

文章编号: 1001-3806(2004)01-0001-04

铸铁表面 Cr 合金化层的微观结构及耐磨性能

单际国, 任家烈, 董春, 赵楠楠
(清华大学 机械工程系, 北京 100084)

摘要: 采用聚焦光束重熔预涂单质 Cr 粉的方法对灰铸铁进行了表面改性处理, 用 SEM, EDS, X ray 等分析了合金化层的微观组织特点及其物相组成, 用环块摩擦试验测试了合金化层的耐磨性能。试验结果表明, 聚焦光束重熔 Cr 粉合金化层的耐磨性较灰铸铁基体明显提高, 合金化层的耐磨性随着 Cr 粉预涂量的增加而提高, 表面磨损机制由犁沟和划伤转变为表面塑性变形。其原因在于, 随 Cr 粉预涂量的增加, 合金化层微观组织中的富铁 α (Fe, Cr) + Cr₇C₃ 共晶体基底依次被富铁的 α (Fe, Cr) + Cr₂₃C₆ 共晶体和富铬的 α (Fe, Cr) 铁素体取代。

关键词: 光束合金化; 耐磨性; 耐磨机制; 微观组织; 铸铁
中图分类号: TG174.445 **文献标识码:** A

Microstructure and wear resistance of Cr powder alloying layers on cast iron

SHAN Ji-guo, REN Jia-lie, DING Jian-chun, ZHAO Nan-nan

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract The grey cast iron was alloyed by light beam remelting the preplating layer of Cr powder. The microstructure and phase of alloying layers were analyzed by SEM, EDS and X ray diffraction. The ring block wear test was used to evaluate the wear resistance of alloying layers. The results show that the wear resistance of Cr powder alloying layer is greatly higher than that of grey cast iron. The wear resistance is heightened with the increases of preplating mass of Cr powder, and the wear mechanism changes from furrow and scratch to surface plastic deformation. The reason is that with the increases of preplating mass of Cr powder, the eutectic matrix of α (Fe, Cr) rich in Fe+Cr₇C₃ in alloying layer is replaced by the eutectic of α (Fe, Cr) rich in Fe+Cr₂₃C₆, then replaced by α (Fe, Cr) ferrite rich in Cr.

Key words: light beam alloying; wear resistance; wear mechanism; microstructure; cast iron

引 言

灰铸铁作为一种应用最为广泛和普通的工程材料, 由于本身的组织结构特点, 若未经表面强化处理则表现为组织较疏松、硬度低^[1]、易产生磨损失效^[2~5]。采用等离子弧、激光合金化对灰铸铁进行表面强化处理可以显著改善其表面耐磨性能。等离子弧合金化由于存在强烈的电弧吹力, 强化后的铸铁表面较粗糙; 激光合金化加热过程平静, 强化表面精度很高, 但是, 激光设备昂贵, 一般应用于精密和关键零部件的表面强化处理, 而对于应用广泛的铸铁零部件, 开发推广低成本表面改性技术得到了国内外同行的广泛认同^[2, 4~7]。聚焦光束合金化表

面改性技术是近年来发展起来的一种新型表面强化技术^[8], 其设备成本和运行费用低, 且具有激光加热过程平静的特点。研究表明, 采用聚焦光束热源可以合成质量良好的表面改性层^[9], 但目前对光束合金化改性层的组织、物相、使用性能的特征及其相互关系尚缺乏系统的研究。作者采用单质 Cr 粉对灰铸铁进行聚焦光束合金化改性处理, 通过研究合金化改性层的微观组织、物相特征及耐磨性, 以期揭示聚焦光束合金化改性层微观结构对其使用性能的影响规律。

1 试验材料及方法

聚焦光束合金化试验所选用的基体材料为 HT200 灰铸铁, 合金化材料为纯度 99.9%、粒度为 200 目的 Cr 粉。采用 JA1003 电子精密天平(称量范围为 1mg~10⁵mg)称量出所需的合金粉末, 用有机粘剂和无水乙醇将其涂覆在基材表面, 涂层长度为 40mm, 宽度为 5mm。合金化试验采用清华大

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50275082)

