

Fe-C-Cr-Mn 亚稳奥氏体铸铁磨损表层的 TEM 观察

齐育红¹, 马永庆¹, 张占平¹, 黑祖昆¹, 秦 颖²

(1 大连海事大学 材料工艺研究所, 辽宁 大连 116026; 2 大连理工大学 物理系, 辽宁 大连 116024)

摘要: 用透射电镜观察了 Fe-C-Cr-Mn 亚稳奥氏体基铸铁在 800[#] SiC 砂纸上经往复摩擦磨损试验后磨损表层的微观结构。结果表明: 摩擦表层奥氏体基体的微观组织结构不均匀, 有位错区、层错区、滑移区和 ϵ -马氏体区; 此外, 还观察到了大量的奥氏体变体, 沿其 $[1\bar{3}1]$ 晶带轴旋转 25°~35° 可与基体 $[112]$ 晶带轴重合; 在碳化物颗粒附近只观察到奥氏体变体和层错。

关键词: Fe-C-Cr-Mn 铸铁; 亚稳奥氏体; 微观结构; 奥氏体亚结构

中图分类号: TG143.9

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(2000)03-0193-04

高铬铸铁是一类应用最广的耐磨材料, 其不仅具有较高的强度、韧性和耐磨性, 还具有相当好的耐热及耐腐蚀性能。研究发现, 经过专门合金成分设计的以奥氏体为基体的高铬铸铁在一定条件下比以马氏体为基体的高铬铸铁具有更高的耐磨性^[1, 2]; 高铬铸铁的耐磨性随组织中奥氏体含量增加而增加。在摩擦磨损过程中, 磨损表面亚稳奥氏体发生马氏体相变, 使耐磨能力大大提高, 且原奥氏体量越多, 诱发马氏体相变量越多, 材料的耐磨性越好^[3, 4]。为此, 马永庆^[5]等开发研制了系列铸态亚稳奥氏体基耐磨材料。通过合金设计, 使得该材料中的亚稳奥氏体基体在摩擦磨损过程中发生马氏体相变, 从而提高耐磨性能。

Fe-C-Cr-Mn 系铸铁是一类亚稳奥氏体基耐磨材料。本文利用透射电子显微镜(TEM)从微观结构上揭示亚稳奥氏体组织在外界应力作用下发生马氏体相变并进而改变材料性能的本质。

1 试验方法

试验所用 Fe-C-Cr-Mn 材料成分的为: 2.7% C, 21% Cr, 4.7% Mn (以质量分数计)。用 W S-20 型非自耗真空电弧炉熔炼得到尺寸为 10 mm × 10 mm × 10 mm 的铸态样品。采用 800[#] SiC 砂纸作为偶件, 在往复式摩擦磨损试验机上考察铸铁试样的摩擦磨损性能, 载荷为 50 kN。摩擦磨损试验结束后, 用电火花切割仪沿铸铁试样滑动表面切取薄片, 打磨减薄至约 50 μ m, 然后在 10% 高氯酸/酒精溶液中进行电解双

喷, 穿孔后在离子减薄器上用氩离子轰击 20 min 以除去表面腐蚀产物, 即得到 TEM 观察用样品。

2 结果与分析

图 1 示出了奥氏体基体中不同区域的一组 111 衍射列的明场像。可以看出, 奥氏体经摩擦作用后形成大量的位错、不全位错、肖克莱层错、 ϵ -马氏体和滑移带。图 1(a) 所示为典型的位错和扩展层错的混合区, 位错主要由平行的位错列和杂乱无章的弯曲位错组成。部分层错与普通位错相接, 有的层错则由 2 个不同取向的层错相遇而合成。图 1(b) 是典型的位错和 ϵ -马氏体组织的混合区, 其中部为树枝状位错群, 其余大多是平行位错列。 ϵ -马氏体呈长条形, 取向基本相同; 一些 ϵ -马氏体条由不同的菱形片组成, 片与片之间有着明显的缝隙, 这与文献[6]报道的结果相一致。图 1(c) 是典型的 ϵ -马氏体形核区, 图中存在大量的扩展层错, ϵ -马氏体在层错上形核(图中箭头所示)。图 1(d) 是典型的滑移区, 在 $\{111\}$ 面上存在平行的滑移带, 滑移带之间有位错、层错和 ϵ -马氏体。

