

定向凝固技术在高铬铸铁中的应用

平兆福^{1, 2}, 郑宝超^{1, 2}, 涂小慧^{1, 2}, 李卫^{1, 2}

(1. 暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院, 广东广州 510632;

2. 暨南大学高性能金属耐磨材料技术国家地方联合工程研究中心, 广东广州 510632)

摘要: 高铬铸铁中 M_7C_3 型碳化物使其具有出色的耐磨、耐腐蚀性能。定向凝固技术可实现碳化物的定向排列, 具有特定碳化物取向的高铬铸铁其硬度、耐磨性能有别于普通高铬铸铁。本文介绍了高铬铸铁的发展及特性, 描述了定向凝固技术的特点。在此基础上, 总结了铸造耐磨合金硬质相定向凝固的研究进展, 并对定向凝固技术在高铬铸铁中的研究方向进行了展望。

关键词: 高铬铸铁; 定向凝固; 碳化物; 耐磨性; 耐腐蚀性

作者简介:

平兆福(1994-), 男, 硕士生, 主要研究方向为金属耐磨蚀材料。
E-mail: 2838570717@qq.com

通讯作者:

郑宝超, 男, 硕士生导师, 博士, 主要研究方向为金属耐磨材料、耐蚀材料、金属基复合材料等。电话: 020-85220890, E-mail: zhengbaochao@126.com

中图分类号: TG244+.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)08-0899-07

基金项目:

国家自然科学基金青年基金(51701084); 暨南大学跃迁计划项目-青年项目(21617338); 博士后基金(2019M663700)。

收稿日期:

2020-03-17 收到初稿,
2020-08-28 收到修订稿。

工业生产中, 工件的磨损失效是常见的失效方式之一, 由此促进了对耐磨材料的研究^[1-2]。高铬铸铁被认为是在普通铸铁、镍硬铸铁之后的第三代耐磨铸铁^[3]。 M_7C_3 型碳化物为高铬铸铁主要的抗磨相, 碳化物的主要磨损失效形式为: 碎裂、切削以及折断后剥落。有研究表明, 当碳化物定向排列且与磨损面垂直时其硬度较高, 由此可提升高铬铸铁的耐磨性^[4-5]。通过人为控制材料的凝固过程而获得具有理想组织形态的材料, 已成为提升材料性能的重要方式^[6-7]。定向凝固技术不仅可以控制材料的结构甚至可以制备单晶材料。目前, 该技术已经发展出晶向择优控制、定向及单晶叶片、熔体织构、单晶连铸等一系列材料成形方法^[8]。

本文通过介绍高铬铸铁的耐磨、耐腐蚀原理以及定向凝固技术的特点, 总结了定向凝固技术在铸造耐磨合金中的应用, 并重点讨论了在高铬铸铁中的应用以及存在的问题, 并对定向凝固技术在高铬铸铁及其复合材料中的应用前景进行了展望。

1 高铬铸铁的发展及特点

Fe-Cr-C合金系中主要有三种碳化物存在: $(Cr, Fe)_3C$ 型、 $(Cr, Fe)_7C_3$ 型、 $(Cr, Fe)_{23}C_6$ 型, 其硬度范围分别是HV 1 000~1 230、HV1 300~1 800和HV1 140左右。随着铬含量增加, 碳化物类型一般按 M_3C 型 \rightarrow M_7C_3 型 \rightarrow $M_{23}C_6$ 变化。但有些Cr含量高达20%~36%的白口铸铁, 其共晶碳化物仍然为 M_7C_3 型。目前认为, 在Cr含量小于5%的低铬白口铸铁中为 M_3C 型, 中铬范围对应为 $M_3C+M_7C_3$ 混合型, 而高铬铸铁中则为 M_7C_3 型^[9]。高铬铸铁中铬含量一般为12%~28%, M_7C_3 硬度高, 以孤立杆状均匀分布, 碳化物之间并不连续, 对基体的割裂程度小。因此, 高铬铸铁具有良好的耐磨性和韧性, 使用效果比前两代铸铁更好^[10]。

高铬铸铁中硬度较高的碳化物为主要的抗磨相, 塑性相对较高的基体对抗磨相起到支撑作用, 磨损过程中碳化物和基体之间通过彼此交互关系起到抵抗磨损的作用^[11-12]。磨损先从基体开始, 而后碳化物弯曲-裂纹-剥落^[13]。在磨损过程中若碳化物不能起到保护基体的作用, 同时基体的耐磨性能又相对较差, 则基体会不断剥落, 进而使碳化物直接暴露在磨损环境中, 裸露的碳化物会碎裂、切削以及折断后剥落^[14]。若碳化物能起到保护基体的作用, 基体耐磨性能也较强, 则磨损过程中基体受破坏小, 对碳化物的支撑作用强, 此时材料的耐磨性能会较高。因此基体的性质对高铬

