

Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金磨粒磨损行为

王智慧, 贺定勇, 蒋建敏, 崔丽

(北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124)

摘要: 采用埋弧堆焊方法,在 Q235 钢表面制备 Fe-Cr-C 耐磨合金,在 MLS-225 型湿式橡胶轮磨粒磨损试验机上进行磨粒磨损试验,通过对磨损试样表面的扫描电子显微镜观察分析并结合能谱成分分析研究磨损形成机制. 结果表明,Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金在试验的湿石英砂磨料磨损条件下,磨损机制以微裂纹引起的剥落去除机制为主,也存在一定数量的犁沟或犁皱造成的微切削去除机制. 剥落的发生与碳化物密切相关,能谱成分分析表明剥落坑内 Cr 元素含量对应应在 $(Cr, Fe)_7C_3$ 铬含量范围内,说明剥落坑是碳化物断裂造成的.

关键词: Fe-Cr-C 堆焊合金; 磨损机制; 碳化物; 剥落

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2010)11-0073-04



王智慧

0 序 言

Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金是典型的自生碳化物强化的复合材料. 在堆焊合金中按适当的比例加入碳素铬铁,使 Fe-Cr-C 形成具有亚共晶或过共晶成分. 在堆焊金属的结晶过程中,液态金属中首先结晶出初生碳化物 M_7C_3 ,在进一步的冷却过程中,当温度达到共晶线时析出共晶碳化物. 堆焊层基体组织是初生碳化物 + 残余奥氏体 + 共晶碳化物 + 少量马氏体^[1]. 这种组织形态表现出了优良的耐粒磨损性能^[2,3]. 对 Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金以及以此合金为基础派生出的堆焊合金耐磨性能方面的研究已经有一些报导^[4-6],但针对此合金耐磨机制方面的研究还鲜有报道. 文中针对 Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金在磨粒磨损的耐磨机制方面开展研究.

1 试验方法

试验用基体材料为厚度 8 mm 的 Q235 钢板,将配制好的合金粉预铺在基板上,采用埋弧自动焊机进行堆焊. 焊丝为 H08A,焊剂为 HJ170. 堆焊工艺参数为:焊接电流 450 A;电弧电压 35 V;焊接速度 360 mm/min. 堆焊层厚度 4 mm,堆焊层的化学成分见表 1.

收稿日期: 2009-07-06
基金项目: 北京市教育委员会科技计划资助项目(00900054R5004)

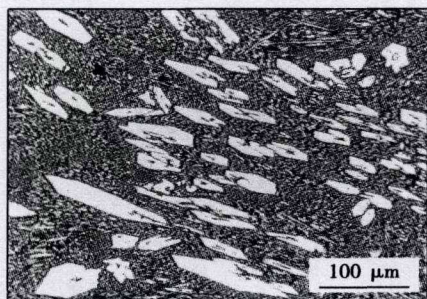
表 1 堆焊层化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of overlayer

C	Cr	Mn	Si	Fe
3.0~4.0	26~32	1.2~1.5	0.55~1.00	余量

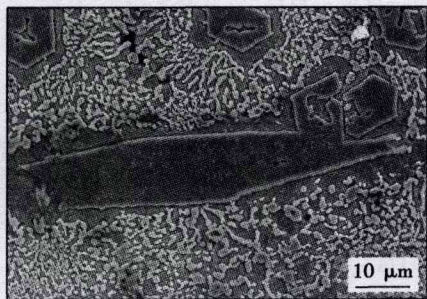
堆焊完的试样在焊缝中部取样,磨粒磨损试验在 MLS-225 型湿式橡胶轮磨粒磨损试验机上进行,橡胶轮直径为 176 mm,转速为 240 r/m,橡胶轮硬度为 60(SHORE HARDNESS),载荷为 100 N,磨料为 40~70 目石英砂,砂浆比例为 1 500 g 砂加 1 000 g 水. 先预磨 1 000 r,然后记录磨损前试样的重量,再经过 2 000 r 的精磨. 磨损试验后,在试样中部的磨损痕迹处用线切割切出 10 mm × 10 mm 试块,用无水乙醇清洗后在 S-3400N 型场发射扫描电镜下观察形貌并进行能谱分析.

2 试验结果

图 1 为 Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金的光学金相显微组织形貌,基体组织上分布着一些初生碳化物 M_7C_3 和细小的共晶碳化物. 初生碳化物主要特征是白色棱柱形状,且内部存在空洞,金相观察面与棱柱轴线垂直时其截面多呈六边形. 共晶碳化物在光学显微镜下不易分辨,扫描电子显微镜的照片如图 1b 所示,共晶碳化物分布于初生碳化物周围. 硬度测试结果见表 2. 初生碳化物和共晶碳化物是合金的主要抗磨硬质相.