作者简介: 单际国(1965), 男, 工学博士, 副教授, 现从事新材料连接和表面改性过程的冶金与材料学问题研究。

E-mail: shanjg@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2003-07-01; 收到修改稿日期: 2003-07-24

学研制开发的聚焦光束加热设备,最大功率密度为 $1.27 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$,光斑直径为 5mm。试验中采用的光源电功率为 5000W,光束扫描速度为 0.8mm/s,合金化过程中用脱氧剂和氩气保护熔池。

金相试样经化学腐蚀后在 NEOPHOT 32 大型金相显微镜及 CSM-950 扫描电镜(配备 TN5402 能谱仪)下分析微观组织及析出相成分,采用 D/max-RB 型 X 射线衍射仪标定合金化层物相。

合金化层耐磨性能试验,在 MHK-500 环块试验机上进行,上试样为 GCr15 标准环,其硬度为 HRC61.5。下试样尺寸为 12.35mm × 12.35mm × 19mm,4 侧面均经过磨床加工。

每个试样的磨损试验周期为 37min,其中磨损期为 25min,载荷为 50kg。磨损期内每隔 5min 测量一次摩擦力,根据摩擦力的测量值计算摩擦系数。在磨损后的试样磨痕长度方向上测 3 个磨痕宽度,

取平均值作为磨痕的平均宽度,进而求得磨损体积,用以反映磨损量。将 Cr 粉加入量分别为 240mg, 480mg, 720mg 的光束合金化试样,以及光束熔凝处理试样的磨损体积与 HT 200 灰铸铁试样的磨损体积之比,即相对耐磨性,作为耐磨性的评定标准以评估耐磨性的优劣。

2 试验结果及讨论

2.1 摩擦学试验结果

由摩擦学试验结果(见表 1)可以看出,灰铸铁表面经 Cr 合金化改性处理后耐磨性均有所提高,且随着 Cr 粉加入量的增加,合金化层的耐磨性增加,当采用 720mg Cr 合金化时,耐磨性提高近 14 倍,但 Cr 粉加入量过少(240mg)的合金化层的耐磨性较熔凝处理层低。

Table 1 Results of tribological experiments

the condition of specimens' preparation	microstructure	friction factor μ	width of trace W / mm	volume of abrasion V / mm^3	relative wear resistance
grey cast iron	pearlite+ flake graphite	0.119	2.323	0.552	1
remelting layer	pearlite+ ledeburite	0.078	1.574	0.172	3.21
alloying layer with 240mg Cr	eutectic(α (Fe, Cr) + M_7C_3) + α (Fe, Cr)	0.098	1.936	0.319	1.73
alloying layer with 480mg Cr	eutectic(α (Fe, Cr) + $M_{23}C_6$) + $M_{23}C_6$	0.100	1.030	0.048	11.50
alloying layer with 720mg Cr	α (Fe, Cr) + eutectic(α (Fe, Cr) + $M_{23}C_6$)	0.100	0.946	0.037	14.92

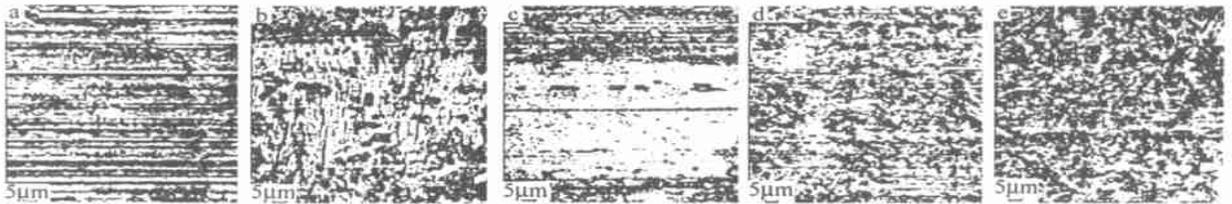


Fig. 1 Surface morphology of samples after ring-block wear test(OM)

a-HT200 cast iron b-remelting layer c-alloying layer with 240mg Cr d-alloying layer with 480mg Cr e-alloying layer with 720mg Cr

