

冲击磨损工况下铁基耐磨材料的现状及发展

徐维义¹, 梁永红², 左志超¹, 黄永德¹

(1. 南昌航空大学 江西省航空构件成形与连接重点实验室, 南昌 330036;
2. 江西省机械工业设计研究院, 南昌 330046)

摘要:在破碎、研磨、挖掘等机械设备上,因其常常受物料的冲击磨损,导致耐磨件快速失效,每年耐磨件消耗量很大,如何实现耐磨性和经济效益的有机统一是人们关注的问题。而耐磨材料也在不断地发展,从第一代钢铁耐磨材料 Mn13 到第三代钢铁耐磨材料高铬铸铁,再到陶瓷颗粒增强复合材料,以应对不同磨损工况。冲击磨料磨损是一种较为复杂的磨损工况,要求材料具有较高的硬度,同时材料还要保持一定的韧性以抵抗冲击力。针对冲击磨损工况下铁基耐磨材料,介绍了国内外耐磨材料的发展现状,概述了从高锰钢到复合材料,再到复合结构的发展过程,总结了复合材料从基体的选择到增强颗粒的选择,及多种颗粒混合增强的研究进展,重点对陶瓷颗粒增强铁基复合材料及复合结构进行了较为全面的介绍,从软质基体包嵌硬质单元和硬质基体包嵌强韧网络单元两种复合方式进行分析,并对未来复合结构技术的发展进行展望。

关键词:冲击磨料磨损;铁基复合材料;复合结构

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.05.024

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)05-0155-06

Development and Present Situation of Steel Wear-resisting Material under Impact Wear Condition

XU Wei-yi¹, LIANG Yong-hong², ZUO Zhi-chao¹, HUANG Yong-de¹

(1. Jiangxi Key Laboratory of Forming and Joining Technology for Aerospace Components, Nanchang 330036, China;
2. Jiangxi Machinery Industry Design and Research Institute, Nanchang 330046, China)

ABSTRACT: In crushing, grinding, digging and other mechanical equipment, the impact and wear of materials usually lead to rapid failure of wear resistant parts, thus the wear resistant parts consumption is large every year. How to achieve the organic unity of wear resistance and economic benefits is a problem that attracts attention. Wear-resistant materials are also developed continuously, from the first generation of steel wear-resistant material Mn13 to the third generation of steel wear-resistant material high chromium cast iron, and then to ceramic particle reinforced composite material, to cope with different wear conditions. Impact abrasive wear is a more complex wear condition, requiring the material to have a higher hardness; at the same time, the material must maintain a certain toughness to resist impact force. In allusion to the iron-based wear-resisting material in impact abrasion working conditions, the current development of wear resistant materials at home and abroad was introduced, the development from composite material from high manganese steel to composite structure and composite materials were summarized from the selection of the matrix to the choice of reinforcing particles, and the research progress of various particle mixing enhancement. Ceramic particles reinforced iron matrix composite materials and composite structures were mainly introduced. Two types of composite were analyzed from the

收稿日期: 2019-07-20

基金项目: 江西省优势科技创新团队重点项目(20181BCB19002); 江西省科技厅重点研发计划项目(20171BBE50010)

作者简介: 徐维义(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为复合材料与增材制造。

通讯作者: 黄永德(1974—), 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为微连接、钎焊扩散焊等。

soft substrate package embedded hard and rigid substrate package embedded strong network units. The future development of composite structure technology was prospected.

KEY WORDS: impact abrasive wear; iron matrix composites; composite structure

钢铁耐磨材料作为一种传统的易损工程材料,在矿山、电力、建材、冶金、机械等行业有着广泛的用途,特别是破碎、研磨、挖掘等机械设备常常受到冲击载荷,造成冲击磨料磨损,从而大量消耗钢铁耐磨件。冲击磨料磨损行为广泛存在于矿山、能源、冶金、电力等行业的机械设备中,由此造成的经济损失是非常巨大的。据中国工程院咨询研究报告统计^[1],在2006年,由摩擦磨损造成的经济损失约占我国全年GDP总量的4.5%(高达9500亿元),其中钢铁和矿山等重型装备行业的磨损件造成的经济损失就高达400亿元。