(a) 光学显微组织形貌



(b) 扫描电镜组织形貌

图1 Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金显微组织形貌

Fig. 1 Microstructures of Fe-Cr-C hardfacing alloy

表2 基体组织和初生碳化物的硬度

Table 2 Hardness of primary carbides and matrix

显微硬度 (HV)		宏观硬度 (HRC)
初生形碳化物	基体	
1 200 ~ 1 700	700 ~ 800	57.7

图2为经过磨损后试样的表面形貌。可看出磨损表面有犁沟状磨削痕,同时还看到材料脱落的剥落坑(图中不规则的黑点)。在高放大倍数下发现剥落坑内存在大量微裂纹(图3)。微裂纹一般形成闭合的多边形状,从裂纹的宽度上判断,有的剥落坑内裂纹有主干(图3a中A处所示)和分支(图3a中B处所示),分支裂纹与主裂纹呈大角度相交,一般为 $80^\circ \sim 90^\circ$ 。在剥落坑边缘,未剥落的区域存在

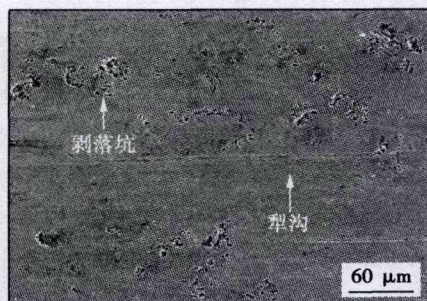
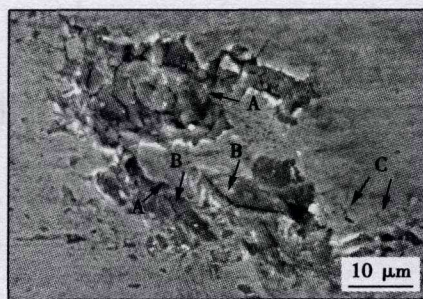
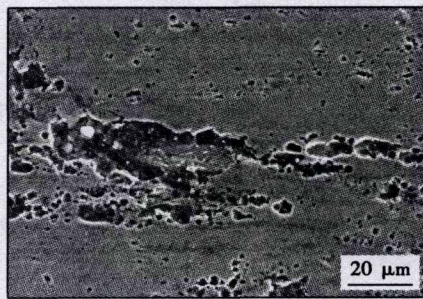


图2 磨损表面形貌

Fig. 2 Morphology of worn surface



(a) 剥落坑内的微裂纹



(b) 剥落坑形貌

图3 磨损表面的剥落坑和剥落坑内的微裂纹

Fig. 3 Crater-like pits of worn surface and micro-cracks in it

表面微裂纹(图3a中C处所示)。

从磨损表面的整体形貌上看,犁沟式的切削去除机制并不是主要去除机制,而微裂纹引起的剥落机制占主导地位。从剥落坑的分布上看,一般呈独立状态分布,有的剥落坑相互连接。剥落坑的形状无规则,有些区域存在近似圆形的小剥落坑(见图3b的下部)。

从图1的显微组织中可以看到Fe-Cr-C耐磨堆焊合金的组织是基体上分布着一些初生碳化物 $(Cr, Fe)_7C_3$ 和细小的共晶碳化物,共晶碳化物也是 $(Cr, Fe)_7C_3$ 相。为了确定剥落坑是否是碳化物剥落造成的,对剥落坑内及没有发生剥落的表面进行能谱成分分析,如图4所示。图中A处Cr元素含量为49.5%,B处Cr元素含量为24.6%。从对Cr, Fe元素的面扫描成分分析可以看出, Cr元素在剥落坑内含量高,其面分布的形状与剥落坑一致。根据文献[7], $(Cr, Fe)_7C_3$ 相Cr元素的含量范围为37%~60%,基体的Cr元素含量范围为17%~25%。从成分上看剥落坑应该是碳化物断裂或剥落形成的凹坑。

图5为试验中发现的剥落坑内碳化物的形态,能谱分析表明图中A处的Cr元素含量为55.2%;B处的Cr元素含量为55.3%;C处的Cr元素含量为22.4%。从成分上可以证明A和B对应的是 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物,从碳化物的尺寸上看,A处的

