● 试验研究 Experimental Research ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.02.001

Cr/C 比对中铬铸铁复合抗磨辊圈组织和耐磨性的影响

翟晨晨[1],苏恒渤[2],郭 嘉[1],苏月莹[1],陈湘茹[1],翟启杰[1]
(1.上海大学 材料科学与工程学院,上海 200444; 2.济宁安泰矿山设备制造有限公司,山东 济宁 232300)

摘 要:中铬铸铁复合抗磨辊圈服役过程中,外层中铬铸铁层起主要的抗磨和粉碎物料的作用。本文主要研究了Cr/C 比对中铬铸铁组织、力学性能和耐磨性的影响。研究结果表明,Cr/C 比的不同会影响碳化物的形态和数量,Cr/C 比(3.17)较高时,碳化物主要为菊花状和弥散分布的块状的$(Cr, Fe)_7C_3$,碳化物面积占比为 8.90%,冲击韧度为 8.6 J,硬度为 52 HRC;Cr/C 比(2.66)较低时,碳化物主要为网状的$(Fe, Cr)_3C$ 和板条状的$(Cr, Fe)_7C_3$,碳化物面积占比为 13.31%,冲击韧度为 5.3 J,硬度为 56 HRC。且 Cr/C 比高时,由于具有较高的韧性,可以缓解磨损过程中应力集中,延迟磨屑的剥落,具有更高的耐磨性。

关键词:中铬铸铁复合抗磨辊圈;Cr/C 比;$(Cr, Fe)_7C_3$ 型碳化物;耐磨性
中图分类号:TG143;TG113 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)02-0139-05

Effect of the Cr/C on Microstructure and Wear Resistance of Medium Chromium Cast Iron Compound Wear-resistant Roll Ring

ZHAI Chenchen[1], SU Hengbo[2], GUO jia[1], SU Yueying[1], CHEN Xiangru[1], ZHAI Qijie[1]
(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Jining Antai Mine Equipment Manufacturing Limited Company, Jining 232300, China)

Abstract: The outer layer of medium chromium cast iron plays the main role of wear resistant and crush materials in the service process of the medium chromium cast iron compound wear-resistant roll ring. The effect of Cr/C on the microstructure, mechanical properties and wear resistance of medium chromium cast iron were studied. The results show that the form and quantity of carbides are affected by the difference of Cr/C. When the ratio of Cr/C is higher (3.17), the carbides are mainly composed of the $(Cr, Fe)_7C_3$ which like chrysanthemum and dispersive bulk, the area ratio of carbides is 8.90%, the impact toughness is 8.6 J and the hardness is 52 HRC; when the ratio of Cr/C is lower (2.66), the carbides are mainly composed of the $(Fe, Cr)_3C$ like nets and the $(Cr, Fe)_7C_3$ lath-shaped, the area ratio of carbides is 13.31%, the impact toughness is 5.3 J and the hardness is 56 HRC. When the Cr/C is higher, the abrasive wear resistance is better. It can relieve stress concentration during wear process and delay the spalling of debris because of its high toughness.

Key words: medium chromium cast iron compound wear-resistant roll ring; Cr/C; the $(Cr, Fe)_7C_3$ carbide; wear resistance

对辊机是粉碎黏土、煤矸石和页岩等砖瓦原料的重要机械设备,并可以筛选原料的粒度,而对辊机的关键是辊圈,因此,辊圈优良的耐磨性是企业不断追求和突破的技术指标,也是提高砖瓦行业生产水平的重要战略目标[1,2]。辊圈的磨损是由于表面受到原料摩擦作用而损耗产生沟槽,辊圈之间间隙增大,物料粒度不能保证,从而失效[3]。因此,辊圈材料成为提高辊圈耐磨性的关键。传统的辊圈材料为白口铸铁加入适量的铬、钼和铜制成[4],其铸造缺陷较多,而且只能用于工况要求比较低的条件。为了保证辊圈的力学性能,选用铸钢做辊圈材料,如 ZG45、EGMn13-4 等,但耐磨性并不理想。采用外圈包钢板,并堆焊耐磨焊条,力学性能提高,寿命有所提高,但成本过高。翟启杰[5]等提出离心铸造复合抗磨辊圈的制造方法,研究并生产出中铬含钨复合抗磨辊圈,其韧性和耐磨性大大提高,内应力较低,延长了辊圈使用寿命,为研究复合辊圈提供了新的思路。

