

基于振动条件下高铬铸铁组织和性能的变化

刘 洲, 王志杰, 蒋业华, 周谟金

(昆明理工大学, 云南昆明 650000)

摘要: 高铬铸铁在凝固过程中, 易形成粗大的初生碳化物, 降低了材料的冲击韧性。通过在凝固过程中外加机械振动处理, 探究了振动工艺参数对碳化物形态、冲击韧性及耐磨性能的影响。采用光学显微镜和扫描电镜观察高铬铸铁显微组织的变化; 利用X射线衍射和电子探针分析了物相组成。结果表明: 与未经过振动处理的高铬铸铁相比, 振动处理的高铬铸铁中 M_7C_3 型碳化物得到了细化, 其冲击韧性较未处理高铬铸铁提高了16.36%; 耐磨性提高了2.9倍。

关键词: 高铬铸铁; 机械振动; 显微组织; 冲击韧性; 耐磨性

耐磨材料主要应用于矿山、冶金、煤炭和水泥制造等大型机械生产或制造领域, 由于工况复杂, 工作环境恶劣, 常出现断裂、磨损和腐蚀等失效形式^[1-2]。磨损对金属制件造成的能源消耗、材料损耗和经济损失巨大, 每年因磨损造成的经济损失在400亿人民币左右。同时, 企业生产时由于频繁替换耐磨零部件, 耗费大量人力物力, 降低企业生产效率。高铬铸铁以其优良的耐磨性能, 在建材、采矿、选矿、冶金、电力、耐火材料、机械工程等领域中都得到较为广泛的应用^[3-5]。但是高铬铸铁中的初生碳化物大多呈粗大的杆条状, 会降低材料的韧性, 在强烈载荷冲击下材料会发生脆性断裂, 导致对冲击韧性要求较高的高铬铸铁失效^[6-8]。因此, 如何细化初生碳化物, 改善高铬铸铁的耐磨、铸造和冲击韧性等性能, 一直是近年来关注的焦点。

机械振动处理作为一种提高高铬铸铁的技术, 在铸件金属凝固过程, 机械振动处理使组织晶粒发生细化, 同时还能改善凝固组织的分布及形态, 促使铸造过程中卷入的杂质与气体上浮至表面, 减少内部缺陷和收缩孔隙率^[9-16], 因此有助于降低高铬铸铁的残余应力, 增强力学性能, 提高耐磨性。此外, 与其他改善高铬铸铁性能的方法比较, 机械振动是一种简便经济有效的改善铸件组织性能的工艺^[17]。因此, 针对高铬铸铁铸造的不足, 本研究通过振动处理来探究其对高铬铸铁组织、韧性及耐磨性能的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用高铬铸铁成分见表1。

表1 高铬铸铁的化学成分
Table 1 Chemical composition of the high chromium cast iron $w_B/\%$

C	Cr	Mn	Si	Mo	Ni	Cu	Fe
3.0~3.4	25~26	1	0.5	0.6	0.2~0.4	0.4	其余

1.2 试验材料制备

采用2 t的中频感应电炉进行熔炼, 浇注温度为1 550 °C, 机械振动工艺为: 铁液

作者简介:

刘 洲 (1998-), 男, 硕士生, 从事金属基耐磨复合材料开发与加工研究工作。E-mail: 635602801@qq.com

通讯作者:

周谟金, 男, 博士, 讲师。E-mail: 631795569@qq.com

中图分类号: TG143.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

05-0523-06

基金项目:

云南省科技厅基础研究项目(202101AU070155)。

收稿日期:

2022-05-07 收到初稿,

2022-07-04 收到修订稿。

浇注满型腔后开始振动，振动频率为50 Hz，振动时间为3 min。未经过机械振动工艺为对比样。

1.3 试验材料测试

(1) 组织观察。采用线切割切取金相试样，用金刚石磨盘预磨，再用砂纸进行精磨，最后对试样进行抛光腐蚀，腐蚀液用4%硝酸酒精腐蚀。通过光学显微镜观察试样的显微组织结构。然后利用Image Pro Plus软件中对材料组织中的碳化物体积分数进行统计；利用ZEISS EV O18-21-57型扫描电镜对材料的组织形貌进行观察；利用D/max-2500型X射线衍射仪对高铬铸铁物相进行鉴定；采用EPMA-1720设备分析高铬铸铁的元素分布。