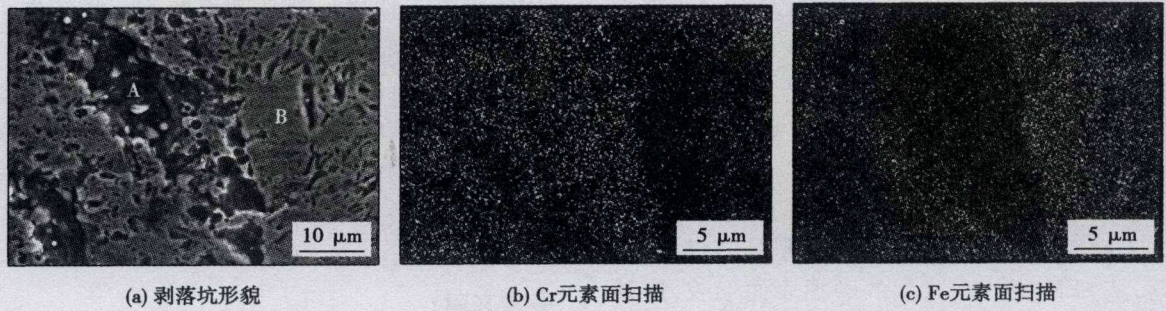


图 4 剥落坑局部面扫描分析
Fig. 4 Energy spectrum analysis of local composition

位置应该是一次碳化物, B 处对应的碳化物是共晶碳化物. 从图中还可以看到一次碳化物已经发生断裂(图中粗箭头处), 细小的共晶碳化物也在局部有断裂的迹象(图 5 中 B 处).

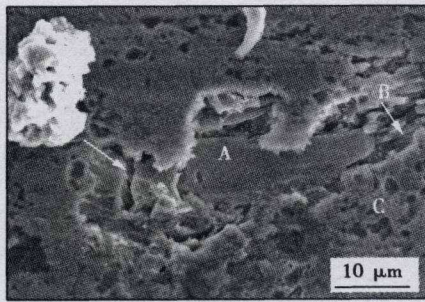


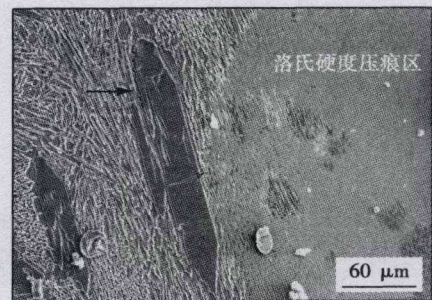
图 5 剥落坑内碳化物形态
Fig. 5 Morphology of carbide in crater-like pits

材料表面时,其亚表面可以产生垂直于表面的残余拉应力,在这个应力的作用下,材料内部微观缺陷处会形成微裂纹,其扩展将平行于表面.

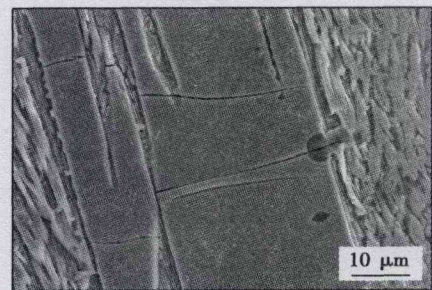
文中的研究过程中并未发现平行于表面的微裂纹,这可能与试验中的观察面平行于磨损表面有关. 对于 $(Cr, Fe)_7C_3$ 硬质相,其硬度为 1 200 ~ 1 700 HV,目前还没有其韧性指标的数据,通过观察洛氏硬度测试留下的压痕可以看到(图 6)压痕边缘的一个 $(Cr, Fe)_7C_3$ 碳化物发生了开裂,裂纹只在碳化物内扩展,到达基体后止裂,这至少能说明碳化物和基体之间的韧性匹配关系,即 $(Cr, Fe)_7C_3$ 本身的脆性很大,而基体有相对较好的韧性. 同时易开裂

3 讨 论

Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金在文中试验条件下表现出了明显的剥落坑去除机制. 剥落坑的形成与应力作用下硬粒子滑动和冲击有关,它往往要经历裂纹形核及扩展过程. 在低应力磨粒磨损条件下,磨粒在应力作用下在试样表面发生滑动和压入,造成犁沟或犁皱,使材料推向周围或前端. 基体组织较高的硬度和大量的高硬度一次碳化物配合,使微观切削阻力很大. 磨粒反复冲刷材料表面,在局部区域形成微观塑性变形,从而造成材料晶格的畸变,当达到极限时,材料出现微观裂纹,裂纹在磨料的反复作用下扩展. 微裂纹可以产生于金属表面,也可以产生于距表面一定深度. 试验中已经观察到表面的微裂纹(图 3a 中 C 处). 20 世纪 70 年代,美国麻省理工学院的 Suh^[8] 提出了剥层磨损理论,受到了广泛的重视与探讨,按照 Suh 的理论,当磨粒冲击滑过



(a) 碳化物上的裂纹



(b) 碳化物裂纹放大图

图 6 洛氏硬度压痕旁碳化物开裂
Fig. 6 Rockwell hardness impression and cracking in carbide

的区域是碳化物与基体的界面,在图左上方的箭头处可以看到基体与碳化物之间的裂纹.这说明基体与碳化物之间在塑性变形过程中容易产生裂纹.

