

# Fe - Cr - C 耐磨堆焊合金中初生碳化物 生长方向的控制

王智慧<sup>1</sup>, 王清宝<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100022; 2. 中冶集团 建筑  
研究总院 硬面技术中心, 北京 100088)

**摘 要:** 用两种方法对 Fe - Cr - C 系耐磨堆焊合金中初生碳化物的生长方向进行了研究。探讨了含碳量(质量分数, %)分别为 3.34、4.11、5.16 和 6.5 的耐磨堆焊合金碳含量及铬 - 碳比对初生碳化物的生长方向的影响, 并采用控制冷却条件的方法对堆焊层微观组织中碳化物定向生长进行了研究。得出了冷却条件对初生碳化物生长方向的影响规律。试验结果表明, 碳含量及冷却条件对耐磨堆焊层的金相组织起决定性的作用, 提高含碳量或降低铬 - 碳比会使 Fe - Cr - C 系耐磨堆焊合金中初生碳化物趋向垂直于耐磨堆焊层表面生长, 并且初生碳化物的密度显著提高。冷却条件和散热方向可以有效地控制初生碳化物的生长方向, 采用基板背面水冷却的方法可以使初生碳化物趋向垂直于耐磨堆焊层表面生长。当改变冷却条件降低冷却速度时, 初生碳化物会随机地沿任何方向生长。

**关键词:** 初生碳化物; 生长方向; 堆焊合金

**中图分类号:** TG455 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 360X(2004)01 - 103 - 05



王智慧

## 0 序 言

Fe - Cr - C 系耐磨堆焊合金由于硬度高, 综合性能好, 价格低廉而被广泛应用于工业生产领域中的耐低应力磨料磨损的工况环境。这种合金的耐磨机制主要靠结晶过程中生成的高硬度初生碳化物  $M_7C_3$  作为抗磨质点<sup>[1,2]</sup>, 配合具有较高硬度的过共晶基体实现良好的综合性能。在以往的研究中发现<sup>[3]</sup>, 初生碳化物  $M_7C_3$  为柱状结构, 其横截面的硬度高, 纵向截面的硬度相对较低, 如果能合理地控制碳化物生长方向, 使之垂直于耐磨层表面, 把碳化物做成定向排列的自生复合材料, 当初生碳化物纤维与磨损表面相垂直时, 会有利于材料耐磨性能的提高<sup>[2]</sup>。这将为进一步提高材料耐磨性, 节省贵重合金提供了一条有效途径, 对充分发挥抗磨材料的综合性能有着重要的意义。

目前, 对高碳耐磨复合材料定向生长技术的研究并不多, 特别是对以手工电弧堆焊获得的高碳耐磨合金初生碳化物的定向生长技术方面的研究尚未见报道。作者采用自行研制的 Fe - Cr - C 系耐磨堆焊焊条, 用两种方法对初生碳化物的定向生长进

行了有效的控制。通过试验研究了碳含量、铬 - 碳比、冷却方式对初生碳化物生长方向的影响。

## 1 试验方法

### 1.1 试验过程

化学成分和冷却方式会影响初生碳化物的生长方向。试验中采用两种方法控制初生碳化物的生长方向。首先自行研制了四种不同碳含量和铬 - 碳比的 Fe - Cr - C 系耐磨堆焊焊条, 焊条采用酸性渣系, 药皮过渡合金的方法。经过多轮试验, 确定了四种不同碳含量的配方, 其编号分别为 1 号、2 号、3 号、4 号。配方确定的原则是使碳含量逐渐增加, 铬 - 碳比逐渐降低。考察化学成分(主要是碳含量、铬 - 碳比)对初生碳化物的影响。

控制碳化物生长方向的另一种方法是控制冷却速度和冷却时的散热方向。试验采用母材水冷却、室温自然冷却和预热的方法, 考察冷却速度和冷却时的散热方向变化对初生碳化物生长方向的影响。

