

改善高铬铸铁力学性能的研究方法

黄佳瑜, 张大斌, 孙 杰, 胡卓涛, 何海军

(贵州大学机械工程学院, 贵州贵阳 550025)

摘要: 综述了高铬铸铁的基体组织和碳化物, 介绍了近年来国内外研究学者最常用的提高高铬铸铁力学性能的方法: 热处理和合金化。发现高铬铸铁的高磨损性能及其他力学性能主要取决于共晶碳化物的数量、类型及基体组织。可通过热处理、合金化等方法, 在高铬铸铁凝固过程中改变高铬铸铁的基体结构、改善碳化物的形貌、控制碳化物的生长等方面对高铬铸铁的性能进行优化。最后, 对未来的研究方向提出了展望。

关键词: 高铬铸铁; 力学性能; 基体组织; 碳化物

高铬铸铁被广泛应用在水泥、矿产、采矿等行业, 常见于锤头、衬板、磨球材质。高铬铸铁按照化学成分可分为共晶高铬铸铁、过共晶高铬铸铁和亚共晶高铬铸铁, 其共晶度由Cr元素和C元素的质量分数决定。与普通铸铁相比, 高铬铸铁具有更多的耐磨性、韧性、耐热性、高温强度等性能^[1-3]。

在磨料磨损条件下, 随着共晶碳化物体积分数的增加, 相应的耐磨性能也跟着增加。然而, 体积分数大的共晶碳化物会降低韧性, 导致高裂纹敏感性和部件早期失效, 尤其是在高速冲击下^[4]。这就要求高铬铸铁在较高耐磨性的同时还要兼备高韧性、抗冲击性等其他力学性能。为了获得更高的韧性, 必须限制共晶碳化物的体积分数, 并避免粗初生碳化物。

高铬铸铁的力学性能主要取决于高铬铸铁的基体组织和碳化物的类型及分布特点^[5]。改善高铬铸铁性能的方法有很多, 近年来有很多国内外学者通过热处理、合金化、堆焊、表面熔覆等方法来提高高铬铸铁力学性能。但应用最为广泛的是热处理和合金化两种方法。下面通过介绍这两种方法, 分析了高铬铸铁性能强化的发展现状, 并提出未来展望。

1 高铬铸铁组织特征

1.1 高铬铸铁的基体组织

1.1.1 高铬铸铁的微观结构

高铬铸铁材料基体组织的类型决定了其力学性能特点。在亚共晶高铬铸铁中, 初生相为奥氏体, 在随后的冷却或热处理过程中可能转变为马氏体和/或贝氏体/珠光体, 共晶碳化物通常更细^[6-7]。因此, 其具有良好的硬度与韧性相组合的性能。相比之下, 过共晶高铬铸铁在微观结构中有大量粗的初生 M_7C_3 型碳化物, 导致其高硬度和脆性。殷会芳等^[8]用光学显微镜观察铸态过共晶高铬铸铁的显微组织, 其由共晶莱氏体和大量的粗大条状和六边形状的一次 M_7C_3 型碳化物组成; Nguyen Thi Hoang Oanh等人^[9]通过使用JMatPro软件对Fe-C-Cr-Mn合金体积分数相的模拟发现, 铸态试样基体上分布着奥氏体、 M_7C_3 型共晶碳化物和二次碳化物。Mehdi Mazar Atabakiv等^[10]利用光学显微镜观察到铸态下高铬铸铁的微观结构, 发现有残余奥氏体、马氏体、 M_7C_3 碳化物和少量二次碳化物分布在基体中, 并且 M_7C_3 碳化物在基体中随机分布。事实上, M_7C_3 型碳化物的形成是由于高铬铸铁中大部分的铬元素都被碳化物所

作者简介:

黄佳瑜(1999-), 女, 硕士, 主要研究方向为金属材料及表面处理。E-mail: 1210762022@qq.com

中图分类号: TG143.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)05-0496-07

基金项目:

贵州省高层次创新型人才项目(701355221108); 复杂地形低风速条件下智能风电场关键技术(701355202105)。

收稿日期:

2022-08-03 收到初稿,

2022-09-04 收到修订稿。

束缚, M_3C 型碳化物转变而成的, 而 M_7C_3 型碳化物具有很高的硬度值, 进而导致了高铬铸铁的耐磨性的提高。

1.1.2 高铬铸铁的平衡相图

碳和铬的含量会导致平衡相图发生变化, 影响各相区范围以及共晶转变温度等, 进而改变高铬铸铁的力学性能。李达等通过软件分别计算出铬含量和碳含量不同, 其他元素含量恒定高铬铸铁的平衡相图, 结果如表1和2所示^[11]。发现共晶转变产物为 $\gamma+M_7C_3$, 随着铬含量的增加, 奥氏体单相区范围减小, 共晶转变温度升高, 共晶碳含量降低。随着碳含量的增加, 液相线、固相线以及共晶温度降低。原因可以从高铬铸铁的平衡相图(图1)看出, 溶解在奥氏体中的碳含量增多, 奥氏体在冷却过程中容易析出碳化物, 从而降低了转变区奥氏体的稳定性^[11-12]。共析转变趋势增加, 各相变温度降低。但当碳含量恒定时, 液相和固相之间的温度范围随铬含量的降低而增大, 即随Cr-C比的增加而减小, 在共晶温度下该值最小。

表1 不同铬含量高铬铸铁相图中共晶转变参数
Table 1 Eutectic transition parameters in the phase diagram of the high chromium cast iron with different chromium contents

铬含量/%	共晶转变温度/℃	共晶碳含量/%	共晶转变产物	共晶碳化物类型
10	1 210	4.0	奥氏体+ (Fe, Cr) ₇ C ₃	(Fe, Cr) ₇ C ₃
15	1 250	3.75	奥氏体+ (Fe, Cr) ₇ C ₃	(Fe, Cr) ₇ C ₃
20	1 270	3.45	奥氏体+ (Fe, Cr) ₇ C ₃	(Fe, Cr) ₇ C ₃
25	1 280	3.2	奥氏体+ (Fe, Cr) ₇ C ₃	(Fe, Cr) ₇ C ₃

表2 不同碳含量高铬铸铁的相变温度
Table 2 Phase transition temperatures of the high chromium cast iron with different carbon contents

碳含量/%	液相线温度/℃	共晶温度/℃	固相线温度/℃	液相和固相的温度范围/℃
2.0	1 375	1 280	1 270	105
2.5	1 340	1 270	1 265	75
3.0	1 290	1 270	1 260	30
3.5	1 270	1 265	1 255	15

