

研究论文(193~ 197)

TiC 颗粒含量及尺寸对原位 TiC_p/Fe 复合材料耐磨性的影响*

严有为¹, 魏伯康², 傅正义¹, 林汉同², 袁润章¹

(1. 武汉工业大学材料复合新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430070;

2. 华中理工大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 研究了 TiC 颗粒的含量及尺寸对原位 TiC_p/Fe 复合材料耐磨料磨损性能的影响。结果表明: 当 TiC 颗粒的尺寸为 5.0 μm 时, 复合材料的耐磨性随 TiC 颗粒含量的增加而提高; 在 TiC 颗粒的含量为 10.1%、尺寸小于 5.0 μm 时, 复合材料的耐磨性随颗粒尺寸的增大而提高; 而当颗粒尺寸大于 5.0 μm 后, 耐磨性因 TiC 颗粒的剥落反而下降。分析认为, 复合材料的耐磨性与其组织中 TiC 颗粒的间距密切相关, 间距越小, 复合材料的耐磨性越高。

关键词: 原位 TiC 颗粒; Fe 基复合材料; 颗粒间距; 磨料磨损

中图分类号: TB 331

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(1999)03-0193-05

近年来, 国外对应用面广、成本低廉的原位 (*in situ*) TiC 颗粒增强 Fe 基复合材料(以下简称原位 TiC_p/Fe 复合材料)已有研究^[1~3]。在这种复合材料的组织中, 原位合成的 TiC 增强颗粒具有热力学稳定、尺寸细小、分布均匀且与基体界面洁净和结合良好等特点; 而基体组织的性能可通过热处理得以进一步改善。因此, 可望用这种材料制备冶金、电力及建材等行业中的抗磨零件。然而, 目前对该材料的耐磨性能及磨损机理尚无系统和深入的研究。为此, 本文着重研究通过反应铸造工艺^[4]制备的铸态原位 TiC_p/Fe 复合材料组织中 TiC 颗粒的含量及尺寸对该材料耐磨料磨损性能的影响, 并考察其磨损机制。

1 试验部分

1.1 材料制备

在 15 kg 中频感应炉中, 分别熔炼不同成分的 Fe-TiC 合金, 通过选择不同的反应温度和时间来控制合金熔体中生成 TiC 颗粒的数量和尺寸; 合金熔体经反应处理后, 浇注为尺寸 20 mm × 20 mm × 110 mm 的树脂砂型冲击试样, 即获得原位 TiC_p/Fe 复合材料^[4]。用 BAS2000 型图像分析仪分析试样的组织, 从中筛选出如下两类试样: TiC 颗粒的平均尺寸均为 5.0 μm 左右, 含量(体积分数, 下同)分别为 4.8%、7.1%、10.1% 和 12.7%, 以此类试样研究 TiC 颗粒含量对复合材料耐磨性的影响; TiC 颗粒的含量为 10.1%, 平均尺寸分别为 2.6 μm、5.0 μm、8.2 μm 和 11.8 μm, 以此类试样研究 TiC 颗粒的尺寸对复合材料

* 材料复合新技术国家重点实验室开放基金资助项目(97002); 华中理工大学科技基金资助项目(96006)。

1999-01-04 收到初稿, 1999-03-15 收到修改稿/本文通讯联系人严有为

严有为 男, 33 岁, 博士后, 主要从事金属基复合材料研究

耐磨性的影响 图 1 所示为所得试样(TiC 含量 10 1%, 尺寸 5 0 μm)的组织及其 TiC 颗粒的图像分析照片. 可以看出, 复合材料的铸态组织为 TiC 颗粒+ 珠光体基体 将上述各试样均加工成 8 mm × 15 mm × 50 mm 的耐磨试样, 其磨损表面的磨削粗糙度 R_a 为 0 8 μm.