试样表面磨痕经微观观察发现,未经表面改性处理的 HT200 铸铁较软,从磨损形貌来看,表面存在很深的犁沟(见图 1a);熔凝层的表面磨损形貌为少量犁沟及塑性变形(见图 1b);加入 240mg Cr 合金化层与 HT200 铸铁相比耐磨性提高不明显,从磨损形貌来看,合金化层表面有大面积的划伤(见图 1c);加入 480mg Cr 时,合金化层的耐磨性得到明显提高,从磨损形貌来看,合金化层表面只有很少的犁沟,主要表现为塑性变形(见图 1d);加入 720mg Cr 时,合金化层的耐磨性很高,从磨损形貌来看,合金化层表面几乎没有犁沟,主要表现为塑性变形(见图

1e)。

2.2 合金化层微观组织特点及其对耐磨性的影响机制

当 Cr 粉加入量为 240mg 时,合金化层由粗大初生相及大量的细小共晶体组成(见图 2a)。由 X 射线衍射结果(见图 3a)可知,合金化层中主要物相为 α (Fe, Cr) 及 $(Cr, Fe)_7C_3$ 。由于粗大初生相的显微硬度较低(HV_{0.02}390)(见表 2),而 $(Cr, Fe)_7C_3$ 的显微硬度较高,因此可推断粗大初生相为富 Fe 的 α (Fe, Cr) 铁素体,而共晶体应为 $(Cr, Fe)_7C_3 + \alpha$ (Fe, Cr)。当 Cr 粉加入量增加到 480mg 时,合金化

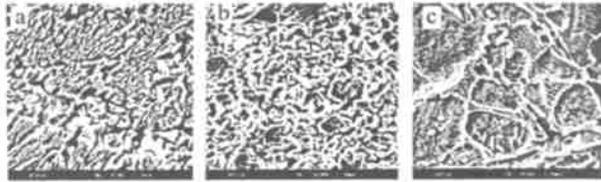


Fig.2 The microstructure of alloying layers by light beam heating on cast iron

a—albying layer with 240mg Cr b—alloying layer with 480mg Cr c—alloying layer with 720mg Cr

层显微组织为共晶基底上分布着多边形析出相(见图 2b), 由 X 射线衍射结果(见图 3b)可知, 合金化层中主要物相为 $\alpha(\text{Fe}, \text{Cr})$, Cr_{23}C_6 及少量 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$, 多边形析出相显微硬度较高且硬度值很不均匀($\text{HV}_{0.02} 978 \sim \text{HV}_{0.02} 1536$) (见表 2), 而 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 中最大含 Cr 量为 50%^[10], 由多边形析出相的化学成分(见表 2)可知, 大量的多边形析出相应

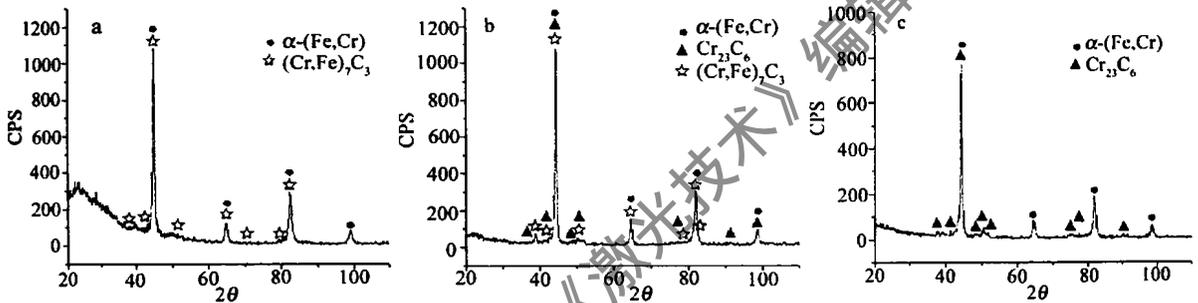


Fig. 3 The X-ray diffraction spectrum of alloying layers

a—240mg Cr b—480mg Cr c—720mg Cr

Table 2 Composition and microhardness of precipitations in alloying layers

the preplacing mass of Cr powder/mg	measurement region	$w(\text{elements})/\%$					$\text{HV}_{0.02}/(\text{kg}\cdot\text{mm}^{-2})$
		Cr	Fe	C	Si	bal.	
240	eutectic(matrix)	30.33	67.17	2.38	0.12	—	518
	bulky primary precipitate	20.98	75.88	2.68	0.46	—	390
480	polygon precipitate	66.49	33.45	0.00	0.07	—	978~1536
	eutectic(matrix)	27.28	72.37	0.00	0.35	—	520
720	eutectic	79.32	14.56	0.10	1.53	4.49	1039
	dendrite(matrix)	74.89	19.74	0.04	2.95	2.37	573