图 2 示出了滑移区 TEM 形貌照片, 图 2(a) 是电子束与 $[112]$ 晶带轴平行时的明场图像, 在 $(1\bar{1}1)$ 面上出现平行的滑移线, 在与 $(1\bar{1}\bar{1})$ 相交的其它 $\{111\}$ 面上形成大量的层错和 ϵ -马氏体。图 2(b) 所示为电子束与 $[0\bar{1}\bar{1}]$ 晶带轴平行时的明场图像, 在 $(1\bar{1}1)$ 和 $(1\bar{1}\bar{1})$ 面产生了大量的滑移带, 在 $[1\bar{1}\bar{1}]$ 方向上滑移带的间距比在 $[1\bar{1}1]$ 方向上宽, 这正是由于在这 2 个

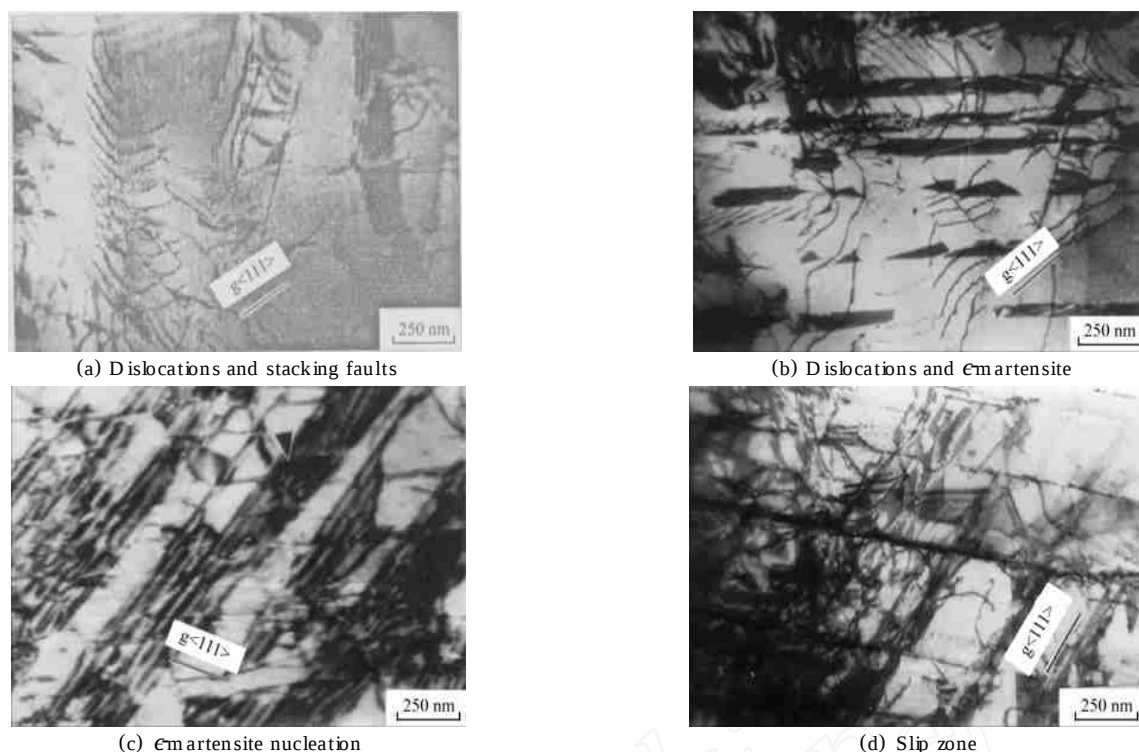


Fig 1 The bright-field images of the 111 diffraction row from the different areas of austenite

