

烧结亚共晶高铬铸铁制备及其显微组织与性能*

肖平安[†], 宋建勇, 陈超, 刘洋, 李志华, 顾景洪

(湖南大学材料科学与工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要:以水雾化高铬铸铁粉末为原料,通过压制/烧结工艺制备了一种亚共晶高铬铸铁(SHCCI),对其显微组织、物理力学性能和冲击磨粒磨损工况下的耐磨性能开展了系统的观察、分析与检测,并与成分相近的传统铸造高铬铸铁(CHCCI)进行了对比研究.试验结果表明,通过超固相线液相烧结可以制备出密度达到 7.44 g/cm^3 的亚共晶高铬铸铁,其 Cr_7C_3 型碳化物呈细小短杆状,沿晶界均匀地分布在由马氏体和奥氏体混合组成的基体中;烧结态高铬铸铁的硬度为HRC58,抗弯强度为 $2\,122\text{ MPa}$,冲击韧性达到 6.5 J/cm^2 (无缺口试样尺寸为 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 50\text{ mm}$);与铸造高铬铸铁相比,由于碳化物形貌、大小和分布均匀性的明显改善,以及基体中有更多的马氏体,烧结高铬铸铁在各种冲击载荷下均展现出明显的抗磨粒磨损性能优势,是一种十分优异的耐磨材料.

关键词:粉末冶金;高铬铸铁;碳化物;冲击磨料磨损

中图分类号:TF124

文献标志码:A

Sintering Fabrication of a Hypoeutectic High Chromium Cast Iron as well as Its Microstructure and Properties

XIAO Ping'an[†], SONG Jianyong, CHEN Chao, LIU Yang, LI Zhihua, GU Jinghong

(College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A sintered hypoeutectic high chromium cast iron (SHCCI) was fabricated by a powder metallurgy process with water atomized powders as raw materials. Its microstructure, mechanical properties and impact abrasion resistance were systematically analyzed or/and detected, and compared with an as-cast high chromium cast iron (CHCCI) with the same composition. The results showed that the density of SHCCI could be of 7.44 g/cm^3 as supersolidus liquid phase sintering was applied. There was only Cr_7C_3 -type carbides in SHCCI, and its matrix with fine grain size was a hybrid of a major part of martensite and austenite. The short rod shape Cr_7C_3 carbides were homogeneously dispersed along grain or subgrain boundaries. The hardness, bending strength and impact toughness (specimens with dimensions of $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ were used) of the as-sintered SHCCI were of HRC58, $2\,122\text{ MPa}$ and 6.5 J/cm^2 , respectively. With the dramatical improvement of morphology, size and distribution of carbides as well as more amount of martensite in the matrix, as-sintered SHCCI presented evident advantages of impact abrasive resistance under all kinds of impact charges over CHCCI.

Key words: powder metallurgy; HCCI; carbide; impact abrasive wear

* 收稿日期:2016-03-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574119), National Natural Science Foundation of China(51574119)

作者简介:肖平安(1962—),男,湖南长沙人,湖南大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: changcluj@163.com

高铬铸铁作为一种广泛应用的工业耐磨材料,其优良的耐磨性能源于高硬度的碳化物(体积分数为20%~35%)分布在基体中^[1-3],同时,基体具有足够的强度和硬度.目前高铬铸铁制备的研究仍集中于铸造方法,但是在铸造高铬铸铁的显微组织中存在基体金属晶粒与碳化物尺寸过大和碳化物三维分瓣生长发达造成对基体割裂严重等不足,导致其冲击韧性、强度和抗疲劳性均不理想.这不但限制了其突出耐磨性能的充分发挥,而且难以满足冲击磨粒磨损等苛刻工况应用中的性能要求.因此,控制碳化物的形态和生长成为了改善高铬铸铁力学性能的一种重要途径.然而研究表明,合金化、变质处理和热处理等方法在改善碳化物形态及其分布上虽然能够产生一定作用,但是效果仍然有限^[4-8].将粉末冶金工艺应用于高铬铸铁的制备,由于其独特的热力学生长条件,成功制备了碳化物形态独特、分布均匀且晶粒细小的高综合力学性能的高铬铸铁^[9].本研究选用水雾化亚共晶高铬铸铁预合金粉末为原料,通过压制成型和超固相液相烧结制备亚共晶高铬铸铁,并对其显微组织、力学性能及冲击磨料磨损性能进行研究,重点探究在不同冲击功状态下的磨粒磨损行为,以期获得成本更优、具有优秀综合力学性能的耐磨铸铁材料.

1 试验方案与过程

本试验使用水雾化亚共晶高铬铸铁粉末为原料,其Cr/C比约为7.5,碳当量约为3.6%.图1所示为原料粉末的激光粒度分析仪分析结果, D_{50} 为 $9.48\ \mu\text{m}$.