### 1.2 焊接方法

堆焊焊条直径为  $\phi 4$  mm, 使用交流弧焊机。堆焊电流为 160 ~ 180 A, 电压 24 ~ 28 V。堆焊四层。

### 1.3 化学成分分析

在 1 号 ~ 4 号四种不同堆焊层表面取样, 进行

化学成分分析。

1.4 冷却条件控制

将 10 mm 厚的 Q235 钢板切取 30 mm × 60 mm 作为试板,分三种冷却条件进行堆焊试验:(1)水冷却定向凝固试验。将试板放置在冷却水槽中,冷却装置如图 1 所示。加冷却水使试板浸在水中 5 mm 深,然后进行堆焊试验。(2)在室温、自然冷却条件下进行堆焊试验。(3)将试板预热 250 ℃后,在室温、自然冷却条件下进行堆焊试验。参加试验的是 1 号、3 号、4 号合金。

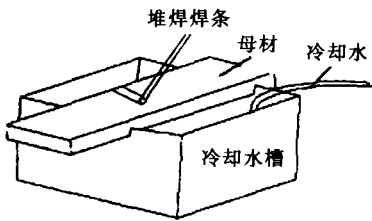


图 1 冷却装置示意图  
Fig.1 Schematic diagram of cooling device

1.5 取 样

在堆焊好的试板上切取 10 mm × 10 mm 试样,将堆焊层表面磨平,作为堆焊层表面组织分析的平台。取试样的横截面为另一分析平面。

1.6 显微硬度试验

用 HXD - 1000 型显微硬度计测试组织的显微硬度,载荷为 1 N。

1.7 组织分析

用 CLYMP VS - DEM 金相显微镜观察分析堆焊层的组织。

2 试验结果及分析

2.1 化学成分分析结果

四种含碳量不同的堆焊金属化学成分分析及铬 - 碳比结果列于表 1。

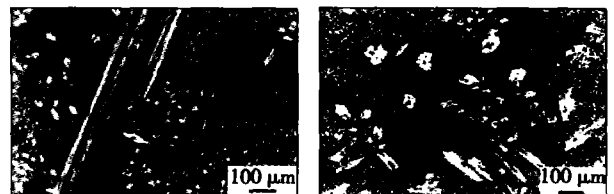
2.2 碳含量及铬 - 碳比对初生碳化物生长方向的影响

碳含量及铬 - 碳比不同将直接影响初生碳化物的数量、性质、尺寸、分布状态及基体组织性能。图 2 为上述四种堆焊合金的金相组织(观察面为耐

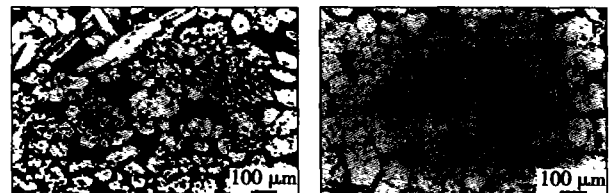
表 1 堆焊金属的主要化学成分(质量分数,%)及铬 - 碳比  
Table 1 Chemical compositions of hardfacing metal

编号	化学成分(质量分数,%)及铬 - 碳比		
	C	Cr	Cr/C
1	3.34	34.10	10.21
2	4.11	37.48	9.12
3	5.16	33.82	6.55
4	6.50	28.03	4.31

磨层表面)。在隐针马氏体和少量奥氏体的基体上分布着一些初生碳化物  $M_7C_3$ 。这些初生碳化物为柱状,横截面大致呈六角形,是 Fe - Cr - C 系耐磨堆焊合金中的最主要的耐磨硬质相。 $M_7C_3$  柱状碳化物的横截面和纵向截面的硬度见表 2。横截面硬度为 1 500 ~ 1 700 HV,棱柱纵向截面硬度一般只有 1 100 ~ 1 200 HV。



(a) 1 号试样碳含量 3.34% (b) 2 号试样碳含量 4.11%



(c) 3 号试样碳含量 5.16% (d) 4 号试样碳含量 6.50%

图 2 (堆焊层表面) Fe - Cr - C 堆焊合金中不同碳含量的金相组织(侵蚀剂:氯化铁溶液)

Fig.2 Microstructures of Fe - Cr - C hardfacing alloy with different carbon contents