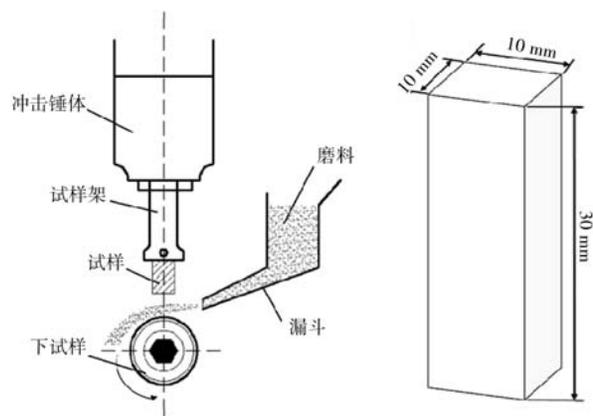
(2) 冲击韧性测试。采用冲击试验机（JBT-50）对高铬铸铁进行冲击韧性测试。试样尺寸为10 mm × 10 mm × 55 mm的夏比无缺口试样，每组试样选取3个冲击试样，取3个试样的平均值作为试验材料的冲击韧性值。

(3) 冲击磨料磨损试验。采用设备型号为MLD-10型动载荷磨损试验机对高铬铸铁进行测试，试验机的工作原理示意图如1a。所示试样的尺寸为10 mm × 10 mm × 30 mm，试样尺寸见图1b。冲击载荷分别设置为3 J、4 J，其中磨料为石英砂，目数为70~100，通过统计试样的质量损失量来表征高铬铸铁的耐磨料磨损性能。

2 结果与讨论

2.1 振动处理对高铬铸铁组织的影响

图2是高铬铸铁金相组织及初生碳化物体积分数统计图。从图2a可以看出，基体上分布有六边形的初生碳化物和集束状的共晶碳化物。经过振动处理后可



(a) 试验机示意图 (b) 冲击磨料磨损试样

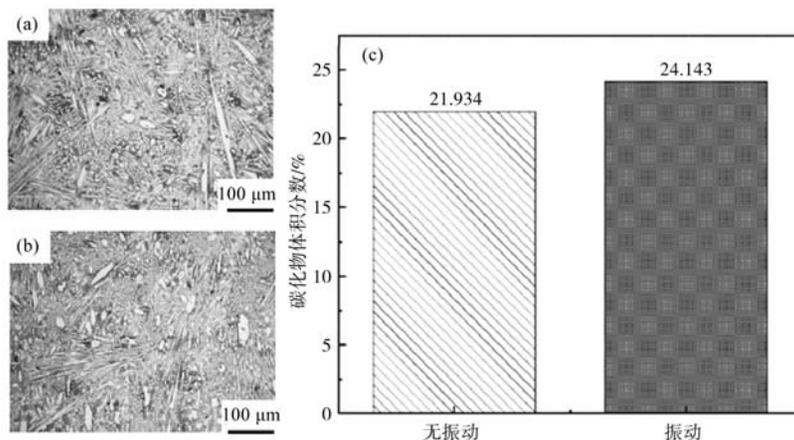
图1 MLD-10试验机示意图及冲击磨料磨损试样

Fig. 1 Schematic illustration of the MLD-10 testing machine and abrasive wear specimen

以使熔融金属液在凝固结晶过程中形成粗大枝晶发生碎裂，组织中的初生碳化物由较大的条状和近似六边形细化变为较小的条状和较小的近似六边形形状，分布呈现出更加细小弥散的特点。通过Image Pro Plus软件统计出高铬铸铁初生碳化物体积分数，如图2c所示，未施加振动的高铬铸铁的初生碳化物体积分数为21.934%，而振动处理后的高铬铸铁初生碳化物体积分数为24.143%，经过振动处理初生碳化物发生了碎裂，数量逐渐增多。