在冲击磨料磨损等复杂工况下,传统耐磨材料越来越难以满足其要求,因为在提高材料硬度的同时材料脆性也会相应变大。如何使材料既有抵抗磨损的高耐磨性(工作面),又有抗冲击的强韧性,是目前很多研究者共同的研究目标^[2],因此针对冲击磨料磨损工况下铁基复合材料的研究成为近年来研究的热点。

为了给相关研究人员提供参考,文中综述了冲击磨损工况下,铁基复合材料的发展及现状。

1 国内外传统铁基耐磨材料

目前,针对冲击磨损工况下常用的钢铁耐磨材料可分为耐磨锰钢(奥氏体锰钢)、耐磨白口铸铁、耐磨合金钢、耐磨球墨铸铁等^[3]。

耐磨锰钢可分为中锰钢、高锰钢、超高锰钢等,其中Mn13作为第一代钢铁耐磨材料,因为其良好的韧性和加工硬化能力,广泛用于制作抗冲击载荷的耐磨件。因其塑性较好,并且在强冲击条件下可发生加工硬化,而内部仍然保持较好的韧性,可承受较大的冲击,从而被广泛应用于冲击磨损工况。其缺点也十分明显,在低冲击条件下,加工硬化效果不明显,耐磨耐冲击性大大下降。后续也有大量的研究,主要集中在通过变质处理和热处理两个途径来提高高锰钢的冲击磨损性能。如东北大学的查向东^[4]在普通的高锰钢上加入了适当微合金元素铬、硼、稀土,生产了微合金化高锰钢鄂板、球磨机衬板,研究其组织及性能,发现其耐磨性能较普通高锰钢得到提高,衬板的使用寿命提高了0.2倍,鄂板的寿命提高了2.3倍。

继高锰钢和镍硬IV铸铁后,高铬铸铁成为第三代耐磨材料。在普通耐磨铸铁中加入少量合金元素从而提高碳化物硬度的同时,基体也得到强化,如铸态低铬铸铁广泛用于制造磨球、衬板等^[5]。高铬铸铁硬度较高,其组织中较容易形成显微硬度较高的 M_7C_3 型

碳化物,缺点是消耗资源大、成本高,而且韧性较低,脆性较大,只能适用于低冲击磨损工况,其使用受到限制。另外高合金白口铸铁主要是指高铬白口铸铁,其中铬质量分数占10%~30%^[6~12]。铬含量提高会使碳化物由 Fe_3C 转变为 Cr_7C_3 ,其形状为条块状、菊花状,从而韧性也得到提高,可用于一定冲击磨损工况。

耐磨球墨铸铁耐磨性比普通高铬铸铁差30%~50%,但是贝氏体耐磨球墨铸铁由于其硬度较高、韧性较好,在冲击磨损为主的磨损情况下,其耐磨性比普通高铬铸铁还好。此外,中碳中、低合金钢等耐磨合金钢,通过提高钢的强度、硬度和韧性相配合,也可全面提高抗冲击磨损能力^[13]。

2 冲击磨损工况下铁基复合材料

传统的耐磨材料虽然具有一定抗冲击磨损的能力,但是往往只能应对单一的冲击磨损,高硬度材料在低冲击磨损下性能较好,但是高冲击磨损下极易产生裂纹,高韧材料虽然可抵抗一定冲击,但易于塑性变形,最终发生疲劳剥落,因此由较高硬度的硬质材料与软韧基体组成的复合材料在应对复杂的冲击磨损工况下往往具有优秀的性能。

铁基复合材料是将不同材料与钢铁材料相结合为一体而组成的新型材料,而铁基复合材料按照增强体的形态种类不同,可分为连续性纤维、短纤维和颗粒3类^[14~16]。在应对冲击磨损工况时,颗粒增强复合材料得到了广泛的研究与应用,因为其增强颗粒自身的强度和硬度,在阴影效应下可以有效保护基体,同时基体也起着支撑颗粒的作用,可以有效提高材料的抗磨损性能。通过选用不同的基体与增强体,可以有效提高抗冲击磨损性能。同时其加工成本也相对较低,因此开发研究一种性能优秀、价格适宜的颗粒增强铁基复合材料是工业发展的必然^[17]。