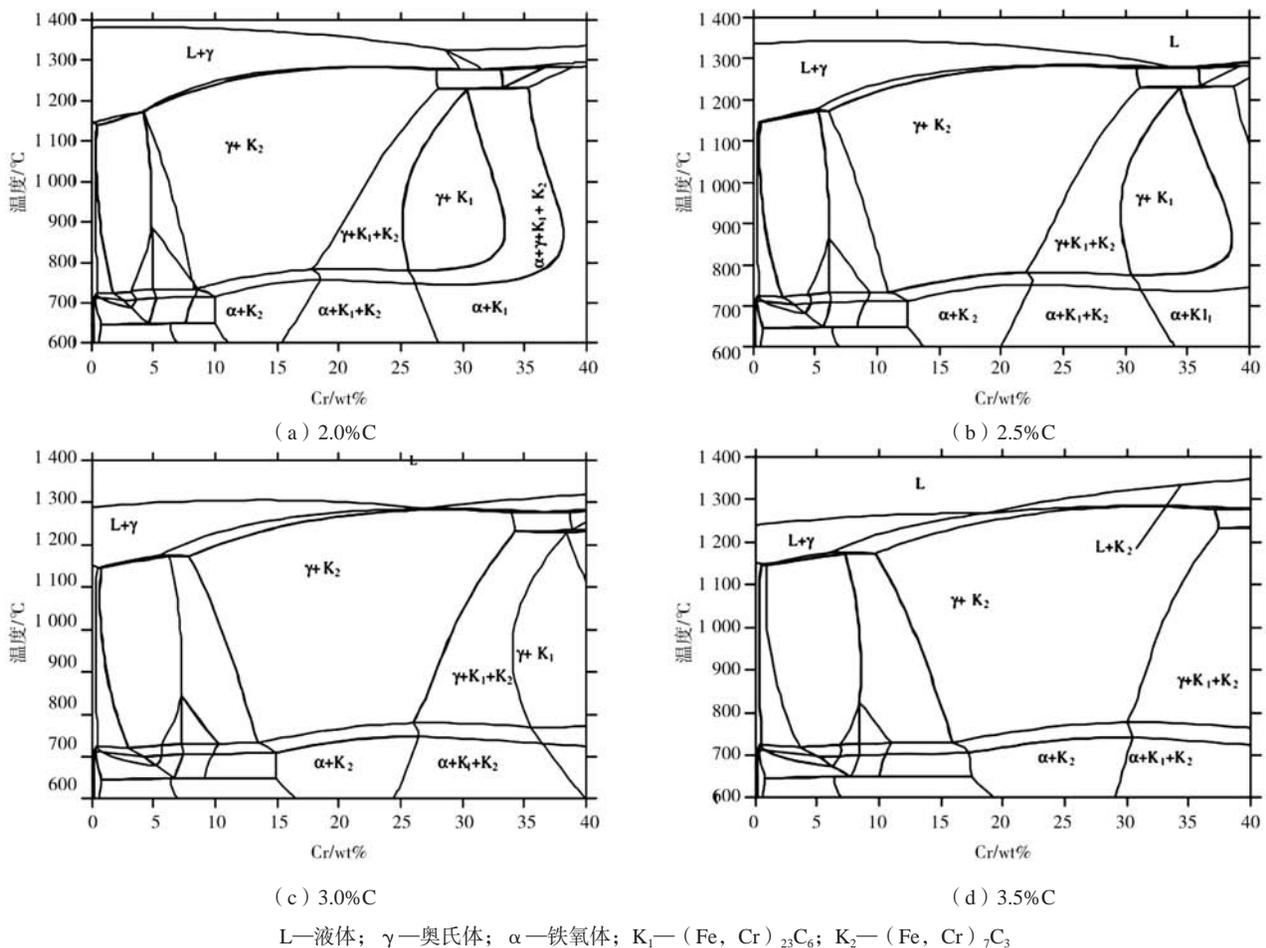


图1 不同碳含量的高铬铸铁的平衡相图
Fig. 1 Equilibrium phase diagrams of the high chromium cast iron with different carbon contents

L—液体; γ —奥氏体; α —铁氧体; K_1 —(Fe, Cr)₂₃C₆; K_2 —(Fe, Cr)₇C₃

1.2 高铬铸铁的碳化物

当含有超过2 wt.%C和其他合金元素的铸铁凝固时,会形成碳化物而不是石墨,这种碳化物的形成使这种材料具有高硬度和优异的耐磨性。碳化物的体积分数、类型和形态取决于碳含量和其中所含的合金元素。对于亚共晶铸铁,大部分碳化物为层状形态的共晶碳化物。在过共晶铸铁中,添加大于12 wt.%的Cr形成高铬铸铁,其显微组织如图2^[8]所示,基体中初生

M_7C_3 碳化物和共晶碳化物均形成,其中初生 M_7C_3 碳化物通常表现为魏氏组织,在随后的热处理过程中不能被改性,尽管这种硬相显著提高了合金的硬度和耐磨性,但本质上是脆性的。

高铬铸铁中的碳化物越多,硬度就越大。其中 M_3C 、 M_7C_3 和 $M_{23}C_6$ 型碳化物是高铬铸铁铸态组织中较为常见的三种形态。李永存等研究出三种类型碳化物的存在形式及性质如表3所示^[13]。高铬铸铁中的Cr-C比

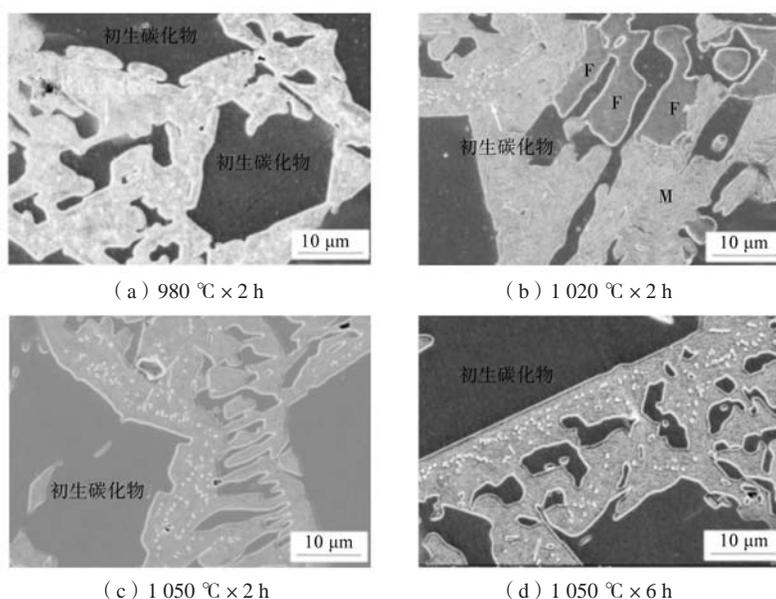


图2 不同热处理条件下的过共晶高铬铸铁SEM组织(F:铁素体,M:马氏体)