铸铁耐磨性能也存在着影响。

高铬铸铁中基体的硬度分别为：铁素体HV 70~200、珠光体HV 300~460、奥氏体HV 300~600、马氏体HV 500~1 000^[15]。有研究表明，不同基体组织对耐磨性的影响作用是不同的。Richardson理论^[16-17]认为，当材料磨后的维氏硬度与磨料的维氏硬度之比大于1时，磨料为软磨料；小于0.8时为硬磨料。软磨料磨损时，马氏体白口铸铁表现出较好的耐磨性；硬磨料磨损时，奥氏体白口铸铁表现出较好的耐磨性；而珠光体基体对碳化物的支撑作用最弱，因而拥有珠光体基体组织的高铬铸铁耐磨性相对较差^[14, 18]。通常情况下，由于马氏体的硬度最高，抗磨料磨损的能力也较好。因此，希望所得的基体组织是马氏体而避免得到珠光体^[19-20]。但基体的选用还要考虑工件所服役的工况^[21]。在冲击磨损工况下，奥氏体的塑性和韧性较高，与碳化物界面的结合强度较高；同时在冲击力的作用下，奥氏体由于产生较强的加工硬化而使材料表面硬度提高，从而起到保护和支撑碳化物的作用。马氏体基体变形能力小，抵抗裂纹扩散的能力差，因此在冲击和凿削作用下很容易产生疲劳剥落和脆性剥落，致使失重增大。当冲击功相对较小时，奥氏体不能充分加工硬化，易于被磨粒凿削和犁削，此时马氏体基体相对抗磨；当冲击功相对较高时，奥氏体具有适当厚度的硬化层不会脱落，此时奥氏体基体较抗磨^[22]。李卫等人^[23]的研究显示：在冲击载荷、高应力湿态磨料磨损工况下，马氏体-贝氏体-奥氏体复相基体的磨损速度低于马氏体高铬铸铁。饶启昌等人^[24]的研究表明：在强酸性介质中，宜选用奥氏体基体；在弱酸性介质中，选用材料时应首先考虑使基体处于钝化状态，再考虑提高抗冲蚀磨损能力；在中性、碱性介质中，宜选用马氏体基体，以保证其冲蚀磨损抗力。尽管基体组织对高铬铸铁的耐磨性起到了一定作用，但基体组织的主要作用依然是支撑碳化物。碳化物保护基体组织，高铬铸铁的磨损量主要由碳化物的磨损量来决定^[18]。

普通铸铁在空气中易氧化，生成疏松的氧化膜，而且普通铸铁的基本组成相：铁素体、渗碳体、石墨都有各自的电极电位，石墨与铁素体之间，渗碳体与铁素体之间产生腐蚀电流，降低其耐腐蚀性^[25]。铬是高铬铸铁耐腐蚀性的关键元素，铬元素固溶于基体提高了基体的硬度以及电极电位，降低了基体与碳化物的电位差^[26]；并且在氧化环境中会形成一层很薄（约10 nm）而紧密附着在铸铁表面层的Cr₂O₃钝化膜，金属离子不易通过钝化膜^[27-28]。PB值（Pilling-Bedworth ratio）被用来大致推测氧化膜的保护作用，表达式如（1）所示^[29]。

$$R_{PB} = \frac{V_{\text{oxide}}}{V_{\text{metal}}} = \frac{M_{\text{oxide}} \cdot \rho_{\text{metal}}}{n \cdot M_{\text{metal}} \cdot \rho_{\text{oxide}}} \quad (1)$$

式中： V_{oxide} 为金属氧化膜基本单元（即氧化物分子）的体积； V_{metal} 为相应金属（由其生成氧化物）基本单元（即金属原子）的体积； M_{oxide} 为氧化物分子的质量； M_{metal} 为金属原子的质量； ρ 为密度； n 为单个氧化物分子中金属原子的个数。

PB值<1时，氧化物太薄，可能会破裂，没有保护作用；PB值>2时，氧化物内应力过大而剥落，没有保护作用；1<PB值<2时，氧化物层被钝化，防止进一步氧化。Cr₂O₃的PB值为1.99，实践证明其具有良好的保护作用^[30]。以上多种原因使得高铬铸铁具有较好的耐蚀性。高铬铸铁中碳元素主要以碳化物的形式存在，而碳化物的电极电位均高于基体。在腐蚀磨损环境中，碳化物与基体之间存在较大的电位差而形成腐蚀电池，产生相间腐蚀，削弱了碳化物与基体的结合力，在磨料或硬质点的作用下，碳化物容易从基体脱落或发生断裂，导致腐蚀磨损严重。因此，提高高铬铸铁耐蚀性的关键是提高基体的耐蚀性^[10, 31, 32]。

