

# 铸渗法制备金属基表面耐磨复合材料的发展现状

李祖来, 蒋业华, 周荣

(昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 介绍了铸渗法制备钢铁基表面耐磨复合材料的制备工艺分类、铸渗机理和铸渗组织研究的新进展, 总结了新近开发的一些改善铸渗效果的工艺措施, 并提出了今后研究工作中值得重视的几个问题。

**关键词:** 铸渗; 表面复合材料; V - EPC; 组织; 润湿性

**中图分类号:** TG38.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2003)05 - 0056 - 04

## Using Cast - penetrating Process to Obtain Metal Matrix Wear Resistant Surface Composites

LI Zu-lai, JIANG Ye-hua, ZHOU Rong

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** The new development of casting - penetrating technologies, and the mechanism and microstructures of cast - infiltration in using cast - penetrating process to obtain metal matrix wear resistant surface composites are introduced. Some technological measures to improve the result of casting penetration are summarized, and several main research problems that should be paid more attention to are also proposed.

**Key words:** casting penetration; surface composite; V - EPC; microstructures; wet capabilities

## 0 引言

铸渗法源于涂覆铸造工艺, 1913 年由美国人 Davis 创立, 美国、德国、南非和日本等国在这方面的研究比较前沿。铸渗法制备钢铁基表面耐磨复合材料就是将合金粉末或陶瓷颗粒(如  $\text{SiO}_2$ ) 等预先固定在型壁的特定位置上, 通过一次性浇注钢铁液的方法使铸件表面形成复合层, 该复合层具有耐磨、耐蚀、耐高温等特殊性能。一般来说, 这种制备工艺包括普通铸渗制备工艺和消失模(V - EPC)法铸渗制备工艺, 其中 V - EPC 法是当今研究的热门, 被称为“第三代造型方法”<sup>[1~3]</sup>。

## 1 制备工艺概述

### 1.1 普通铸渗工艺

在铸渗工艺发展的初期, 利用在铸型型腔表面涂刷以合金粉末为主的涂料, 利用液态金属的流渗能力、金属液的余热并使金属液与金属粉末间发生冶金作用, 直接在铸件表面形成合金化层。所以涂料以欲合金化的元素为主, 添加一定比例的粘结剂、催渗剂和固化剂制成。后来又出现了一种以膏块代替涂层的铸渗方法<sup>[4]</sup>。

但是以上两种方法均需要加入有机或无机粘结剂和熔剂, 在液态金属的作用下, 粘结剂或熔剂汽化或渣化, 因而易产生气孔和夹杂(杂), 降低材料性能。为了消除这种影响, 就产生了取消粘结剂和熔剂的散剂法。如于思荣等采用普通粘土干砂型或  $\text{CO}_2$  硬化砂型及铬铁加稀土合金改善浸渗性的技术, 制成了质量良好的表面复合材料<sup>[5]</sup>。

### 1.2 V 法铸渗工艺

真空密封造型法(简称 V 法)砂型只用干砂, 无需粘结剂, 是 70 年代初铸造界一大发明。其基本原理

收稿日期: 2003 - 01 - 09; 基金项目: 云南省应用基金项目(项目编号: 2002E0007Q)。

第一作者简介: 李祖来(1977.8~), 男, 在读硕士; 主要研究方向: 材料加工。E-mail: lizulai@163.net

是: 在带抽气室的砂箱内填入单一干砂, 稍加微震紧实, 然后对型面和砂箱背面覆有塑料薄膜的砂箱抽真空, 利用砂箱内外的压力差使铸型定型, 然后起模、合箱, 在保持真空状态下浇注金属液. 与传统砂型铸造相比, V 法铸造铸件表面光洁度好, 尺寸精度高, 工艺操作简便, 适用范围广, 生产成本低. 但是, 这种方法也存在一个缺陷, 即粘砂问题相当严重<sup>[6~8]</sup>.