采用XRD对高铬铸铁物相进行分析，结果如图3所示。通过XRD衍射分析可以观察到高铬铸铁主要物相为 M_7C_3 型碳化物、马氏体和奥氏体。当施加振动时，碳化物的种类并未发生变化，物相仍以 M_7C_3 型、马氏体和奥氏体为主，外加机械振动工艺，并没有改变基体组织及物相，只是对碳化物形态产生了影响。

未处理与处理后的高铬铸铁组织SEM图如图4所



(a) 普通浇注；(b) 振动浇注；(c) 体积分数统计

图2 高铬铸铁金相组织

Fig. 2 Microstructures of the high chromium cast iron

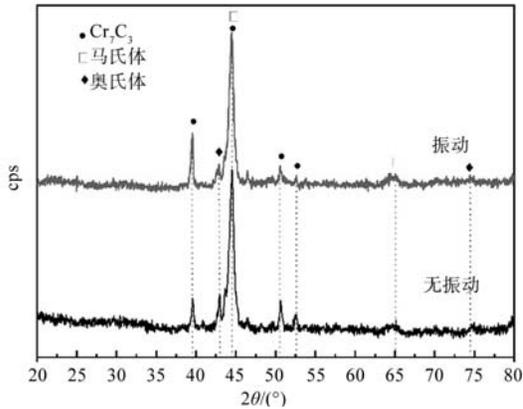
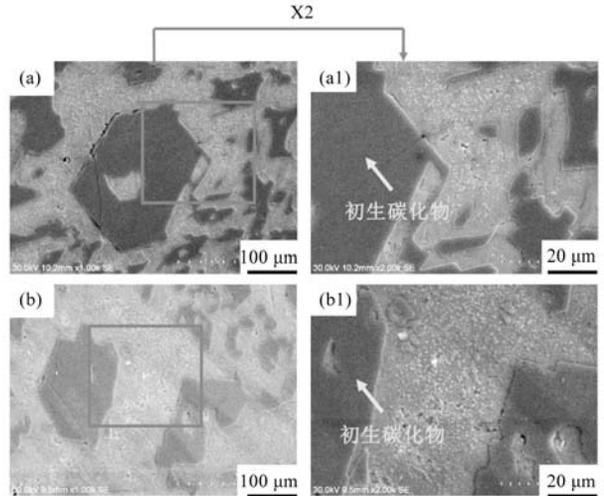


图3 高铬铸铁XRD衍射图谱对比

Fig. 3 Comparison of XRD diffraction patterns of the high chromium cast iron

示。从图4a1与图4b1中可知，经过机械振动处理后的高铬铸铁组织中的初生碳化物较未振动时细小，初生碳化物的尺寸变小，数量逐渐增多，以细小的六边形态均匀分布于基体组织。