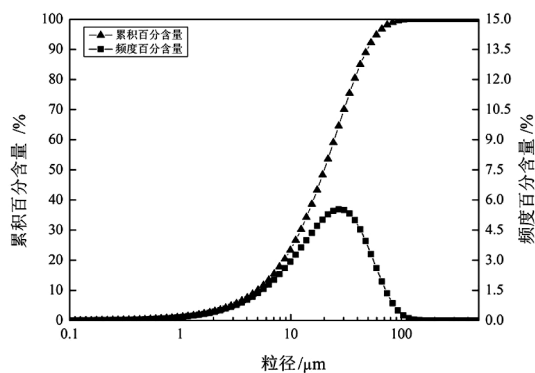


图1 亚共晶高铬铸铁原料粉末的粒度分布

Fig.1 Powder size distribution of hypoeutectic high chromium cast iron powders

使用丁苯橡胶作为成形剂,添加量 $\leq 2\%$ (质量

分数).在四柱液压机上进行坯样压制成型,压制压力为300 MPa.压坯在GSL1600X管式炉上进行超固相液相烧结,烧结温度为 $1\ 210\ ^\circ\text{C}$,保温2 h后随炉冷却.

根据阿基米德原理测量烧结密度;使用HR-150A型全洛氏硬度计测量材料硬度;采用MHV-2000显微维氏硬度计测量材料的显微维氏硬度;冲击韧性在XJ-40A型冲击试验机上进行测试,试样尺寸为 $5\ \text{mm}\times 5\ \text{mm}\times 50\ \text{mm}$.采用D8-advance型X射线衍射仪(XRD,Cu靶, $\lambda=0.154\ 05\ \text{nm}$)分析材料的物相组成;用Leitz-MM6金相显微镜观察材料的显微组织,利用QUANTA200环境扫描电镜(SEM)对碳化物的形貌、分布、大小和冲击断口进行观察分析.

烧结亚共晶高铬铸铁的冲击磨粒磨损性能测试在MLD-10型动载磨料磨损试验机上进行.在测试过程中上试样既受到冲击力作用,又受到磨料的快速磨损,试验条件非常接近于冲击磨料磨损的实际工况,如图2所示.上试样为冲击磨损高铬铸铁试样,尺寸为 $10\ \text{mm}\times 10\ \text{mm}\times 30\ \text{mm}$,冲击频率为200次/min;下试样为圆环,选材为GCr15,硬度范围为62~64 HRC,转速为200 r/min.磨料为粒度16目的棕刚玉,磨料的流量为15 kg/h.实验中选取的冲击功分别为: $1\ \text{J}/\text{cm}^2$, $2\ \text{J}/\text{cm}^2$, $3\ \text{J}/\text{cm}^2$ 和 $4\ \text{J}/\text{cm}^2$.每种冲击功条件下试样的测试总时间为60 min,其中每10 min停机一次,将试样取下并用酒精在超声波中对其进行清洗,干燥后用精确度为0.1 mg的电子天平称量试样的质量,通过测试前后其质量的变化来评价磨损量.并利用QUANTA200环境扫描电镜观察分析试样磨损表面的微观形貌.为便于比照分析,选择成分相近的铸造亚共晶高铬铸铁进行对比研究.

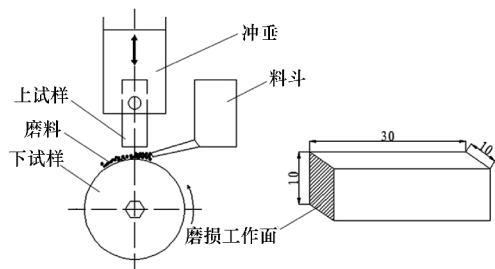


图2 动载磨料磨损试验机及试样示意图

Fig.2 Schematic diagram of dynamic load abrasive wear tester and impact abrasion specimen

2 试验结果与分析

2.1 烧结亚共晶高铬铸铁的显微组织

图 3 为烧结亚共晶高铬铸铁和铸造亚共晶高铬铸铁的 XRD 图谱.经分析烧结亚共晶高铬铸铁和铸造亚共晶高铬铸铁的物相均由 Cr_7C_3 型碳化物、马氏体(Martensite)以及奥氏体(Austenite)构成.由衍射峰强度的差异可以看出,在烧结高铬铸铁中基体以马氏体为主,存在少量奥氏体,而铸造高铬铸铁的基体构成与之相反.

图 4 为试验获得的烧结亚共晶高铬铸铁和成分相近的铸造高铬铸铁的显微组织照片.从图 4(a)(c)可以看出铸造亚共晶高铬铸铁碳化物粗大(长度为 $10\sim 400\ \mu m$),分布在由马氏体和残余奥氏体组成的基体上;基体显微硬度测量结果为 $(579\pm 28)\ HV$.研究表明,含 $10\%\sim 30\%$ Cr 和 $2\%\sim 3.3\%$ C 的高铬铸铁在凝固过程中,熔液首先析出奥氏体,然后在共晶温度时发生共晶反应,形成奥氏体和 Cr_7C_3 型

碳化物的共晶组织^[10].图 4(b)(d)为烧结亚共晶高铬铸铁的显微组织,从图中可以看出,基体晶粒细小,外形比较圆润的短杆状 Cr_7C_3 型碳化物(长度为 $1\sim 10\ \mu m$) 比较均匀地分布在基体上,而且主要沿晶界分布.