1 2 试验方法

磨损试验在MLS-3 型橡胶轮磨料磨损试验机上进行. 橡胶轮的肖氏硬度为 74, 转动速

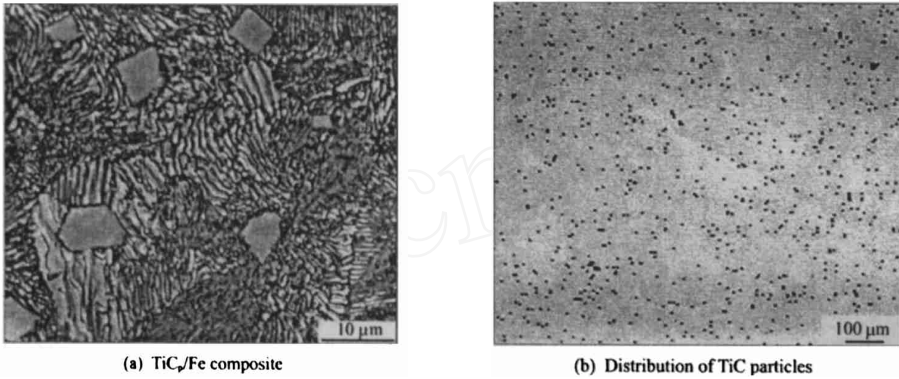


Fig 1 The structure of *in situ* TiC_p/Fe composite and the distribution of TiC particles
图 1 原位 TiC_p/Fe 复合材料的组织及其 TiC 颗粒的分布

度 100 r/m in, 法向载荷 50 N; 磨料为粒度 0 1 mm 的人工石英砂($HV = 1 100$), 供砂速率 225 g/m in 磨损时间 10 m in, 每个试样磨损 4 次 试样磨损前后均用丙酮清洗, 烘干后用感

量万分之一的天平测定试样的磨损质量损失 为避免或减少试验的系统误差, 用相对耐磨性 ϵ 来评定材料的耐磨性 即以正火 45# 钢为标准试样, 材料的相对耐磨性 ϵ 为标准试样的平均磨损质量损失 $W_{标}$ 与试样的平均磨损质量损失 $W_{试}$ 之比 用 JSM -35CF 型扫描电镜(SEM) 和 JXA -8800 型电子探针对试样的磨损表面进行观察和分析

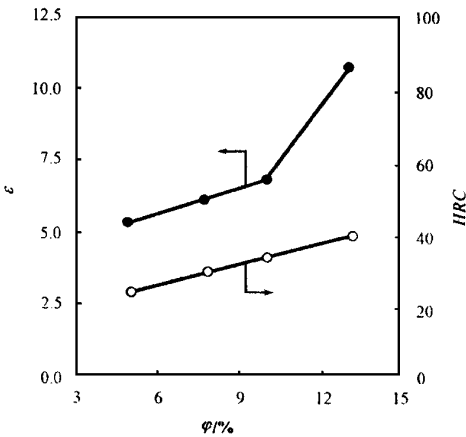


Fig 2 The variation of wear resistance and hardness vs volume fraction of TiC

图 2 复合材料的耐磨性和硬度随 TiC 颗粒体积分数变化的关系曲线

2 结果与讨论

2 1 TiC 颗粒含量对耐磨性的影响

TiC 颗粒的体积分数(ϕ)对复合材料相对耐磨性 ϵ 及硬度 HRC 的影响如图 2 所示 可见, 随着 ϕ 的增加, 复合材料的 HRC 和 ϵ 均提高, 但当 $\phi > 10 1\%$ 后, HRC 和 ϵ 增加的趋势不同步. 由此可知, 材料的硬度与其耐磨性并不完全对应, 对多相复合材料尤其如此

同时还可以看出, 复合材料的耐磨性是正火 45# 钢的 5~ 10 倍 而正火 45# 钢与复合材料的基体组织均为珠光体, 因此, 复合材料耐磨性的提高应主要归功于其组织中 TiC 颗粒的增