图 1 奥氏体基体中不同区域的一组 111 衍射列的明场图像

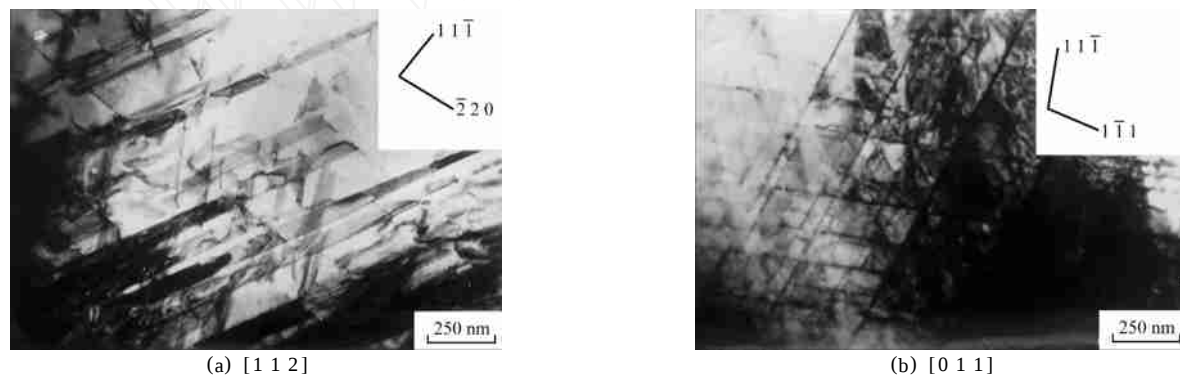


Fig 2 Micrographs of slip zone in austenite

图 2 滑移区的 TEM 形貌照片

方向上的摩擦剪切应力大小不同所致

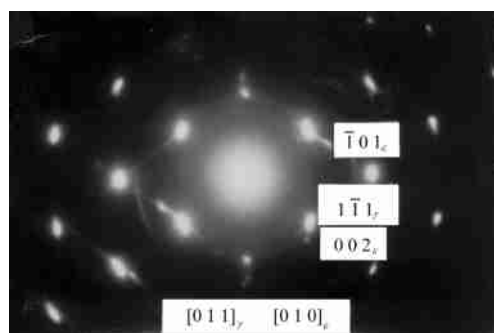
图 3 示出了 ϵ -马氏体片的 TEM 形貌照片及相应的电子衍射照片。图 3(a) 是电子束与 $[0\ 1\ \bar{1}]_{\epsilon}$ 晶带轴平行时的明场像。可见在 $(1\ \bar{1}\ 1)_{\gamma}$ 面上生成了较多的 ϵ -马氏体 (图中所示为 ϵ -马氏体片的垂直截面), 测量得出 ϵ -马氏体片厚约 25 nm。图 3(b) 所示为图 3(a) 对应的电子衍射图谱, 是奥氏体 $[0\ \bar{1}\ 1]_{\gamma}$ 晶带轴与 ϵ -马氏体片 $[0\ 1\ 0]_{\epsilon}$ 晶带轴合成的衍射图谱。从图 3(b) 可以得到 ϵ -马氏体片和奥氏体的取向关系为: $(1\ \bar{1}\ 1)_{\gamma} \parallel (0\ 0\ 2)_{\epsilon}$, $[0\ 1\ \bar{1}]_{\gamma} \parallel [0\ 1\ 0]_{\epsilon}$ 。图 3(c) 所示为电子束

与 $[0\ 0\ 1]_{\epsilon}$ 晶带轴平行时的明场像, 对应的电子衍射图谱如图 3(d) 所示, 它是奥氏体 $[1\ 1\ 2]_{\gamma}$ 晶带轴与 ϵ -马氏体片 $[0\ 0\ 1]_{\epsilon}$ 晶带轴合成的衍射图谱。从图 3(d) 可以得到 ϵ -马氏体片和奥氏体的另一组取向关系为 $(1\ \bar{1}\ 1)_{\gamma} \parallel (\bar{1}\ 0\ 0)_{\epsilon}$ 和 $[1\ 1\ 2]_{\gamma} \parallel [0\ 0\ 1]_{\epsilon}$ 。

