均为 M_7C_3 类型。随着 V 含量的增加, 堆焊合金的显微组织得到了明显的细化, 大块初级碳化物含量减少, 共晶碳化物含量有所增加。通过热动力学计算和 DSC 曲线的分析, VC 在堆焊金属凝固后以二次碳化物形式从基体中析出。上述方法均在不同程度上提高了堆焊层的耐磨性, 但对于材料韧性的提升相对有限, 并存在成本较高和工艺复杂等问题。

与过共晶高铬铸铁相比, 亚共晶高铬铸铁的先析出相为奥氏体, 碳化物和基体组织共同生长, 多

为断续网状结构和条状结构存在,因此具有更好的韧性^[13]。但是由于组织中碳化物的减少,其耐磨性弱于过共晶高铬铸铁。采用陶瓷颗粒与金属材料制备复合材料的方法可以显著提高材料的耐磨性^[14],其中,Ti作为强碳化物元素,价格低廉,在合金中主要形成碳化物,基体中固溶量小,对基体不会产生较大的固溶强化作用,且TiC具有高硬度、高熔点、不易分解、对基体割裂性小和能够细化晶粒等一系列优点^[15-17],是一种提高耐磨性的理想材料^[18]。因此,本文通过制备药芯焊丝采用原位合成和在药芯焊丝粉芯中直接添加TiC颗粒(外添加)两种方法,研究TiC对亚共晶高铬铸铁堆焊合金微观组织和耐磨性的影响。

1 材料与方 法

堆焊用母材 Q235 钢板的尺寸为 140 mm×80 mm×10 mm,焊前用角磨机打磨清理后备用。自行研制了 3 种药芯焊丝,采用尺寸为 12 mm×0.3 mm 的 430 不锈钢带材,包裹主要由适当粒径的高碳铬铁、石墨、碳化钛和钛铁等粉末,经药芯焊丝成型机轧制和逐步拉拔减径为直径 1.6 mm 的药芯焊丝。采用 ABB-IR60 机械手和德国福尼斯 TPS5000 焊机在无气体的保护下接进行多层多道堆焊。堆焊工艺参数为:焊接电流:230~240 A;焊接电压:25~27 V;送丝速度:7.1 m/min;焊接速度:4 mm/s。堆焊 3 层时的堆焊合金层尺寸约为 130 mm×70 mm×9 mm。

用电火花线切割机和砂轮切割机制备 10 mm×10 mm×10 mm 的堆焊层金相试样和 57 mm×25 mm×15 mm、75 mm×25 mm×15 mm 的磨粒磨损和冲击磨损试样,样品避开起弧和收弧的区域。堆焊合金表面的化学成分采用德国 Bruker Q4 TASMEN 全谱直读光谱仪测定,其结果见表 1。

表 1 堆焊层化学成分(质量分数/wt.%)

Table 1 Chemical composition of hardfacing alloys (wt.%)

Element	C	Si	Mn	Cr	Ti	Fe
TiC free	2.3	1.2	1.1	16.5	0.2	Bal.
In-situ TiC	3.1	1.3	1.1	16.1	3.2	Bal.
TiC addition	3.2	1.2	1.0	16.1	3.3	Bal.

堆焊合金的金相试样经砂纸打磨和抛光后,采用三氯化铁盐酸溶液进行浸蚀,浸蚀时间为 5~10 s,并通过 GX51 光学显微镜进行拍照观察。

磨粒磨损试验采用 MLS-225 型湿式橡胶轮磨

粒磨损试验机,橡胶轮直径为 176 mm,硬度为 60(邵尔硬度),转速为 240 r/min,试验时加入 1 kg 水,1 500 g 40~70 目石英砂。试验载荷为 100 N,预磨转数为 4 000 r,精磨转数为 8 000 r。冲击磨损试验采用自制叶轮-滚筒装置,该装置由一个缓慢旋转的外筒和一个快速旋转的内轮组成,其结构如图 1 所示。试验时,桶内装入 800 g 粒径 10~20 mm 的花岗岩磨粒,在装置启动时,磨粒会以一定的速度撞击快速旋转的样品造成磨损。内筒转速为 600 r/min,外筒转速为 40 r/min,实验每进行 15 min 更换一次磨粒,共进行 60 min。每次磨损前用超声清洗仪对样品进行清洗,在精度为 0.1 mg 的天平上进行称重来计算其失重,并使用 Quanta 650 FEG 场发射扫描电子显微镜对其磨损表面和截面进行观察分析。

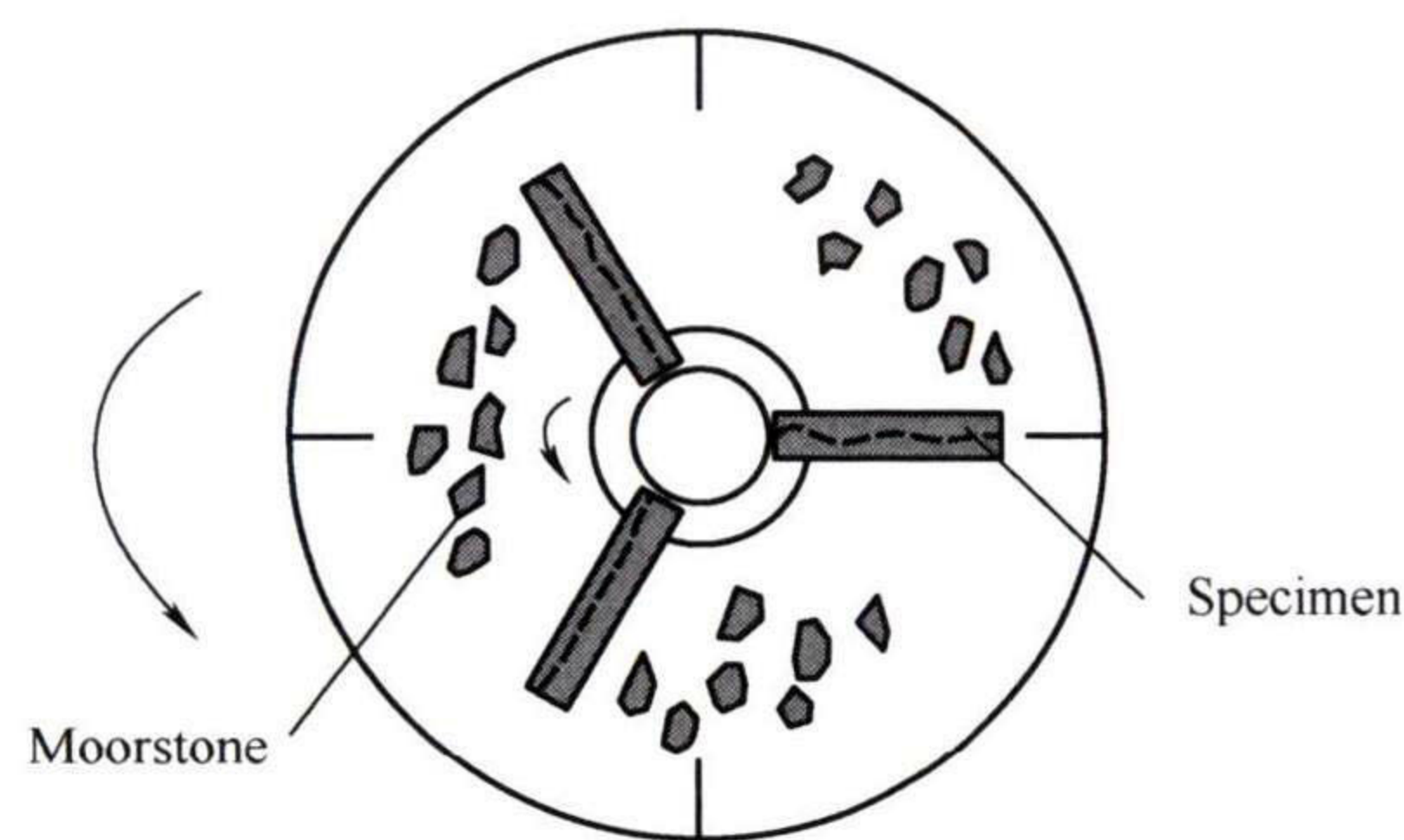


图 1 自制冲击磨损机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of self-made impact-abrasion machine