随着 Cr 粉加入量的增加, 合金化层显微组织和物相组成的变化对耐磨性产生了直接影响。加入 240mg Cr 时虽然生成了高硬度的 M_7C_3 相, 但此相以共晶形式存在, 显微硬度值仅为 $\text{HV}_{0.02} 518$, 且共晶间尚有显微硬度较低的富铁的铁素体枝晶相, 因此, 合金化层的耐磨性提高不明显, 从磨损形貌来看, 合金化层表面有大面积的划伤。加入 480mg Cr 时, 合金化层组织为 $\alpha(\text{Fe}, \text{Cr}) + \text{M}_{23}\text{C}_6$ 共晶体基底上分布着 M_{23}C_6 碳化物, 碳化物粒子的弥散分布使合金化层的耐磨性明显提高, 从磨损形貌来看, 合金化层表面只有很少的犁沟, 主要表现为塑性变形。

为 Cr_{23}C_6 , 而共晶体为 $\alpha(\text{Fe}, \text{Cr}) + \text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 。当 Cr 粉加入量提高到 720mg 时, 合金化层组织由大量的枝晶及枝晶间共晶体组成(见图 2c), 与 Cr 粉加入量较低时不同的是, 枝晶相变为基底相, 而共晶体的析出量很少。由 X 射线衍射结果(见图 3c)可知, 合金化层中主要物相为 $\alpha(\text{Fe}, \text{Cr})$ 及 Cr_{23}C_6 。由于枝晶相显微硬度较低($\text{HV}_{0.02} 573$) (见表 2), 可推断为富 Cr 的 $\alpha(\text{Fe}, \text{Cr})$ 铁素体, 而枝晶间共晶体应为 $\alpha(\text{Fe}, \text{Cr}) + \text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 。由此可见, 随着 Cr 粉加入量的增加, 合金化层的显微组织及其相组成发生了显著变化, 虽然合金化层的物相组成均为铁素体和铬的碳化物, 但显微组织的基底相发生了显著变化, 富铁的 $\alpha(\text{Fe}, \text{Cr}) + \text{Cr}_7\text{C}_3$ 共晶体基底相依次被富铁的 $\alpha(\text{Fe}, \text{Cr}) + \text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 共晶体和富铬的 $\alpha(\text{Fe}, \text{Cr})$ 铁素体取代。

加入 720mg Cr 时, 合金化层组织为富铬 $\alpha(\text{Fe}, \text{Cr})$ 枝晶基底及枝晶间 $\alpha(\text{Fe}, \text{Cr}) + \text{M}_{23}\text{C}_6$ 共晶体, 虽然碳化物和共晶相体的数量较少, 但由于 $\alpha(\text{Fe}, \text{Cr})$ 基底相的显微硬度较高($\text{HV}_{0.02} 573$) 且析出量较大, 因此合金化层的耐磨性很高, 从磨损形貌来看, 合金化层表面几乎没有犁沟, 主要表现为塑性变形。

从上述分析可以看出, 当合金化层中显微硬度较低的物相析出量较多时, 由于对磨环块硬度很高, 表面很容易产生大量犁沟或大面积的划伤, 耐磨性较差; 当合金化层析出硬度较高的弥散碳化物后, 表

面的犁沟数量将显著减少,更多地变现为塑性变形,耐磨性明显提高;当合金化层中产生大量显微硬度较高的基底时,表面很少有犁沟,主要表现为塑性变形,耐磨性最高。

与Cr合金化层相比,熔凝层组织细密均匀,但莱氏体共晶组织较脆,摩擦系数小,因此其耐磨性也有一定的提高,超过了加入240mg Cr的合金化层,此时合金化层表面磨损形貌为少量犁沟及塑性变形。HT200铸铁的微观组织为珠光体基体上分布着片状石墨,组织较软,在磨损过程中极易产生摩擦氧化。氧化层由 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 或 Fe_3O_4 构成^[11],脆性氧化层的脱落使铸铁表面产生了磨粒磨损,导致了摩擦系数的增加,耐磨性能因此而下降,磨损形貌表现为很深的犁沟。