研究表明在强酸性介质中，宜选用奥氏体基体，并提高含铬量，降低含碳量，以保证高的Cr/C比；在弱酸介质中，奥氏体、铁素体钝化能力比马氏体强，生成的钝化膜稳定^[24, 31]。Lu等人^[32]使用真空感应加压炉制备了高氮高铬铸铁，氮的加入在基体上产生固溶强化，增加材料的硬度，还可以增加基体的电极电位并增强钝化膜的自修复能力，从而提高耐蚀性。Li等人^[33]通过添加微量Ni元素促进碳化物形核，使Fe-35Cr-3C-0.09Ni的微观结构得到细化，碳化物尺寸减小，由此减少了微观结构上电化学腐蚀的不均匀性而有利于耐蚀性提高。

2 定向凝固技术的原理与应用

凝固是一种普通的物理现象，金属制品在生产流程中都要经历一次或多次的凝固过程^[8]。定向凝固又称定向结晶，是使金属或合金在熔体中定向生长晶体的一种工艺方法^[34]。在凝固过程中采用强制手段，使凝固金属与未凝固熔体中建立起沿特定方向的温度梯度，从而使熔体在型壁上形核后沿着与热流相反的方向进行凝固的技术。定向凝固技术可以较好地控制凝固组织的晶粒取向，消除横向晶界，获得柱状晶或单晶组织，提高材料的力学性能。在高温合金、磁性材料、共晶复合材料及其他新材料领域有很多应用^[35-36]。

根据成分过冷理论，要实现定向凝固，须满足固液界面前方无过冷^[34]，即：

$$G_L \geq \frac{dT_L(x)}{dx} \Big|_{x=0} \quad (2)$$

在满足Tiller公式前提下:

$$\frac{G_L}{R} \geq -\frac{mC_0(1-k_0)}{k_0} \frac{1}{D_L} = \frac{\Delta T_0}{D_L} \quad (3)$$

式中: G_L 为晶体生长前沿液相的温度梯度; R 为界面推进速度; m 为相图液相线的斜率; C_0 为合金平均成分; D_L 为溶质原子在液相中的扩散系数; k_0 为溶质在液固两相中的平衡分配系数; ΔT_0 为平衡结晶温度间隔。

定向凝固中固液界面形态由 G_L/R 决定。从公式(3)可知, 固液界面要以单向的平面方式进行长大, 需要满足 G_L/R 足够大; G_L/R 逐渐减小时, 平面界面失稳, 逐渐变为胞状直至树枝晶和等轴晶^[37]。为了保证平面界面可采取如下措施:

(1) 单向散热(热流向单方向流动)。使凝固系统始终处于柱状晶生长方向的正温度梯度作用之下, 并且要绝对阻止侧向散热以避免界面前方型壁及其附近的形核和长大;

(2) 提高熔体的纯净度。减小熔体的非均质形核能力以避免界面前方的形核现象;

(3) 要避免液态金属的对流、搅动和振动, 以阻止界面前方的晶粒游离。对晶粒密度大于液态金属的合金, 避免自然对流的最好方法就是自下而上的进行单向结晶^[34]。

定向凝固是在高温合金的研制中建立和完善起来的。最典型的代表就是高温合金的发动机叶片, 与普通铸造方法获得的铸件相比, 该技术所获得的具有柱状乃至单晶组织的叶片具有优良的抗热冲击性能、较长的疲劳寿命、较高的蠕变抗力和中温塑性, 提高了叶片的使用寿命和使用温度^[38]。基于定向凝固技术发展出了一系列单晶与多晶的材料, 这些材料被广泛应用在各领域^[39]。定向凝固技术还被用于材料的提纯、除杂^[40-41]。材料的性能往往由其结构决定, 定向凝固技术也被广泛用于制备理想组织形态的材料。Qi等人^[42]用电渣重熔定向凝固法合成奥氏体热作模具钢, 减小了初生碳化物的尺寸, 获得了近似平行排列的柱状晶组织, 改善了铸锭中心偏析。文献[43-44]指出, 磁场与温度梯度之间耦合产生热电磁力, 采用垂直磁场时可减少熔体湍流, 因而减少了材料的夹杂物并改善了组织均匀性和力学性能; 采用横向磁场会导致晶粒尺寸的横向不均匀, 使细化和粗化的等轴晶粒各自分布在样品的两侧。这种不均匀分布的晶粒结构将导致性质分布的不均匀, 这或许为梯度材料的合成提供了新思路。

3 定向凝固技术在高铬铸铁中的应用

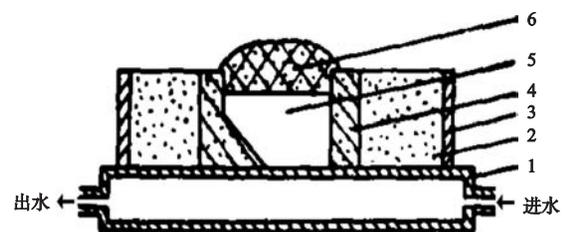
前文介绍了高铬铸铁的耐磨、耐腐蚀原理, 碳化物在其中起到了重要作用。有研究表明, 碳化物的尺寸与取向也会影响到高铬铸铁的耐磨性。但由于碳化