Fig. 2 SEM microstructures of peri-eutectic high chromium cast iron under different heat treatment conditions

表3 高铬铸铁铸态组织中较为常见的三种碳化物的存在形式及性质

Table 3 Existing forms and properties of three common carbides in as cast microstructure of the high chromium cast iron

类型	晶体结构	晶格常数	显微硬度HV	密度/($g \cdot cm^{-3}$)
$(Fe, Cr)_3C$	斜方晶格	$a=4.52, b=5.09, c=6.74$	1 000~1 230	7.67
	六方晶格	$a=6.88, b=4.54$		
$(Fe, Cr)_7C_3$	斜方晶格	$a=4.54, b=6.88, c=11.94$	1 200~1 800	6.92
	菱形六面晶格	$a=13.98, b=4.52$		
$(Fe, Cr)_{23}C_6$	面心立方晶格	$a=10.64$	~1 140	6.97

决定了形成何种类型的碳化物。 M_3C 型碳化物一般在Cr含量较低时生成,以连续网状分布,对基体的隔离作用明显,严重影响材料的韧性。当Cr含量超过10%时,生成 M_7C_3 型碳化物,呈棒状独立分布,对基体几乎没有割裂作用,韧性最好^[14]。

高铬铸铁的耐磨性还可以通过调整碳化物相的尺寸、尺寸分布和体积分数来控制^[15-16],通过调整碳化物相性能可以改变高铬铸铁的耐磨性,例如可以通过改变碳化物取向来提高高铬铸铁的磨料磨损性能。Hawk等^[17]发现,若碳化物的长轴与磨损(负荷)方向垂直

又与磨损表面平行时,其磨损性能最好;但当碳化物的长轴与磨损表面垂直时,耐磨性就会显著降低。然而,根据Coronado等^[18]的研究,在较低的载荷下,磨料磨损性能与碳化物相对于磨损方向的取向无关,只有在较高的载荷下,碳化物相对于磨损方向的取向才导致更好的磨料磨损性能。还发现裂纹萌生和扩展更容易沿着碳化物的较大边缘发生,而不是垂直于其边缘发生。

因此,高铬铸铁的耐磨性、韧性等性能不单单取决于碳化物的形态,还取决于碳化物的尺寸、分布、

碳化物间距、取向、形态和形状^[19]。因此,控制高铬铸铁中的碳化物对于实现所需性能非常关键和必要。

2 高铬铸铁力学性能强化方法

2.1 热处理

热处理是优化高铬铸铁组织和性能的最常用的手段之一,通过高温热处理可以使高铬铸铁中的网状碳化物变为孤立分布,还可使碳化物边角处溶解。常用的热处理手段包括淬火+回火、高温奥氏体化去稳处理、深冷处理和等温淬火等^[20]。

对于大多数的高铬铸铁,铸态下的基体是稳定的奥氏体。因此,通常对铸件进行失稳热处理,以减少奥氏体的合金含量,从而在基体中析出二次碳化物。形成的碳化物可能是 M_3C 、 M_7C_3 、 $M_{23}C_6$,这会导致合金元素耗尽,因此在冷却时,奥氏体基体可以完全或部分转变为马氏体。沉淀的二次碳化物提高了奥氏体基体的强度,并为共晶碳化物提供了更好的支撑。通常高铬铸铁的失稳处理温度在1 100 °C以上进行1~4 h,然后回火。生成的微观结构由马氏体基体中的共晶和二次碳化物组成^[21]。