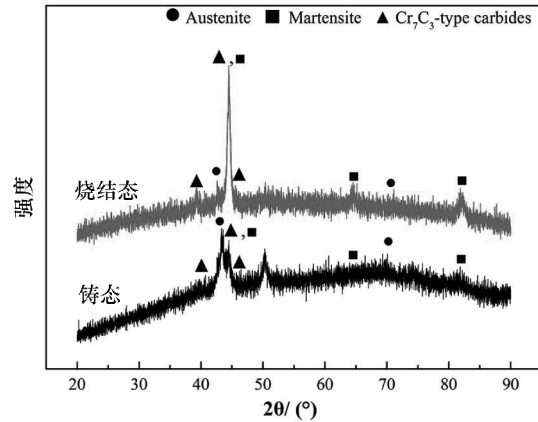


图 3 亚共晶高铬铸铁的 XRD 图谱

Fig.3 Diffraction of hypoeutectic high chromium cast iron

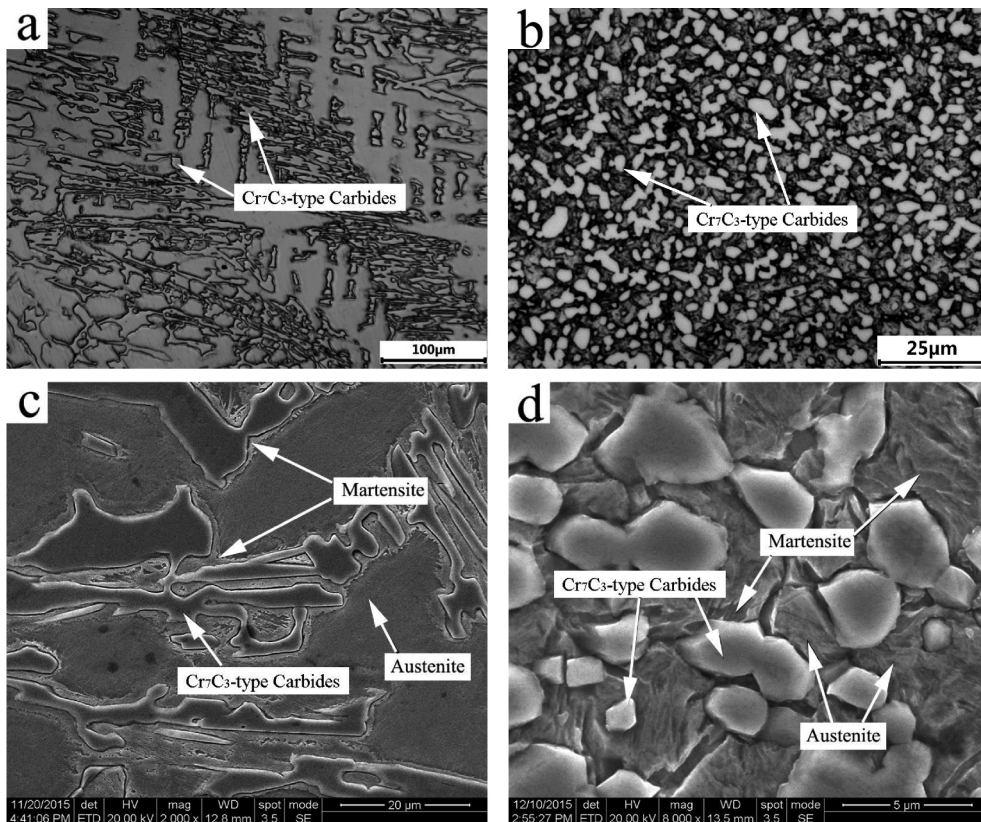


图 4 亚共晶高铬铸铁显微组织

Fig.4 Microstructures of hypoeutectic high chromium cast iron

(a), (c)CHCCI; (b), (d)SHCCI

这是因为,一方面实际烧结温度远低于铸造过程中的熔炼和浇注温度(相差 $300\ ^\circ C$ 左右),在二种

技术的材料制备过程中碳化物生长的热力学条件差异巨大,严重制约了烧结高铬铸铁中碳化物的长

大和枝晶分瓣,因而最终呈短杆状;另一方面在液相烧结过程中,碳化物主要在液相中快速生长,而在超固相线液相烧结时液相主要沿晶界和亚晶界形成,因此碳化物主要分布于晶界,并可以起到阻碍晶粒生长和相互吞并的作用。

烧结亚共晶高铬铸铁基体的显微硬度测量结果为 (806 ± 41) HV,明显高于铸造高铬铸铁基体的显微硬度.这印证了XRD分析得出的烧结亚共晶高铬铸铁基体内马氏体含量明显比铸造高铬铸铁基体中高的结论。

图5为烧结和铸造亚共晶高铬铸铁基体的EDS分析结果,数据显示烧结高铬铸铁基体中的Cr含量明显低于铸造高铬铸铁,而Si含量高于铸造高铬铸铁.由于在烧结高铬铸铁制备中使用快冷水雾