2 结果与分析

2.1 堆焊合金显微物相

图 2 为三种样品的 XRD 图谱,从图谱中得出,无 TiC 的堆焊层主要由 γ -Fe、 α -Fe、 M_7C_3 组成。与

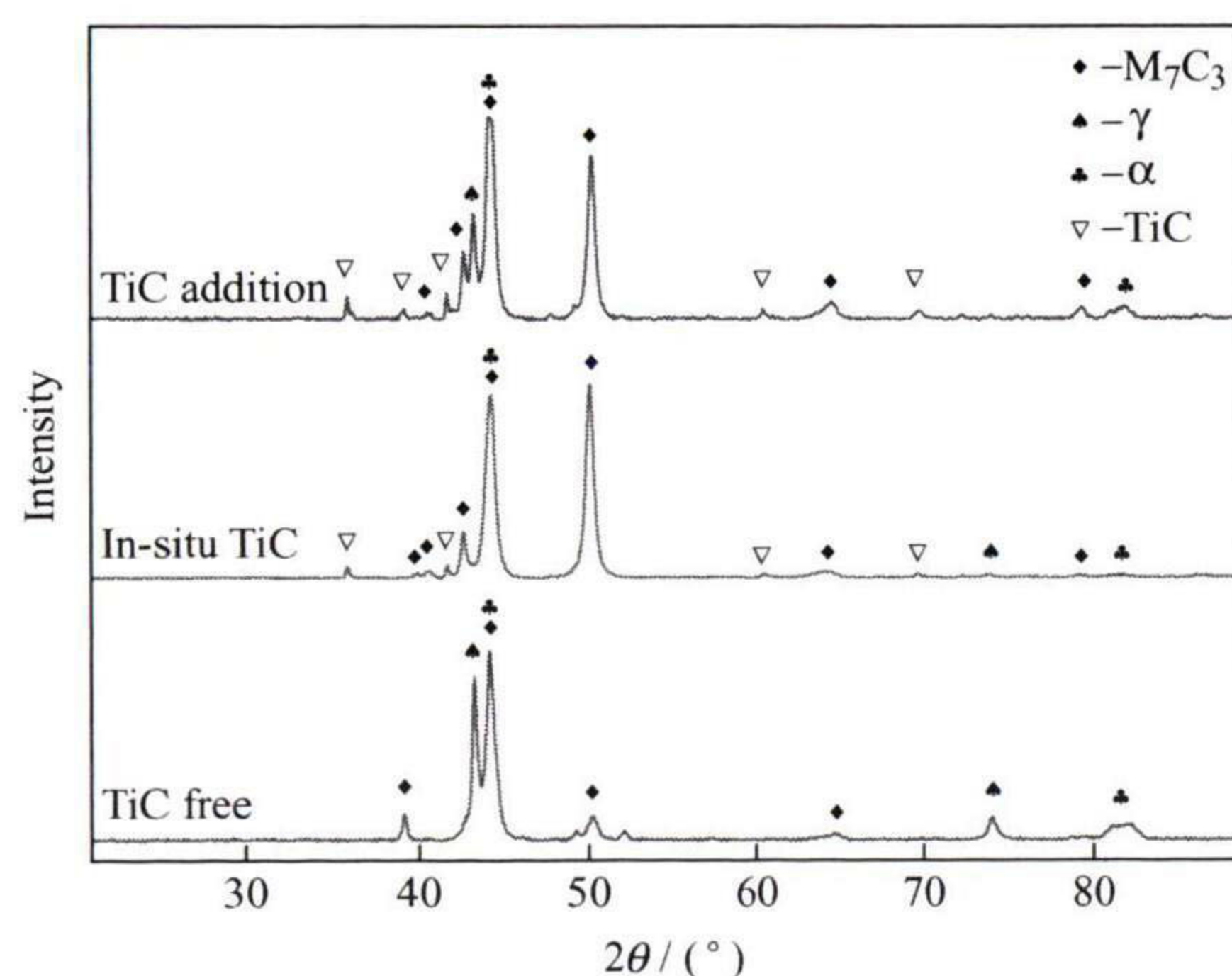


图 2 堆焊层 XRD 衍射图谱

Fig. 2 XRD pattern of hardfacing alloys

无 TiC 的堆焊层相比, 原位生成 TiC 的堆焊层中, γ -Fe 的特征衍射峰消失, M_7C_3 的特征衍射峰显著增加, 出现了 TiC 新相。而在外添加 TiC 的堆焊层中, γ -Fe 的特征衍射峰并未消失, 但与未添加 TiC 堆焊层相比其强度显著降低, 而 M_7C_3 的特征衍射峰显著增加, 其强度稍低于原位生成 TiC 的堆焊层中衍射峰的强度, 同时也出现了 TiC 新相。

2.2 堆焊合金硬度

通过洛氏硬度计对各堆焊合金进行硬度测试, 每个样品测量 10 次后取平均值, 其结果如图 3 所示。可以看到, 未添加 TiC 的堆焊层硬度为 54.1 HRC, 在添加 TiC 后, 堆焊层的硬度有所提升, 原位生成 TiC 的堆焊层硬度提高到 57.6 HRC, 外添加 TiC 的堆焊层硬度提高到 58.3 HRC。原因在于, TiC 硬度很高, 在采用原位合成和粉芯中添加的方式引入 TiC 后对基体起到第二相强化作用, 同时提高了堆焊层中 M_7C_3 的衍射峰强度, 组织中共晶碳化物的含量增多, 两者的共同作用使得堆焊合金的硬度提升。

