

消失模铸造 WC_p/Fe 复合材料微观组织研究

马国彬^{1,2,3}, 谭建波^{1,2,3}, 于延龙⁴, 李春海⁴

(1. 河北科技大学材料科学与工程学院, 河北石家庄 050018; 2. 河北省材料近净成形技术重点实验室, 河北石家庄 050018; 3. 航空轻质复合材料与加工技术河北省工程实验室, 河北石家庄 050018; 4. 石家庄工业泵厂有限公司, 河北石家庄 050100)

摘要: 采用消失模铸造工艺制备 WC_p/Fe 复合材料, 研究了其组织形貌、物相成分及界面结合情况。结果表明, 粒度为600~2 000目的WC颗粒在高温铁液内完全溶解并发生了化学反应, 反应产物绝大部分以 Fe_3W_3C 复式碳化物形式在晶界处析出, 剩余少部分W和C以多组分固体形式存在于基体中; Fe_3W_3C 相整体分布较为均匀, 局部略有聚集, 界面结合较好; WC颗粒偏聚处产生大量的 Fe_3W_3C 相, 使界面反应层形成较多的显微缩松, 对界面结合状况有显著影响。

关键词: 消失模铸造; WC_p/Fe ; 颗粒粒度; 微观组织; Fe_3W_3C 复式碳化物

作者简介:

马国彬(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为精确成型及凝固控制技术。

E-mail: 992994201@qq.com

通讯作者:

谭建波, 男, 教授, 博士。电话: 0311-81668716, E-mail: tanjian1998@163.com

中图分类号: TG333

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)02-0149-05

基金项目:

河北省新兴产业前沿技术开发专项(18211021D)。

收稿日期:

2019-08-19 收到初稿,

2019-10-11 收到修订稿。

由于颗粒增强金属基复合材料具有耐磨、耐高温、良好的抗冲击性能及低成本等特点, 在冶金设备、水泥行业及矿山机械等领域得到了广泛应用^[1-5]。目前, 颗粒增强金属基复合材料制备方法主要有粉末冶金法、喷射沉积法、液态金属浸渗法、搅拌铸造法及消失模铸造等^[6-7], 其中粉末冶金法、喷射沉积法成本高, 液态金属浸渗法需制备预制件, 因此, 采用这几种方法难以制造大型、形状复杂的铸件; 搅拌铸造法较适用于工业规模化生产^[8-9], 但搅拌铸造法在将陶瓷颗粒加入金属液时所需时间长且难以被润湿而容易发生团聚; 消失模铸造法是一种生产效率高, 成本低的制备方法, 主要应用于表面复合材料的制备。

本文采用消失模铸造法, 制备了含WC颗粒8% (体积分数)的 WC_p/Fe 整体复合材料, 研究了 WC_p/Fe 复合材料的微观组织形貌、物相成分及界面结合情况, 研究结果可为消失模铸造钢铁基复合材料提供参考。

1 试验材料及方法

基体选用高铬铸铁, 其化学成分见表1, 增强相为WC颗粒, 纯度 $\geq 99.7\%$ 、粒度为600目、1 000目、1 500目及2 000目; WC颗粒载体为EPS珠粒, 粒径为1~2 mm、密度为22 kg/m³。

将体积分数为8%的不同粒度WC颗粒分别与EPS珠粒、浓度为0.2 g/ml A型粘结剂在搅拌混合机中以120~200 r/min搅拌30~50 s, 保证EPS珠粒表面均匀涂覆有WC颗粒, 然后再将WC颗粒与EPS珠粒的混合物吹入模具中, 在110~130 °C高温水蒸气下蒸制3~5 min, 成形冷却后出模, 制备的EPS消失模试块模样如图1所示。

在消失模试块模样表面涂涂料, 烘干后和浇注系统组合后, 放入砂箱震实, 负压浇注, 负压度0.03~0.06 MPa, 底注式浇注系统, 浇注温度为1 420~1 470 °C。冷却清理后的试块放入热处理炉内, 加热升温到850 °C后保温6 h, 出炉空冷得到正火态 WC_p/Fe 复合材料试块。消失模铸造复合材料的铸造工艺原理示意图如图2所示。利用金相显微镜、扫描电镜进行金相组织结构分析, 用XRD、EDS能谱仪进行物相成分分析。