化粉末为原料,其晶粒细小、形成碳化物核心众多^[9],因而在烧结过程中碳化物形成元素Cr的平均自由扩散行程较短,能够形成更多的碳化物.这一方面使得基体中Cr含量下降,另一方面暗示着烧结高铬铸铁的硬度会高于铸造高铬铸铁.基体中Cr含量降低,会导致马氏体转变温度 M_s 升高^[2].另外,基体中的Si不仅能使共晶转变温度范围缩小,减小固-液两相共存区,使共晶碳化物变得更细小,分布更为弥散化,还能减少C在奥氏体的溶解度,提高 M_s 温度^[11].但是,由于管式炉在较高温度段的冷却 $(4 \sim 5^\circ\text{C}/\text{min})$,而且烧结高铬铸铁基体的Mo和C含量比较高,因此仍可以保证良好的淬透性和获得高马氏体量。

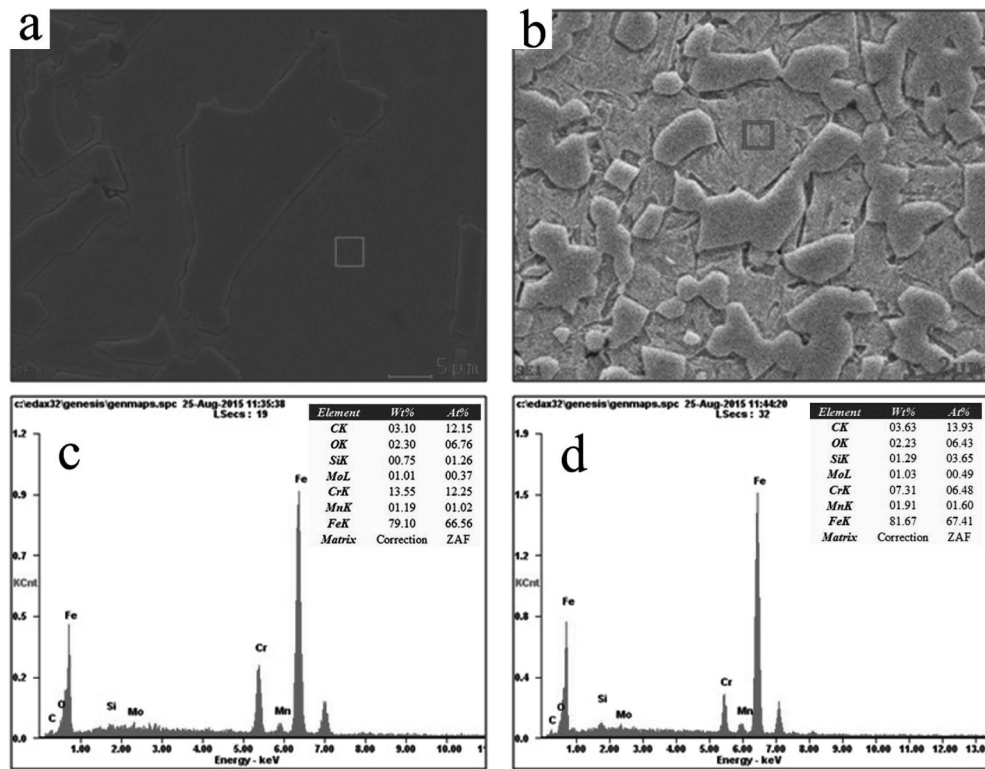


图5 亚共晶高铬铸铁 EDS 分析

Fig.5 EDS of hypoeutectic high chromium cast iron

(a), (c)CHCCI; (b), (d)SHCCI

2.2 烧结亚共晶高铬铸铁的力学性能

表1所列试验获得的烧结亚共晶高铬铸铁与相近成分铸造高铬铸铁的物理和力学性能结果.表中结果表明,烧结获得的亚共晶高铬铸铁样品的密度为 $7.44 \text{ g}/\text{cm}^3$,铸造高铬铸铁的密度为 $7.69 \text{ g}/\text{cm}^3$,二者的密度差异约3%;这一方面说明作者选择超固相线液相烧结技术进行压坯致密化可行且有效,另一方面烧结制品中残余孔隙已经孤立化,为获得优

良的力学性能奠定了基础。

表1 亚共晶高铬铸铁力学性能
Tab.1 Mechanical properties of hypoeutectic high chromium cast iron

材料	密度 $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	硬度 $/\text{HRC}$	抗弯强度 $/\text{MPa}$	冲击韧性 $/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$
SHCCI	7.44	58	2 122	6.5
CHCCI	7.69	52	1 008	2.4

表 1 中的硬度检测结果显示, 烧结高铬铸铁的硬度明显高于铸造高铬铸铁. 这与前面 XRD 分析得到的在烧结高铬铸铁基体中马氏体含量更高和 EDS 分析结果预示其碳化物析出更充分等结论恰好相印证. 此外, 有文献报道在高铬铸铁中碳化物的不同晶面具有不同的显微硬度^[12], 由于烧结高铬铸铁和铸造高铬铸铁的碳化物形态差异显著, 碳化物不同晶面对合金硬度的影响有待深入探究. 硬度是影响材料耐磨性能的最重要因素之一, 采用粉末冶金方法可以直接制备出高硬度高铬铸铁, 因而有望省略在铸造高铬铸铁生产中必须的热处理工艺环节.