Pearce^[21]发现失稳处理的最高温度达到1 025 °C以下时对 M_7C_3 碳化物的形貌没有影响。观察到热处理只能轻微改变初生碳化物的尺寸,但不会改变其形状。Hinckley等人^[22]在1 200 °C下热处理成分为Fe-24.9Cr-5.18C的高铬铸铁1 h,然后水淬。他们观察到碳化物略微磨圆,这是因为失稳处理通常在固相线温度以下进行^[22-23]。Nguyen Thi Hoang Oanh等人^[24]对Fe-C-Cr-Mn合金进行热处理,铸态样品的硬度从HRC 48增加到HRC 62,还发现除了 M_7C_3 的棒状粗碳化物外,还存在具有针状马氏体相基体的纳米颗粒相,细小碳化物相的出现可以提高马氏体基体的耐磨性,并改善材料的性能。K.Wieczerek等人^[25]研究了在成分为25Cr-0.8C的快速凝固亚共晶Fe-Cr-C合金中加热后,共晶碳化物从六角 M_7C_3 原位转变为立方 $M_{23}C_6$ 。J.Wang等人^[26]在1 000 °C加热铸态样品,冷却0.5 h,然后风冷至室温,发现在16.38Cr-2.77C合金中存在两种尺寸为200 nm的 $M_{23}C_6$,包括相对于基体具有特殊取向的立方形貌和另一种具有无特定取向的粒状形貌。A.Wiangmoon^[27]对成分为2.7C-16Cr和2.7C-26.6Cr的高铬铸铁进行热处理,发现存在 M_7C_3 型碳化物和 $M_{23}C_6$ 型碳化物的混合物,且二次碳化物的尺寸在0.2~0.6 μm之间变化,其分布受先前退火和失稳条件的影响。Xiaoshuai Jia等人^[28]采用多循环淬火—分割—回火工艺,发现在成分为12Cr-2.4C的高铬铸铁合金的铸造过程中仅形成 M_7C_3 碳化物。说明当铬含量降至12%时,热处理后不容易获得二次碳化

物相。

2.2 合金化

虽然弥散分布的大量 M_7C_3 型碳化物使得高铬铸铁有着良好的耐磨性,但是纯的高铬铸铁合金存在着许多缺陷,硬度、耐磨性、冲击韧性等很难达到要求。因此,为了一步提高高铬铸铁的耐磨性、硬度和冲击韧性等性能,国内外学者在高铬铸铁合金中加入其他合金元素。

(1) 钛元素。A.Bedolla-Jacuinde^[29]发现增加了2.02wt.%的钛细化了高铬铸铁(16wt.%Cr)的结构,一些小而硬的TiC颗粒增强了基体。钛是强碳化物形成元素之一,因此,TiC很容易进入熔体。TiC在提高力学性能方面也起着非常重要的作用。

Han-guang Fu等人^[30]研究了添加碳化钛颗粒对含约20%Cr和4.0%C的过共晶高铬铸铁组织和力学性能的影响。研究发现随着碳化钛颗粒的增加,高铬铸铁的碳化物逐渐细化,高铬铸铁的硬度略有增加,冲击韧性明显增加。当碳化钛颗粒的加入量超过1.0wt%时,微观结构的变化不明显,冲击韧性没有明显变化。

范秀风等^[31]通过对添加适量钛元素的高铬铸铁进行热处理工艺的研究中发现,当910 °C保温2 h并260 °C回火2 h后,高铬铸铁的硬度和冲击韧性都有一定的提高。但逐渐升高淬火温度之后,冲击韧性会降低,这是由于淬火温度太高,回火马氏体组织开始变粗大,析出 M_7C_3 型碳化物数量明显增加导致的。

(2) 锰元素。张荣军^[32]研究了锰元素对Cr15MnV铸铁的影响,发现随着锰元素的增加,高锰铸铁中的共晶碳化物会逐渐粗化,其硬度、耐磨性、冲击韧性等性能开始下降。Kadhim MJ等人^[33]通过在高铬铸铁中添加不同含量的锰元素,发现高铬铸铁中的含锰量越多,奥氏体明显细化,使得高铬铸铁的硬度提高。

Ali Hadji等人^[34]通过研究热处理后锰合金高铬铸铁的磨损行为,发现锰是奥氏体稳定剂和碳化物形成元素,它不会形成自己的碳化物,因为它在基体和碳化物之间分配。增加合金中二次碳化物的体积分数,从而提高耐磨性和摩擦阻力。通过改变锰元素的含量,会促进热处理后的二次沉淀,这些沉淀提高了其使用性能。在凝固过程中,锰溶解在奥氏体中,直到达到其溶解度极限,然后剩余的溶解在 M_7C_3 共晶碳化物中。锰不会形成自己的碳化物,它形成复杂的(Fe, Cr, Mn)₇C₃型碳化物,在晶体单元中占据替代位置。热处理后,溶解的锰从基体中返回,然后与碳和其他元素反应,形成 M_7C_3 二次碳化物类型。