2 试验结果与分析

2.1 复合材料显微形貌分析

图3为不同WC颗粒粒度时WC_p/Fe复合材料正火态微观组织。图4为图3a试样在扫描电镜下1 000倍、5 000倍的局部微观组织。通过观察显微组织发现,基体组织主要为奥氏体,晶界处存在着许多条块状碳化物。在图3中,明显地散布着少量白色网状碳化物,没有发现明显的WC增强颗粒。分析其原因,一是虽然WC颗粒熔点高达2 800 ℃,化学性能稳定,但遇到高温金属液,WC颗粒周围环境升降温度迅速,使其内部和外部温差大,由此产生的内应力可能使增强颗粒产生微裂纹,裂纹扩展后分解为大量的小颗粒,加上本文所选WC颗粒尺寸较小,这些小颗粒在高温铁液中溶解^[10-12];二是溶解WC颗粒直接与高温熔融铁液发生化学反应。结合SEM和EDS能谱分析得出:试样晶界处存在白色网状碳化物且W元素含量较高,基体中W元素含量也有所增加。一方面,WC颗粒发生溶解固溶到基体中;另一方面,WC颗粒与铁液发生反应生成了新物相。

2.2 复合材料物相分析

图4晶界处存在黑色条块状和白色网状碳化物。为了确定碳化物的种类,进行了XRD物相分析。进过X射线衍射分析(图5)可知,复合材料存在的物相为Fe₃W₃C、(Cr, Fe)₇C₃、Cr₂₃C₆和Fe-Cr,未发现WC物相。为了研究Fe₃W₃C在复合材料中的存在形式,选取了20个微观区域,对复合材料试样进行SEM及EDS分析。图6为图4a不同区域对应的SEM形貌,表2为图6中各个区域EDS能谱分析结果。

从表2可以看出,在白色网状物质上的10、12和16处均为含W较高相,分别为22.45%、25.73%和20.43%,均含有10%左右的Mo元素,并且10和16处含有1%左右的Ni元素,结合XRD衍射结果分析,该物质为含有合金元素的Fe₃W₃C复式碳化物和(Cr, Fe)₇C₃的混合物。对图6d的13处进行EDS分析,结果表明,该处W和Mo元素分别达到了7.34%和3.21%,结合XRD衍射结果分析,该物质为较多的(Cr, Fe)₇C₃、Cr₂₃C₆及少量的Fe₃W₃C复式碳化物的混合物。对图6a的8处进行EDS及XRD衍射结果分析,该物质主要为(Cr, Fe)₇C₃。对基体组织(6e图的14处)进行EDS及XRD衍射结果分析,该物质主要为Fe-Cr,固溶了2%左右的W元素。在高温铁液中WC分解为W和C, C容易扩散进入铁液中,促进了WC溶解,同时WC、W和铁液反应生成Fe₃W₃C,冷却过程中,以白色网状碳化物的形式在晶界处沉淀析出,该过程可通过以下反应解释:



剩余少部分W和C以多组分固溶体形式存在于基体中。试验结果和热力学分析可得,细粒度的WC颗粒在铁液内溶解严重甚至可以完全溶解,WC颗粒分布的均匀性对其界面结合状况有显著影响。WC颗粒聚集处,当铁液冷却凝固时,大量的反应产物会阻塞铁液向界面补缩的通道,导致收缩时在界面反应层中形成显微缩松,颗粒与反应产物连成一片呈现出大块网状结构。但由图4a发现,仅有局部区域存在大块网状Fe₃W₃C复式碳化物,大部分Fe₃W₃C以条状碳化物形式较均匀地分布在晶界处,且显微缩孔较少,界面以冶金方式结合,界面结合较好。

表1 高铬铸铁的化学成分

Table 1 Chemical composition of high chromium cast iron

							w _B /%
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
1.6~1.8	1.0~2.0	≤2.0	26~30	1.5~4.0	1.0~4.0	1.0~3.0	余量