物抗磨作用的“尺寸效应”并不是简单的细化碳化物就能提高耐磨性, 具体效果随磨损条件而异^[45-46]。贺林等人^[46]在保证碳化物含量相同的条件下, 通过选用不同铸型得到具有不同尺寸碳化物的28%Cr铸铁, 试验结果表明: 在较大尺寸的硬磨料两体磨损系统中, 尺寸过小的碳化物抵抗显微切削的作用差, 材料的耐磨性下降明显; 在较大尺寸、较高应力的硬磨料二体磨损系统中, 尺寸过大的碳化物易剥落, 降低材料的耐磨性; 在较大尺寸、较高应力的软磨料两体磨损系统中, 尺寸较小的碳化物也会降低材料的耐磨性。

硬度是影响材料耐磨性的重要因素, 高铬铸铁中 M_7C_3 型碳化物晶格类型是密排六方结构, 晶体长轴横截面硬度高, 侧面硬度低^[18]。这种不同生长面硬度的不一致, 必然会导致不同生长方向耐磨性不一致。若能使碳化物垂直于磨损面, 则磨损面的硬度会提高, 基体也可以更好的支撑碳化物, 这些都有利于耐磨性的提高, 因而促进了定向凝固技术应用到高铬铸铁领域^[4, 18, 45, 47]。

20世纪70年代初, 国外出现了对高铬铸铁定向凝固的研究论文^[48]。80年代, 国内研究人员贾育丁、苏俊义等^[4, 45]通过在铸型下放置水冷铜板/水冷铝板、在铸型顶端放置发热剂构建单向散热设备, 使碳化物定向排列, 定向凝固设备如图1所示^[4]。

碳化物横截面上的硬度显著高于纵截面上的硬度, 具体值见表1^[4]。当磨损面垂直于定向方向时, 宏观洛氏硬度最高, 耐磨性能相对于普通砂型铸造的试样得到了提高。但同时也发现随着磨损条件的不



1. 水冷铜套 2. 型砂 3. 砂箱 4. 保温套 5. 试样 6. 发热剂

图1 定向凝固设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of directional solidification equipment

表1 定向凝固试样和砂型铸造试样硬度的比较
Table 1 Comparison of hardness of directionally solidified and sand cast samples

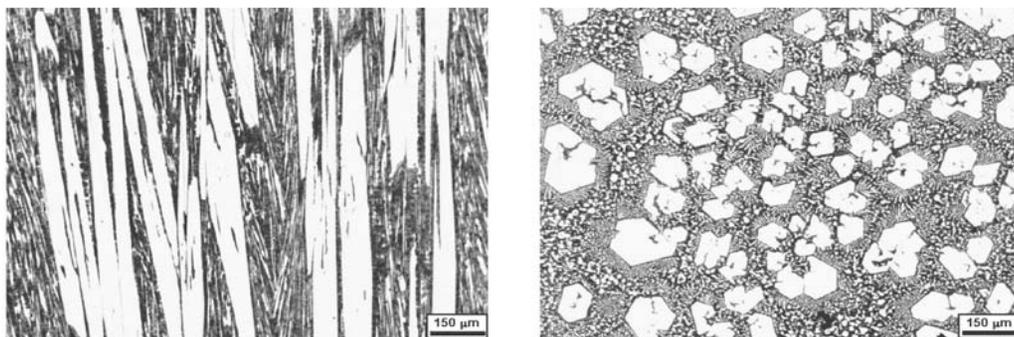
	定向凝固试样		砂型铸造试样
	与定向方向垂直的面	与定向方向平行的面	
	碳化物的显微硬度HV	1 989	
基体的显微硬度HV	821	821	790
宏观硬度HRC	63.5	61	60

同,碳化物尺寸和取向对耐磨性的影响也不同,在软磨料、低载荷下耐磨性提高最显著;在高载荷硬磨料下,细小的碳化物会变形及折断,定向凝固试样并未显现出较好的耐磨性。

符寒光^[49-50]采用水冷铜板构建的单向散热体系制备了定向凝固高铬铸铁试样,碳化物横截面的硬度为HV1 793明显高于纵截面HV1 344的硬度;碳化物垂直于磨损面定向排列后,其耐磨性优于无定向排列试样,同时也发现碳化物尺寸和取向对耐磨性的影响随磨损条件不同而变化。Coronado^[51]采用定向凝固技术制备了碳化物取向不同的高铬铸铁,见图2所示^[51]。测试结果显示, $(Cr, Fe)_7C_3$ 型碳化物横截面的硬度比纵截面高;且铬含量增加,横截面与纵截面的硬度差值也增加;与碳化物取向垂直的截面比平行截面的断裂韧性和耐磨性更高。Wang等人^[52]采用熔模铸造技术,制造了17.63%Cr高铬铸铁喷丸机叶片,如图3所示(黑色实心箭头为喷丸流动方向)。结果显示,当图3a中碳化物的取向平行于喷丸流动方向时,硬度和断裂韧性比图3b中垂直时高。因此当冲击方向垂直于碳化物的长轴时,裂纹易于引发和扩展,从而导致耐磨性降低。戚亭^[53]采用定向凝固技术制备了碳化物垂直于工作面Cr28型高铬铸铁,其碳化物深埋于基体之中,抗