### 1.3 消失模(V-EPC)法铸渗工艺

此工艺也叫实型负压铸渗工艺. 即用聚苯乙烯泡沫材料(EPS)制备试样模型, 将增强颗粒均匀涂于试件(EPS)需要合金化的表面. 然后将模型埋入干砂中, 震实后在负压状态下浇注的一种新工艺, 它可以获得精度高, 质量好的铸件, 还可以把工人从繁重的体力劳动和恶劣的作业环境中解放出来, 故这种方法被誉为“第三代造型方法”<sup>[9,10]</sup>. 该工艺简便实用, 不必考虑涂层膏块的安放、固定, 可以避免 EPC 铸渗工艺中的气孔和夹渣等缺陷, 负压对 EPS 和涂胶气化产物的排出十分有效, 显著改善了铸渗层的质量. 增强颗粒可以采用铬铁、钼铁、钨铁颗粒和碳化钨颗粒等<sup>[11]</sup>.

## 2 对铸渗机理和铸渗组织的探讨

### 2.1 铸渗机理研究的进展

表面材料复合是金属液与陶瓷或其他材料颗粒之间的相互作用, 通过改变铸造表层组织而达到提高表层性能的目的. 主要存在着金属液对复合颗粒材料的浸润、渗透, 也存在一定程度的界面反应.<sup>[1]</sup>

关于铸渗层的形成机理, 目前研究得很少, 且无统一认识. 有关资料测定的凝固特性曲线表明, 当母材金属液凝固时, 其平均温度接近于 Cr-Fe 合金的熔点, 因此, 在一段时间内, 母材与膏块表面层共处于熔融状, 它们之间发生互溶作用, 然后结晶凝固, 使二者牢固结合在一起. 显然, 它强调了热力学条件在铸渗过程中的作用. 有关资料将铸型抽成不同的真空度, 以增加铸渗动力. 随真空度的增加, 铸渗层逐渐增加, 这说明毛细管作用在铸渗过程中确实存在<sup>[12]</sup>.

沈蜀西等观察了以 Cr-Fe 粉为主、高压成型的合金膏块制造铸渗件所得到材料的组织. 典型的组织分为内层、中间层和外层, 组织成分明显不同. 铸铁渗 Cr 层是靠母液对膏块的热作用和铸渗动力形成的, 内层(熔合层)组织热作用最强烈, Cr-Fe 颗粒完全熔化, 与母液的扩散比较充分; 中间层(钎焊层)组织由于毛细管作用, 使母液渗透到增强颗粒的间隙中, 使增强颗粒溶解、熔化, 并与母液发生互渗, 然后冷却结晶; 外层组织(烧结层)由于距离热源较远, 热量较少, 故只能使低熔点金属粘结相融合<sup>[12~14]</sup>.

纪朝辉等利用图 1 对铸渗过程进行了推导得出:

钢液铸渗量  $Q$  为:

$$Q = \sqrt{8L} [(P_{\text{大气}} + gh - P_{\text{渣}}) R^4 - 2R^3 \cos \theta] \quad (1)^{[15]}$$

其中:

—钢液与渣液间的界面张力;  $P_{\text{大气}}$  —钢液通过浇道与大气相通产生;  $P_{\text{渣}}$  —渣液内部压力(包括型腔反压力、溶剂阻力等); —钢液密度;  $h$  —液面高; —润湿角;  $R$  —铸渗孔径;  $L$  —液柱高; —动力粘度.

### 2.2 铸渗组织研究的进展

铸渗法制备钢铁基表面复合材料的组织也有许多研究.

张晓玲等对钢铁基表面铸渗硼复合材料的表层组织进行了分析. 结果表明, 表面化合物层由  $\text{Fe}_2\text{B} +$  共晶组织组成, 共晶组织为  $\text{Fe}_2\text{B} +$  奥氏体, 奥氏体的最终转变产物为  $\text{Fe}_3(\text{SiB}) +$  铁素体<sup>[16]</sup>.

许多文献都研究了 V-EPC 法制备钢铁基复合材料的组织, 一般认为该组织从表层到心部大致可分为复合层、过渡层和基体三部分. 复合层和过渡层的组织特征均为增强颗粒分布在基体上, 但过渡层组织中增强颗粒的含量较低, 并逐渐过渡为基体组织. 颗粒与基体的结合属于冶金结合, 具有较高的结合强度和耐磨性.