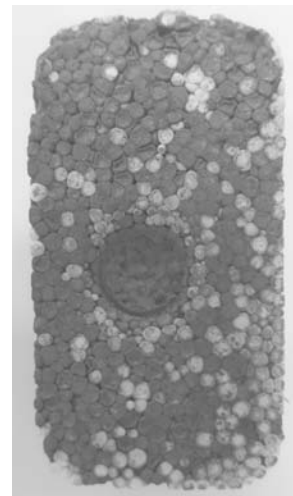


图1 消失模试块模样
Fig. 1 EPS test sample

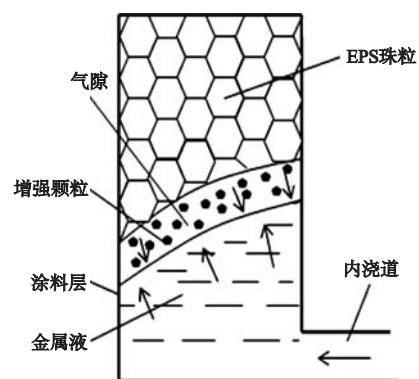
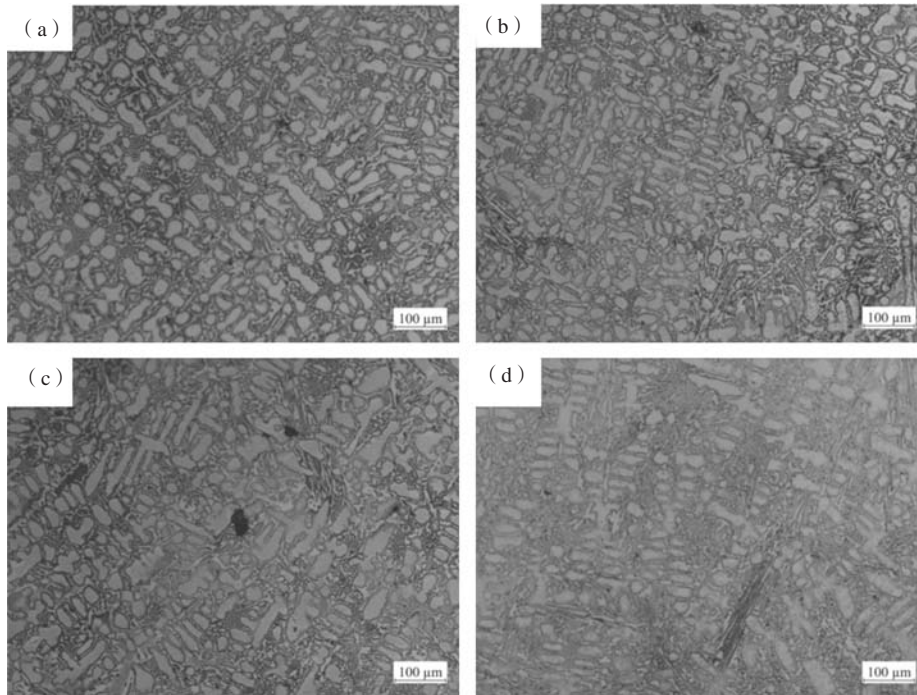


图2 消失模铸造复合材料的工艺原理示意图
Fig. 2 Schematic diagram showing the process principle of lost foam casting composite