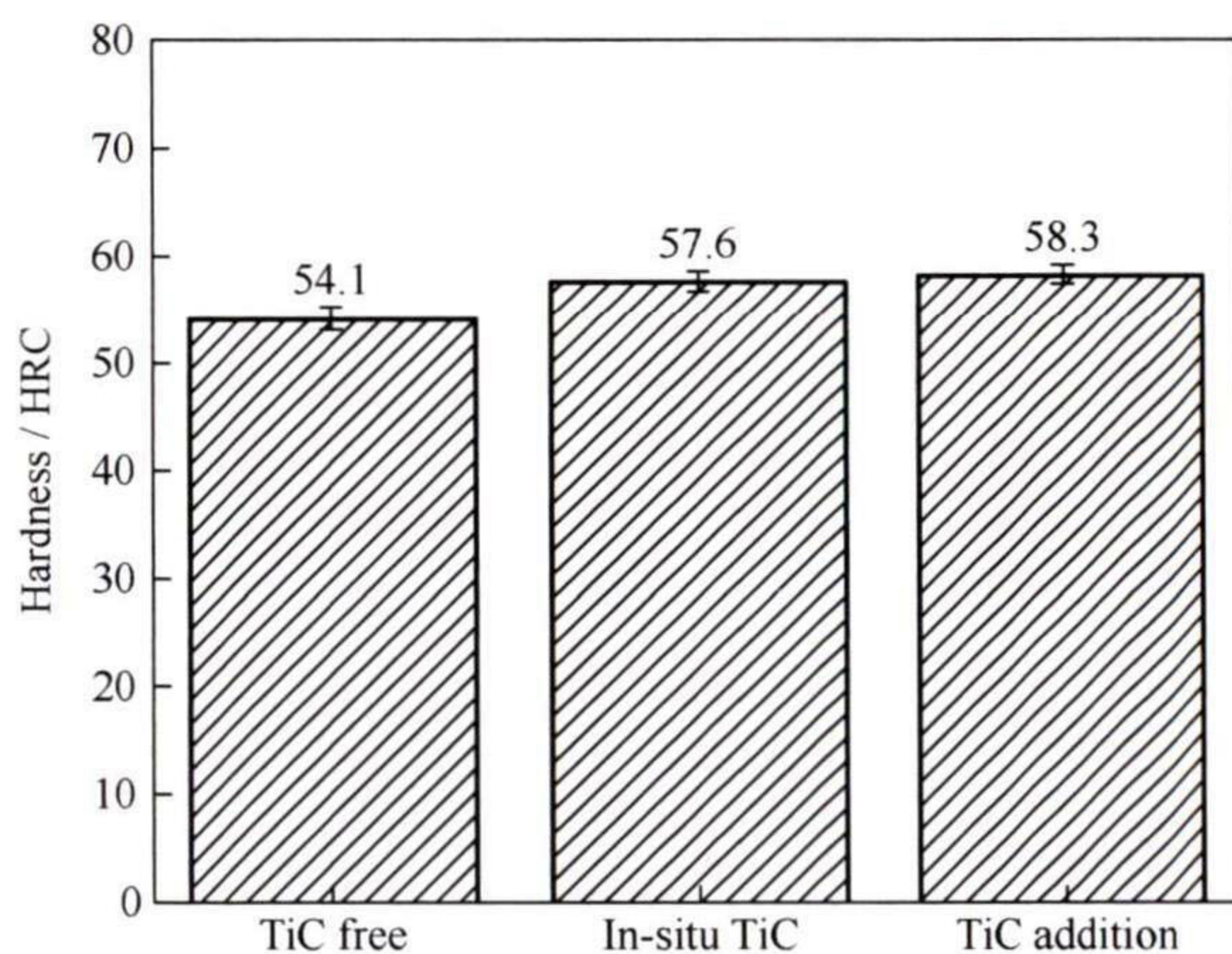


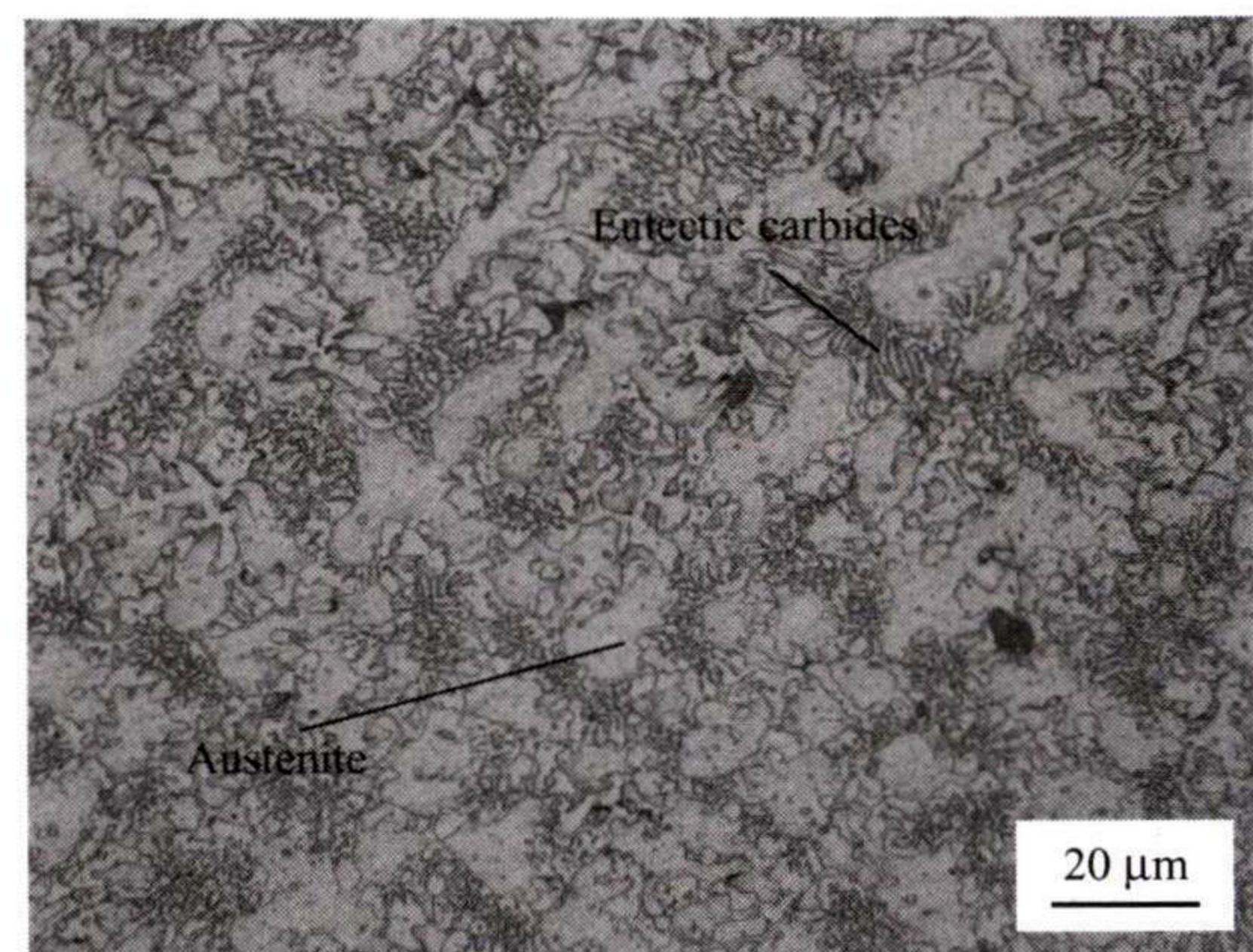
图 3 堆焊层宏观硬度

Fig. 3 Macroscopic hardness of hardfacing alloys

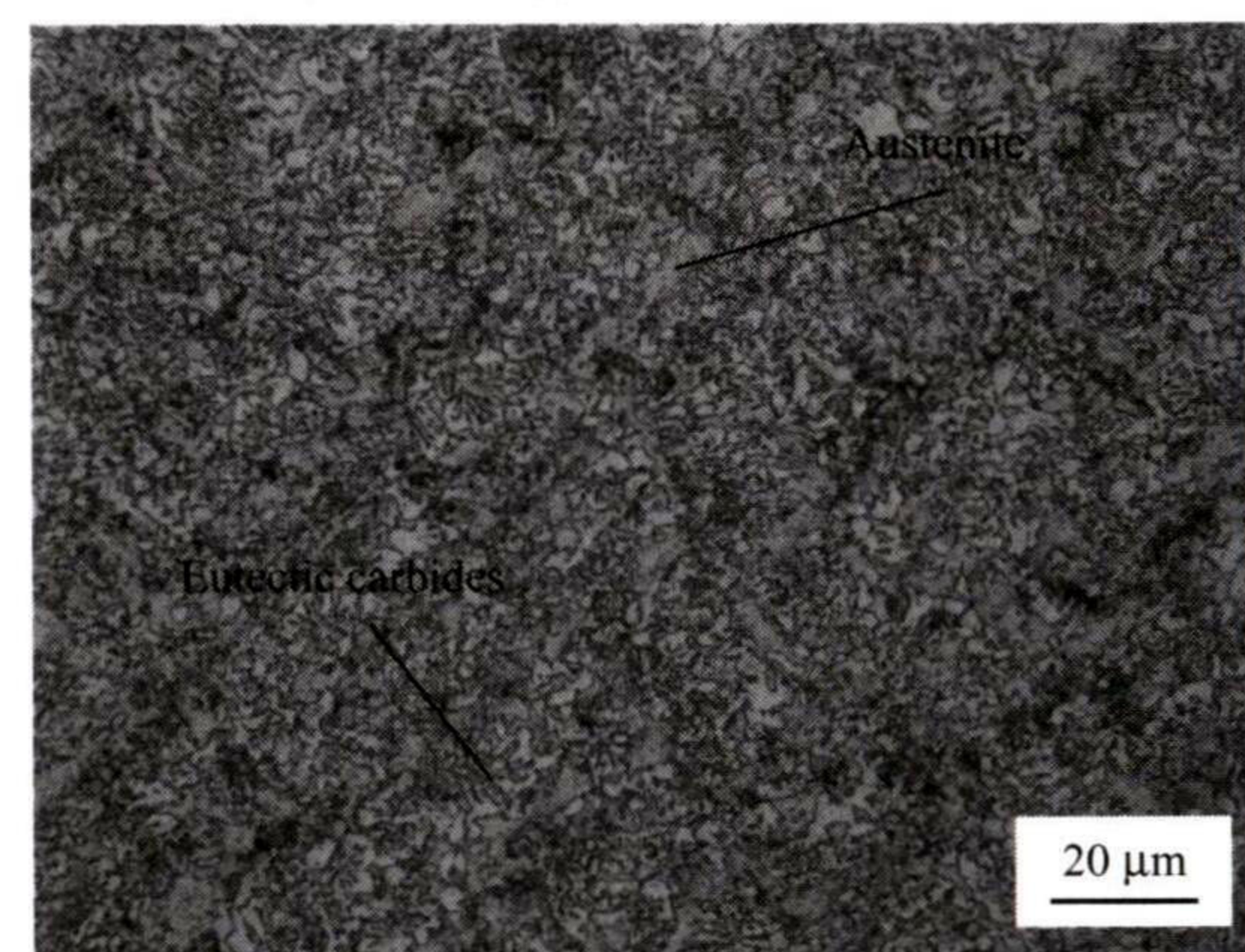
2.3 堆焊合金显微组织

3 种焊丝所制堆焊层的微观组织形貌如图 4 所示, 其中图 4a 为典型的亚共晶高铬铸铁组织, 它主要由短棒状的先析出奥氏体、马氏体和共晶碳化物组成, 图 4b 和图 4c 所示两种合金的组织同样由奥氏体、马氏体及共晶碳化物组成, 但 3 种堆焊合金中的奥氏体组织尺寸和分布存在明显不同。从图中可以看出, 无 TiC 的堆焊合金中的奥氏体组织较为粗大, 呈短棒状分布, 在添加 TiC 后, 组织中的初生奥氏体组织得到了明显的细化, 其中原位合成 TiC 堆焊合金中的奥氏体组织比粉芯中直接添加方式引入 TiC 堆焊合金中的奥氏体组织要更加细小。原因在于, 添加的 TiC 可以作为堆焊合金凝固过程中奥氏体的异质形核核心, 提高了形核率, 使得单