强作用 对于正火 45[#] 钢, 由于其珠光体的硬度 ($HV = 700$) 小于石英磨料的硬度 ($HV = 1100$), 因此, 在磨料磨损过程中, 磨料的棱角在法向分力的作用下会刺入材料的表层, 而切向分力则使刺入的磨料作切向犁削运动, 结果使材料表面形成犁沟并导致材料的磨损 而对于 TiC_p/Fe 复合材料, TiC 颗粒会降低磨料刺入珠光体基体的深度并阻止磨料的进一步犁削作用, 从而使复合材料的耐磨性得以提高

在磨损过程中, TiC 颗粒的上述作用与其间距有很大的关系 TiC 颗粒的间距 λ 与其尺寸 d 及体积分数 φ 之间存在如下关系^[5]:

$$\lambda = \frac{d}{\sqrt{\varphi}} \quad (1)$$

当 d 一定时, 随着 φ 的增加, λ 降低 例如, 当 $\varphi = 10\%$ 时, λ 为 80~100 μm , 略小于或等于本试验所用磨料的尺寸 [见图 1(b)] 因此, 当 $\varphi < 10\%$ 时, TiC 颗粒的间距 λ 大于磨料的尺寸 这样, 磨料在载荷的作用下能顺利地刺入颗粒间软的珠光体基体中, 并犁削较长的距离, 从而使磨损表面上留下较多且宽而深的犁沟 [如图 3(a) 所示] 随着颗粒含量的不断

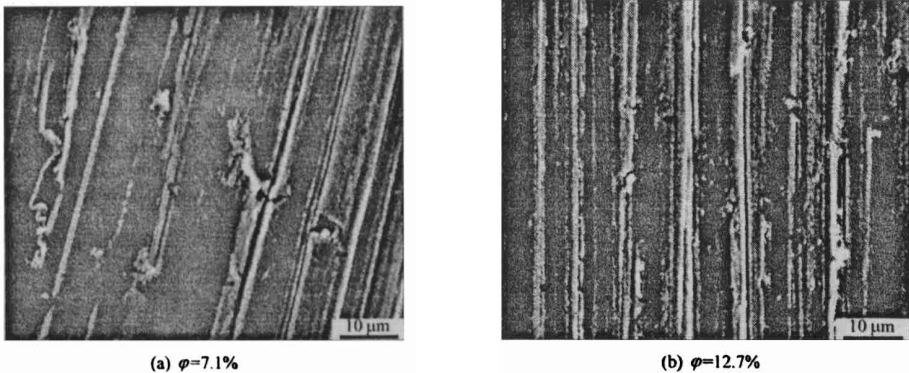


Fig 3 SEM morphology of worn composite surfaces with different volume fraction of TiC
图 3 不同 TiC 颗粒含量的复合材料的磨损表面形貌 SEM 照片

增加, 颗粒间距 λ 不断降低 当 $\varphi > 10\%$ 时, λ 小于磨料的尺寸 这样, 大尺寸的磨料不能刺入软的珠光体基体内, 即使能刺入, 其刺入深度及随之而引起的塑性变形也较浅小, 且当这些磨料向前运动很短的距离后, 即碰到更硬的 TiC 颗粒, 不仅使磨料的棱角钝化, 而且迫使其离开犁沟, 从而抑制犁沟的进一步扩展 因此, 在这种情况下, 材料的磨损表面较为光滑, 犁沟较短且浅而窄 [如图 3(b) 所示] 由此可见, 在本试验条件下, $\varphi = 10\%$ 是组织中 TiC 颗粒间距的转变点 因此, 图 2 所示的曲线在 $\varphi = 10\%$ 处出现了拐点, 即由于颗粒数量的增加, 导致其间距 λ 小于磨料尺寸, 从而使复合材料的耐磨性得以显著提高