折断和剥落能力提高,即使在热强碱腐蚀环境中发生相界腐蚀后,碳化物出现剥落的可能性也相对较低。

J. J. Coronado^[51]指出,碳化物相对于磨损面的取向会影响高铬铸铁的耐磨性,但是规律是相互矛盾的,与碳化物垂直的截面并不总是表现出比无定向及平行方向的截面更高的耐磨性。生兆洲^[18]的研究表明,当碳化物取向与磨损面垂直时,高铬铸铁试样在磨损过程中垂直于亚表面的碳化物长轴会断裂,磨损量会更大;而碳化物取向平行于磨损面时试样的耐磨性反而较高。Do an等人^[54-55]使用高应力销盘磨损试验和单次划痕试验对24.5%Cr高铬铸铁进行测试,当碳化物取向垂直于磨损面时,亚表面的裂纹比平时多,耐磨性也比平时差。亚表面裂纹似乎是导致碳化物垂直取向试样的磨损率较高的主要原因。当碳化物的取向与磨损面平行并垂直于磨损方向时,耐磨性最高。Su等人^[56]的研究结果显示:在低应力三体磨料磨损测试中使用不同磨料时,碳化物取向对17.7%Cr高铬铸铁耐磨性的影响也不同,甚至一些情况下碳化物的取向对耐磨性没有影响。导致这些结果出现的原因可能有很多:不同尺寸的碳化物,不同的磨损测试方式,载荷的高低,不同类型的磨料。要解释碳化物取向究竟如何影响材料的耐磨性,还需要进一步研究。

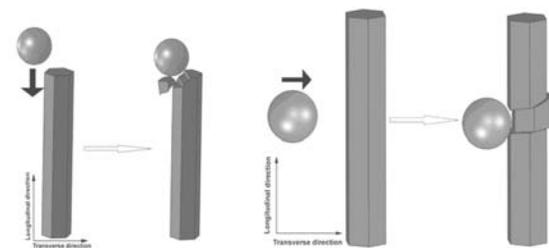


(a) 纵向

(b) 横向

图2 光学显微镜下具有不同取向的 M_7C_3 碳化物Fig. 2 Optical micrographs showing M_7C_3 carbide in two orientations

进入21世纪以来,第四代陶瓷-金属耐磨复合材料出现,以高铬铸铁为基体进行复合化、纳米化的研究成为了提升高铬铸铁性能的新方向^[57]。研究人员使用氧化锆增韧氧化铝(ZTA)陶瓷颗粒为增强体,高铬铸铁为基体,提高了复合材料的硬度与韧性。在磨损过程中,ZTA颗粒对高铬铸铁的保护作用使得耐磨性提高。然而,陶瓷-金属复合材料存在增强体偏聚问题、增强体与基体之间润湿性的问题。为了提高陶瓷颗粒和金属基体之间的润湿能力,通常还需要加入Ti、Ni等合金粉末覆盖陶瓷颗粒,以此来活化 Al_2O_3 表面^[58-60]。Zheng等人^[59]的研究表明,Ti元素对陶瓷表面具有良好



(a) 喷丸流动方向平行碳化物长轴

(b) 喷丸流动方向垂直碳化物长轴

图3 裂纹形成示意图

Fig. 3 Schematic diagram illustrating how cracks form

的活化作用,降低ZTA陶瓷表面的化学稳定性,可以提高陶瓷表面的润湿性。ZTA陶瓷中的氧原子和Cr26铸铁中的铁原子扩散到过渡层中,形成Ti-O共价键和Fe-Ti金属键。因此,过渡层是牢固的冶金界面。三体磨料磨损后的形貌如图4所示^[59],ZTA陶瓷的磨损表面上可见许多沟槽,这表明ZTA陶瓷断裂趋势降低并且抵抗了磨料的切削。硬度较高的ZTA陶瓷是主要的耐磨相,保护了周围的Cr26基体。基体易被磨料除去而凹陷,为陶瓷颗粒提供支撑作用。刘世英等人^[61]的研究显示

高能超声振动会显著降低熔体的表面张力及摩擦力,提高SiC颗粒与熔体的润湿性。在高铬铸铁中添加纳米颗粒能够细化晶粒,影响碳化物类型,使碳化物在组织中更加分散、均匀^[62-64],但是由于纳米颗粒具有较高的表面能,容易发生团聚。朱巧博^[65]将SiC颗粒加入到熔化的镁合金中,经过机械搅拌与超声搅拌后再采用Bridgman定向凝固系统制备了纳米SiC颗粒增强镁基复合材料,通过控制凝固过程及改善纳米陶瓷颗粒与基体的润湿性,提高了SiC颗粒在金属基体内分布的均匀性。