综合以上试验结果可以将 Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金在磨粒磨损条件下的磨损机制归结如下:(1) 磨损表面存在一定数量的犁沟,磨粒在应力作用下在试样的表面滑动和压入造成犁沟或犁皱,使材料发生剥落,从 SEM 照片观察到的磨损表面形貌,这种去除机制不占主导地位.(2) 在磨料反复磨削作用下碳化物首先发生微裂纹,一次碳化物硬而脆,很难发生塑性变形,在物料颗粒压应力作用和反复疲劳作用下就会萌发生裂纹,同时,磨料对试样的反复冲撞,使试样表面发生弹性变形和塑料变形,基体发生的塑性变形不能和碳化物协调一致,碳化物与基体的相界面处是缺陷的聚集处,基体的塑性变形造成位错在此处塞集,当应力集中达到一定程度而发生开裂.从图 4 和图 5 的试验结果可以断定剥落坑是碳化物断裂或碳化物与基体之间剥离产生的,在剥落坑内观察到的裂纹证实碳化物首先形成垂直与表面的微裂纹,这种裂纹在很多区域并不是单一的,而是多个裂纹呈不规则形状相互连接.按照 Suh^[8]的理论,当磨粒冲击滑过材料表面时,其亚表面可以产生垂直于表面的残余拉应力,当这个应力大于产生裂纹的临界应力时,材料内部平行于亚表面处会形成微裂纹,其扩展将平行于表面,被多个裂纹封闭的一块材料其下面如果存在平行于表面的裂纹就会造成此处材料的剥落.

4 结 论

(1) Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金在试验的湿石英砂磨料磨损条件下磨损机制以微裂纹引起的剥落去除机制为主,碳化物在磨料的应力作用下首先生成微裂纹,微裂纹扩展形成闭合,在垂直与表面的拉

应力作用下,造成材料的磨损脱落.也存在一定数量的犁沟或犁皱造成的微切削去除机制.

(2) 剥落的发生与碳化物密切相关,能谱成分分析表面剥落坑内 Cr 元素含量对应应在 $(Cr, Fe)_7C_3$ 复合碳化物的铬含量范围内,说明剥落坑是碳化物断裂造成的.

参考文献:

- [1] Wang Z H, Wang Q B, Cui L, *et al.* Influence of cooling rate and composition on orientation of primary carbides of Fe-Cr-C hardfacing alloys[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13(7): 656 - 662.
- [2] 王清宝, 王智慧. Fe-Cr-C 系高耐磨堆焊合金组织及性能[J]. *焊接学报*, 2004, 25(6): 119 - 124.
Wang Qingbao, Wang Zhihui. Microstructures and properties of Fe-Cr-C hardfacing alloys with high carbon content[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, 25(6): 119 - 124.
- [3] Atamert S, Bhadeshia H K D H. Microstructure and stability of Fe-Cr-C hardfacing alloys[J]. *Materials Science and Engineering*, 1990, 130(3): 101 - 111.
- [4] Buchely M F, Gutierrez J C, Leon L M, *et al.* The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloy [J]. *Wear*, 2005, 259(5): 52 - 61.
- [5] Sapate S G, Rama Rao A V. Effect of carbide volume fraction on erosive wear behaviour of hardfacing cast irons[J]. *Wear*, 2004, 256(3): 774 - 786.
- [6] Svensson L E, Greftoft B, Ulander B, *et al.* Fe-Cr-C hardfacing alloys for high-temperature applications[J]. *Journal of Materials Science*, 1986, 21(1): 1015 - 1019.
- [7] 郝石坚. 现代铸铁学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [8] Suh N P. An overview of the delamination theory of wear[J]. *Wear*, 1977, 44(5): 1 - 15.

作者简介: 王智慧, 男, 1956 年出生, 硕士, 教授级高级工程师. 主要从事金属表面强化、环境协调性焊接材料研究. 发表论文 70 余篇.

Email: zhwang@bjut.edu.cn