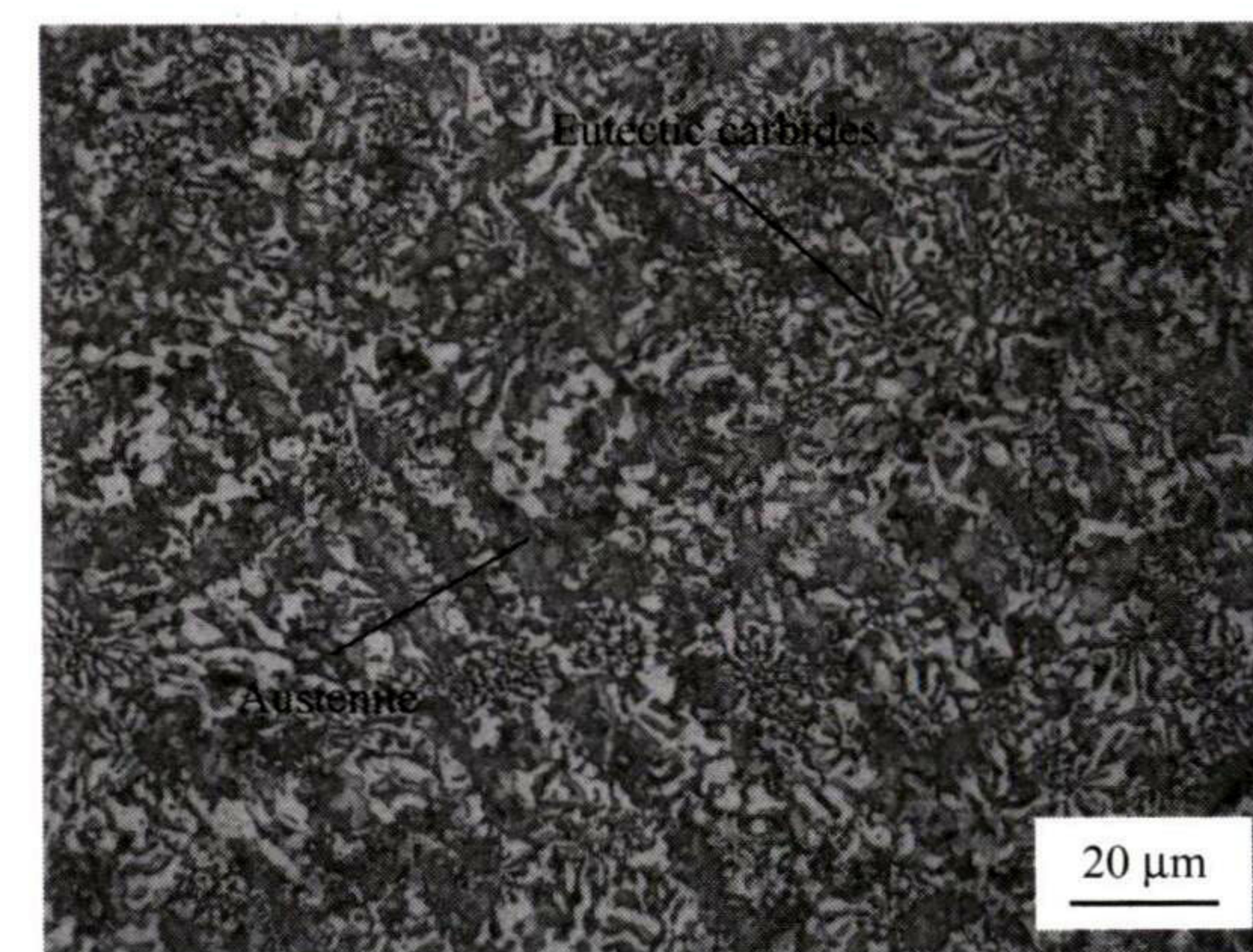
位面积内奥氏体晶粒的数量增加; 且弥散分布的 TiC 颗粒还能有效抑制奥氏体晶粒的长大, 在这两方面的共同作用下, 使得原奥氏体晶粒得到了细化^[19]。堆焊合金中的马氏体含量与共晶碳化物的析出密切相关。在合金冷却过程中, 先析出奥氏体的淬透性足以使其保持稳定, 只有共晶奥氏体在冷却过程中部分转变为马氏体。原因在于, 凝固过程中, 沿奥氏体生长的 M_7C_3 碳化物会从周围吸收碳, 使得奥氏体与碳化物界面区域的碳含量降低。这些奥氏体区域中碳的减少提高了 M_s 点的温度, 使得这些奥氏体区域在随后的冷却过程中转变为马氏体。



(a) TiC free



(b) In-situ TiC



(c) TiC addition

图 4 堆焊层微观组织

Fig. 4 Microstructure of hardfacing alloys

图 5 为两种添加 TiC 堆焊合金的背散射电子成像 (BSE), 从中可以看到黑色的 TiC 较为均匀地分布在先析出奥氏体附近, 其中, 通过原位合成形成的 TiC 比粉芯中直接添加形成的 TiC 尺寸更小, 分布更加均匀。其原因在于, Ti 是强碳化物形成元素, 在 Fe-Cr-C-Ti 合金系中 Ti 会优先于 Cr 和 C 反应生成 TiC, 而在粉芯中直接添加的部分 TiC 颗粒会在焊接过程中溶解后重新析出^[20], TiC 溶解后, 该区域内 Ti 元素和 C 元素的含量升高, 由于焊接的冷却速度较快, 当熔化后 Ti 元素和 C 元素未完全扩散时, 堆焊层组织内便会重新生成 TiC, 此情况利于 TiC 的形核长大, 因此粉芯中直接添加 TiC 的堆焊层中部分 TiC 颗粒的尺寸要大于通过原位合成方式引入的 TiC 尺寸。

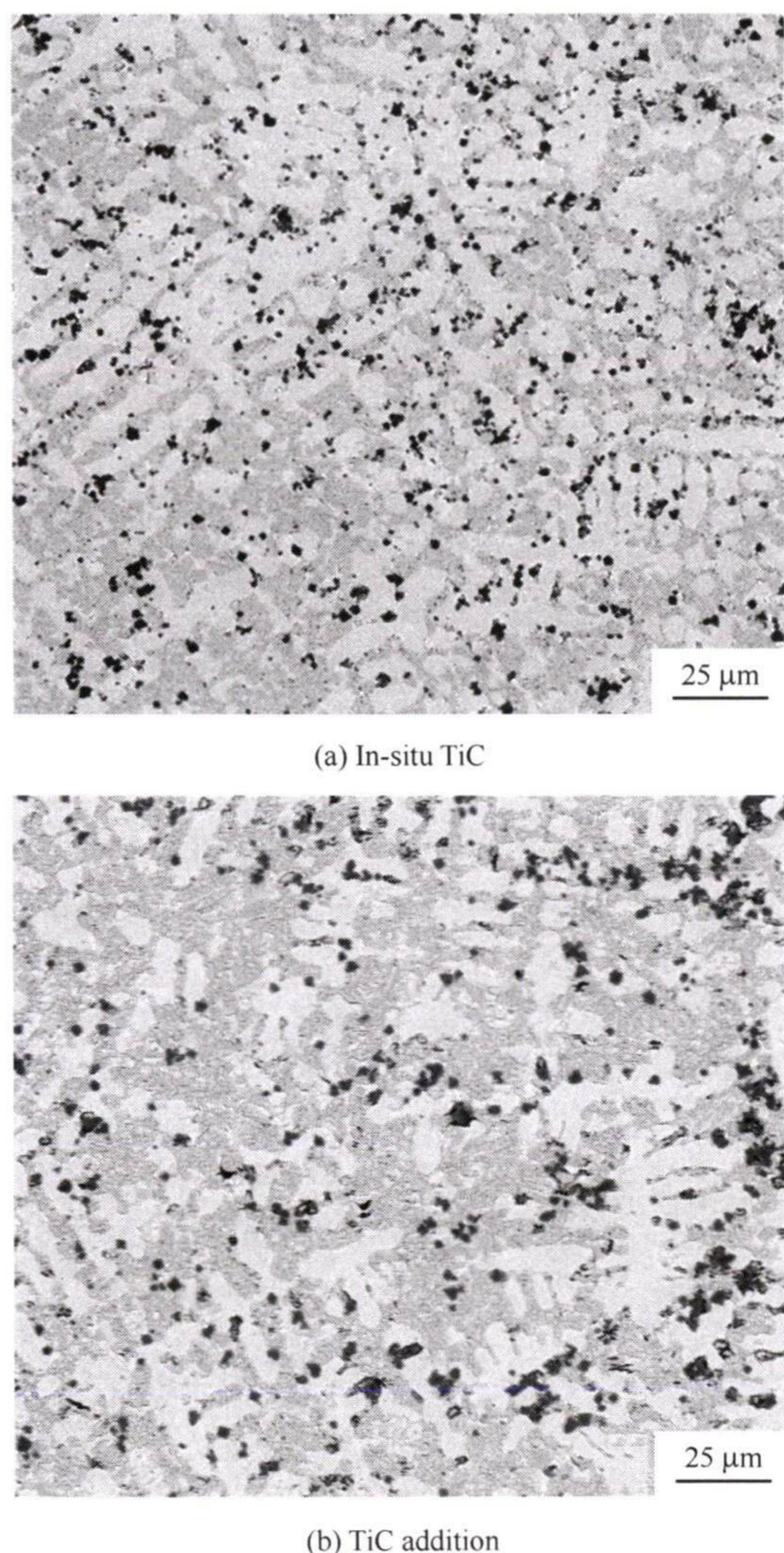


图 5 堆焊层表面 BSE 图

Fig. 5 BSE images of hardfacing alloy

2.4 堆焊合金磨粒磨损性能

堆焊合金磨粒磨损的试验结果如图 6 所示, 未含有 TiC 的堆焊层磨损失重最高, 为 2.111 6 g, 而

原位合成和粉芯中添加 TiC 的堆焊合金磨损失重显著降低, 分别为 0.406 2、0.498 9 g, 抗磨粒磨损性能分别为未添加 TiC 堆焊合金的 5.2、4.2 倍。