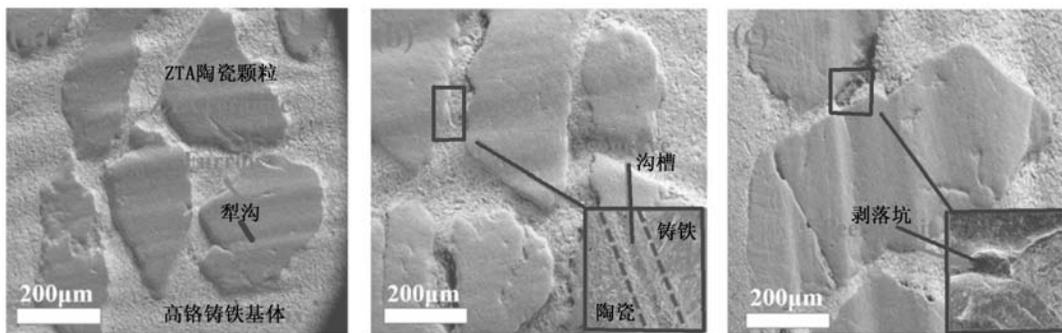


图4 施加3 kg载荷时的磨损表面形态

Fig. 4 The worn surface morphology of sample subjected to applied pressure of 3 kg

4 总结与展望

高铬铸铁组织中由于含有大量高硬度的 M_7C_3 型碳化物,在使用中表现出了良好的耐磨性。铬元素进入基体提高了基体硬度与电位,缩小了基体与碳化物的电位差,在氧化环境中会生成钝化膜,使高铬铸铁具备了较好的耐腐蚀特点。得益于这些优点,高铬铸铁广泛运用到采矿、建筑、水泥、电力等服役状况恶劣的领域。 M_7C_3 型碳化物的分布通常是无定向的,但其横截面上硬度显著高于纵截面上的硬度,定向凝固技术则可以通过控制热流方向制备具有特定碳化物取向的高铬铸铁。有些研究表明与碳化物取向垂直的截面具有更高的耐磨性,而有些研究则显示相反的结果。具有特定碳化物取向的高铬铸铁在测试中受多种因素的影响,得到的结果也不同。

高铬铸铁中基体的性质对材料的性能同样有重要影响。基体的显微硬度、冶金质量(显微疏松、晶界夹杂物等)、电极电位远低于碳化物,是磨损的开始点^[13]。选择适当的基体可以提高耐磨性和耐腐蚀性。然而定向凝固技术多集中于对碳化物的尺寸和取向的改善,运用定向凝固技术对基体改性的研究仍然

较少。

电磁力、高频振动等新型定向凝固技术可改善材料的组织组成及分布,对材料进行除杂、提高力学性能等,但针对高铬铸铁所开发的新型定向凝固技术并不多,常见的还是控制热流方向这类最基本的方法,如水冷铜模、冷铁、发热剂+水冷铜模这种对温度梯度控制较为简单的工艺。目前,对高铬铸铁的一个研究热点是将其与陶瓷颗粒、纳米颗粒进行复合化。通过定向凝固工艺可以一定程度上改善陶瓷颗粒分布不均、以及陶瓷颗粒与金属之间润湿性不足的缺点。