表 1 中的试验结果显示, 烧结高铬铸铁的抗弯强度和冲击韧性相比铸造高铬铸铁均获得了成倍的提升. 高铬铸铁的显微组织是由高硬度脆性碳化物和韧性金属基体组成, 可以看成为一种原位生成的 Cr_7C_3 型碳化物增强复合材料. 作为强化相, Cr_7C_3 型碳化物的最显著作用是显著提高高铬铸铁的硬度和耐磨

性, 而其对合金强度的影响则与其生长形态与分布密切相关, 因为高硬度脆性碳化物也会对合金产生强烈的割裂作用, 并引起严重的应力集中, 降低高铬铸铁的强度和冲击韧性^[13].

图 6 为烧结亚共晶高铬铸铁与铸造高铬铸铁的深腐蚀显微组织对比图. 其中, 图 6(a) 所示铸造高铬铸铁碳化物粗大, 边缘棱角锐利, 对基体的割裂和应力集中效应明显; 另外, 在碳化物中还出现中空结构, 容易造成剧烈的应力集中. 因此, 合金的强度和冲击韧性不佳. 而图 6(b) 所示烧结亚共晶高铬铸铁碳化物细小且外形比较圆润, 使得其对基体的割裂和应力集中作用大大降低, 因而合金的力学性能获得大幅提高. 此外, 作者开展的水淬试验结果证实, 烧结亚共晶高铬铸铁能够进行水淬而不产生任何裂纹, 而铸造高铬铸铁在水淬时则总会开裂. 这进一步说明在烧结亚共晶高铬铸铁中碳化物引起的应力集中比铸造高铬铸铁中要小得多.

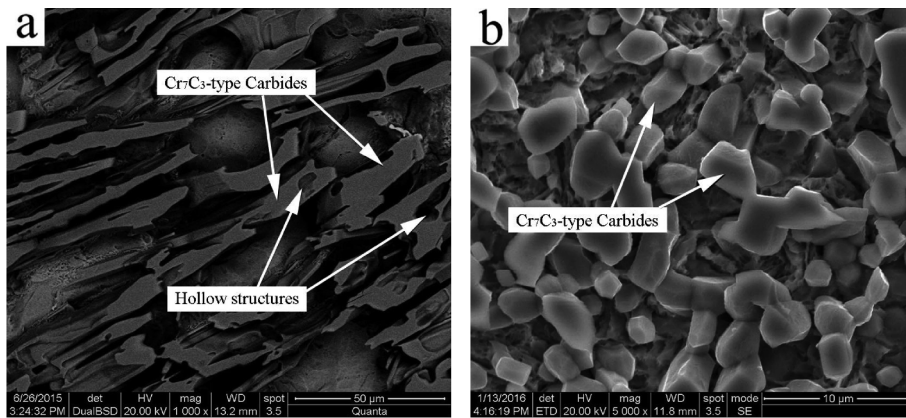


图 6 亚共晶高铬铸铁深腐蚀显微组织

Fig.6 Deep etching microstructures of hypoeutectic high chromium cast iron

(a) CHCCI; (b) SHCCI

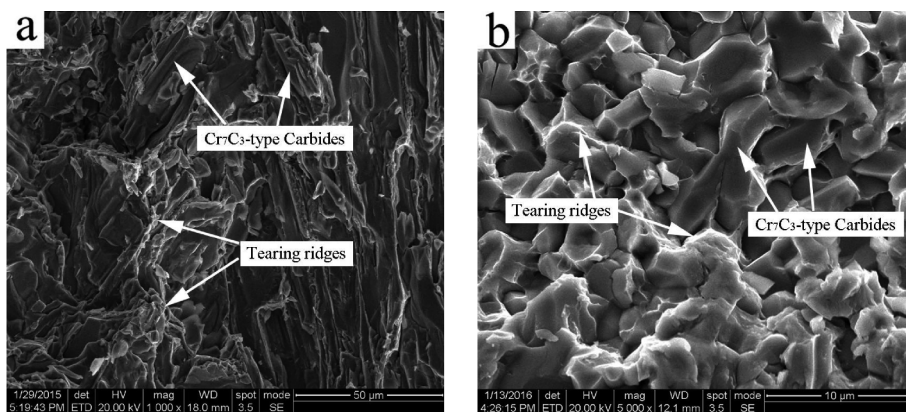


图 7 亚共晶高铬铸铁冲击断口形貌

Fig.7 Impact fractographs of hypoeutectic high chromium cast iron

(a) CHCCI; (b) SHCCI

图7为烧结合晶高铬铸铁与铸造高铬铸铁的冲击韧性测量试样的断口SEM形貌照片.由图7(a)的铸造高铬铸铁冲击断口形貌可以看出,以冰糖型解理断裂为主,存在一些高度很小的金属撕裂棱;因而,主要是脆性断裂.在图7(b)的烧结合晶高铬铸铁冲击断口中,冰糖型解理断裂面的份量大为减少,而类似于韧窝状的断口面积明显增加,且金属撕裂棱的高度显著提高,因此,其冲击韧性获得了大幅提高. Cr_7C_3 型碳化物形貌、大小和分布的改善有助于吸收冲击功和阻碍裂纹的扩展,对提高高铬铸铁的冲击韧性发挥了重要作用.