对高铬铸铁进行电子探针成分分析，如图5所示。从图5a、b中可以看出，初生碳化物主要是C、Cr两种元素的富集，并没有Fe元素，与XRD衍射分析结果相一致。



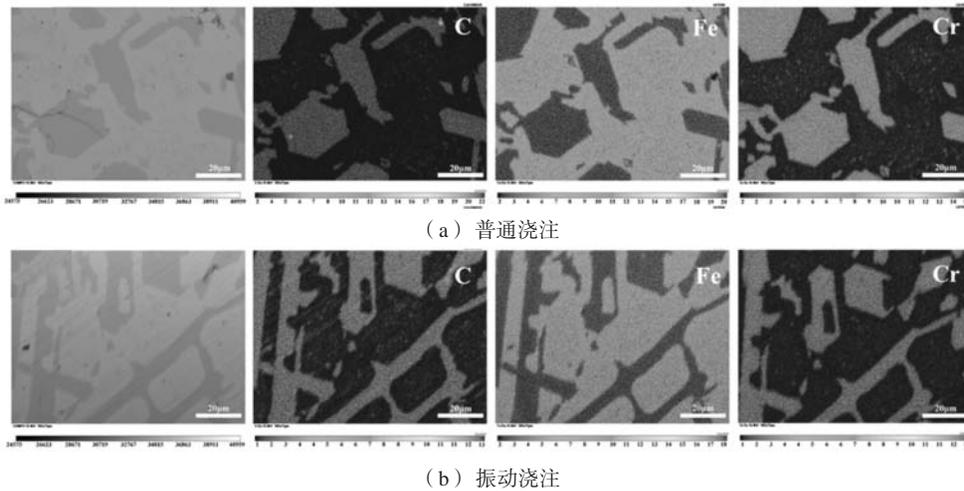
(a), (a1) 普通浇注; (b), (b1) 振动浇注

图4 高铬铸铁SEM组织

Fig. 4 SEM microstructures of the high chromium cast iron

2.2 高铬铸铁抗冲击性能

高铬铸铁的抗冲击性能如图6所示。未施加振动的高铬铸铁的冲击韧性值为4.6 J，而振动处理后的高铬铸铁冲击韧性值达到了5.5 J，提高了16.36%。



(a) 普通浇注

(b) 振动浇注

图5 高铬铸铁电子探针面能谱

Fig. 5 EPMA spectrum of the high chromium cast iron

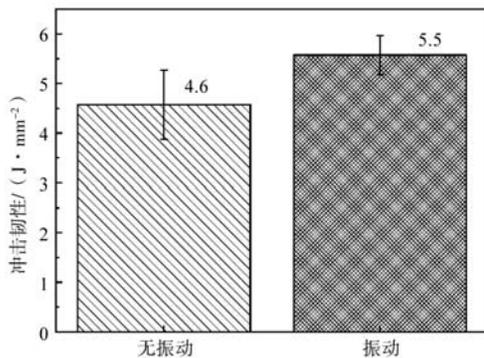
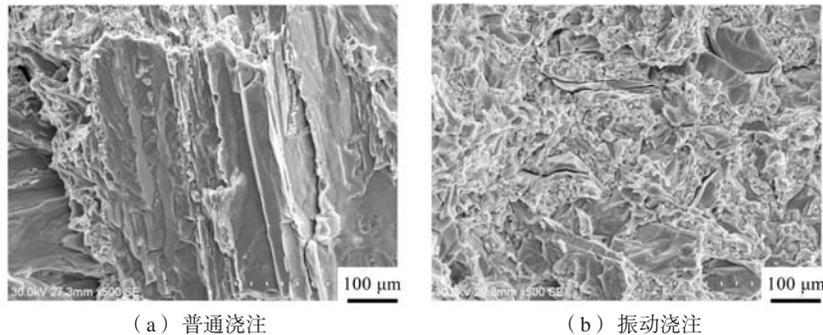


图6 高铬铸铁冲击韧性

Fig. 6 Impact toughness of the high chromium cast iron

由于机械振动提供的振动力或者振动波的作用，使金属液之间产生粘性的剪切力，这种粘性的剪切力对正在长大的枝晶间的作用十分明显，当这种粘性剪切力达到能够使枝状晶破碎的能量时，高铬铸铁中的碳化物发生枝晶破碎，形成形状较为细小的碳化物，并随着振动起伏，均匀分布于基体组织中，故而振动浇注的铸件冲击韧性值有较大提高。

对高铬铸铁的断口形貌进行分析，如图7所示。图7a为未经振动高铬铸铁的断口形貌图，从图中可以明显的看出，试样断口是解理断裂，为脆性断裂，断口平齐而光亮，形成的断裂面比较光滑，断裂面较为