(a) 600目; (b) 1000目; (c) 1500目; (d) 2000目

图3 不同颗粒粒度时复合材料的微观组织

Fig. 3 OM microstructure of composites with different WC particle sizes

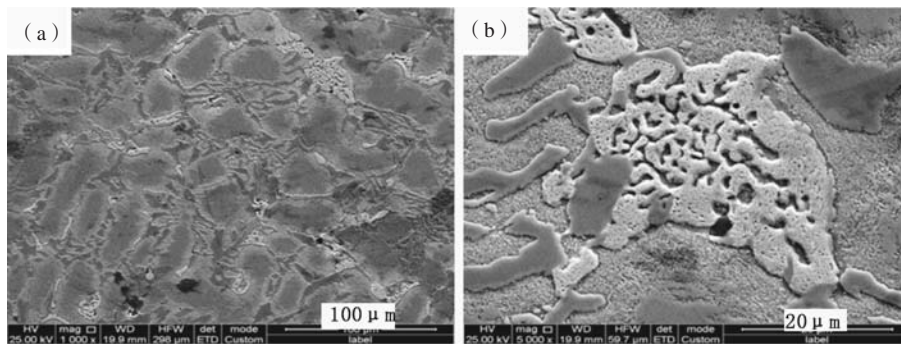


图4 图3a中局部微观组织的SEM图像

Fig. 4 SEM images of local microstructure in Fig.3a

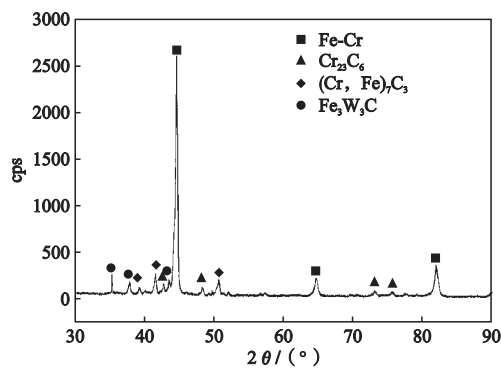
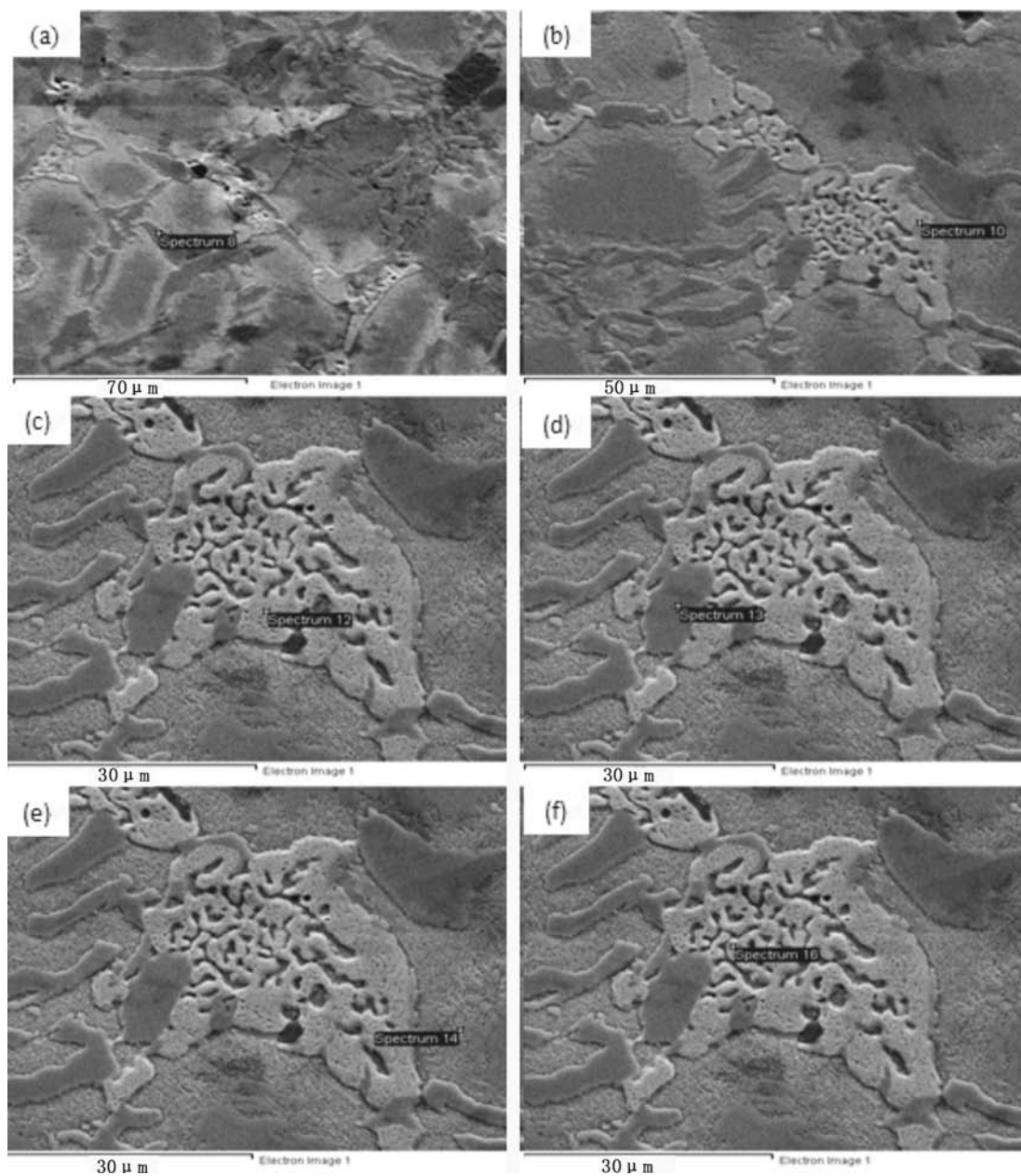


图5 复合材料的XRD图谱

Fig. 5 XRD pattern of composite material



(a) 8; (b) 10; (c) 12; (d) 13; (e) 14; (f) 16

图6 图4a中不同区域对应的SEM形貌

Fig. 6 SEM images at different zones in Fig. 4a

表2 复合材料试样中各种物相的EDS能谱分析
Table 2 EDS spectrum analysis of various phases in composite samples

区域	C	Cr	Fe	W	Mo	Si	Ni	Cu	$w_B / \%$
(a) 8	19.96	23.77	56.27						
(b) 10	1.94	24.88	41.14	22.45	8.67		0.92		
(c) 12	2.62	26.07	34.08	25.73	11.51				
(d) 13	3.60	63.48	22.37	7.34	3.21				
(e) 14	1.43	19.13	70.83	2.22		1.74	2.32	2.32	
(f) 16	3.04	25.96	41.02	20.43	8.35		1.19		