在图 2 中可以看出碳含量、铬 - 碳比对初生碳化物生长方向的影响。判断初生碳化物生长方向的依据是,由于初生碳化物是棱柱形状,当金相观察面与棱柱垂直时,碳化物表现为多边形(一般为六边形)。当金相观察面与棱柱平行时,看到的碳化物为长条形。当金相观察面与棱柱成一定角度时,观察到的碳化物是不规则状长条或条状多边形。

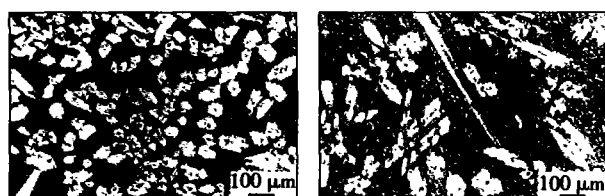
表 2 初生碳化物横截面和纵向截面硬度(HV)  
Table 2 Hardness of transverse section and lognitudinal section of primary carbide

测试点	显微硬度 HV			
	1	2	3	平均值
横截面	1 681.9	1 546.4	1 619.7	1 616.0
纵向截面	1 201.1	1 131.7	1 225.7	1 186.1

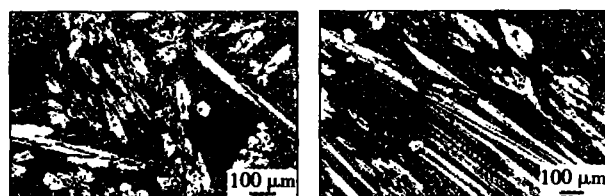
图 2a 所示的 1 号合金碳含量低,初生碳化物数量较少,且生长方向十分散乱,没有明显的方向性。图 2b、c 是 2 号试样和 3 号试样的金相组织。可以看出初生碳化物生长方向逐渐向垂直于耐磨层表面转变。当碳含量达到 6.5% 时(图 2d),初生碳化物基本垂直于耐磨层表面。由图可知,随碳含量的增加或碳-铬比的降低,初生碳化物越来越多,碳化物的生长方向越来越明显垂直于耐磨层表面。增加碳含量可以使碳化物趋向垂至于耐磨层表面。

### 2.3 控制冷却条件对初生碳化物生长方向的试验结果

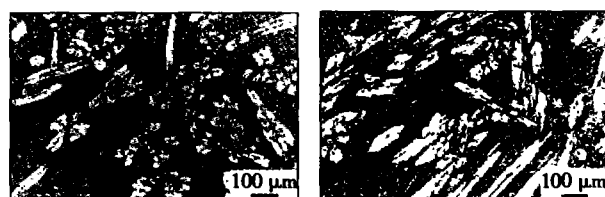
图 3 是碳含量为 4.11%,三种不同冷却条件的堆焊层表面与横截面的金相组织。其中图 3a、b、c 金相组织的观察平面为耐磨层表面,图 3d、e、f 的观察平面为与耐磨层表面相垂直的横截面。可以看出在强迫水冷的条件下(图 3a),棱柱状初生碳化物几乎全部与外表面垂直,而在与其相垂直的横向截面上(图 3d),柱状初生碳化物显现出棱柱的侧面——即白色的长条。图 3b、c 是室温自然冷却和预热自然冷却条件下堆焊层表面的组织,可以看出,初生碳化物的生长方向不确定。对应的试样横截面中初生碳化物的生长方向也不确定(图 3e、f)。



(a) 水冷却堆焊层表面 (b) 室温自然冷却堆焊层表面



(c) 预热自然冷却堆焊层表面 (d) 水冷却堆焊层横截面

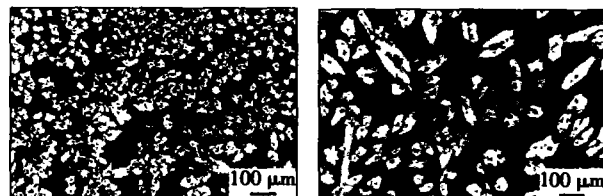


(e) 室温自然冷却堆焊层横截面 (f) 预热自然冷却堆焊层横截面

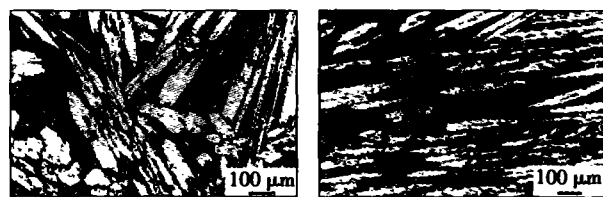
图 3 碳含量为 4.11%,冷却条件不同时堆焊层表面与横截面的金相组织(侵蚀剂:氯化铁溶液)