(3) 钨元素。王新华等^[35]研究了钨元素的含量对

高铬铸铁组织和性能的影响。发现当添加含量1%的钨时,高铬铸铁硬度最高,可以达到HRC 58.75,冲击韧性可达到11.18 J/cm²;但当钨元素的添加量超过3%时,高铬铸铁的冲击韧性呈明显的下降趋势。Yezhe Lv等人^[36]通过在高铬铸铁中添加钨元素,发现随着钨含量的增加,碳化物的数量和尺寸显著增加,并且在高铬铸铁基体中的分布更加不规则。接着进行热处理后发现,随着钨含量的增加,高铬铸铁合金的整体硬度和基体显微硬度均升高,并且达到了峰值。E.Cortés-Carrillo^[37]发现,随着钨的添加量的增加,高铬铸铁的耐磨性也随着增加。

(4) 钒元素。张艳等^[38]研究了添加不同含量的钒元素对高铬铸铁性能的影响,发现添加1.8%钒的高铬铸铁,硬度可达到HRC 63,耐磨性能也得到明显的改善。表明钒元素可以改变初生碳化物的分布形式和形貌,还可以细化高铬铸铁的基体组织。

Mirjana Filipovic等人^[39]通过研究钒含量对高铬铸铁凝固过程的影响,发现随着钒含量的增加,导致凝固温度区间减小,从而也改变了当前相的体积分数、尺寸和形态。在以相同速率冷却的过程中,由于合金中钒含量的增加,凝固温度区间的缩小和大量碳化钒的形成将有利于形成更精细的结构。

(5) 钼元素。王若宇等人^[40]通过对比3种钼含量的高铬铸铁试条试样发现,通过增加钼元素含量,高铬铸铁显微组织中奥氏体相的含量也随之增加。因此,添加钼元素有助于细化枝晶组织,提高抗热疲劳性能。Yongcun Li等人^[41]通过在高铬铸铁(16wt.%Cr)中添加6wt.%的钼,发现高铬铸铁的微观结构中除了有M₇C₃型碳化物外,还有莱氏体基体和富钼M₂C碳化物。在失稳处理的均热过程中,大量的二次碳化物(M₂₃C₆)从奥氏体中析出。M₂C碳化物分解为亮白色

鱼骨状的M₆C碳化物和点状MC碳化物。基体在强迫风冷过程中发生马氏体相变。上述因素共同导致高铬铸铁合金硬度的增加。夏鹏举等人^[42]在高铬铸铁中加入一定量的钼元素后,发现高铬铸铁组织中共晶碳化物的分布和形貌都发生了改变,钼原子还和碳原子形成了新的Mo₂C碳化物,增强了高铬铸铁的耐磨性。Shimizu K等人^[43]发现,高铬铸铁中加入3%的Mo元素,在900℃下时,高铬铸铁的耐磨性提高了36%。

通过添加上述元素,可以在形成高硬度碳化物、改变高铬铸铁的基体结构、改善碳化物的形貌、控制碳化物的生长等方面来改善高铬铸铁的性能。在研究中还发现,在高铬铸铁中添加一定量的镍、铜、硼和稀土元素也能对高铬铸铁的力学性能产生一定的影响。

3 结语与展望

(1) 高铬铸铁中碳化物的尺寸、分布、碳化物间距、取向、形态和形状等都会影响高铬铸铁耐磨性、韧性等力学性能。

(2) 通常使用热处理、合金化等方法,通过在高铬铸铁凝固过程中改变高铬铸铁的基体结构、改善碳化物的形貌、控制碳化物的生长等方面对高铬铸铁的性能进行优化。

(3) 通常对高铬铸铁进行失稳热处理,然后回火。在失稳热处理后会析出的二次碳化物和随后回火过程中形成的碳化物,都对耐磨性和力学性能起着重要作用。

(4) 合金化是强化高铬铸铁的最普遍方式,铬和碳两种元素也可以与其他元素(包括钛、锰、钨、钼、硅等元素)合金化,形成的高硬度的碳化物可以改善高铬铸铁力学性能。

参考文献:

- [1] SIEKANIEC D, KOPYCINSKI D, GUZIK E, et al. Effect of different inoculants on impact toughness in high chromium cast iron [J]. Archives of Foundry Engineering, 2017, 17 (2): 85-88.
- [2] HUANG Z, XING J, GUO C. Improving fracture toughness and hardness of FeB in the high boron white cast iron by chromium addition [J]. Materials & Design, 2010, 31 (6): 3084-3089.
- [3] DING H, LIU S, ZHANG H, et al. Improving impact toughness of a high chromium cast iron regarding joint additive of nitrogen and titanium [J]. Materials & Design, 2016, 90: 958-968.
- [4] JAIN A S, CHANG H, TANG X, et al. Refinement of primary carbides in hypereutectic high-chromium cast irons: a review [J]. Journal of Materials Science, 2021, 56 (2): 999-1038.
- [5] 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.
- [6] ADACHI Y, HAKATA K, TSUZAKI K. Crystallographic analysis of grain boundary Bcc-precipitates in a Ni-Cr alloy by FESEM/EBSD and TEM/Kikuchi line methods [J]. Mater. Sci. Eng. A, 2005, 412 (1-2): 252-263.