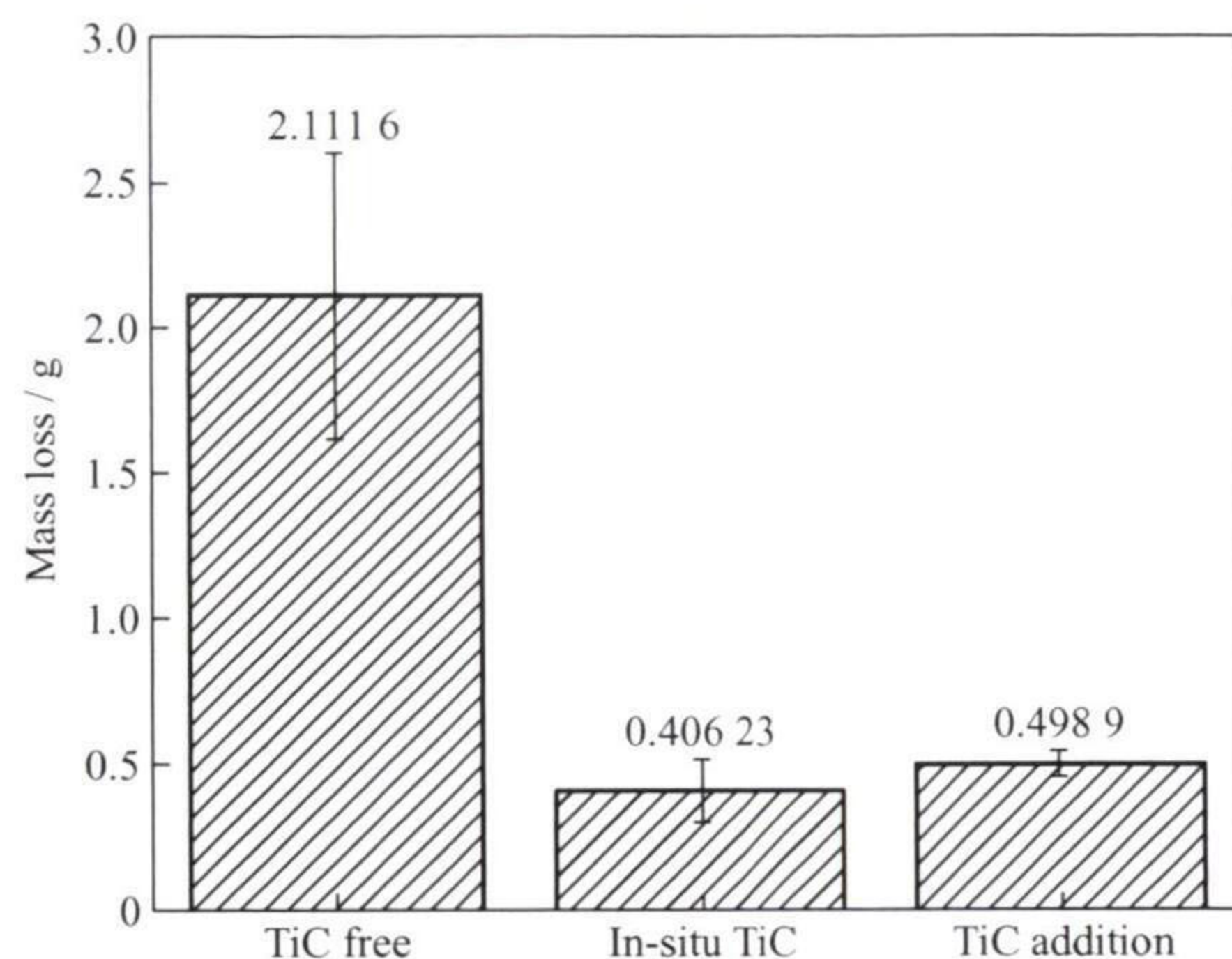
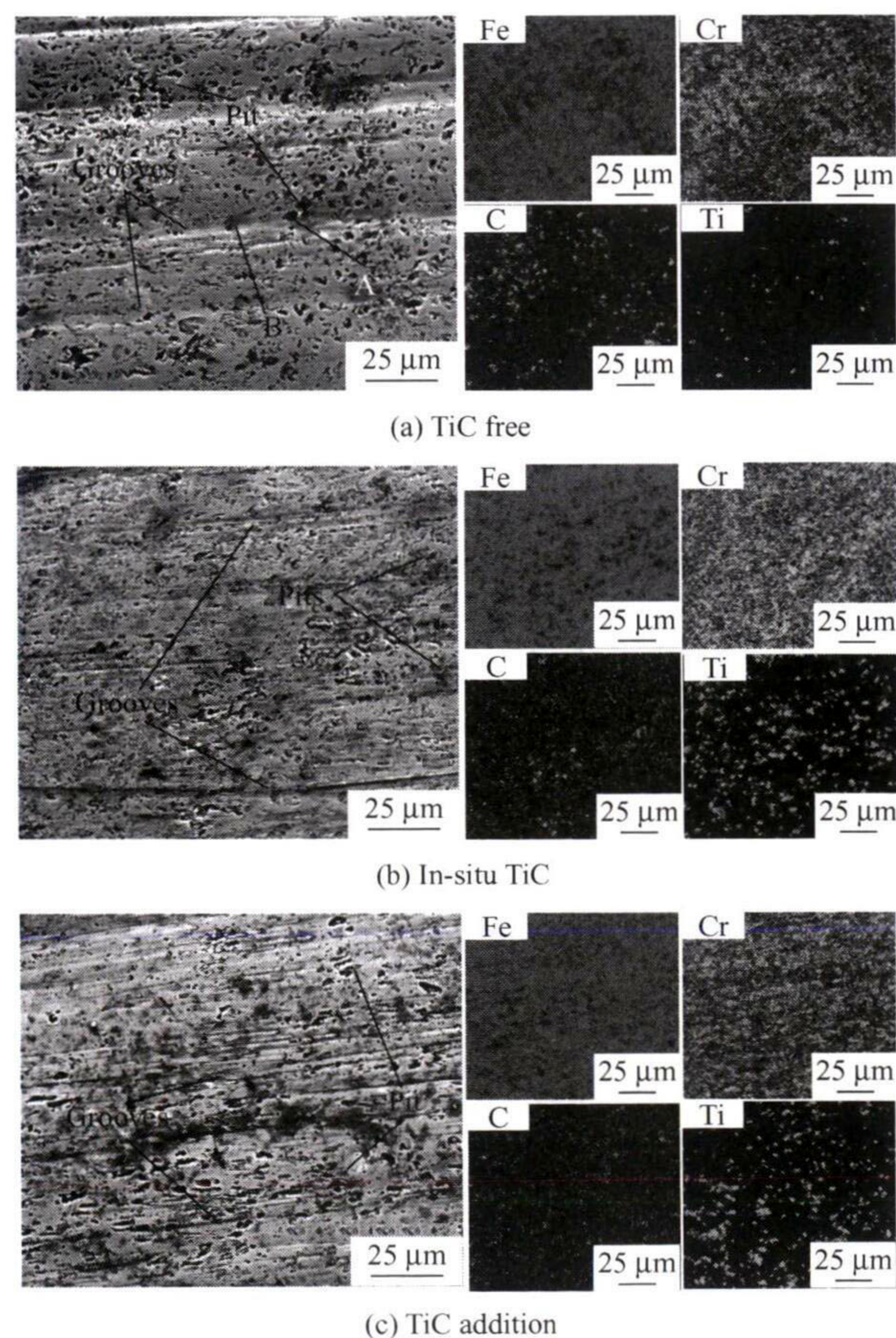


图 6 堆焊层磨粒磨损失重

Fig. 6 Wear loss of hardfacing alloys

图 7 为堆焊合金磨损表面的 SEM 图, 其中图 7a 为未添加 TiC 堆焊合金的磨损表面, 表面的磨痕深且宽, 同时分布有大量的黑色小孔, 而添加 TiC 的样品表面磨痕较窄并呈断续状, 三组样品磨损形式均以犁沟式显微切削为主。产生该现象的原因在



(c) TiC addition

图 7 各堆焊层磨粒磨损表面 SEM 图

Fig. 7 SEM images of hardfacing alloy after abrasive wear test

于, 未加 TiC 的堆焊合金中共晶 M_7C_3 碳化物可以起到抗磨骨架的作用, 但其中的奥氏体组织硬度较低, 易被磨粒所磨损产生大且深的犁沟, 同时使得碳化物突出, 当再一次受到磨粒作用时, 碳化物出现断裂剥落的现象, 产生较大的磨损失重。在引入 TiC 后, 弥散分布的 TiC 使得磨粒切削的阻力增加, 当磨粒遇到高硬度的 TiC 颗粒后被阻止, 减少了材料的磨损, 因此含 TiC 耐磨合金表面的磨损磨痕浅并变得断续。

通过对该磨损面进行 EDS 能谱分析, 测得样品磨损表面上的黑色小孔的成分见表 2, 其主要元素为 C、Cr、Fe, 因此磨损表面上的黑色小孔应为共晶碳化物在受到磨粒的切削后剥落所留下的剥落坑^[21]。同时, 对各个磨损面进行面扫后发现, 通过原位生成方式引入 TiC 所制堆焊层中 Ti 元素的分布比粉芯中直接添加方式引入 TiC 所制堆焊层中 Ti 元素的分布更加均匀, 而 Ti 元素在堆焊层中主要以 TiC 的形式存在, 故通过原位生成方式引入 TiC 比粉芯中添加方式引入 TiC 的分布更加弥散均匀, 可以更有效地阻挡磨粒的切削。

表 2 堆焊层磨粒磨损表面 EDS 分析 (质量分数 / wt.%)

Table 2 EDS analysis of element content of abrasive wear surface of hardfacing alloys (wt.%)

Element	A	B
C	37.90	23.01
Si	1.09	0.61
Ti	0.34	0.89
Cr	9.03	16.18
Fe	51.64	59.31

耐磨堆焊合金磨粒磨损截面形貌如图 8 所示, 从图中可以明显看出, 未添加 TiC 的堆焊层中共晶 M_7C_3 碳化物的开裂和脱落, 以及被磨损的奥氏体组织, 而加入 TiC 后的堆焊层磨损截面相对平滑, 组织中的奥氏体和共晶碳化物得到了不同程度的细化, 碳化物脱落和微裂纹的数量减少。原因在于, 未添加 TiC 的堆焊层共晶碳化物尺寸较大, 具有较高的脆性, 磨损时的切应力使其率先出现开裂现象, 但由于周围奥氏体组织的支撑作用并未发生脱落, 随着磨损的进行, 组织中较软的奥氏体被磨粒切削去除, 使得奥氏体对碳化物的支撑作用减弱, 从而发生脱落现象。而 TiC 可以阻止磨粒切削基体, 在细化组织的同时提高了共晶碳化物与奥氏体之间的结合性能, 减少了碳化物的开裂和脱落, 因此含有 TiC 的堆焊层耐磨性更优。