Fig.3 Microstructures of surface and transverse section of hardfacing metal under different cooling condition with carbon content of 4.11%

图 4 是碳含量为 5.16%,冷却条件不同时堆焊层表面与横截面的金相组织。初生碳化物生长规律与上一组试样基本一致,强迫水冷的试样中初生碳化物要比室温自然冷却和预热自然冷却条件下的更为细小,且密度也显著提高。由于碳含量的提高,室温自然冷却条件下(图 4 b),初生碳化物的生长方向趋于与堆焊层表面垂直。



(a) 水冷却堆焊层表面 (b) 室温自然冷却堆焊层表面



(c) 预热自然冷却堆焊层表面 (d) 水冷却堆焊层横截面



(e) 室温自然冷却堆焊层横截面 (f) 预热自然冷却堆焊层横截面

图 4 碳含量为 5.16%,冷却条件不同时堆焊层表面与横截面的金相组织(侵蚀剂:氯化铁溶液)

Fig.4 Microstructures of surface and transverse section of hardfacing metal under different cooling condition with carbon content of 5.16%

当碳含量为 6.5%,冷却条件不同时堆焊层表面与横截面的金相组织示于图 5。在这种高含碳量的情况下,即使室温自然冷却,初生碳化物也能在垂直方向生长(图 5 b)。其生长规律与图 3 中的情况基本一致,只是强迫水冷却时碳化物更细小、密集。而在预热条件下,初生碳化物比不预热情况下粗大得多。

通过以上试验结果可以看出,高铬堆焊合金中初生碳化物的生长方向是可以由化学成分和冷却条件控制的。提高碳含量或降低铬-碳比会使 Fe-Cr-C 系耐磨堆焊合金中的初生碳化物趋向于垂直于耐磨层表面生长,并且初生碳化物的密度显著增加。冷却条件和散热方向可以有效地控制初生碳化

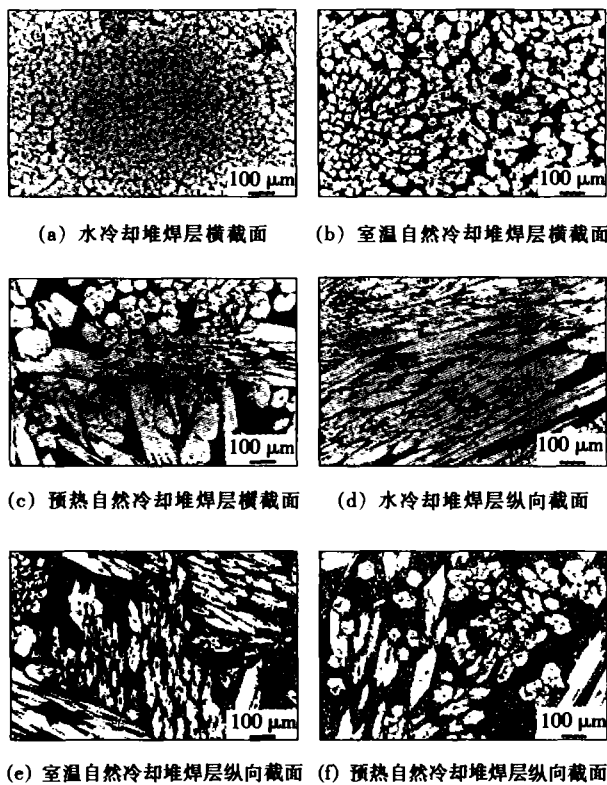


图 5 碳含量为 6.5%，冷却条件不同时堆焊层表面与横截面的金相组织(侵蚀剂:氯化铁溶液)  
Fig. 5 Microstructures of surface and transverse section of hardfacing metal under different cooling condition with carbon content of 6.5%