2.1 基体的选择

基体对颗粒起支撑作用,须有一定的强度和硬度,同时由于承受冲击磨损,还须有一定的韧性,高锰钢由于其良好的加工硬化能力和较好的韧性常用于耐冲击复合材料的基体,此外高铬铸铁因较高的硬度、良好的耐磨性也得到广泛的应用。

河南科技大学的上官宝^[18],研究了以ZG25为基体的高铬铸铁铸渗层在低能量冲击下的磨损性能,采用MLD-10型动载磨粒磨损试验机进行试验,与基体材料相比,铸渗层的抗冲击磨损性能提高了20倍。

西安交通大学祁小群等^[19]研制的碳化钨-高铬铸铁表面复合材料 PLJ 式破碎机喷射口衬板,其使用寿命是原材料 (Cr20) 的 3.5 倍。由此可见,高锰钢和高铬铸铁均可作为耐冲击磨损复合材料良好的基体,且已得到广泛的研究。

2.2 增强颗粒的选择

颗粒是复合材料中的主要耐磨相,其硬度应大大高于基体硬度。颗粒耐磨损,才能有效保护基体,使复合材料具有较好的耐磨性能。颗粒在制备复合材料过程中应不与基体发生剧烈反应,颗粒与基体界面结合良好。常用的增强相颗粒有碳化物 (WC, VC, TiC, SiC) 等、氧化物 (Al₂O₃)、氮化物 (TiN) 和金属间化合物等,常用的增强颗粒及性能如表 1。

东北大学的李杰^[21]采用电流直加热动态热压烧结工艺,研究了不同陶瓷颗粒增强铁基复合材料的磨损性能和磨损机理。结果表明,Ti(C,N)粒子对改善铁基复合材料磨损性能作用最强,SiC 和 TiC 次之,Cr3C2 虽然提高硬度和强度最显著但改善耐磨性效果最差。

东北大学的曹新建^[22]采用电流直加热动态热压烧结工艺制备陶瓷颗粒增强铁基复合材料,研究高体积分数(25%, 30%, 35%)下,单一类型颗粒(SiC, TiC, TiN)及混合类型颗粒(TiC+TiN, SiC+TiN, SiC+TiC)作为增强相对铁基复合材料磨损性能的影响。结果表明,混合粒子作为增强体时,(TiC + TiN)混合增强的复合材料磨损性能显著优于两个单一颗粒增强的材料。

除了陶瓷颗粒的种类,陶瓷颗粒的体积分数对复合材料的抗冲击磨料磨损性能有着重要的影响^[29]。由于复合区中陶瓷颗粒体积分数的增加,会使复合区颗粒团聚的可能性增加,这在冲击工况下对复合材料的耐磨性是不利的。所以在制备复合材料时需根据材料的具体工况来选择合适的颗粒的体积分数,同时还要尽量保证复合区的颗粒分数均匀,避免颗粒团聚,这样

才能充分发挥材料的性能,节约成本,提高效率。

2.3 耐冲击磨损铁基复合材料研究进展

目前,WC 因为与钢铁材料良好的润湿性、较小的热膨胀系数,被广泛应用于耐冲击磨损工况下复合材料的制备。暨南大学的田山雪^[23]通过在 Al₂O₃ 表面化学镀镍的工艺,解决了其润湿性较差的问题,制备了 Al₂O₃ 增强高锰钢基复合材料,结果表明,在低冲击磨料磨损下,其耐磨性优于高锰钢。

西安交通大学的宋怀江^[34],为了提高高锰钢冲击磨料磨损性能,利用离心铸造法制备了 WC 颗粒增强高锰钢基表面复合材料,并在 MLD-10 型动载磨料磨损试验机上进行了冲击磨料磨损性能试验。结果表明,制备的复合材料颗粒分布均匀,WC 颗粒与高锰钢基体结合良好;WC 的加入提高了材料的抗冲击磨料磨损性能。