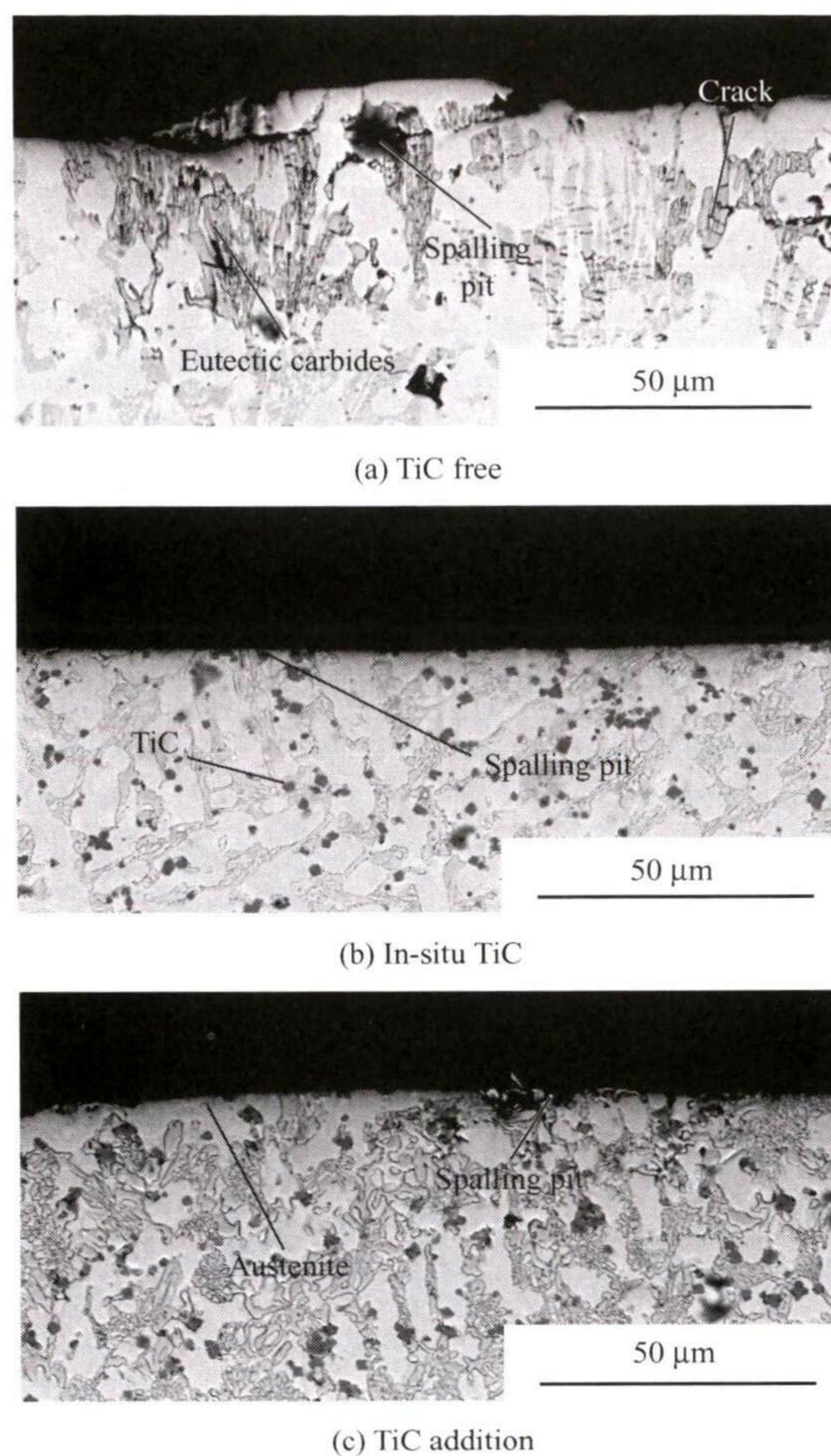


图 8 堆焊层磨粒磨损截面 BSE 图

Fig. 8 Cross-section BSE images of hardfacing alloy after abrasive wear test

2.5 堆焊合金冲击磨损性能

农机触土部件的工况较为复杂, 作业时会受到土壤中较大石块等物体的冲击, 极易发生冲击断裂, 引起的早期失效与报废^[22-23]。因此, 堆焊层不仅须拥有较好的耐磨粒磨损性能, 还须具有较好的耐冲击磨损性能。

各试样冲击磨损后的失重如图 9 所示, 从图中可以看出, 未加 TiC 堆焊层的磨损失重最大, 为 60.65 mg, 原位合成 TiC 的堆焊层冲击磨损失重最小, 为 48.20 mg, 外添加 TiC 的堆焊层冲击磨损失重为 52.15 mg, 添加 TiC 的堆焊层冲击磨损失重均低于未加 TiC 堆焊层的冲击磨损失重, 这与其碳化物和基体组织在冲击磨料磨损中的破坏和脱落密切相关。

图 10 为冲击磨损后各试样末端的 SEM 图, 从图中可以看到, 在周期性的冲击磨损后, 各样品磨损形貌具有相似的特征。在磨损表面上可以观察到嵌入材料表面的磨粒, 金属被冲击产生的塑性变形和凹坑, 以及多次冲击后材料产生的开裂。其原因

在于，冲击磨损的过程中，磨粒以一定的速度冲击试样，试样表面会发生弹性变形，部分磨粒会嵌入在试样表面；同时，磨粒的冲击使得周围金属挤出而产生塑性变形并产生加工硬化，使其强度硬度上升，塑性和韧性下降。当磨粒继续冲击使得载荷超过抗拉强度时，材料会发生开裂现象，裂纹会在材料内部不断扩展从而使材料产生剥落。当磨粒的角度及方向合适，利于切削时，磨粒会在切应力的作用下切削掉部分材料，但其切削量很小切削沟浅且窄^[24-26]。