物的生长方向,采用基板背面水冷却的方法可以使初生碳化物向垂直于耐磨层表面生长。当改变冷却条件降低冷却速度时,初生碳化物会随机地沿任何方向生长。

### 3 讨 论

碳浓度对碳化物生长方向影响的机理目前还不清楚,对组织的观察分析可以看出,当碳含量很高时,由于有足够的碳的供应,碳化物的形核几率和长大速度应该有较大的提高。碳化物的生长一般以联生结晶方式进行,当碳含量很高,即碳化物密度很高时,联生结晶的其它生长方向受到抑制,其主要生长方向为垂直于等温线,这样就造成了高含碳量的堆焊合金中碳化物沿垂直于堆焊层表面的方向生长。

当存在强迫冷却条件时,由于堆焊时,堆焊焊道高于母材 2~5 mm,焊道的散热方向主要是垂直于等温线,其示意图见图 6。碳化物在联生结晶时,最易长大的方向与散热最快方向(或最大温度梯度方向)相一致时,最有利于晶体长大。在这种情况下,

焊道的散热方向是晶体长大方向的决定因素。所以,碳化物主要沿垂直于等温线——也就是近似垂直于堆焊层表面方向生长。

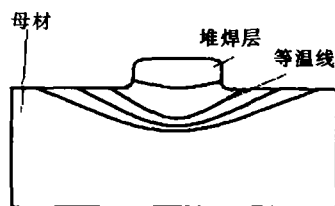


图 6 堆焊焊道热作用区的等温线示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of isotherm in heat affected zone

当进行强迫冷却时,随过冷度的提高,原子的扩散受到限制,碳化物成核几率增多,碳化物不易长大。所以碳化物数量逐渐增加,初生碳化物颗粒较小,颗粒大小比较均匀。过共晶合金中,共晶碳化物围绕着初生碳化物向四周辐射生长,当共晶团直径增大时,结晶潜热释放能量大,使共晶碳化物和初生碳化物颗粒均变粗。从已有的研究结果<sup>[4,5]</sup>知道,共晶团平均直径  $E_w$  ( $\mu\text{m}$ ) 与共晶凝固速率  $R_E$  ( $\text{cm}/\text{min}$ ) 的关系为  $E_w = A \cdot R_E^{-0.72}$ ,  $A$  为由合金成分决定的正值常数。由式可知,凝固速率越大,共晶团平均直径越小,结晶潜热释放能量越小。共晶团直径小,反映出初生碳化物密集;结晶潜热释放能量小,反映出碳化物细小。所以,水冷时碳化物最为细小、致密。预热时碳化物尺寸最大,自然冷却状态下处于二者之间。

当不存在强迫冷却条件(不预热、预热两种情况)时,碳化物在高温下生长、扩散时间长,碳化物的生长方向趋于随机,所以,生长方向零乱,没有规律性。

由于图 3、4、5 中的碳化物生长规律基本一致,可以说随过冷度的提高,碳化物呈纤维状存在,大体上平行排列,且基本上与抗磨表面相垂直,这样有利于抗磨性能的提高。这在一定程度上解决了如何在 Fe-Cr-C 系耐磨堆焊合金中,使碳化物尽可能多地转换成真正意义上的抗磨骨架的难题。

高碳耐磨堆焊表面硬化层中存在的碳化物都是分散状的,分散的碳化物被金属基相包裹。堆焊层中含有相当高比例的碳化物,同时有一定的韧性和强度。这种弥散碳化物可以很好地改善堆焊层性能。碳的浓度对堆焊层的组织和性能影响很大。碳含量偏低,则合金碳化物数量不足,宏观硬度低。随

[下转第 110 页]

接时4条环焊缝交叉分段焊接可以减小结构的平面度。

(4) 由表2可知,所有焊缝作用后,挖掘机下车架主件顶环面的平面度为0.68 mm,很难达到要求的0.5 mm,建议可以通过改变环焊缝的焊接顺序或者适当减小焊角尺寸(即减小收缩量)来降低顶环面的平面度。