3 结论

(1) 粒度为600~2 000目的WC颗粒在高温铁液内完全溶解并发生了化学反应, 反应产物绝大部分以 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 复式碳化物形式在晶界处析出, 剩余少部分W和C以多组分固溶体形式存在于基体中, $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 相局部略有聚集, 整体分布较为均匀。

(2) Mo元素集中分布在 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 相区域。由于 $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 偏聚处阻塞了铁液向界面的补缩通道, 导致收缩时在界面反应层中形成较多的显微缩松; 反之, $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ 含量低的区域, 界面反应层中显微缩孔较少且界面结合良好, 所以WC颗粒在铁液中分布的均匀性对复合材料的界面结合状况有显著影响。

参考文献:

- [1] 李菊. 泡沫陶瓷增强钢基复合材料的制备与性能研究 [J]. 铸造, 2017, 66 (2): 142-144.
- [2] 刘侃, 徐方伟, 涂小慧, 等. ZTA颗粒增强高铬铸铁基复合材料界面研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (5): 398-403.
- [3] MOHAMMED M, FATHY A, El-Kady O. Effect of iron addition on microstructure, mechanical and magnetic properties of Al-matrix composite produced by powder metallurgy route [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25 (1): 46-53.
- [4] 姬长波. WC颗粒增强高铬铸铁复合材料的制备及其性能研究 [D]. 山东大学, 2018.
- [5] 郝世明, 毛建伟, 谢敬佩, 等. 陶瓷颗粒增强 SiC_p/Al 铝基复合材料制备和性能研究 [J]. 铸造, 2017, 66 (4): 332-336.
- [6] MOHANAVEL V, RAJAN K, SURESH K S, et al. Mechanical and tribological characterization of stir-cast Al-SiCp composites [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 1 (5): 1740-1746.
- [7] MOHANAKUMARA K C, RAJASHEKAR H, GHANARAJA S, et al. Development and mechanical properties of SiC reinforced cast and extruded Al based metal matrix composite [J]. Procedia Materials Science, 2014, 5: 934-943.
- [8] MOSES J J, DINAHARAN I, SEKHAR S J. Prediction of influence of process parameters on tensile strength of AA6061/TiC aluminum matrix composites produced using stir casting [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26 (6): 1498-1511.
- [9] SIRAHBIZU Y B, JHA P K, MAHAPATRA M M. The key attributes of synthesizing ceramic particulate reinforced Al-based matrix composites through stir casting process: a review [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28 (9): 969-979.
- [10] 蒋业华, 李祖来, 叶小梅, 等. 碳化钨颗粒在WC/Fe基复合材料基体中的断裂和溶解 [J]. 铸造, 2007, 56 (5): 491-494.
- [11] 张春红, 张宁, 强颖怀, 等. 电渣熔铸WC/Cr12Mo1V1钢基复合材料的摩擦磨损特性 [J]. 铸造技术, 2014, 35 (7): 1483-1486.
- [12] 吴迎飞, 陈华辉, 李海存, 等. 铁基复合材料中碳化钨颗粒的溶解析出行为 [J]. 材料工程, 2018, 46 (8): 98-105.

Study on Microstructure of Lost Foam Cast WC_p/Fe Composites

MA Guo-bin^{1,2,3}, TAN Jian-bo^{1,2,3}, YU Yan-long⁴, LI Chun-hai⁴

(1. Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Near-Net Forming Technology of Hebei Province, Shijiazhuang 050018, Hebei, China; 3. Hebei Engineering Laboratory of Aviation Lightweight Composite Materials and Processing Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China; 4. Shijiazhuang Industrial Pump Factory Co., Ltd., Shijiazhuang 050100, Hebei, China)

Abstract:

WC_p/Fe composites with different WC particle sizes were prepared by lost foam casting. The microstructure, phase composition and interfacial bonding of the WC_p/Fe composites were studied. The results show that the WC particles between 600 to 2 000 meshes were completely dissolved into high temperature molten iron and undergo chemical reactions. And the great majority of the reaction product $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ carbide (a ternary compound) precipitated at the grain boundaries, while W and C were found only in small amounts in the matrix with multi-component solid solution form. The overall distribution of $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ phase was fairly uniform, with a slight local aggregation and good interface bonding. A large amount of $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ phase was produced at the segregation and aggregation zone of WC particles, which resulted in more microshrinkage in the interfacial reaction layer, and had a significant effect on the interfacial bonding.

Key words:

lost foam casting; WC_p/Fe ; particle size; microstructure; $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ double carbides