典型的奥氏体基体形貌如图 4(a) 所示, 在奥氏体基体上形成了具有一定取向的条状奥氏体变体, 对应的电子衍射图谱如图 4(b) 所示, 奥氏体基体可用 $[1\ 1\ 2]_{\gamma}$ 晶带轴标定, 条状奥氏体变体可用 $[0\ \bar{1}\ \bar{3}]_{\gamma}$ 晶带轴标定, 它沿 $[1\ 3\ 1]_{\gamma}$ 晶带轴旋转 25.35° 可与基



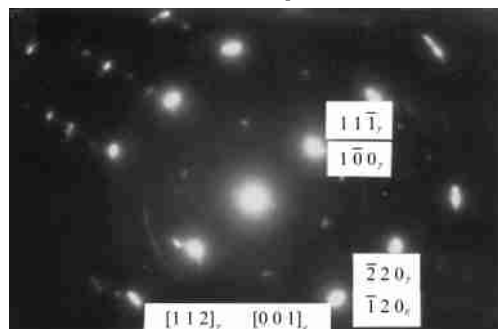
(a) Bright-field image



(b) The diffraction pattern of (a)



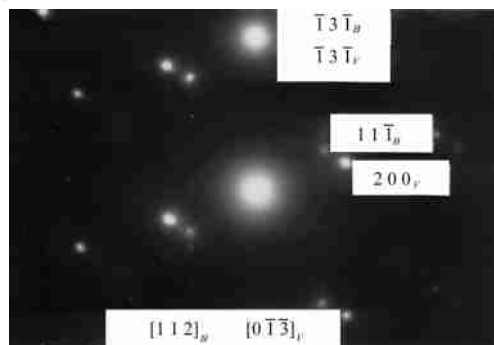
(c) Bright-field image



(d) The diffraction pattern of (c)

Fig 3 The bright images and the corresponding diffraction patterns of ϵ -martensite图 3 ϵ -马氏体片的电镜形貌及相应的电子衍射谱

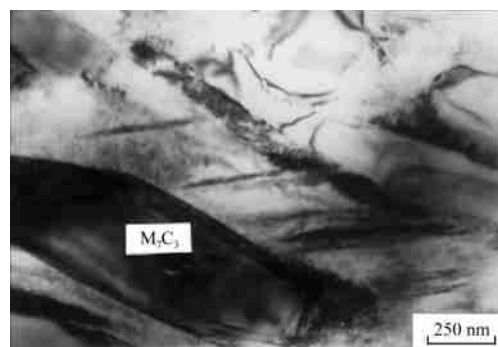
(a) Bright-field image



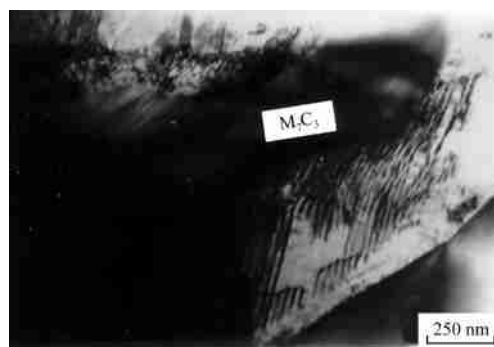
(b) The diffraction pattern of (a)

Fig 4 The substructure of austenite

图 4 奥氏体中变体的 TEM 形貌照片



(a) Substructure



(b) Stacking faults

Fig 5 The micrographs of austenite between carbides

图 5 碳化物对奥氏体基体微结构的影响

体 $[112]$ 晶带轴重合, 其形成机理待于进一步研究

碳化物对奥氏体基体微结构的影响如图 5 所示从图 5(a) 可以看出, 2 个碳化物颗粒之间存在条状的奥氏体变体, 它们终止于奥氏体晶粒内而未延伸到奥氏体与碳化物的界面 图 5(b) 是 2 个碳化物颗粒之间密集(layer)的层错, 一端在奥氏体与碳化物的界面上 在碳化物颗粒附近未观察到 ϵ -马氏体