## 4 结 论

(1) 由于大部分焊缝位于结构重心的上方,焊接后,模型整体出现下沉现象。因此,焊接时从减小焊接变形的角度考虑,交叉焊接底板焊缝和顶板焊缝是合理的。

(2) 焊接过程中随环焊缝的施加, $z$ 向相对变形越来越大,在一定角度达最大,随后,因单位焊缝周向位置作用减小而减小。焊接时内外环与顶板4条环焊缝交叉分段焊接可以减小结构的平面度。

(3) 根据预测结果,挖掘机下车架主件整个结

构焊后的顶环面平面度为0.68 mm,很难达到实际要求的0.5 mm。

## 参考文献:

- [1] Ueda Y, Kim Y C, Yuan M G. A predicting method of welding residual stress using source of residual stress (report i) - characteristics of inherent strain (source of residual stress)[J]. J Trans of JWRI, 1989, 18(1): 135 ~ 141.
- [2] 汪建华, 陆 皓. 预测焊接变形的残余塑性应变有限元方法[J]. 上海交通大学学报, 1997, 31(4): 53 ~ 56.
- [3] 库兹米诺夫 C A. 船体结构的焊接变形[M]. 王承权译. 北京: 国防工业出版社, 1978.
- [4] Wang Jianhua, Lu Hao. Prediction of welding deformations by FEM based on inherent strains [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (in English), 2000, 5(2): 83 ~ 87.

**作者简介:** 陈俊梅,女,1973年10月出生,博士后。研究方向为焊接过程的数值模拟及焊接结构的强度与断裂,发表论文10篇。

**Email:** cjmjtg@eyou.com

## [上接第106页]

碳含量的增加,堆焊层硬度提高。

碳含量的提高及冷却方式对碳化物的生长影响很大。随碳含量的增加,初生碳化物生长方向逐渐垂直于表面,而随过冷度的增加,碳化物颗粒变得均匀、细小。此时,碳化物垂直于母材定向生长。两种方法均可以使得碳化物定向生长。相关的研究<sup>[4]</sup>表明在切削型磨损的情况下,与碳化物纤维相垂直的面为磨损面时,工件的耐磨性最高;并预计减小碳化物之间的距离将使耐磨性能提高。试验中,增加碳含量和提高冷却速度都能减小碳化物之间的距离。这为进一步提高Fe-Cr-C耐磨堆焊合金的性能开辟了新的方向。

## 4 结 论

(1) 提高碳含量或降低铬-碳比会使Fe-Cr-C系耐磨堆焊合金中的初生碳化物趋向垂直于耐磨堆焊层表面生长,并且初生碳化物的密度显著提高。

(2) 冷却条件和散热方向可以有效地控制初生碳化物的生长方向,采用基板背面水冷却的方法可以使初生碳化物趋向垂直于耐磨堆焊层表面生长。当改变冷却条件降低冷却速度时,初生碳化物会随

机地沿任何方向生长。

(3) 提高冷却速度可以使初生碳化物密度提高,使碳化物组织细化,分布均匀。

## 参考文献:

- [1] 郝石坚. 高碳耐磨铸铁[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992. 79 ~ 232
- [2] 苏俊义. 铬系耐磨白口铸铁[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990. 183 ~ 196.
- [3] Kotecki J, Ogborn J S. Abrasion resistance of iron-based hardfacing alloys[J]. Welding Journal, 1994, 57(3): 269s ~ 278s.
- [4] Matsubara Y, Ogi K, Matsuda K. Eutectic solidification of high chromium cast iron-eutectic structures and their quantitative analysis[J]. Transactions of the American Foundrymen's Society, 1982, 89(6): 183 ~ 196.
- [5] Ogi K, Matsubara Y, Matsuda K. Eutectic solidification of high chromium cast iron-eutectic mechanism of eutectic growth[J]. Transactions of the American Foundrymen's Society, 1982, 89(6): 197 ~ 204.

**作者简介:** 王智慧,男,1956年出生,副教授。主要从事耐磨堆焊技术、异种钢焊接接头组织与性能及纳米复合吸波材料的研究,发表论文20余篇。

**Email:** zhwang@bjpu.edu.cn