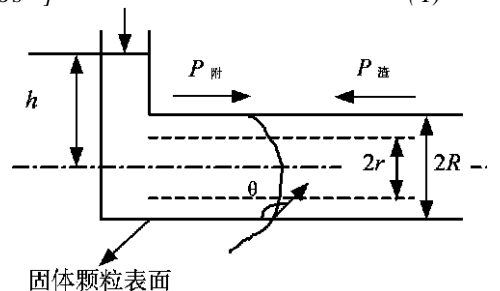


图 1 铸渗推动力分析示意图

### 3 铸渗法制备钢铁基表面耐磨复合材料研究的新进展

#### 3.1 改善液态金属与固相材料表面润湿性的工艺措施

影响铸渗层质量的主要因素有:合金化涂层(或增强相银嵌块)的组成及其配制工艺、母材的合金分类、铸渗工艺参数等。其中,改善液态金属与涂敷层表面的润湿性,一直是铸渗研究中的一个重要课题。在铸渗表面合金化研究初期,人们大多数以提高铸钢(铁)件的耐磨性能为主要目的,采用的合金化组元主要是铁合金(铬铁、硼铁等),润湿性的问题不是很突出。但当研究用铝作表面合金化元素来提高铸钢(铁)件的耐热性能时,这个问题就突显出来。在铸件表面复合材料研究中,由于大多采用陶瓷材料作为铝、镁基合金的增强相,润湿问题一开始就显得十分突出,几乎成了材料复合技术的一个关键。

一般地说,合金元素Mg、Ca、Re等元素、碱金属元素及VI和VIIa族元素都能改变铝与 $Al_2O_3$ 等固相的润湿性;用脱水四硼酸钠处理SiC<sup>[17]</sup>,用酒精或其它有机溶剂处理 $B_4C$ <sup>[18]</sup>,用氟盐处理SiC<sup>[18]</sup>,都能改善铝液或镁液对陶瓷材料的润湿性。王恩泽等用CVD法在陶瓷颗粒表面获得TiNi涂层,TiNi涂层可在小粒度氧化铝颗粒的条件下获得较大的铸渗复合材料层<sup>[19]</sup>。文献[20]用自制化学气相装置在 $Al_2O_3$ 颗粒表面获得了较均匀的Ni涂层。Ni涂层可在小粒度 $Al_2O_3$ 颗粒的条件下获得较大深度的铸渗复合材料层。 $Al_2O_3$ 颗粒表面的Ni涂层的存在,使在即使很小的颗粒间隙中也能充满耐热钢液,从而使颗粒能得到基体的牢固支撑,改善复合材料的使用性能。该研究得到的复合材料在900℃的耐磨性是合金白口铁的6.6倍。

除此之外,超声波清洗、真空预热处理、对固体颗粒进行加热处理、固体颗粒表面覆膜、化学反应(如在铸渗时使用一些铸渗剂)等也是改善增强颗粒与金属液润湿性的有效措施<sup>[21]</sup>。

#### 3.2 提高金属液渗透能力的工艺措施

合金液对合金化涂层或复合银嵌块的润湿性反映了金属液渗入的热力学条件,为了进一步强化金属液对涂敷层的渗透,还可以采用向液体施加外力的方法。这类外力可以是外加的正压力、负压力,还可以是超重力(通过离心力场或振动等方法获得)<sup>[21]</sup>。

周贤良等提出一种制备颗粒增强铝基复合材料的新方法—无压渗透法。即在空气气氛下,使用特殊的催渗剂,使铝或铝合金自动渗入颗粒填料中,可省去气氛控制的一系列设备,形成高性能的复合材料。无压渗透法复合材料的形成经过了截留空气的逸出和反应消耗、颗粒间空隙中出现负压、铝液吸入等过程。铸渗剂的选择是该工艺的关键<sup>[21]</sup>。张晓玲等也成功地用无压渗透法制备了灰铸铁基表面复合材料,复合层达到了8mm<sup>[22]</sup>。

夏运锋等利用V-EPC铸渗工艺,通过向基体中加入SiC颗粒,应用优化的工艺设计参数,得到了铁基复合材料,大大提高了铸铁材料的硬度和耐磨性。同时得出了影响铸渗质量的因素:基体材料、真空度、浇注温度、增强体颗粒度(颗粒间隙大小)、增强体颗粒种类、抽真空方向、浇注位置、金属液静压头高度、涂料及铸件壁厚和预涂颗粒层厚度等<sup>[23]</sup>。