昆明理工大学的隋育栋^[35]通过在预制层中添加一定量的镍基自熔合金粉末 (Ni60WC25) 和 Co 粉,成功制备了碳化钨颗粒增强高铬钢基层复合材料,磨损研究得出,在不同的冲击载荷下,两类表层复合材料均表现出较好的耐磨性,为高铬铸铁的 2~3 倍。在相同磨损实验条件下,预制层中合金粉末的种类和体积分数对复合材料的耐磨性有较大的影响。当材料受到的冲击功较小 (0.5 J 和 1 J) 时,预制层中添加质量分数为 2% 的 Co 粉的表层复合材料耐磨性较好,而当材料受到的冲击功较大 (2.5 J) 时,预制层中添加质量分数为 5% 的 Co 粉的表层复合材料的耐磨性较好。

西安交通大学^[36]研制一种破碎机复合材料锤头及其铸造方法,将 WC 颗粒填充于柱状金属网中,密封后形成预制体并置于铸型型腔的端面侧,浇注钢液并在真空负压下成形。锤端即工作面或打击面由金属母体与均匀分布于其中的柱状增强体组成,柱状增强体硬度为 HRC55~HRC67,具有优异的抗冲击磨损性能;增强体与金属母体的界面以及柱状增强体中 WC 颗粒与基体的界面呈良好的冶金结合。

表 1 可作为增强颗粒的化合物的物理性质^[20]
Tab.1 Physical properties of compounds that can be used to enhance particles

化合物	密度/ (g·cm ⁻³)	熔点/℃	线膨胀系数 (×10 ⁻⁶)/K ⁻¹	热导率/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	显微硬度/ MPa	弹性模量 (×10 ⁻⁶)/MPa	耐压 强度/MPa
Al ₂ O ₃	3.9	2050	8.6	28.89		420	2500
TiC	4.93	3107	7.74	24.28	50 000	460	1380
VC	5.36	2810	4.2	24.7	20 900	430	620
NbC	7.56	3480	6.5	14.24	19 600	345	
WC	15.55	2720	3.84	29.31	17 800	810	5600
TiN	5.2	3205	9.35	19.26	19 900	256	
SiC	3.19	2600	4.63	6.0	33 400	430	2250

3 冲击磨损工况下复合材料及复合结构

在实际运用中,例如矿山机械的辊齿,其受到的冲击载荷通常是由磨料的大小和硬度决定,因而辊齿端部受到的冲击载荷非常不稳定。复合材料可以较好解决此类问题,但是在冲击磨损工况中,复合材料的边缘往往特别容易崩落,因而加速复合材料的失效^[24],通常通过优化颗粒尺寸或改善基体成分来提高其抗冲击能力^[25]。

昆明理工大学的包昂^[26]采用挤压铸造法制备出具有复合结构的 WC/高锰钢基复合材料,如图 1 所示,复合结构通过表面的塑性流动释放大量应力,从而避免了复合材料区域裂纹的出现,显著提高了材料的耐磨性。同样方法制备的复合材料在冲击磨损下,磨损表面发生材料崩落,耐磨性低于高锰钢,而这种复合结构在冲击磨损下耐磨性比高锰钢提高了 1.34 倍,其原理是在应力传递方向加上塑性较好且具有一定强度的基底材料,在受到应力后,应力将快速的被连续致密的基底迅速传递开,从而分散减小这些应力,复合结构材料表层通过塑性流变将大量应力释放,而基底在弥散强化和位错堆积的作用下,可以承受更多的应力^[26]。

吉林大学的周倜^[27]从生物仿生耦合的角度,研究了强冲击磨损下的耐磨部件,设计两种复合结构,分

别为软质基体包嵌硬质单元的仿生耦合模型和硬质基体包嵌强韧网络单元的仿生耦合模型。图 2 为部件表面模仿生物体的软硬相间仿生耦合结构模型(蓝色为硬质单元,白色为软质基底),图 3 为仿生强韧骨架示意图。