- [7] NEVILLE A, REZA F, CHIOVELLI S, et al. Characterization and corrosion behavior of high-chromium white cast irons [J]. *Metall. Mater. Trans. A*, 2006, 37A: 2339–2347.
- [8] 殷会芳, 周丽, 薛冰, 等. 过共晶高铬铸铁的显微组织和力学性能研究 [J]. *铸造技术*, 2016, 37 (12): 2535–2537.
- [9] OANH N T H, VIET N H. Precipitation of $M_{23}C_6$ secondary carbide particles in Fe-Cr-Mn-C alloy during heat treatment process [J]. *Metals*, 2020, 10 (2): 157.
- [10] ATABAKI M M, JAFARI S, ABDOLLAH-POUR H. Abrasive wear behavior of high chromium cast iron and Hadfield steel—a comparison [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2012, 19 (4): 43–50.
- [11] LI D, LIU L, ZHANG Y, et al. Phase diagram calculation of high chromium cast irons and influence of its chemical composition [J]. *Materials & Design*, 2009, 30 (2): 340–345.
- [12] 马幼平, 李俊, 刘玉高, 等. 量变化对高铬铸铁初生奥氏体稳定性的影响 [J]. *铸造*, 2006 (10): 1079–1081.
- [13] 李永存. 高铬铸铁/低碳钢复合材料的制备及性能研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [14] 王驰. 复合强化高铬铸铁堆焊金属组织与性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [15] CORONADO J J, SINATORA A. Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: part 1 [J]. *Wear*, 2011, 271 (9-10): 1794–1803.
- [16] CORONADO J J, SINATORA A. Effect of abrasive size on wear of metallic materials and its relationship with microchips morphology and wear micromechanisms: part 2 [J]. *Wear*, 2011, 271 (9-10): 1804–1812.
- [17] DOĞAN Ö N, HAWK J A. Effect of carbide orientation on abrasion of high Cr white cast iron [J]. *Wear*, 1995, 189 (1-2): 136–142.
- [18] CORONADO J J. Effect of load and carbide orientation on abrasive wear resistance of white cast iron [J]. *Wear*, 2011, 270 (11–12): 823–827.
- [19] HONGSUG OH, LEE S, JUNG J-Y, et al. Correlation of microstructure with the wear resistance and fracture toughness of duocast materials composed of high-chromium white cast iron and low-chromium steel [J]. *Metall. Mater. Trans. A*, 2001, 32: 515–524.
- [20] 马建辉, 孟凯. 热处理对高铬铸铁组织及性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2013, 42 (18): 158–160.
- [21] PEARCE J T H. Examination of M_7C_3 carbides in high chromium cast irons using thin foil transmission electron microscopy [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1983, 2 (8): 428–432.
- [22] HINCKLEY B, DOLMAN KF, WUHRER R, et al. SEM investigation of heat treated high-chromium cast irons [J]. *Mater Forum*, 2008, 32: 55–71.
- [23] HINCKLEY B, DOLMAN KF, WUHRER R, et al. SEM and EBSD investigations of high-chromium cast irons [J]. *Microsc Microanal*, 2008, 14 (S2): 550–551.
- [24] OANH N T H, VIET N H. Precipitation of $M_{23}C_6$ secondary carbide particles in Fe-Cr-Mn-C alloy during heat treatment process [J]. *Metals*, 2020, 10 (2): 157.
- [25] WIECZERZAK K, BALA P, DZIURKA R, et al. The effect of temperature on the evolution of eutectic carbides and $M_7C_3 \rightarrow M_{23}C_6$ carbides reaction in the rapidly solidified Fe-Cr-C alloy [J]. *J. Alloys Compd.*, 2017, 698, 673–684.
- [26] WANG J, LI C, LIU H, et al. The precipitation and transformation of secondary carbides in a high chromium cast iron [J]. *Mater. Charact.*, 2006, 56, 73–78.
- [27] WIENGMON A. Carbides in high chromium cast irons [J]. *Naresuan Univ. Eng. J.*, 2011, 6: 64–71.
- [28] JIA X, HUANG Y, ZUO X, et al. High hardness-toughness and wear resistance of white cast iron treated by a multicycle quenching-partitioning-tempering process [J]. *Heat Treat. Surf. Eng.*, 2019, 1: 57–62.
- [29] BEDOLLA-JACUINDE A, CORREA R, MEJÍA I, et al. The effect of titanium on the wear behavior of a 16%Cr white cast iron under pure sliding [J]. *Wear*, 2007, 263: 808–820.
- [30] FU H, WU X, LI X, et al. Effect of TiC particle additions on structure and properties of hypereutectic high chromium cast iron [J]. *Journal of materials engineering and performance*, 2009, 18 (8): 1109–1115.
- [31] 范秀风, 闫永旺, 高占勇, 等. 添加Ti元素的高铬铸铁热处理工艺的研究 [J]. *热加工工艺*, 2013, 42 (22): 204–206.
- [32] 张荣军, 晁建兵. 锰对Cr15MnV铸铁组织性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2007, 36 (1): 8–10.
- [33] KADHIM M J, ABOOD A N, YASEEN R S. The role of manganese on microstructure of high chromium white cast iron [J]. *Modern Applied Science*, 2011, 5 (1): 179–185.
- [34] HADJI A, BOUHAMLAK K, MAOUCHE H. Improving wear properties of high-chromium cast iron by manganese alloying [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2016, 10 (1): 43–55.
- [35] 王新华, 李志明, 方晓辉, 等. W对铸态高铬铸铁组织和性能的影响 [J]. *现代铸铁*, 2010, 30 (3): 31–33.
- [36] LV Y, SUN Y, ZHAO J, et al. Effect of tungsten on microstructure and properties of high chromium cast iron [J]. *Materials & Design*, 2012, 39: 303–308.