(a) 普通浇注

(b) 振动浇注

图7 高铬铸铁冲击断口形貌

Fig. 7 Impact fracture morphologies of the high chromium cast iron

平整,无韧窝和撕裂出现,几乎没有发生塑性变形。如图7b所示,对铸件进行机械振动,使得高铬铸铁组织得到了细化,提高了高铬铸铁的韧性,出现了撕裂棱。小平面之间发生的塑性变形以撕裂的方式相连接,含有一定量的撕裂棱,从试样断口形貌可看出,试样的断裂方式仍为脆性断裂。

2.3 冲击磨料磨损性能

图8是高铬铸铁在不同冲击功条件下的磨损量变化曲线,由磨损结果可知,在磨损过程中,当冲击功为3 J时,施加振动的高铬铸铁每个磨程损失量较为稳定,当冲击功为4 J时,施加振动的高铬铸铁抗冲击磨

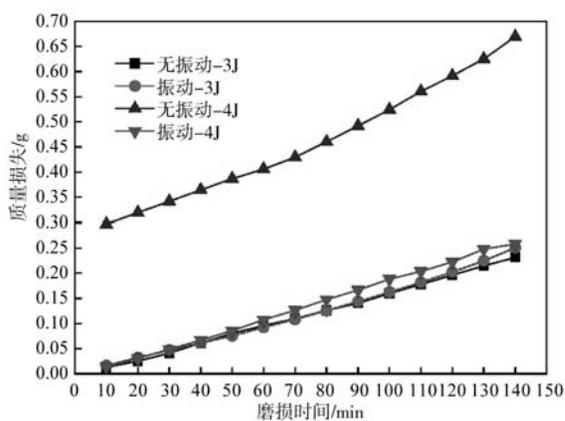


图8 不同冲击功条件下磨损量随时间的变化

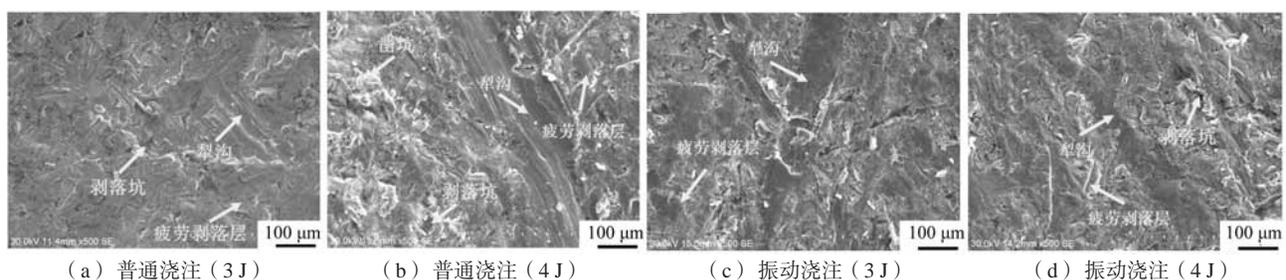
Fig. 8 Changes of the wear amount with time under different impact work conditions

料磨损性能是未施加振动的2.9倍,所以施加振动的高铬铸铁耐磨性能优于未施加振动的高铬铸铁。

高铬铸铁中抵抗磨粒磨损作用的主要是 M_7C_3 型碳化物,其硬度高,可以保护基体,阻止磨粒的显微切削,从而有效发挥高铬铸铁的抗磨作用^[18-19]。通过振动均匀化组织的同时,细化了晶粒,使材料中的碳化物细化均匀分布在基体中,从而使材料的磨损面更加均匀,提高材料的耐磨性。