收稿日期:2018-07-30
作者简介:翟晨晨(1994-),山西临汾人,硕士生.研究方向:微合金在耐磨钢中的作用研究.电话:13917253519,E-mail:cczhai526@163.com
通讯作者:陈湘茹(1981-),女,浙江泰州人,高级实验师.研究方向:铌的微合金化以及耐磨钢和耐热钢等研究工作.E-mail:chenxr@shu.edu.cn

中铬铸铁复合抗磨辊圈为复合结构，内层为高强度普通球墨铸铁，外层为中铬铸铁，在服役过程中，外层中铬铸铁起主要的抗磨和粉碎作用，中铬铸铁中共晶碳化物为$(Cr, Fe)_7C_3$+$(Fe, Cr)_3C$混合型，强度高，韧性和硬度具有比较好的匹配，显示出良好的经济效益[6]。然而早期文献中对于中铬铸铁复合抗磨辊圈在耐磨性方面的研究较少，本文在企业生产的基础上，针对在服役过程中起主要抗磨和粉碎物料作用的中铬铸铁的组织和耐磨性进行研究，为实际生产提供理论依据。

1 试验方法

实验用复合抗磨辊圈外层中铬铸铁化学成分及热处理工艺见表 1。

试验采用 JB-500B 型半自动冲击试验机进行无缺口冲击实验，采用 HBRVU-187.5 型布洛维光学硬度计测量宏观洛氏硬度。选用动载磨料磨损试验机(MLD-10 型)进行冲击磨料磨损试验，试验冲击功为 0.5 J，上试样为 10 mm×10 mm×35 mm 的热处理试样，下试样为 GCr15，840℃保温 1 h 油淬处理，下试样转速为 200 r/min，上试样冲击频率为 200 次 /min，磨料为 10/20 目的石英砂，流量为 200 mL/min。试验时，前 30 min 是跑合期，之后分别按 1 万次，2 万次及 3 万次的冲击次数进行磨料磨损试验。磨损前后采用超声波 + 丙酮溶液清洗，并用精度为 0.001 g 电子分析天平称重，计算磨损前后的失重量。采用 JEOL-6700 场发射扫描电子显微镜观察磨损表面形貌。将热处理后的试样磨抛后采用 4%的硝酸酒精溶液腐蚀，并用 Carl Zeiss 光学显微镜观察金相组织。

2 实验结果与讨论

试样的硬度，无缺口冲击功以及磨损前后的质量和失重量如表 2。

2.1 Cr/C 比对组织的影响

铬系白口铸铁中的碳化物形态、数量、分布等由 Cr/C 比决定，Cr/C 比 >4 时，共晶碳化物为$(Cr, Fe)_7C_3$型，中铬铸铁 Cr/C 比 <3.5，共晶碳化物为$(Cr, Fe)_7C_3$+$(Fe, Cr)_3C$混合型[8]。如图 1，为 1# 和 2# 两组试样的 XRD 图谱，可以看出两组试样的主要物相组成为$(Cr, Fe)_7C_3$和$(Fe, Cr)_3C$相。