3 讨论

本研究所用的 Fe-C-Cr-Mn 铸铁经专门的成分设计获得了亚稳奥氏体基体, 其在外界能量(如摩擦应力、冲击应力)作用下易于发生马氏体相变^[7]. 该材料常在铸态下使用, 加上存在碳化物, 故奥氏体中存在着大小不同的热应力和组织应力 在摩擦力作用下, 材料表面受到切向应力, 结果使原奥氏体基体在宏观上又受到某一方向上的往复式应力的作用, 使得在奥氏体各个晶粒中的 $\{111\}$ 密排面上的应力大小不同, 且处于动态变化之中

我们的研究表明, 在摩擦磨损试验后奥氏体中产生了大量的位错、层错、奥氏体变体、滑移带及 ϵ -马氏体, 且分布不均匀, 这正是由于奥氏体基体微观结构中所受应力大小和方向不相同而造成的 磨损表层的位错、奥氏体变体、层错、滑移带、 ϵ -马氏体及奥氏体基体上的碳化物构成了复杂的应力状态及微观结构; 它们相互作用和转变, 并抵抗外界摩擦应力引起的破裂及变形, 从而使铸铁材料表现出良好的耐

磨性

4 结论

- a 磨损表层奥氏体基体的微观组织结构不均匀, 有位错区、层错区、滑移区及 ϵ -马氏体区
- b 在磨损表层还存在大量的奥氏体变体, 沿着其 $[1\bar{3}1]$ 晶带轴旋转 $25^\circ \sim 35^\circ$ 可与基体 $[112]$ 晶带轴重合
- c 在碳化物颗粒的附近仅存在奥氏体变体和层错

参考文献:

- [1] 麻生节夫, 田上道弘, 后藤正治 Fe-Cr-C-B 系合金铸造材料的机械性质[J]. 日本金属学会志, 1992, 56 (6): 707~ 714
- [2] Dogan O N, Hawk J A, Laird G Solidification structure and abrasion resistance of high chromium white irons[J]. Metal Trans A, 1997, 28A: 1315~ 1328
- [3] 张福成, 郑炆曾, 朱瑞雪, 等 介稳奥氏体锰钢耐磨性的研究[J]. 钢铁, 1996, 31(1): 58~ 62
- [4] 刘喜明, 邹占田, 于长山, 等 摩擦磨损中的马氏体相变及其对材料磨损特性的影响[J]. 金属热处理, 1997, (3): 8~ 12
- [5] 马永庆, 许晓磊, 于志伟, 等 Fe-C-Cr-Ni 亚稳奥氏体基合金摩擦磨损表层特性[J]. 机械工程材料, 1997, 21 (6): 44~ 46
- [6] Liu Q, Ma Z, Gu N. The $\gamma \rightarrow \epsilon$ Martensitic Transformation and Its Reversion in the Fe-Mn-Si-Cr-Ni Shape Memory Alloy [J]. Metall Trans A, 1998, 29A (6): 1579~ 1583
- [7] 戴乐阳, 马永庆 Fe-C-Cr-Mn 系耐磨合金的结构设计[J]. 大连海事大学学报, 1999, 25 (增刊): 87~ 91

TEM Observation of the Worn Surface Layer in Metastable Austenite Fe-C-Cr-Mn Cast Iron

Q I Yu-hong¹, MA Yong-qing¹, ZHANG Zhan-ping¹, HE I Zu-kun¹, Q N Ying²

(1. Institute of Materials & Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Department of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The microstructure of austenite in the worn surface layer of Fe-C-Cr-Mn cast iron sliding against 800# SiC sand paper was observed with a transmission electron microscope (TEM). As the results, the microstructure of austenite on the worn surface layer is unhomogeneous in which there are dislocation zones, stacking fault zones, slip zones, ϵ -martensite zones and some austenite variants. Only strip austenite substructure and stacking fault were observed around the carbides.

Key words: Fe-C-Cr-Mn cast iron; metastable austenite; microstructure; austenite variant