2.3 烧结合晶高铬铸铁的冲击磨粒磨损性能

图8为试验获得的烧结合晶高铬铸铁与铸造高铬铸铁在不同冲击功作用下,每冲击磨损10 min,质量磨损量和冲击功的关系曲线.从图中可以看出,随着冲击功增加,铸造高铬铸铁的平均质量磨损量增加较大,基本上呈现线性增大关系.

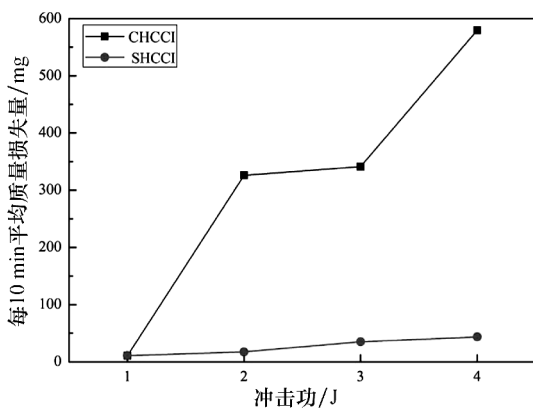


图8 亚共晶高铬铸铁质量磨损量和冲击功的关系

Fig.8 The relations between mass loss and impact energy of hypoeutectic high chromium cast iron

烧结合晶高铬铸铁的平均质量磨损量变化一直比较平稳,虽然也是线性增加,但是线性变化的斜率要小得多,表现出优良的冲击磨料磨损性能.由图8可知,在低冲击功(1 J)状态下,两者质量磨损量相近.在中等冲击功(2 J和3 J)状态下,铸造高铬铸铁的质量磨损量是烧结合晶高铬铸铁质量磨损量的10倍左右.在高冲击功(4 J)状态下,铸造高铬铸铁的质量磨损量是烧结合晶高铬铸铁质量磨损量的13倍左右.说明在中、高等冲击功状态下,由于铸造高铬铸铁中应力集中严重,耐冲击载荷能力比较差,发生比较严重的剥落性磨损.

图9为试验获得的烧结合晶高铬铸铁冲击磨料磨损量和时间的关系曲线.从图中可以看出冲击功为1 J

和2 J时,质量磨损量随时间的变化曲线比较平缓,说明磨损过程很平稳,是非常适用于烧结合晶高铬铸铁的工况.冲击功为3 J和4 J时,质量磨损量随时间的变化曲线均出现了比较明显的波动,波动范围在15~130 mg/10 min,其中最大磨损量相当于铸造高铬铸铁在低冲击载荷($<2 \text{ J/cm}^2$)工况下的磨损水平.这说明在较高冲击功状态下烧结合晶高铬铸铁会发生周期性的轻微剥落磨损,但是仍然具有良好的耐冲击和耐磨损性能.

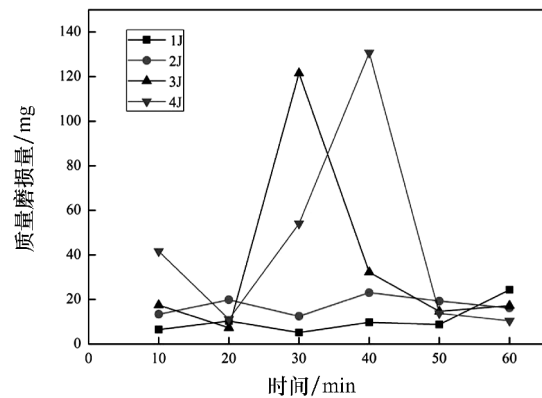


图9 烧结合晶高铬铸铁质量磨损量和时间的关系

Fig.9 The relations between average mass loss and time of SHCCI

材料的冲击磨粒磨损形式主要表现为:显微切削、浅小凿坑和微观剥落^[14-16].图10为不同冲击功状态下铸造高铬铸铁(a)~(d)与烧结合晶高铬铸铁(e)~(h)磨料磨损表面微观形貌的对比.从图中可以看出,在低冲击功状态下,铸造高铬铸铁和烧结合晶高铬铸铁的磨损形式主要为切削磨损,但前者的犁沟相比于后者更宽更深.随着冲击功的增加,铸造高铬铸铁试样变形严重,切削磨损不断加剧,犁沟变宽变深.在中、高冲击功载荷工况下,发生了严重的疲劳剥落磨损,合金的耐磨性能急剧下降.而烧结合晶高铬铸铁在不同冲击功工况下磨损面均较为平整,主要磨损形式为显微切削,在高冲击功作用下才会发生轻微的疲劳剥落磨损.分析其中的原因,一方面是因为烧结合晶高铬铸铁的硬度更高,更加有效地阻止了磨粒的进入,减少犁沟的形成,降低磨损质量^[16];另一方面,烧结合晶高铬铸铁显微组织的优化改善了冲击韧性,能够承受较高的冲击载荷,从而有利于抑制磨损表层中裂纹的产生和扩展,同时由于基体中马氏体含量更多,能够为碳化物提供更加强有力的支撑^[17-18],减少疲劳剥落磨损,从而提高耐磨性.