3 结论

(1)灰铸铁表面Cr元素合金化层随着Cr粉加入量的增加,显微组织及其相组成发生了显著变化,虽然合金化层的物相组成均为铁素体和铬的碳化物,但显微组织的基底相发生了显著变化,富铁的 $\alpha(\text{Fe, Cr}) + \text{Cr}_7\text{C}_3$ 共晶体基底相依次被富铁的 $\alpha(\text{Fe, Cr}) + \text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 共晶体和富铬的 $\alpha(\text{Fe, Cr})$ 铁素体取代。

(2)Cr元素合金化层耐磨性较灰铸铁基体均有提高,且随着Cr粉加入量的增加,合金化层的耐磨

性提高。

(3)在磨损过程中,当合金化层中显微硬度较低的物相析出量较多时,由于对磨环块硬度很高,表面很容易产生大量犁沟或大面积的划伤,耐磨性较差;当合金化层析出硬度较高的弥散碳化物后,表面的犁沟数量将显著减少,更多地变现为塑性变形,耐磨性明显提高;当合金化层中产生大量显微硬度较高的基底时,表面很少有犁沟,主要表现为塑性变形,耐磨性最高。

参考文献

- [1] 赵新,金杰,丁欣 *et al.* 天津大学学报, 1999, 32(6): 754~757.
- [2] 陈瑜眉,朱金华,王根保. 西安交通大学学报, 1993, 27(6): 99~103.
- [3] 赵新,姚建铨. 小型内燃机, 1997, 26(4): 41~44.
- [4] 吴建华,李力,吴矿山 *et al.* 农业机械学报, 1999, 30(4): 99~104.
- [5] 刘政军,林克光,刘耀山 *et al.* 焊接学报, 1998, 19(3): 135~140.
- [6] TOMLINSON W J, CASH M, BRANSDEN A S. Wear, 1991, 142(2): 383~386.
- [7] GIORDANO L, TIZIANI A, ZAMBON A *et al.* Materials Science & Engineering, 1991, A140(1~2): 727~732.
- [8] 丁建春,单际国,任家烈. 中国表面工程, 2002, 15(2): 4~7.
- [9] 单际国,张迪,余顺周 *et al.* 材料热处理学报, 2001, 22(3): 42~45.
- [10] 陆文华,李隆盛,黄良余. 铸造合金及其熔炼. 北京:机械工业出版社, 1996. 115~120, 134~139.
- [11] 哈比希. 材料的磨损与硬度. 北京:机械工业出版社, 1984. 36~37.

• 简 讯 •

敬告作者

根据“美国工程信息公司(EI)数据库”的要求,请作者在投稿时注意:

1. 为了方便联系,请提供确切的通信地址、单位名称、部门、电话、E-mail 等信息。

2. 应加强对摘要的撰写!摘要是文章的真正概要,应该全面、简要:减少背景类的知识介绍;不要用修饰语;不要有实验数据;不要出现方程、图、表、参考文献、特殊字符等。作者应组织好文章的主要概念并清楚、简要地表达出来,才能实现摘要应有的作用,传达重要的可检索信息。

一般的研究性论文其摘要必须包括被报道的研究项目的目的、使用方法、结果和结论,不应太短;也不要重复标题中已给出的内容;不要使用多余的词语,如“据报道……”,或“大量的研究表明”;摘要中不要写作者将来的打算。

对于文献综述,只需简要说明文章的内容,而不报道文章中使用的方法及得出的结果。

对于发展现状综述,除了陈述文章的主题范围外,还要给出文章得出的结论。

3. 英文摘要相当重要!最好是中英文一致。原则是平铺直叙。

4. 英文版稿件中应有中文题目、作者姓名、单位、摘要、关键词、中图分类号。

投稿时请注意“投稿”字样!谢谢合作!