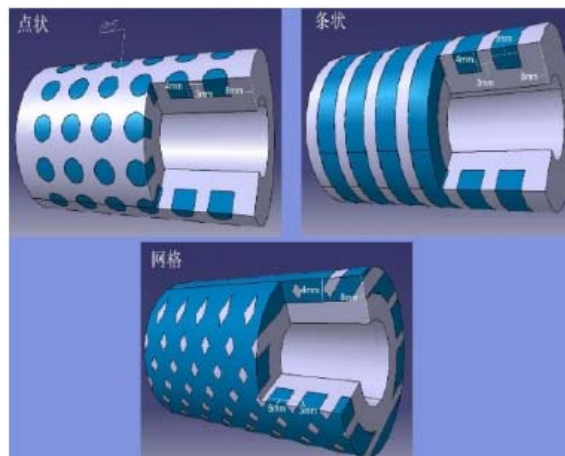


图 2 表面模仿生物体的软硬相间仿生耦合结构模型^[27]
Fig.2 A bionic coupling structure model of hard and soft phases mimicking an organism

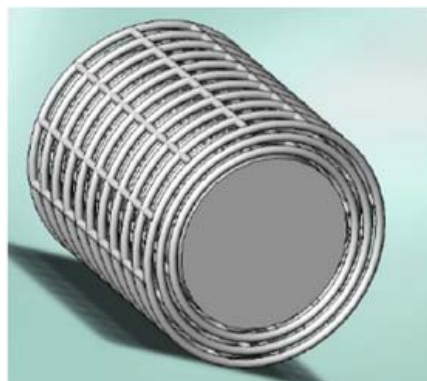


图 3 仿生强韧骨架示意图^[27]
Fig.3 Schematic diagram of bionic tough skeleton

这种复合结构和复合材料的结合可以有效提高材料的冲击磨损性能,内蒙古工业大学的敖敦其其格^[28]采用真空消失模铸造工艺开发了柱状碳化钨表面增强耐磨复合材料,并对其基体与增强体界面微观组织和磨粒磨损性能进行了系统研究。所制备的铁基复合材料的耐磨性约为球铁基复合材料的 1.4 倍,基体奥贝球铁的 2 倍,基体球铁的 3 倍,且有一定的耐冲击磨损性能。

印度 AIA 工程有限公司^[30-31]发明了 1 种高耐磨铁基陶瓷材料,并将其应用在磨辊辊套和磨盘衬板中,耐磨性提高到堆焊修复件的 2 倍以上,并将此陶瓷材料镶嵌在磨辊套中,形成复合结构。经过复杂的热处理工艺,使材料达到足够硬度以后,并具有一定的延展性,可有效吸收冲击磨损过程中的能量,大大提高了材料的耐冲击性能。



图 1 磨损试样^[26]
Fig.1 Wear sample

比利时 Magotteaux 国际股份公司^[32-33]在陶瓷金属复合技术的研究成果, 主要是包括了 Xwin®技术、Duocast®技术和 Duocast Xwin®技术等。Xwin®技术是将陶瓷颗粒与高铬铸铁一次性浇注成一种复合材料, 其兼具陶瓷和高铬合金的特性, 该技术制造的复合材料陶瓷层达到 3/4, 底部保留了 1/4 层厚的高铬合金, 并且在磨损表面形成蜂窝状结构, 增加摩擦力的同时, 提高了研磨效率, 耐冲击性能也得到提高。Duocast®技术主要被用于辊套的制造, 此技术采用了燕尾式结构, 将硬度较高的铸铁嵌入件固定在塑性铸铁基体中, 通过这种连接方式, 加工出复合材料, 并具有软硬相间的复合结构, 可在应力较高的工况条件下工作。Duocast Xwin®技术则是 Xwin®技术和 Duocast®技术结合, 是采用 3 种不同材料, 陶瓷颗粒、高铬合金嵌入件, 基体材料选用铸铁, 将陶瓷颗粒引入高铬合金中, 形成复合材料, 嵌入铸铁基体中。其本质也是一种复合材料与复合结构相结合的方法, 使材料具有一定硬度的同时保留基体的韧性, 而提高其耐冲击磨损性能。

4 结语

在矿山、电力、建材、冶金、机械等行业中, 应对冲击磨料磨损等复杂工况, 传统钢铁耐磨材料的发展从第一代耐磨材料高锰钢, 到镍硬IV铸铁, 再到第三代耐磨材料高铬铸铁, 已得到深入的研究。近年来复合材料成为耐磨材料研究的一个热点, 特别是从陶瓷颗粒增强复合材料, 在软韧基体中加入硬质颗粒, 是材料耐磨性能和耐冲击性能得到提高。然而对于冲击磨损工况而言, 复合结构是一种有效的措施, 通过软硬相间的复合结构, 可大大缓解冲击磨损过程中的冲击力, 从而使材料具有更高的耐冲击磨损性能。复合结构方面的研究却相对较少, 带有复合结构的耐磨复合材料的研究应得到重视, 也给耐冲击磨损材料的发展指明新的方向。