为了探究振动下高铬铸铁冲击磨料磨损过程中的磨损机理,对其磨损形貌进行观察。图9为不同冲击功作用下冲击磨损后的表面形貌。从图中可以看出,磨损表面主要以犁沟、疲劳剥落层和剥落坑为主,并有少量微小的凿坑。犁沟和凿坑主要是因磨料引起的切削和凿削磨损,磨料作用于其表面,产生较深的犁沟,由磨料尖角造成的切削行为所形成的铁屑堆积在犁沟两边,有些甚至直接形成磨料,对高铬铸铁表面产生类似的切削作用;当受到近于垂直的冲击力时,磨料颗粒甚至可能会嵌入材料表面,造成材料表面剥落,形成凿坑。疲劳剥落层和剥落坑是冲击变形导致的疲劳磨损,在反复的冲击力和切应力作用下,材料表层出现轻微塑性变形,从而形成疲劳剥层,在磨损面的组织难以阻止磨料的入侵,导致磨屑脱落,在磨损表面形成了比较严重的剥落坑。

在不同的冲击功作用下,图9a、b未经过振动处理,在冲击磨损作用下易于出现较多较深的犁沟、较



(a) 普通浇注 (3 J)

(b) 普通浇注 (4 J)

(c) 振动浇注 (3 J)

(d) 振动浇注 (4 J)

图9 不同冲击功下冲击磨损形貌

Fig. 9 Impact wear morphologies under different impact energies

大的疲劳剥层和较深的凿坑,所以磨料容易嵌入剥落坑。施加振动的图9c、d中,可以看出,仅有少量的、很浅的切削犁沟,且疲劳剥落层也不明显,通过振动处理,把抵抗磨粒磨损作用的 M_7C_3 型碳化物细化,导致碳化物的数量增多,减少了基体与磨料直接接触的

机会,并使磨料难以压入材料内部,在冲击磨损过程中可以有效抵抗磨粒的作用,提升了材料的磨损性能。

为进一步观察冲击磨料磨损后的微观形貌,采用3D彩图对不同冲击功的磨损试样的表面形貌进行成像,所得结果如图10。从图中峰值的最大高度差可以

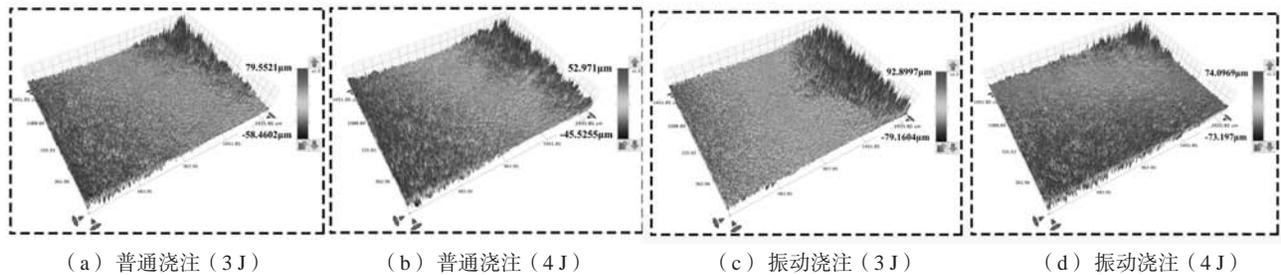


图10 不同冲击功下磨损表面三维图

Fig. 10 Three-dimensional diagrams of the worn surface under different impact energies

看出,未经机械振动的高铬铸铁如图10a、c明显比经过振动条件下的高铬铸铁如图10b、d磨损严重。振动改变了材料的奥氏体和碳化物的尺寸及分布,提高了材料的耐磨性,因此振动对耐磨性能的影响是积极的。

为了能够获得材料更加准确、微观的磨损机制,将冲击磨料磨损后的材料沿垂直磨损方向切开,观察高铬铸铁磨损后亚表层的结构状态,如图11。施加振动的高铬铸铁,通过冲击而产生的微裂纹比普通浇注的高铬铸铁小,通过振动使得材料组织中的碳化物呈细化弥散分布,其次晶粒得到有效细化,非金属夹杂物的含量降低,结合位错理论与裂纹扩张理论可知,位错移动和裂纹扩展的阻力会明显增大,故而振动浇注的铸件性能有较大提高。