- [37] CORTÉS-CARRILLO E, BEDOLLA-JACUINDE A, MEJÍA I, et al. Effects of tungsten on the microstructure and on the abrasive wear behavior of a high-chromium white iron [J]. *Wear*, 2017, 376: 77–85.
- [38] 张艳, 辛伟, 季峰. 钒对高铬铸铁耐磨性能的影响机理研究 [J]. *热加工工艺*, 2011, 40 (5): 23–26.
- [39] FILIPOVIC M, KAMBEROVIC Z, KORAC M. Solidification of high chromium white cast iron alloyed with vanadium [J]. *Materials Transactions*, 2011, 52 (3): 386–390.
- [40] 王若宇, 陈政, 许婷, 等. 钼对高铬铸铁组织和热疲劳性能的影响 [J]. *安徽工业大学学报 (自然科学版)*, 2022, 39 (2): 140–144.
- [41] LI Y, LI P, WANG K, et al. Microstructure and mechanical properties of a Mo alloyed high chromium cast iron after different heat treatments [J]. *Vacuum*, 2018, 156: 59–67.
- [42] 夏鹏举, 邹祥宇, 寇小平. 钼对金属型铸造高铬铸铁组织与性能的影响 [J]. *陕西理工学院学报 (自科版)*, 2016, 32 (1): 19–24.
- [43] SHIMIZU K, KUSUMOTO K, YAER X, et al. Effect of Mo content on erosive wear characteristics of high chromium cast iron at 1173 K [J]. *Wear*, 2017, 376–377: 542–548.

Methods of Improving Mechanical Properties of High Chromium Cast Iron

HUANG Jia-yu, ZHANG Da-bin, SUN Jie, HU Zhuo-tao, HE Hai-jun
(School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract:

The matrix structure and carbides of high chromium cast iron were summarized, and then the most commonly used methods to improve the mechanical properties of high chromium cast iron by domestic and foreign researchers in recent years: heat treatment and alloying were introduced. It is found that the high wear performance and other mechanical properties of the high chromium cast iron mainly depend on the amount and type of eutectic carbides and matrix structure. Through the heat treatment, alloying and other methods, the properties of the high chromium cast iron are optimized in the aspects of changing the matrix structure of the high chromium cast iron, improving the morphology of carbides and controlling the growth of carbides during the solidification process of the high chromium cast iron. Finally, the future research directions were prospected.

Key words:

high chromium cast iron; mechanical properties; matrix microstructure; carbide