未来对高铬铸铁定向凝固技术的研究应该集中在以下几个方面:将更多先进定向凝固技术运用到高铬铸铁及其颗粒复合材料的生产工艺中,可按照研究者意图合成具有特定组织形态的高铬铸铁及其复合材料。通过定向凝固技术改善高铬铸铁基体的性能,甚至可以使基体和碳化物同时改性,使二者抵御失效时更协调。对具有不同取向、尺寸碳化物的高铬铸铁的耐磨、耐腐蚀机理进行更深入地研究,用理论指导工艺生产,使工艺更加高效、产品性能更加符合工业生产需求。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李卫. 耐磨钢铁件的市场与生产 [J]. 铸造, 2004 (12): 958-962.
- [3] 邵荷生. 金属的磨料磨损与耐磨材料 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [4] 苏俊义, 周庆德, 贾育丁, 等. 定向凝固高铬铸铁耐磨性的初探 [J]. 西安交通大学学报, 1983 (4): 62-67.
- [5] 符寒光. 提高高铬铸铁耐磨性和韧性的途径 [J]. 现代铸铁, 1990 (2): 46-48.
- [6] MCLEAN M. 定向凝固高温材料 [M]. 陈石卿, 陈荣章, 译. 北京: 航空工业出版社, 1988.
- [7] 翟薇, 常健, 耿德路, 等. 金属材料凝固过程研究现状与未来展望 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29 (9): 1953-2008.
- [8] 傅恒志, 郭景杰, 刘林, 等. 先进材料定向凝固 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 4-13.
- [9] 祖方道, 王崇, 张文进. 高铬抗磨铸铁生产技术相关的若干原理及实践问题辨析 [J]. 铸造, 2014, 63 (2): 132-137.
- [10] 符寒光, 邢建东. 耐磨铸件制造技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [11] 鲍崇高, 高义民, 邢建东, 等. 28Cr-铸铁冲蚀磨损过程中碳化物及基体的作用机理 [J]. 西安交通大学学报, 2004 (11): 1156-1159.
- [12] 邢建东, 王小同, 陆文华. 在不同磨料磨损条件下高铬铸铁磨损过程的研讨 [J]. 西安交通大学学报, 1982 (5): 118-128.
- [13] 平宪忠, 乔峰, 朴东学. 以高铬铸铁为例探讨抗磨白口铸铁件磨损特性 [J]. 铸造技术, 2019, 40 (12): 1286-1290.
- [14] 王兆昌, 周年. 奥氏体白口铸铁与马氏体白口铸铁的磨料磨损行为及抗磨性能 [J]. 铸造, 1993 (9): 24-28.
- [15] 苏俊义. 铬系耐磨白口铸铁 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [16] RICHARDSON R C D. The wear of metals by hard abrasives [J]. Wear, 1967, 10 (4): 291-309.
- [17] RICHARDSON R C D. The wear of metals by relatively soft abrasives [J]. Wear, 1968, 11 (4): 245-275.
- [18] 生兆洲. 高铬铸铁的耐腐蚀性研究 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2012.
- [19] 郭帅. 热处理及合金元素对高铬铸铁微观组织和性能的影响 [D]. 福州: 福州大学, 2006.
- [20] 陈华辉, 邢建东, 李卫. 耐磨材料应用手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 50.
- [21] ALBERTIN E, SINATORA A. Effect of carbide fraction and matrix microstructure on the wear of cast iron balls tested in a laboratory ball mill [J]. Wear, 2001, 250 (1): 492-501.
- [22] 向道平, 唐建新. Cr/C比及热处理工艺对高铬铸铁抗磨粒磨损性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2004 (5): 21-23.
- [23] 李卫, 朴东学, 姜炳焕. 马氏体-贝氏体-奥氏体复相基体高硅碳比中铬铸铁及马氏体基体高铬铸铁磨损特性的研究 [J]. 铸造, 1992 (9): 16-21.
- [24] 饶启昌, 高峰, 刘福玲. 铬系白口铸铁腐蚀磨损特性的研究 [J]. 西安交通大学学报, 1988 (6): 53-62.
- [25] 宋宏峰. 铸铁化学镀镍磷工艺及性能研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2006.
- [26] 崔忠圻, 覃耀春. 金属学与热处理 [M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2007: 381.
- [27] 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.
- [28] 曹楚南. 腐蚀电化学原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 216-217.
- [29] XU C, GAO W. Pilling-Bedworth ratio for oxidation of alloys [J]. Materials Research Innovations, 2016, 3 (4): 231-235.
- [30] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册第4卷: 热处理质量控制和检验 [M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2008: 423.
- [31] 李涌. 高铬铸铁抗磨、耐热、耐蚀性能的研究 [J]. 云南冶金, 2005 (6): 50-52.
- [32] LU F, WEI S, XU L, et al. Erosion-wear behaviors of high-chromium cast iron with high nitrogen content in water-sand slurry and acid-sand slurry [J]. Tribology Transactions, 2019.
- [33] LI T Z, LI L, LU H, et al. Effect of trace Ni on the resistance of high-Cr cast iron to slurry erosion [J]. Wear, 2019, 426-427 (A): 605-611.
- [34] 雷玉成, 汪建敏, 贾志宏. 金属材料成型原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [35] 马幼平, 崔春娟. 金属凝固理论及应用技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
- [36] 周振平, 李荣德. 定向凝固技术的发展 [J]. 中国铸造装备与技术, 2003 (2): 1-3.
- [37] 李勇, 郑碰菊, 张建波, 等. 定向凝固技术的研究现状及发展趋势 [J]. 材料导报, 2014, 28 (23): 108-112.
- [38] 汤国兴, 毛卫民, 刘永峰. 定向凝固技术的发展与应用 [J]. 中国铸造装备与技术, 2007 (2): 11-16.
- [39] 张健. 液态金属冷却定向凝固技术的发展与应用 [C] //2019中国铸造活动周, 武汉: 2019.
- [40] BOUARAB S, MOKHTARI F, KADDECHE S, et al. Effect of high frequency vibrations on PV silicon purification [J]. Journal of Crystal Growth, 2020, 529 (UNSP 125298).
- [41] XIAO T, LYÜ G, BAO Y, et al. Electromagnetic separation of coarse Al-Si melts: The migration behavior of iron-rich phase and continuous growth of primary silicon [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 819: 153006.
- [42] QI Y, LI J, SHI C, et al. Effect of directional solidification of electroslog remelting on the microstructure and primary carbides in an austenitic hot-work die steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249: 32-38.
- [43] 任忠鸣, 雷作胜, 李传军, 等. 电磁冶金技术研究新进展 [J]. 金属学报, 2020, 56 (4): 583-600.
- [44] ABOU-Khalil L, WANG J, SALLLOUM-Abou-Jaoude G, et al. Investigation of thermo-electro-magnetic force on equiaxed grain motion during upward directional solidification [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 145 (UNSP 106047): 106047.
- [45] 贾育丁, 苏俊义. 碳化物的位向及尺寸对高铬铸铁耐磨性的影响 [J]. 西安交通大学学报, 1986 (04): 63-75.