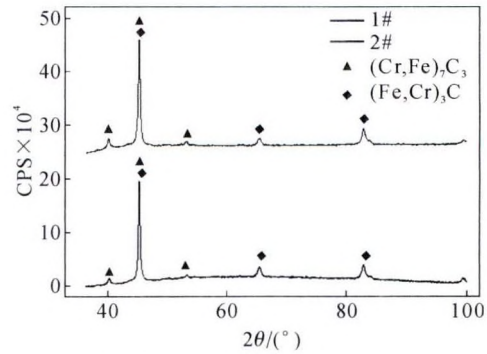


图 1 1# 和 2# 试样的 XRD 图谱
Fig.1 XRD spectrum of the samples of 1# and 2#

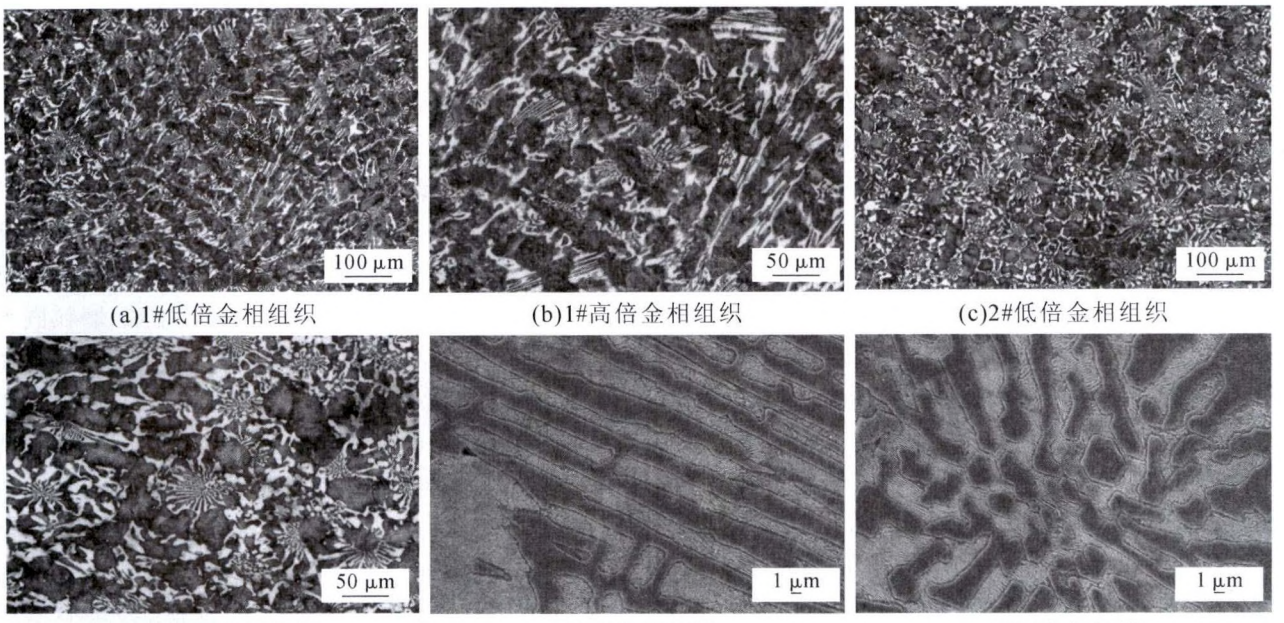
图 2 为 1# 和 2# 两组不同 Cr/C 比的金相组织照片，其中(a)和(b)为 1# 在光学显微镜下的金相组织，(c)和(d)为 2# 在光学显微镜下的金相组织，(e)为 1# 在扫描电子显微镜下的金相组织，(f)为 2# 在扫描电子显微镜下的金相组织。从图中可以看出，1# 和 2# 基体均为珠光体，1# 碳化物主要为菊花状和弥散分布的块状的$(Cr, Fe)_7C_3$型碳化物，以及少量蜂窝状的$(Fe, Cr)_3C$型碳化物，2# 碳化物主要为板条状的$(Cr, Fe)_7C_3$型碳化物和蜂窝状的$(Fe, Cr)_3C$型碳化物，以及少量菊花状碳化物。另外，针对碳化物数量做了统计，从图 3 两组试样的碳化物面积占比可以看出，1# 试样的碳化物面积占比为 13.31%，2# 试样的碳化物面积占比为 8.90%，1# 碳化物的数量高于 2#。也就是说，Cr/C 比的不同影响了碳化物的形态

表 1 试样化学成分 w(%)及热处理工艺
Tab.1 Chemical composition and heat treatment parameters

试样类别	试样状态	C	Si	Mn	Cr	Mo	微合金元素	Cr/C 比
1#	离心浇铸后风淬	3.11	1.79	0.818	8.27	适量	少量	2.66
2#	+500 ℃回火 12 h	2.72	1.56	0.903	8.64	适量	少量	3.17