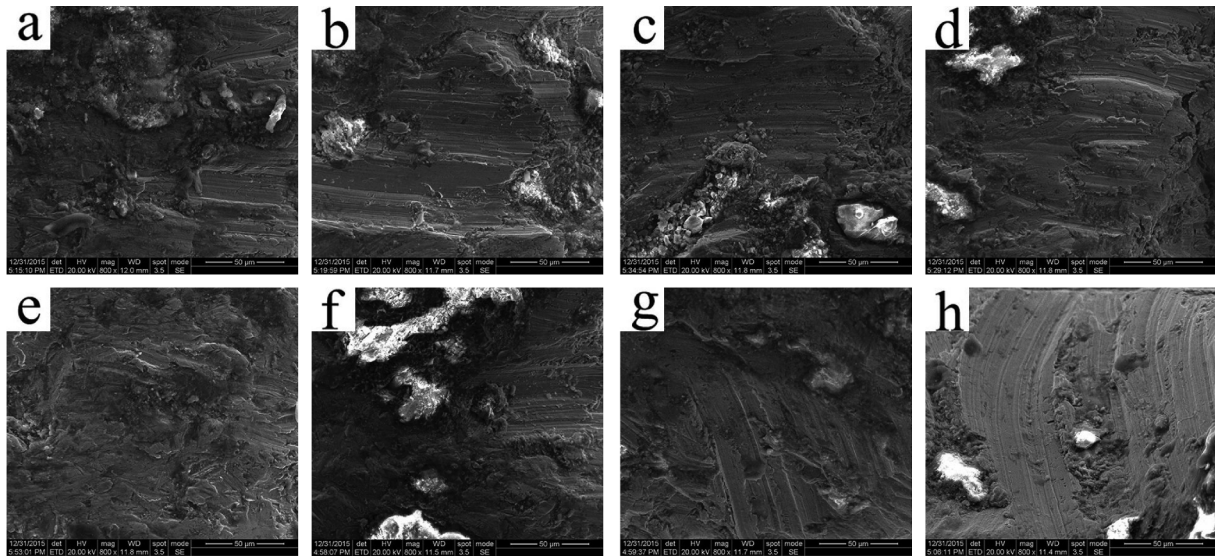


图 10 不同冲击功状态下亚共晶高铬铸铁磨料磨损表面微观形貌

Fig.10 Abrasive wear surface morphologies of hypoeutectic high chromium cast iron under different impact energy

(a)~(d) CHCCI and (e)~(h) SHCCI

(a),(e)low impact energy;(b),(c),(f),(g)medium impact energy;

(d),(h)high impact energy

总之,由于硬度和耐冲击性能的良好配合,烧结高铬铸铁的抗冲击磨料磨损性能相比铸造高铬铸铁获得了成倍的提高,是一种优异的抗冲击磨料磨损材料。

3 结 论

1)通过超固相液相烧结可获得高密度、高硬度、高韧性和高强度的亚共晶高铬铸铁,其物理力学性能为:密度 7.44 g/cm^3 ,硬度为 HRC58,冲击韧性达到 6.5 J/cm^2 ,抗弯强度 2122 MPa 。

2)在烧结亚共晶高铬铸铁中碳化物为 Cr_7C_3 ,呈短杆状分布在以马氏体为主的金属基体中,主要沿晶界和亚晶界分布.由于碳化物不仅析出量更多,而且形貌和分布得到改善,使得其对基体的割裂和应力集中作用明显减小,因此烧结亚共晶高铬铸铁具有良好的硬度和冲击韧性配合,相对于铸造高铬铸铁在各种冲击工况下的抗冲击磨料磨损性能显著提高。

参考文献

[1] BERNS H. Microstructural properties of wear-resistant alloys [J]. *Wear*, 1995, 181/183(95): 271-279.
[2] TABRETT C P, SARE I R. Effect of high temperature and sub-ambient treatments on the matrix structure and abrasion resistance of a high chromium white iron [J]. *Scripta Mater.*

1998, 38(12): 1747-1753

[3] HANLON D N, RAINFORTH W M, SELLARS C M. The effect of spray forming on the microstructure and properties of a high chromium white cast iron [J]. *Journal of Materials Science*, 1999, 34(10): 2291-2301.
[4] KASAMA A H, MOURISCO A J. Microstructure and wear resistance of spray formed high chromium white cast iron [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 375/377(1): 589-594.
[5] DINGH S, LIU S Q, GUO J, *et al.* Improving impact toughness of a high chromium cast iron regarding joint additive of nitrogen and titanium [J]. *Materials and Design*, 2016, 90: 958-968.
[6] ARIKAN M M, CIMENOGLU H, KAYALI E S. The effect of titanium on the abrasion resistance of 15Cr-3Mo white cast irons [J]. *Wear*, 2001, 247(2): 231-235.
[7] LAIRD G II, POWELL G L F. Solidification and solid-state transformation mechanisms in Si alloyer high-chromium white cast irons [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1993, 24(4): 981-988.
[8] 高文理, 黄雅妮, 何建军, 等. 固液混合铸造对高铬铸铁抗拉强度的影响 [J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2006, 33(4): 85-88.
GAO Wenli, Huang Yani, HE Jianjun, *et al.* Effects of mixed solid-liquid casting on the tensile strength of high chromium cast iron [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2006, 33(4): 85-88. (In Chinese)
[9] 肖平安, 张霞, 范安平, 等. 高综合性能亚共晶高铬铸铁的烧结制备 [J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2015, 20(1): 78-85.
XIAO Pingan, ZHANG Xia, FAN Anping, *et al.* Sintering