除此之外,在研究过程中,还出现了一些新方法,如于思荣等用取消粘结剂和熔剂的新方法—散剂法,采用普通粘土干砂型或 $CO_2$ 硬化砂型及铬铁加稀土合金改善浸渗性技术,制成了质量很好的复合材料<sup>[24]</sup>。房文斌等提出了泡沫陶瓷过滤器过滤净化液态金属的机制,确定了过滤效率的方程式。实验验证泡沫陶瓷过滤器通过滤饼机制、表面效应及整流效应,能够有效去除液态铸造合金中的夹杂物,提高铸造合金的力学性能<sup>[25]</sup>。因此在研究铸渗法制备钢铁基表面耐磨复合材料时,浇注前应该使用泡沫陶瓷过滤器,净化液态金属。

### 4 铸渗表面耐磨复合材料应用的新发展

随着铸渗法制备钢铁基表面耐磨复合材料方面的理论研究的逐步深入,20世纪90年代以来,在应用研究方面也取得了长足的进步。Mechel通过铸渗工艺在钢锭模上形成了0.2~0.6mm的铝合金化热涂层,使模具高温抗磨损能力提高了7%~20%<sup>[26]</sup>。沈蜀西等用铸渗方法研究铸铁渗铬制砖模具,生产结果表明,铸铁渗铬模具的使用寿命为变质铸铁的8~10倍,比灰铸铁提高26倍以上<sup>[27]</sup>。蒋业华等针对承受严重冲蚀磨损的渣浆泵过流件,采用砂型负压铸渗工艺制备了WC/灰铸铁基表面复合材料,结果表明,Wc/灰铸铁基表面复合材料具有良好的微观组织结构和优异的抗冲蚀磨损性能,抗冲蚀磨损性能是 $Cr_{15}Mo_3$ 高

铬铸铁的 2.7 倍, 砂型负压铸渗工艺可进行大面积异型曲面的复合<sup>[28]</sup>。祁小群等采用负压渗透法成功制备出 WC 颗粒增强高铬铸铁基表面复合材料喷射口衬板, 其耐磨性能是高铬铸铁的 5.1 倍, 大大提高了使用寿命<sup>[29]</sup>。

## 5 铸渗表面复合材料研究值得重视的几个方向

随着现代工业的发展, 对机械产品等各种零部件表面的性能要求越来越高, 要求能在高速、高温、高压、重载、严重摩擦及腐蚀介质等苛刻的工况下可靠而持续地工作。这就对制造技术提出了挑战, 同时也推动了表面材料的发展。

铸渗法具有工艺简单, 成本低廉等特点<sup>[30]</sup>。因此铸渗技术作为制备金属基表面复合材料的一种新工艺具有广阔的市场应用前景。为了进一步提高铸渗产品的质量, 扩大其工程应用, 对铸渗工艺理论与截面理论还需要进一步作深层次的研究, 如铸渗层形成过程的热力学、动力学原理和铸渗层凝固的控制等<sup>[2]</sup>。同时还要注意铸渗表面复合材料凝固过程的研究以及在工程上的应用研究等<sup>[31]</sup>。