表 2 试样的力学性能和磨损前后的质量及失重量
Tab.2 Mechanical properties of the specimen and mass and weight loss before and after wear

试样类型	硬度(HRC)	冲击功 α_k/(J/cm²)	冲击次数 / 次	磨损前质量 /g	磨损后质量 /g	失重量 /g
1#	56	5.3	10 000	25.613	25.441	0.172
			20 000	26.095	25.796	0.299
			30 000	25.819	25.432	0.387
4#	52	8.6	10 000	25.856	25.702	0.154
			20 000	25.920	25.635	0.285
			30 000	25.789	25.437	0.352



(a)1#低倍金相组织　(b)1#高倍金相组织　(c)2#低倍金相组织

(d)2#高倍金相组织　(e)1#金相扫描　(f)2#金相扫描

图 2 1# 和 2# 试样的组织形貌

Fig.2 Microstructure of the samples 1# and 2#

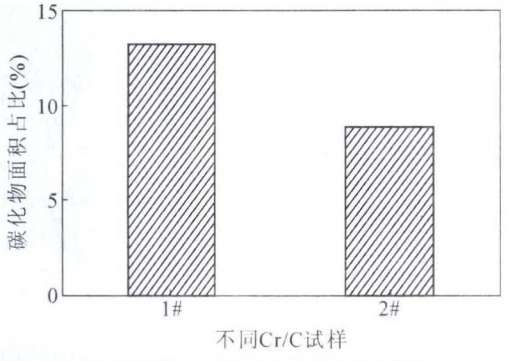


图 3 1# 和 2# 试样碳化物面积占比

Fig.3 The carbide area ratio of the samples 1# and 2#

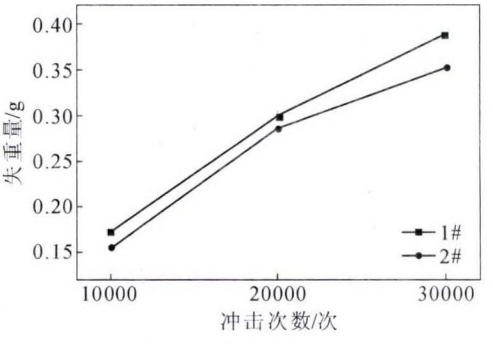


图 4 1# 和 2# 试样的磨损失重量比较

Fig.4 The weight loss of 1# and 2#

和数量，Cr/C 比高，$(Cr, Fe)_7C_3$ 型碳化物呈弥散分布的块状和菊花状，而 Cr/C 比低，$(Cr, Fe)_7C_3$ 型碳化物呈细长的板条状，且网状的$(Fe, Cr)_3C$ 型碳化物较多，细长连续分布的板条状和网状碳化物会破坏基体的连续性，使材料韧性降低。且碳化物越多，对基体连续性的破坏就越大，从而降低材料的冲击韧度和塑性[8]。而 1# 碳化物数量较多也是引起宏观硬度较高的原因；另外，碳含量增加，残余奥氏体的数量也会减少，因此基体的硬度也会升高。

2.2 Cr/C 比对耐磨性的影响

中铬铸铁的耐磨性与其组织和力学性能有很大的关系，而组织和力学性能决定于化学成分，化学成分中 Cr/C 比是关键[9]，Cr/C 比不同，$(Cr, Fe)_7C_3$/$(Fe, Cr)_3C$ 共晶碳化物的相对量不同，形态也不同，中铬铸铁中$(Cr, Fe)_7C_3$ 硬度高，韧性好，是提高耐磨性的关键。将表 2 中 1# 和 2# 试样的磨损失重量的数据画成曲线图，如图 4 所示，可以看出，试样的失重量随着冲击次数增加而增加，2# 试样的失重量要低于 1# 试样，即 2# 试样的耐磨性高于 1# 试样。虽然 1# 试样的碳化物数量比较多，但$(Fe, Cr)_3C$ 型碳化物硬度低脆性大，在相同的冲击磨损条件下，更容易发生脆性剥落。而 2# 试样的$(Cr, Fe)_7C_3$ 型碳化物相对多，其韧性较好，延迟磨屑的剥落，耐磨性提高。另外，从图 5 可以看出，1# 和 2# 试样的磨损速率随