3 结论

(1) 高铬铸铁中抵抗磨粒磨损作用的主要是 M_7C_3 型碳化物,与普通浇注的高铬铸铁碳化物相比,施加振动处理的高铬铸铁其物相组成没有发生改变,仍然是 M_7C_3 型碳化物、马氏体、奥氏体。

(2) 经过振动处理的高铬铸铁初生碳化物细化,形状由较大的条状和近似六边形细化变为较小的条状和较小的近似六边形状,分布呈现出更加弥散的特点。

(3) 振动处理使得高铬铸铁的碳化物细化且均匀分布在基体中,冲击韧性提高了16.36%,耐磨性提高了2.9倍。

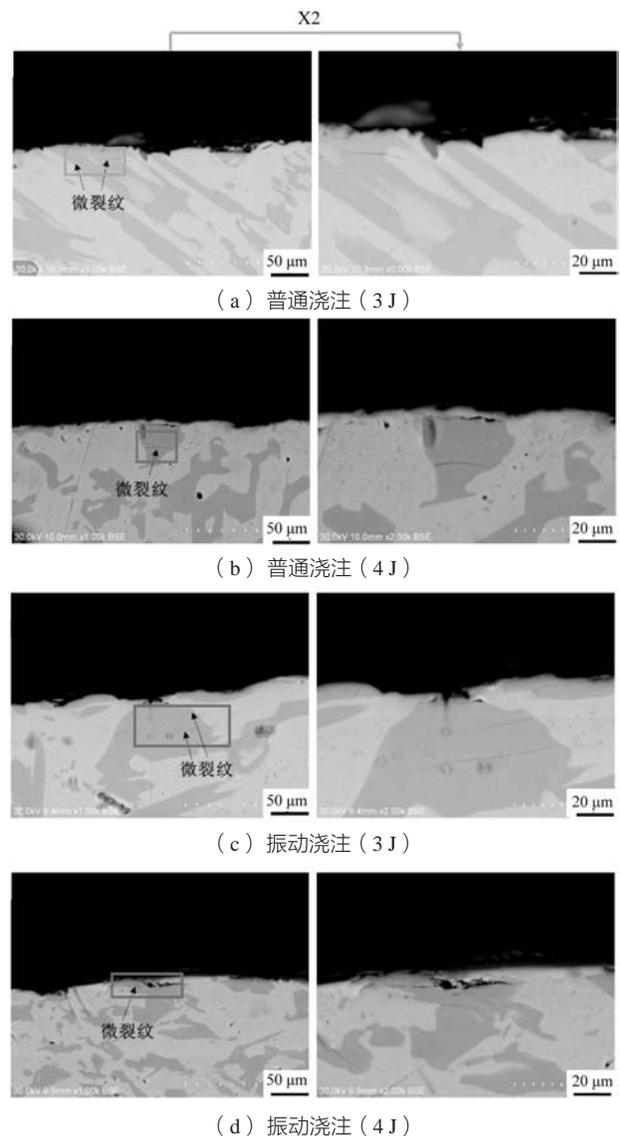


图11 高铬铸铁磨损试样亚表层形貌

Fig. 11 Sub-surface morphologies of the wear specimen of the high chromium cast iron

参考文献:

- [1] GU Jinghong, XIAO Pingan, SONG Jianyong, et al. Sintering of a hypoeutectic high chromium cast iron as well as its microstructure and properties [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 740: 485–491.
- [2] 魏世忠, 徐流杰. 钢铁耐磨材料研究进展 [J]. *金属学报*, 2020, 56 (4): 523–538.
- [3] TANG X H, CHUNG R, PANG C J, et al. Microstructure of high (45 wt.%) chromium cast irons and their resistances to wear and corrosion [J]. *Wear*, 2011, 271 (9–10): 1426–1431.
- [4] FU H G, WU X J, LI X Y, et al. Effect of TiC particle additions on structure and properties of hypereutectic high chromium cast iron [J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2009, 18 (8): 1109–1115.
- [5] 宫成立. 高铬铸铁的耐磨性应用研究 [J]. *机械设计与制造*, 2008 (3): 80–81.
- [6] JAIN A S, CHANG H, ZHANG M X. Effect of TiB₂ addition on microstructure and mechanical properties of a hypereutectic high chromium cast iron [J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56: 19047–19059.
- [7] WANG Y P, LI D Y, PARENT L, et al. Improving the wear resistance of white cast iron using a new concept-high-entropy microstructure [J]. *Wear*, 2011, 271 (9–10): 1623–1628.
- [8] 李秀兰, 周新军, 谢文玲. 高铬铸铁初生碳化物生长的研究进展 [J]. *热加工工艺*, 2014, 43 (23): 6–8.
- [9] CHEN W, WU S, WANG R. Effect of vibration on interdendritic feeding of Al–5%Cu–0.4%Mn alloy [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2019, 13 (4): 969–978.
- [10] 陈旭, 蒋文明, 王本京, 吴和保. 机械振动对消失模型壳铸造镁合金充型能力的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2015, 35 (1): 70–73.
- [11] 潘迪, 樊自田, 赵忠, 等. 机械振动对ZL101消失模铸造组织及性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2009, 29 (3): 290–292.
- [12] TAGHAVI F, SAGHAFIAN H, KHARRAZI Y. Study on the effect of prolonged mechanical vibration on the grain refinement and density of A356 aluminum alloy [J]. *Materials and Design*, 2009, 30 (5): 1604–1611.
- [13] LIMMANEEVICHITR C, PONGANANPANYA S, KAJORNCHAIYAKUL J. Metallurgical structure of A356 aluminum alloy solidified under mechanical vibration: an investigation of alternative semi-solid casting routes [J]. *Materials & Design*, 2009, 30 (9): 3925–3930.
- [14] SUN Y, LUO J, MI G F, et al. Numerical simulation and defect elimination in the casting of truck rear axle using a nodular cast iron [J]. *Materials & Design*, 2011, 32 (3): 1623–1629.
- [15] 吴桃泉, 杜军, 黄正阳. 振动频率对Mg₂Si/再生356-1.5Fe铝基复合材料组织和性能的影响 [J]. *铸造*, 2017, 66 (8): 810–813.
- [16] 邹文奇, 杨浩, 李卫. 振动频率对消失模铸造高铬铸铁组织与性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2016, 36 (5): 501–504.
- [17] ABU-DHEIR N, KHRAISHEH M, SAITO K. Silicon morphology modification in the eutectic Al–Si alloy using mechanical mold vibration [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, A393 (1/2): 109–117.
- [18] YILMAZ O. Abrasive wear of FeCr (M₇C₃–M₂₃C₆) reinforced iron based metal matrix composites [J]. *Metal Science Journal*, 2013, 17 (10): 1285–1292.
- [19] JENA P S M, RAJESH Kumar Rai, SAHU J K. Improvement of toughness of high chromium white cast iron: duplex ferritic-austenitic matrix [J]. *Materials Science and Technology*, 2018, 34: 299–304.

Microstructure and Properties of High Chromium Cast Iron Under Vibration Condition

LIU Zhou, WANG Zhi–jie, JIANG Ye–hua, ZHOU Mo–jin
(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, Yunnan, China)

Abstract:

In the solidification process of high chromium cast iron, coarse primary carbides are easily formed, which reduces the impact toughness of the material. The effect of vibration process parameters on carbide morphology, impact toughness and wear resistance of the high chromium cast iron was investigated by mechanical vibration treatment during solidification. The microstructure of the high chromium cast iron was observed by optical microscope and scanning electron microscope (SEM). The phase composition was analyzed by X-ray diffraction and electron probe. The results showed that compared with the high chromium cast iron without vibration treatment, the M₇C₃ carbides in the high chromium cast iron with vibration treatment were refined, and the impact toughness-increased by 16.36%. The wear resistance increased by 2.9 times.

Key words:

high chromium cast iron; mechanical vibration; microstructure; impact toughness; wear resistant