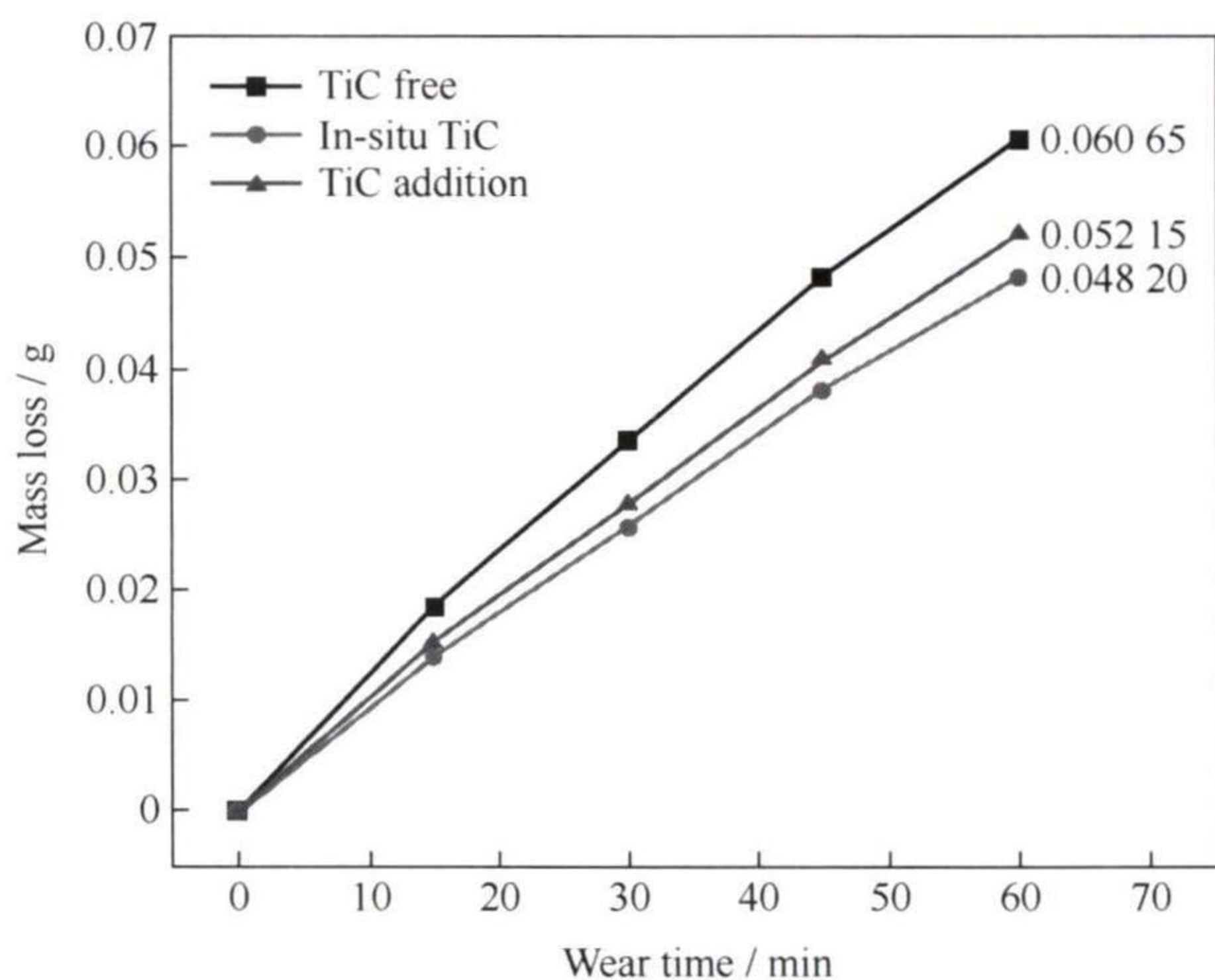


图 9 堆焊层冲击磨损测试结果

Fig. 9 Results of impact-abrasion test

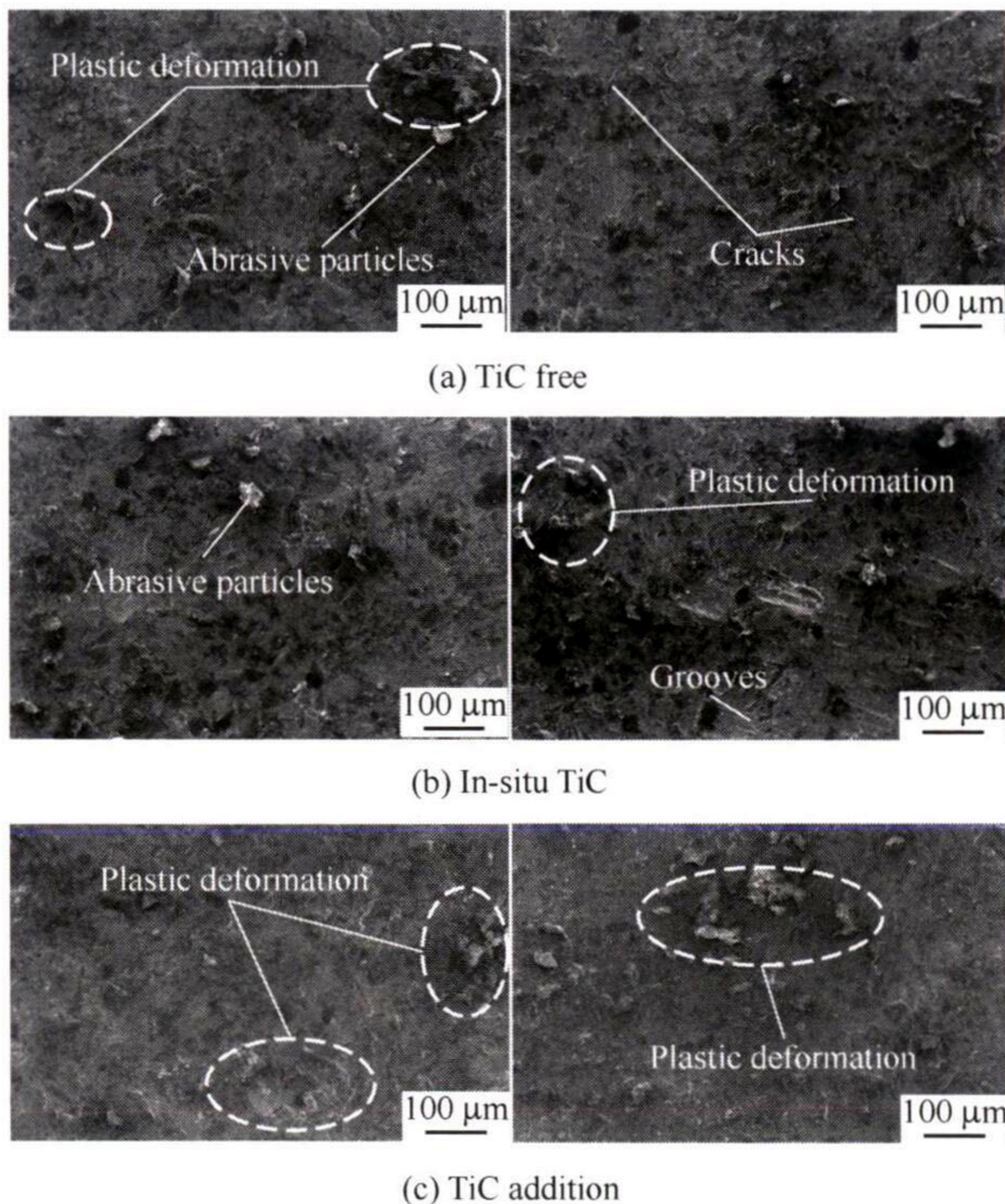


图 10 堆焊层冲击磨损表面 SEM 图

Fig. 10 SEM images of hardfacing alloy after impact-abrasion test

冲击磨损后试样末端截面的 BSE 图如图 11 所示，未添加 TiC 的样品截面凹凸不平，存在较大的裂纹和剥落坑，而添加 TiC 后的试样表面比较平整，其表面仅有较小的剥落坑和微裂纹，3 种材料的冲击磨损失重均由裂纹扩展导致材料剥离所致。由于碳化物的硬度较高，在冲击磨损中起到了抗磨骨架的作用，可以阻挡磨粒的显微切削，在加入 TiC 后，弥散分布的 TiC 可以有效地阻挡磨粒的入侵，减少磨粒的嵌入和磨粒冲击产生的塑性变形和开裂，同时，细化的奥氏体组织增加了裂纹扩展的阻力，减少了材料表面大块组织脱落的现象，使得材料的抗冲击磨损性能得到一定的提高。