2.2 TiC 颗粒尺寸对复合材料耐磨性的影响

当组织中 TiC 颗粒的含量为 10% 时, 尽管 TiC 颗粒的平均尺寸增加对复合材料的硬度影响不大, 但是, 其耐磨性却先增加后降低 (如图 4 所示). 当组织中 TiC 颗粒的尺寸较小 (如 $d = 2.6 \mu\text{m}$) 时, 这些细小的颗粒刚从合金熔体中反应生成, 尚未经过均化与长大过程^[4], 而熔体已铸造成形 因此, 所得试样组织中 TiC 颗粒分布不均匀, 部分区域有颗粒的严重偏聚现象, 从而造成颗粒间距大小不一 在磨损过程中, 颗粒间距较大的区域, 软的珠光体基体率先被磨损, 并使颗粒逐渐暴露于磨损表面 由于细小的 TiC 颗粒在基体中钉扎的深

度有限,且在磨料的反复作用下,这些细小的颗粒或被剥落或连同磨屑一起脱离材料本体。图5(a)是在此情况下材料磨损表面形貌的SEM照片。可见,犁沟深而宽,变形脊上不仅有颗粒剥落留下的黑坑,而且还有明显的疲劳断裂迹象。因此,当组织中细小的TiC颗粒严重聚集时,复合材料的耐磨性较差,这与文献[6]的试验结果是一致的。当熔体中的TiC颗粒长大均化后(如 $d=5.0\mu\text{m}$),所得试样组织中TiC颗粒的分布均匀[图1(b)],其颗粒间距小于或等于磨料的尺寸。这样TiC颗粒阻碍磨料磨损的作用加强,复合材料具有较高的耐磨性能。随后当颗粒尺寸进一步增大时,根据式(1),颗粒间距亦增大(因为颗粒含量一定),从而使颗粒阻碍磨料犁削的作用有所减弱。特别是当颗粒的尺寸增大至 $11.8\mu\text{m}$ 时,大部分TiC颗粒的间距已远远大于磨料的尺寸。这样,磨料对珠光体基体的犁削作用加剧,并导致TiC颗粒的剥落[如图5(b)所示]。

由此可见,颗粒间距在TiC_p/Fe复合材料的磨料磨损过程中起着重要的作用。为了充分发挥TiC颗粒的抗磨作用,在用反应铸造工艺制备原位TiC_p/Fe复合材料时,必须综合

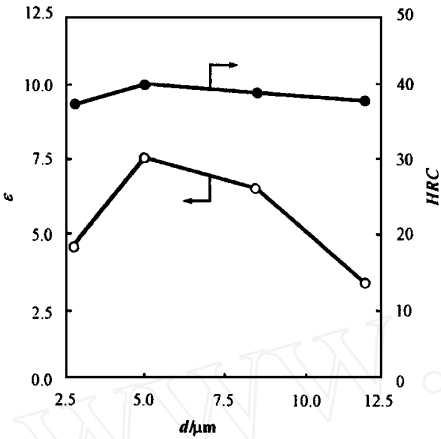
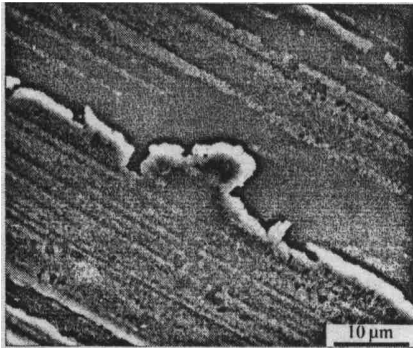