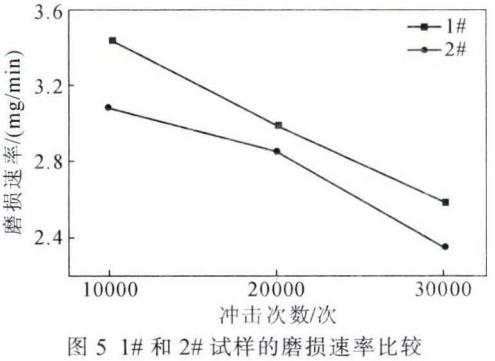


图 5 1# 和 2# 试样的磨损速率比较

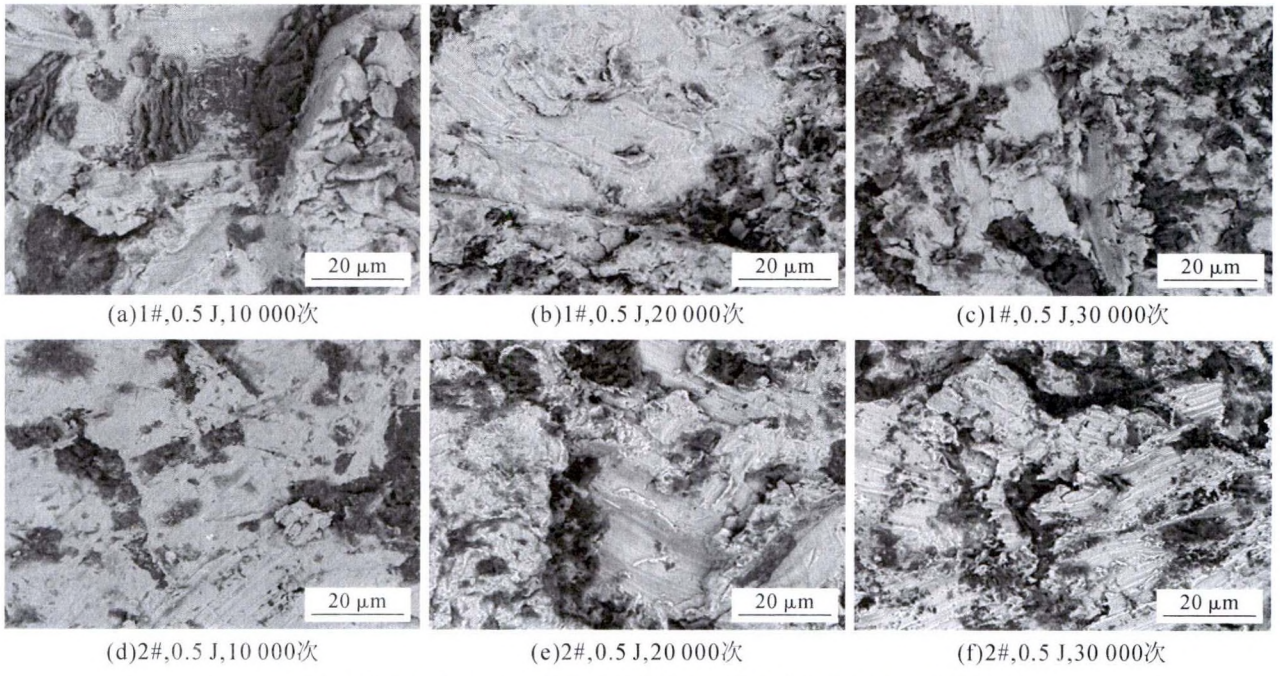
Fig.5 The wear rate of 1# and 2#

着冲击次数的增加而降低，主要是由于冲击次数增加试样表面会产生一定的加工硬化，硬度提高，抗磨粒的切削能力提高，磨损速率下降。2# 试样的磨损速率低于 1# 试样，主要由于其韧性较好，产生的加工硬化能力更强，耐磨性提高。