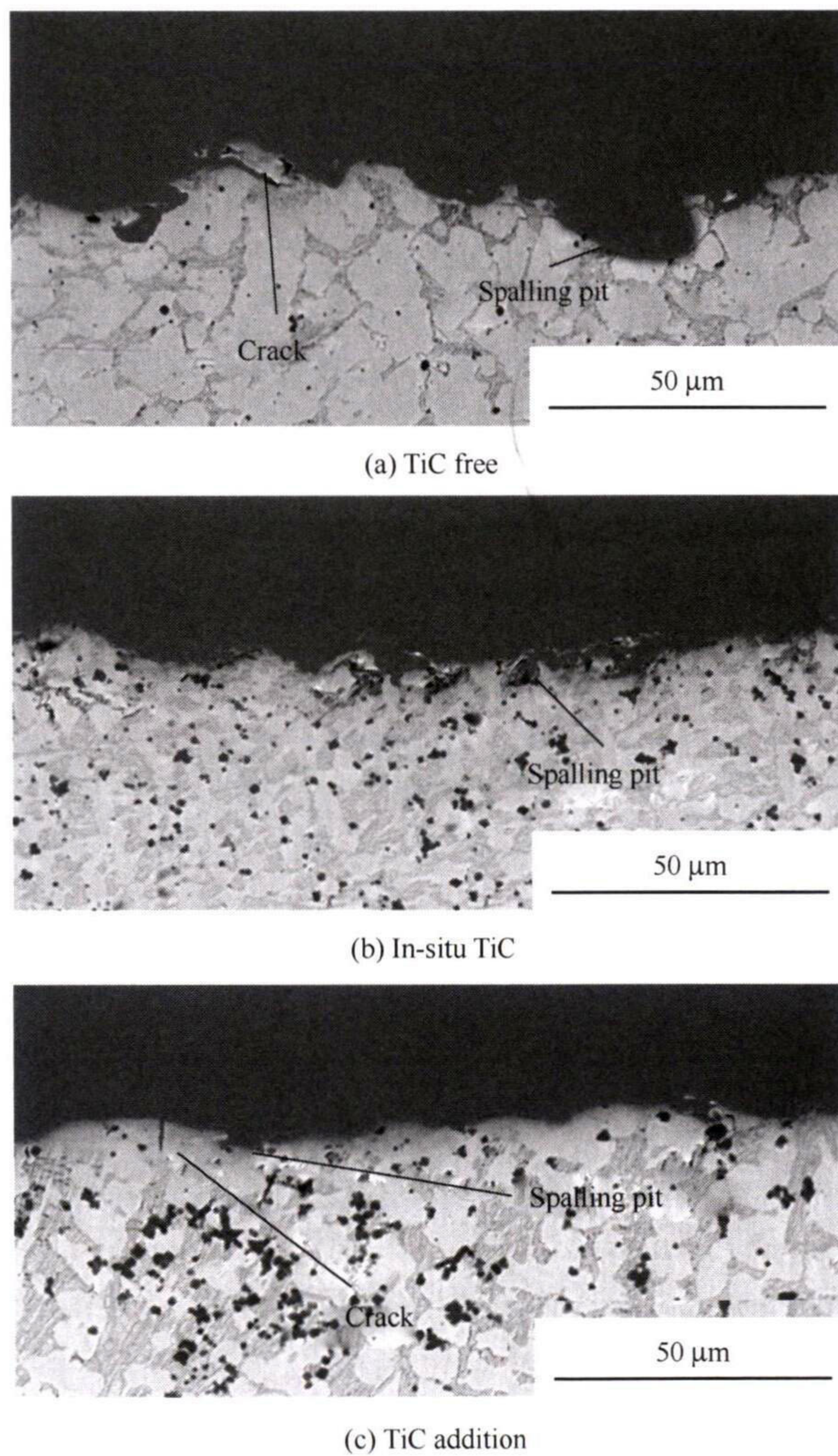


图 11 堆焊层冲击磨损截面 BSE 图

Fig. 11 Cross-section BSE images of hardfacing alloy after impact-abrasion test

3 结论

(1) 在亚共晶高铬铸铁中，TiC 可以提高堆焊合金中先析出奥氏体的形核率，阻止奥氏体的生长，

具有明显的细化晶粒作用。

(2) 在亚共晶高铬铸铁中, TiC 的加入提高了堆焊合金的洛氏硬度, 抗磨粒磨损性能和抗冲击磨损性能得到显著提升。

(3) 原位合成方式引入的 TiC 比粉芯中直接添加方式引入的 TiC 更加细小, 分布更加弥散均匀, 抗磨粒磨损性能和抗冲击磨损性能更加优异。

参 考 文 献

- [1] 文立阁, 李建桥, 崔占荣. 我国灭茬机具及其刀具的发展现状[J]. 农机化研究, 2006(5): 10-13.
WEN Lige, LI Jianqiao CUI Zhanrong. Development status of stubble extinguishing machines and their cutting tools in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(5): 10-13. (in Chinese)
- [2] 吴子岳, 高焕文. 根茬处理技术的现状与发展[J]. 中国农业大学学报, 2000(4): 46-49.
WU Ziyue, GAO Huanwen. Present state and development on technology of stubble chopping[J]. Journal of China Agricultural University, 2000(4): 46-49. (in Chinese)
- [3] 何奖爱, 王玉伟. 材料磨损与耐磨材料[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2014.
HE Jiangai, WANG Yuwei. Material wear and wear resistant materials[M]. Shenyang: North Eastern University Press, 2014. (in Chinese)
- [4] 杨威, 王欣, 张永生, 等. 高铬铸铁耐磨堆焊埋弧药芯焊丝研究[J]. 中国表面工程, 2007, 20(4): 33-37.
YANG Wei, WANG Xin, ZHANG Yongsheng, et al. The research of hardfacing submerged flux-cored wires with high Cr cast Iron[J]. China Surface Engineering, 2007, 20(4): 33-37. (in Chinese)
- [5] 郝建军, 杨泽宇, 马璐萍, 等. Fe-Cr-C-V 等离子堆焊层改善旋耕刀耐磨性和冲击韧性[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 24-30.
HAO Jianjun, YANG Zeyu, MA Luping, et al. Fe-Cr-C-V plasma surfacing layer improving wear resistance and impact toughness of rotary blade[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 24-30. (in Chinese)
- [6] 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 Qingxiang, ZHOU Yefei, YANG Yulin, et al. Research progress of Fe-Cr-C series wear-resistant surfacing alloys[J]. Journal of Yanshan University, 2014, 38(3): 189-196. (in Chinese)
- [7] 田大标. 铌在高铬铸铁堆焊层中的存在状态[J]. 中国表面工程, 2008, 21(6): 37-40, 50.
TIAN Dabiao. The status of Nb in the high Cr cast iron hardfacing layer[J]. China Surface Engineering, 2008, 21(6): 37-40, 50. (in Chinese)
- [8] 田大标. 锆在高铬铸铁堆焊层中的存在状态[J]. 中国表面工程, 2011, 24(4): 51-54.
TIAN Dabiao. The status of Zr in the high Cr cast iron hardfacing layer[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(4): 51-54. (in Chinese)
- [9] GONG Liqiang, FU Hanguang, YANG Penghui, et al. Refinement of primary carbides and improvement of wear resistance of hypereutectic high chromium cast iron after modification[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 5724-5742.
- [10] WANG Shuai, LI Yingmin, WANG Juan, et al. Effect of in-situ (Ti&W)C multiphase particles on three-body abrasive wear of high chromium cast iron[J]. Materials Chemistry and Physics, 2023, 295: 127.
- [11] LIU Sha, SHI Zhijun, XING Xiaolei, 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: 101232.
- [12] QI Xiaowen, JIA Zhining, YANG Qingxiang, et al. Effects of vanadium additive on structure property and tribological performance of high chromium cast iron hardfacing metal[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205: 5510-5514.
- [13] 肖平安, 肖璐琼, 顾景洪, 等. 15Cr 系亚共晶高铬铸铁的烧结制备与性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(12): 58-64.
XIAO Pingan, XIAO Luqiong, GU Jinghong, et al. Study on sintering preparation and properties of 15Cr hypoeutectic high-chromium cast Iron[J]. Journal of Hunan University(Natural Science Edition), 2019, 46(12): 58-64. (in Chinese)
- [14] 张伟光, 郭璟, 田卉莘, 等. TiC 硬质相颗粒对镍基熔覆层耐磨性能的影响[J]. 焊接技术, 2019, 48(5): 43-46.
ZHANG Weiguang, GUO Jing, TIAN Huixin, et al. Effect of TiC hard phase particles on wear resistance of nickel-based cladding layer[J]. Welding Technology, 2019, 48(5): 43-46. (in Chinese)
- [15] JIA R N, TU T Q, ZHENG K H, et al. Abrasive wear behavior of TiC-strengthened eutectic high chromium cast iron composites[J]. Materials Today Communications, 2021, 29: 102906.

- [16] ZHOU Yefei, YANG Yulin, YANG Jian, et al. Effect of Ti additive on $(Cr, Fe)_7C_3$ carbide in arc surfacing layer and its refined mechanism[J]. Applied Surface Science, 2012, 258: 6653-6659.
- [17] LIU Dashuang, LIU Renpei, WEI Yanhong, et al. Effects of titanium additive on microstructure and wear performance of iron-based slag-free self-shielded flux-cored wire[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 207: 579-586.
- [18] 熊中, 王艳, 徐强, 等. TiC 对铁基合金喷焊层组织与性能影响[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 79-84.
XIONG Zhong, WANG Yan, XU Qiang, et al. Effects of TiC on microstructure and properties of Fe-based alloy spray-welding layer[J]. Surface Technology, 2017, 46(8): 79-84. (in Chinese)
- [19] 王震. 纳米 TiC 增强马氏体不锈钢微观组织及力学性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
WANG Zhen. Microstructure and mechanical properties of nano TiC reinforced martensitic stainless steel[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [20] ZHU Chengbo, IAN Fordyce, SUN S D, et al. Effect of Ti and TiC additions on the microstructure and wear resistance of high chromium white irons produced by laser directed energy deposition[J]. Wear, 2022, 510-511: 204519.
- [21] 李磊基. Fe-Cr-C 合金中共晶 M_7C_3 碳化物生长机制的相场模拟与实验研究[D]. 沈阳: 辽宁科技大学, 2022: 58-63.
LI Leiji. Growth mechanism of eutectic M_7C_3 carbide in Fe-Cr-C alloy: phase field simulation and experimental study[D]. Shenyang: University of Science and Technology Liaoning, 2022: 58-63. (in Chinese)
- [22] 贾洪雷, 王万鹏, 陈志, 等. 农业机械触土部件优化研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 1-13.
JIA Honglei, WANG Wanpeng, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 1-13. (in Chinese)
- [23] 苏彬彬, 徐杨, 简建明. 农业机械耐磨件发展及研究现状[J]. 热处理技术与装备, 2013, 34(5): 53-58.
SU Binbin, XU Yang, JIAN Jianming. The actuality of development and research of wear resistant part for agricultural machinery[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2013, 34(5): 53-58. (in Chinese)
- [24] 贾利晓, 张庆丰, 王笑真. 高铬表面复合材料的冲击磨损性能研究[J]. 铸造, 2016, 65(7): 625-629.
JIA Lixiao, ZHANG Qingfeng, WANG Xiaozhen. Study on impact wear properties of high-chromium surface composites[J]. Foundry, 2016, 65(7): 625-629. (in Chinese)
- [25] 彭世广, 宋仁伯, 蔡长宏, 等. 新型轻质奥氏体耐磨钢的冲击磨损性能及其机理研究[J]. 材料研究学报, 2017, 31(7): 537-546.
PENG Shiguang, SONG Renbo, CAI Changhong, et al. Impact wear behavior of a novel light-weight austenitic wear-resistant steel[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017, 31(7): 537-546. (in Chinese)
- [26] 王涛, 胡锋, 张志成, 等. 不同冲击载荷下 10Mn 钢和 NM500 的磨损性能及机理[J]. 中国冶金, 2021, 31(12): 47-54.
WANG Tao, HU Feng, ZHANG Zhicheng, et al. Wear properties and mechanism of 10Mn steel and NM500 under different impact loads[J]. China Metallurgy, 2021, 31(12): 47-54. (in Chinese)

作者简介: 马笑晗, 男, 1998 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为耐磨堆焊药芯焊丝。

E-mail: 15131551586@163.com

贺定勇(通信作者), 男, 1970 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为工程材料表面改性理论与技术。

E-mail: dyhe@bjut.edu.cn

秦志恒, 男, 1995 年出生, 博士研究生。主要研究方向为无磁钻具修复和耐磨堆焊材料。

E-mail: qinzhiheng@email.bjut.edu.cn

王国红, 女, 1968 年出生, 硕士, 高级实验师。主要研究方向为工程材料表面改性理论与技术。

E-mail: wanggh@bjut.edu.cn

许一, 男, 1976 年出生, 硕士, 副研究员。主要研究方向为新材料研制及应用。

E-mail: xuyi0226@vip.sina.com

于金满, 男, 1994 年出生, 硕士, 工程师。主要研究方向为新材料研制及应用。

E-mail: 980878549@qq.com