- preparation of high performance hypoeutectic high chromium cast iron[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2015, 20(1): 78–85. (In Chinese)
- [10] TABRETT C P, SARE I R, GHOMASHCHI M R. Microstructure-property relationships in 13% chromium white iron alloys[J]. *International Materials Reviews*, 1996, 41(2): 52–89.
- [11] CIASW W. Phase transformational kinetics and hardenability of low-carbon, boron-treated steels [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1973, 4(2): 603–614.
- [12] CORONADO J J. Effect of $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ carbide orientation on abrasion wear resistance and fracture toughness [J]. *Wear*, 2011, 270(3/4): 287–293.
- [13] BEDOLLA-JACUINDE A, CORREA R, MEJIA I. The effect of titanium on the wear behavior of a 16%Cr white cast iron under pure sliding[J]. *Wear*, 2007, 263(1/6): 808–820.
- [14] 吕宇鹏, 李士同. 变质超高锰钢的冲击磨料磨损行为研究[J]. *金属学报*, 1999, 35(6): 581–584.
LÜ Yupeng, LI Shitong. On the impact abrasive wear of super-high manganese steel[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1999, 35(6): 581–584. (In Chinese)
- [15] 张福全, 邵飞杰, 周恺武. Mn13Cr2 高锰钢冲击磨损机制的研究[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2006, 41(2): 6–10.
ZHANG Fuquan, SHAO Feijie, ZHOU Dianwu. Research on impact wear mechanism of high manganese steel Mn13Cr2[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2014, 41(12): 6–10. (In Chinese)
- [16] 马陟祚, 张永振. 高钒高速钢冲击磨损性能与机理的研究[J]. *摩擦学学报*, 2006, 26(2): 169–173.
MA Zhizuo, ZHANG Yongzhen. Impact wear and wear mechanism study of high vanadium high speed steel[J]. *Tribology*, 2006, 26(2): 169–173. (In Chinese)
- [17] 刘浩怀, 王均. 亚临界热处理 Cr13Mn3MoV2 高铬铸铁的硬化行为和耐磨性[J]. *金属热处理*, 2006, 31(2): 45–49.
LIU Haohuai, WANG Jun. Hardening behavior and abrasion resistance of the Cr13Mn3MoV2 high chromium cast iron subjected to sub-critical treatment[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2006, 31(2): 45–49. (In Chinese)
- [18] HURRICKS P L. Some metallurgical factors controlling the adhesive and abrasive wear resistance of steels [J]. *Wear*, 1973, 26(3): 285–304.
-
- (上接第 28 页)
- [9] GARNHAM J E, DDVIS C L. Very early stage rolling contact fatigue crack growth in pearlitic rail steels[J]. *Wear*, 2011, 271(1/2): 100–112.
- [10] 梁旭, 周清跃, 张银花, 等. 钢轨中大尺寸外来夹杂物分析[J]. *钢铁*, 2015, 50(5): 54–58.
LIANG Xu, ZHOU Qingyue, ZHANG Yinhua, *et al.* Analysis of large-size external inclusions in rails [J]. *Iron and Steel*, 2015, 50(5): 54–58. (In Chinese)
- [11] 米国发, 刘彦磊, 张斌, 等. 夹杂物对轮毂裂纹萌生的影响[J]. *铁道学报*, 2010, 32(4): 108–113.
MI Guofa, LIU Yanlei, ZAHNG Bin, *et al.* Influence of inclusions on crack initiation in wheel-rim [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2010, 32(4): 108–113. (In Chinese)
- [12] 李泽峰, 王经涛, 欧屹, 等. GCr15 钢滚珠丝杠副的接触疲劳行为[J]. *金属热处理*, 2015, 40(10): 195–199.
LI Zefeng, WANG Jingtao, OU Yi, *et al.* Contact fatigue behavior of GCr15 steel ball screw [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2015, 40(10): 195–199. (In Chinese)
- [13] 颜秉善, 王其昌. 钢轨力学与钢轨伤损[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1989: 45–58.
YAN Bingshan, WANG Qichang. *Rail mechanics and damage* [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1989: 45–58. (In Chinese)
- [14] 束德林. 工程材料力学性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 154–156.
SHU Delin. *Mechanical properties of engineering materials* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 154–156. (In Chinese)
- [15] 郭火明, 王文健, 刘腾飞, 等. 重载铁路钢轨损伤行为分析[J]. *中国机械工程*, 2014, 25(2): 267–272.
GUO Huoming, WANG Wenjian, LIU Tengfei, *et al.* Analysis of damage behavior of heavy-haul railway rails [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(2): 267–272. (In Chinese)