2.3 磨损表面形貌分析

三体磨料磨损中，下试样匀速转动，上试样往复运动，上下试样发生冲击和短暂的相对滑动，磨料在上下试样之间流动。在冲击磨料磨损条件下，磨粒在法向力的作用下压入材料表面，在切向力的作用下发生相对滑动进行切削。在本实验中，石英砂磨粒相对珠光体基体和残余奥氏体是硬磨料，相对于碳化物是软磨料。因此，在磨损过程中，磨料会优先对基体进行切削磨损，基体被磨损后，碳化物得不到基体的有效支撑，从而在冲击载荷作用下发生剥落和脆断，碳化物脱落后，基体失去保护加速基体的磨损，从而发生失效。

图 6 是试样在 0.5 J 条件下的不同冲击次数的 SEM 磨损表面形貌，中铬铸铁由于硬度高，韧性低，表面主要以显微切削为主，含有少量的塑性变形区和磨料嵌入区。冲击次数为 10 000 次时，珠光体基体表面发生少量的显微切削，切削的痕迹浅而窄，磨粒嵌入也较少，表面开始形成磨屑，1# 试样由于硬度较高，磨屑已经有明显剥落的趋势，2# 试样由于韧性较好，磨屑较小。随着冲击次数增加，磨粒嵌入区面积增加，从而在嵌入区周围产生一定的堆积和塑性变形，同时基体表面由于碳化物的脱落，开始产生凹坑，磨粒对没有碳化物保护的基体切削加深，磨损量增加。当冲击次数为 30 000 次时，表面显微切削的宽度增加，磨屑由于疲劳次数的增加产生剥落，且基体表面有大量的凹坑出现，同时 1# 和 2# 试样局部有裂纹出现，裂纹不断扩展，使得碳化物从基体表面完全脱离，形成剥落坑，失去碳化物的保护，基体磨损加剧，磨损量增加。



(a)1#,0.5 J,10 000次　(b)1#,0.5 J,20 000次　(c)1#,0.5 J,30 000次

(d)2#,0.5 J,10 000次　(e)2#,0.5 J,20 000次　(f)2#,0.5 J,30 000次

图 6 冲击载荷为 0.5 J 条件下不同冲击次数的冲击磨损表面形貌

Fig.6 Impact wear surface topography with different impact times under impact load of 0.5 J

因此，整个磨损过程中，中铬铸铁以显微切削和碳化物凿削剥落为主，还有一部分脆性断裂，以及少量的疲劳剥落。2# 试样耐磨性比 1# 试样高，主要由于 Cr/C 比高，残余奥氏体的含量较高，韧性较好，减轻磨损过程中局部的应力集中，提高耐磨性，同时韧性好，也会延迟磨屑的剥落；另外 2# 试样 Cr/C 比高，$(Cr, Fe)_7C_3$ 型碳化物比例相对较高，其硬度高，阻止磨粒的显微切削，也会提高抗磨粒磨损性能[10]。

3 结论

(1)复合抗磨辊圈外层中铬铸铁的组织形貌和 Cr/C 比有关，Cr/C 比高，碳化物主要为菊花状和弥散分布的块状的$(Cr, Fe)_7C_3$，以及少量网状的$(Fe, Cr)_3C$型碳化物。Cr/C 比低，碳化物主要为网状的$(Fe, Cr)_3C$和板条状的$(Cr, Fe)_7C_3$。

(2)复合抗磨辊圈外层中铬铸铁的力学性能

（下转第 160 页）

2011.

[11] 慈铁军,齐纪渝,叶锋. 铬对高铬铸铁组织和性能的影响[J]. 铸造,2000,49(S1): 677-679.

[12] 刘筱薇,仵海东,周安若,等. 热处理对新型高铬铸铁组织与性能的影响[J]. 热加工工艺,2014,43(2): 173-176.

[13] Ma Youping, Li Xiulan, Liu Yugao, et al. Effect of Ti-V-Nb-Mo addition on microstructure of high chromium cast iron [J]. China Foundry,2012,9(2): 148-153.