无论国内还是国外, 都遇到了诸如冲刷、气孔、夹渣、渗透能力差、渗透深度不均匀、粘砂和表面粗糙度高、不易进行机加工等许多问题, 这些问题制约了该工艺的推广和应用。而且从理论上缺乏更进一步的研究和探讨, 也阻碍了该工艺的进一步发展。因此, 我们应该采用更加科学的手段, 在选择合适的浇注温度和粘结剂、溶剂的种类及用量等方面进行大量研究, 克服目前存在的困难<sup>[2]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 王冬, 张军等. 90 年代铸渗工艺新进展[J]. 铸造技术, 2000, (3): 36~38.
- [2] 华磊, 宋月鹏等. 铸渗法制造表面耐磨复合材料的工艺进展[J]. 现代铸铁, 2002, (2): 25~27.
- [3] 彭坤, 王彪等. 等离子喷涂陶瓷复材的性能和应用及其进展[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2001, 26(1): 41.
- [4] 李虎田. 铸渗法制备金属基表面复合材料[J]. 矿山机械, 2001, (5).
- [5] 于思荣, 隋忠祥等. 铸造碳化钨颗粒/中锰钢表面复合材料制作新工艺及理论研究[J]. 吉林工业大学学报, 1996, (4): 30~34.
- [6] 王莉珠. 日本 V 法铸造工艺和设备的发展概况[J]. 中国铸造装备与技术, 1999, (5): 11~12.
- [7] 刘晓艳, 崔明胜等. V 法铸造工艺适应性分析与改进措施[J]. 铸造, 1999, (9): 29.
- [8] 吴友坤, 杨吉卿等. V 法铸造铸铁件粘砂成因及对策[J]. 现代铸铁, 1999, (3): 87~88.
- [9] 阎峰云, 李元东等. V-PEC 法铸渗表面合金化研究[J]. 铸造设备研究, 2000, (2): 13.
- [10] 韩豫刚, 张方等. 消失模铸造在阳极爪架铸钢件生产中的应用[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2002, 27(4): 46.
- [11] 许大庆, 罗吉荣等. V-EPC 铸渗工艺的研究[J]. 铸造设备研究, 1999, (2): 3~6.
- [12] 沈蜀西, 李维民. 铸渗机理与改善铬铸渗层质量的研究[J]. 铸造技术, 1995, (2): 43~46.
- [13] 沈蜀西, 李维民等. 铸铁渗铬层形成机理的研究[J]. 铸造技术, 2000, (4): 40~42.
- [14] 沈蜀西, 刘炳等. 铸渗铬合金层组织特征分析[J]. 现代铸铁, 2000, (3): 9~12.
- [15] 纪朝辉, 张成军. 消失模铸钢件表面合金化铸渗机理研究[J]. 铸造, 2000, (3): 130~133.
- [16] 张晓玲等. 铸渗硼表面复合材料组织分析[J]. 铸造, 1998, (12): 10~12.
- [17] Delannay F. et al. The wetting of solids by molten and Its Relation to the Preparation of MMCs[J]. Mater. Sci, 1987, 22.
- [18] Li Q F, et al. Casting and HIPping of Al-based MMCs[J]. Mater. Rro. Tech. 1995, 48.
- [19] 王恩泽, 郑燕青等. 用 CVD 法在陶瓷颗粒表面获得 TiN 涂层与应用[J]. 复合材料学报, 1998, (4): 53~58.
- [20] 王恩泽, 鲍崇高等. 包镍 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的获得及其在复合材料制备中的应用[J]. 西安交通大学学报, 1999, (1): 84~87.
- [21] 周贤良, 张建云等. 无压渗透法制备颗粒增强铝基复合材料的工艺及渗透机理初探[J]. 热加工工艺, 1995, (3): 25~27.
- [22] 张晓玲等. 无压渗透法制备铸造表面复合材料[J]. 复合材料学报, 1999, (8): 57~60.
- [23] 夏亚锋, 张元好等. V-EPC 铸渗铁基复合材料的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2001, (2): 32~33.
- [24] 于思荣, 隋忠祥等. 铸造碳化钨颗粒/中锰钢表面复合材料制作新工艺及理论研究[J]. 吉林工业大学学报, 1996, (4): 30~34.
- [25] 房文斌, 耿耀宏等. 泡沫陶瓷过滤器过滤净化液态金属的机制[J]. 铸造, 2001, (8): 482~484.
- [26] Mechel. . Surface Alloying the Operating Layer of Ingot Moulds[J]. Mezhdunarodnays Kniga, 1998, (3): 20~30.
- [27] 沈蜀西. 铸渗技术在制砖机模具生产中的应用[J]. 特种铸造及有色合金, 1996, (3): 46~47.
- [28] 蒋业华, 周荣等. 渣浆泵用 WC/铁基表面复合材料的研究[J]. 铸造, 2002, (3): 170~172.
- [29] 祁小群等. WC 颗粒增强高铬铸铁基表面复合材料喷射口衬板的研制[J]. 铸造技术, 2002, (5): 282~284.
- [30] 杨贵荣, 郝远等. 铸渗法表面改性技术概述[J]. 铸造, 2002, (9): 565~567.
- [31] 刘耀辉, 于思荣等. 金属基耐磨铸造表面复合材料的现状及其今后研究工作的主攻方向[J]. 摩擦学学报, 1994, (1): 94.