- [46] 贺林, 张长军, 周卫星. 高铬铸铁中碳化物相抗磨作用的“尺寸效应” [J]. 热加工工艺, 1998 (4): 15-18.
- [47] CHONG X, HU M, WU P, et al. Tailoring the anisotropic mechanical properties of hexagonal M_7X_3 ($M=Fe, Cr, W, Mo; X=C, B$) by multialloying [J]. Acta Materialia, 2019, 169: 193-208.
- [48] 李浩. 高铬铸铁中碳化物生长形态的研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [49] 符寒光. 碳化物定向排列对高铬铸铁抗磨能力影响的试验研究 [J]. 现代铸铁, 1992 (4): 27-30.
- [50] 符寒光. 定向凝固高铬铸铁抗冲击磨损研究 [J]. 机械工程材料, 1995 (1): 43-46.
- [51] CORONADO J J. Effect of $(Fe, Cr)_7C_3$ carbide orientation on abrasion wear resistance and fracture toughness [J]. Wear, 2011, 270 (3-4): 287-293.
- [52] WANG S, SONG L, QIAO Y, et al. Effect of carbide orientation on impact-abrasive wear resistance of high-Cr iron used in shot blast machine [J]. Tribology Letters, 2013, 50 (3): 439-448.
- [53] 戚亭. 氧化铝矿用渣浆泵过流件用Cr28研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.
- [54] DO AN Ö N, HAWK J A. Effect of carbide orientation on abrasion of high Cr white cast iron [J]. Wear, 1995, 189 (1): 136-142.
- [55] DO AN Ö N, LAIRD G, HAWK J A. Abrasion resistance of the columnar zone in high Cr white cast irons [J]. Wear, 1995, 181: 342-349.
- [56] SU J, ZHOU Q, JIA Y. An investigation of abrasive wear resistance of unidirectionally solidified high chromium iron [A]. Wear of Materials, Vancouver, British Columbia, Canada; 14-18 Apr. 1985: 621-624.
- [57] 任强. ZTA陶瓷/高铬铸铁基复合材料的制备及其组织结构研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [58] 陈守东, 陈敬超, 吕连灏. 颗粒增强铁基耐磨材料的研究进展 [J]. 机械工程材料, 2012, 36 (5): 10-13.
- [59] ZHENG B, LI W, TU X, et al. Effect of titanium binder addition on the interface structure and three-body abrasive wear behavior of ZTA ceramic particles-reinforced high chromium cast iron [J]. Ceramics International, 2020, 46 (9): 13798-13806.
- [60] ZHENG B, LI W, TU X, et al. Effect of ZTA ceramic particles strengthened high chromium white cast iron on three-body abrasion behavior [J]. Materials Research Express, 2019, 6 (11): 116581.
- [61] 刘世英, 李文珍, 高飞鹏, 等. 高能超声处理在制备纳米SiC颗粒增强镁基复合材料中的作用 [J]. 铸造, 2009, 58 (3): 210-212.
- [62] WANG Y, GOU J, CHU R, et al. The effect of nano-additives containing rare earth oxides on sliding wear behavior of high chromium cast iron hardfacing alloys [J]. Tribology International, 2016, 103: 102-112.
- [63] 王海军, 周建党, 陈全心, 等. 纳米SiC对高铬铸铁组织和性能的影响 [J]. 热处理, 2017, 32 (2): 15-19.
- [64] SHAO X H, XIE J P, WANG W Y, et al. Wear resistance of nano TiN strengthen high chromium cast iron [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 217-219: 2410-2413.
- [65] 朱巧博. 纳米颗粒增强镁基复合材料的凝固过程研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013.

Application of Directional Solidification Technology to High Chromium Cast Iron

PING Zhao-fu^{1,2}, ZHENG Bao-chao^{1,2}, TU Xiao-hui^{1,2}, LI Wei^{1,2}

(1. Institute of Advanced Wear&Corrosion Resistant and Functional Materials, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China; 2. National Joint Engineering Research Center of High Performance Metal Wear Resistant Materials Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China)

Abstract:

M_7C_3 carbide in high chrome cast iron makes it have excellent wear and corrosion resistance. Directional solidification technology can realize the directional arrangement of carbide. The hardness and wear resistance of high chromium cast iron with specific carbide orientation are different from ordinary high chromium cast iron. This paper introduces the development and characteristics of high-chromium cast iron and describes the characteristics of directional solidification technology. On this basis, the research progress of the hard phase directional solidification of cast wear-resistant alloys is summarized, and the future research direction of directional solidification technology in high chromium cast iron is given.

Key words:

high chromium cast iron; directional solidification; carbide; wear resistance; corrosion resistance