[14] Guo Erjun, Wang Lihua, Wang Liping, et al. Effects of RE, V, Ti and B composite modification on the microstructure and properties of high chromium cast iron containing 3% molybdenum [J]. Rare Metals ,2009,28(6): 606-611.

[15] Lin Chiming, Chang Chiaming, Chen Jiehao, et al. The effects of additive elements on the microstructure characteristics and mechanical properties of Cr-Fe-C hard-facing alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 498(1): 30-36.

[16] 郭克星,夏鹏举. 高铬铸铁耐磨性的研究进展与展望[J]. 铸造技术,2018,39(9): 2138-2141.

[17] Hou Yuncheng, Wang You , Pan Zhaoyi, et al. Influence of rare earth nanoparticles and inoculants on performance and microstructure of high chromium cast iron[J]. Journal of Rare Earths, 2012,30 (3): 283-288.

[18] 张宇彤,王丽萍. RE 对高铬铸铁变质效果的研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2005, 10(3): 7-10.

[19] 袁晓洲. 用高铬铸铁研制排渣阀过流件[J]. 新技术新工艺, 2003 (2): 38-40.

[20] 刘嘉,张锁梅,赵爱民,等. 热处理对高铬铸铁组织和硬度的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 39(9): 28-33.

[21] 赵亚忠. 超高铬抗磨损耐腐蚀铸铁的研制及应用 [J]. 中国铸造装备与技术, 2003(3): 24-25.

(上接第 142 页)

和 Cr/C 比有关,Cr/C 比高,碳化物弥散分布,材料韧性提高;Cr/C 比低, 网状碳化物和细长的板条状碳化物对基体的割裂作用比较严重, 降低材料的韧塑性,碳化物数量多,宏观硬度相对较高。

(3)复合抗磨辊圈外层中铬铸铁的耐磨性和 Cr/C 比有关,提高 Cr/C 比,由于材料韧性提高,缓解磨损过程中应力集中和延迟磨屑的剥落, 提高耐磨性。

参考文献:

[1] 马岸奇. 不同材质的耐磨辊圈的研究[J]. 砖瓦, 2018(2):74-76.

[2] 邓建国. 提高砖瓦产品质量的好设备——高铬复合耐磨辊圈细碎对辊机[J]. 砖瓦, 1996(2):47.

[3] 颜志武, 朱中稳. 一种经济实用的耐磨辊圈 [J]. 砖瓦, 2004(2): 13-15.

[4] 娄开钧, 乐川. 提高对辊机辊圈耐磨性能的研究 [J]. 铸造, 1994,43(8):7-11.

[5] 翟启杰,王溪,苏恒渤,等. 中铬含钨复合抗磨辊圈的制造方法: 中国, CN1943860[P]. 2007.

[6] 韩福生, 张在奇. 低铬白口铸铁磨球的组织与性能研究 [J]. 铸造, 1993,42(6):19-23.

[7] 李海鹏. 提高中铬铸铁综合性能的研究[D].天津:河北工业大学, 2002.

[8] 王文韶,刘俊友,刘杰. 钛强化中铬铸铁显微组织和耐磨性能研究[J]. 铸造技术, 2012,33(12):1378-1380.

[9] 李海鹏, 梁春永, 王立辉,等. 铬系白口铸铁的研究进展[J]. 中国铸造装备与技术, 2006(5):8-12.

[10] 龚建勋, 肖逸锋, 张清辉, 等. Fe-C-Cr-V 高铬堆焊合金的 M_7C_3 型碳化物及耐磨性[J]. 焊接学报, 2010, 31(1):33-36.

技术资料邮购

《铸造实用生产技术集锦》

《铸造实用生产技术集锦》本书由李德臣教授级高工编著。共七章:1、重大铸件生产技术;2、耐热耐磨产品生产技术;3、耐蚀耐磨产品生产技术;4、耐磨产品生产技术;5、铸造工艺设计;6、铸造用辅助产品生产技术;7、铸造与哲学。特快专递邮购价:97元。

邮购咨询:李巧凤　　电话/传真:029-83222071