Fig 4 The variation of wear resistance and hardness vs size of TiC

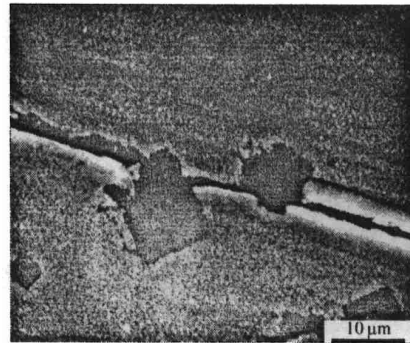
图4 复合材料的耐磨性

和硬度随TiC颗粒尺寸变化的关系曲线

发挥TiC颗粒的抗磨作用,在用反应铸造工艺制备原位TiC_p/Fe复合材料时,必须综合



(a) $d=2.6\mu\text{m}$



(b) $d=11.8\mu\text{m}$

Fig 5 SEM morphology of worn surfaces of composites reinforced with TiC of different size

图5 不同TiC颗粒尺寸的复合材料磨损表面形貌的SEM照片

优选各种工艺参数,以保证所得复合材料中的TiC颗粒数量较多、尺寸较小且分布均匀。这样可使TiC颗粒的间距减小,抗磨作用加强。

3 结论

a 当TiC颗粒的尺寸为 $5.0\mu\text{m}$ 时,原位TiC_p/Fe复合材料的耐磨性随TiC颗粒含量的增加而提高。

b 在TiC颗粒的含量为10%而尺寸小于 $5.0\mu\text{m}$ 时,复合材料的耐磨性随颗粒尺

寸的增大而提高;当颗粒尺寸大于 5.0 μm 后,其耐磨性因 TiC 颗粒的剥落反而下降

c 复合材料的耐磨性与其组织中 TiC 颗粒的间距有很大关系,间距越小,复合材料的耐磨性越高

[参 考 文 献]

- [1] Terry B S, Chinyamakobvu O S. *In situ* production of Fe-TiC composites by reactions in liquid iron alloys[J]. *J Mater Sci Lett*, 1991, 10: 628~ 629
- [2] Liu Z, Fredriksson H. On the reaction between Fe-Ti and Fe-C liquids under microgravity [J]. *Metall Mater Trans*, 1996, 27A (2): 407~ 414
- [3] Bergman A, Jarfors A, Liu Z, *et al*. *In situ* formation of carbide composites by liquid/solid reactions[J]. *Key Eng Mater*, 1993, 79: 213~ 234
- [4] 严有为,魏伯康,林汉同. 原位(*in situ*)TiC_p/Fe 复合材料制备工艺的研究[J]. *铸造*, 1998, 4: 5~ 8
- [5] Pagounis E, Talvitie M, Lindroos V K. Influence of reinforcement volume fraction and size on the microstructure and abrasion wear resistance of hot isostatic pressed white iron matrix composites[J]. *Metall Mater Trans*, 1996, 27A (12): 4 171~ 4 181
- [6] 齐育红,张占平,黑祖昆,等. Al₆₅Cu₂₀Cr₁₅准晶颗粒/A1 基复合材料的摩擦学性能[J]. *摩擦学学报*, 1998, 18(2): 129~ 135

Effect of the Volume Fraction and Size of TiC Particles on the Abrasive Wear Resistance of In Situ TiC_p/Fe Composites

YAN You-wei¹, WEI Bo-kang², FU Zheng-yi¹,
LIN Han-tong², YUAN Run-zhang¹

(1. State Key Lab of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Institute of Materials, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The effect of the volume fraction and size of TiC particles on the abrasive wear resistance of *in situ* TiC_p/Fe composites has been studied. The results show that, when the average size of TiC particles is constant (5.0 μm), the wear resistance of the composite increases with the TiC volume fraction. However, when the volume fraction is constant (10%), the wear resistance decreases at the particle size above 5.0 μm, owing to the spalling of TiC particles, although the wear resistance increases with the increasing of particle size below 5.0 μm. The interparticle spacing between the TiC particles plays an important role in increasing the abrasive wear resistance of the composite. Namely, the smaller the spacing, the higher the wear resistance of the composite will be.

Key words: *in situ* TiC particle; ferrous matrix composite; interparticle spacing; abrasive wear

Classifying number: TB 331