参考文献:

- [1] 王洪发. 中国金属耐磨材料的发展态势与未来的发展趋向[J]. 铸造, 2010, 62(1): 577—591
WANG Hong-fa. Development Trend and Future Development Trend of Metal Wear Resistant Materials in China[J]. Casting, 2010, 62(1): 577—591
- [2] 赵散梅. 陶瓷颗粒增强高铬铸铁基表层复合材料的制备与磨损性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
ZHAO San-mei. Preparation and Wear Properties of Ceramic Particle Reinforced High Chromium Cast Iron Matrix Surface Composites[D]. Changsha: Zhongnan University, 2012.
- [3] 李继林, 郑开宏. 钢铁耐磨材料专利技术分析[J]. 铸造技术, 2013, 34(8): 941—948.
- LI Ji-lin, ZHENG Kai-hong. Patent Technology Analysis of Steel Wear Resistant Materials[J]. Casting Technology, 2013, 34(8): 941—948.
- [4] 查向东. 微合金化高锰钢的应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
ZHA Xiang-dong. Application Research of Microalloyed High Manganese Steel[D]. Shenyang: Dongbei University, 2008.
- [5] 曾绍连. 陶瓷颗粒增强铁基表面复合材料的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2007.
ZENG Shao-lian. Study of Ceramic Particle Reinforced Fe-based Surface Composites[D]. Guangzhou: Jinan University, 2007.
- [6] 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, 2012, 19(4): 43—50.
- [7] ZUNO S J. Abrasive Wear of V-Nb-Ti Alloyed High-chromium White Irons[J]. Wear, 2015, 332/333: 1006—1011.
- [8] FERNÁNDEZ I, BELZUNCE F J. Wear and Oxidation Behaviour of High-chromium White Cast Irons[J]. Materials Characterization, 2008, 59(6): 669—674.
- [9] PENAGOS J J, ONO F, ALBERTIN E, et al. Structure Refinement Effect on Two and Three-body Abrasion Resistance of High Chromium Cast Irons[J]. Wear, 2015, 340/341: 19—24.
- [10] SUN T, SONG R B, WANG X, et al. Abrasive Wear Behavior and Mechanism of High Chromium Cast Iron[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 22(1): 84—90.
- [11] TANG X H, CHUNG R, LI D Y, et al. Variations in Microstructure of High Chromium Cast Irons and Resultant Changes in Resistance to Wear, Corrosion and Corrosive Wear[J]. Wear, 2009, 267(1/2/3/4): 116—121.
- [12] 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.
- [13] 李卫. 钢铁耐磨材料技术进展[J]. 铸造, 2003, 55(11): 1105—1109.
LI Wei. Technological Progress of Wear-resistant Materials for Iron and Steel[J]. Casting, 2003, 55(11): 1105—1109.
- [14] 王金辉, 金培鹏, 马国俊, 等. 硼酸镁晶须增强镁基复合材料高温蠕变性能[J]. 热加工工艺, 2010, 39(8): 86—89.
WANG Jin-hui, JIN Pei-peng, MA Guo-jun, et al. Magnesium Borate Whisker Enhances High Temperature Creep Property of Magnesium Matrix Composite[J]. Thermal Processing Technology, 2010, 39(8): 86—89.
- [15] LIU Y B, LIM S C, LU L, et al. Recent Development in the Fabrication of Metal Matrix-particulate Composites Using Powder Metallurgy Techniques[J]. Journal of Materials Science, 1994, 29(8): 1999—2007.

- [16] 于化顺. 金属基复合材料及其制备技术[J]. 机械制造, 2006(12): 32—39.
YU Hua-shun. Metal Matrix Composites and Their Preparation Technology[J]. Machinery Manufacturing, 2006(12): 32—39.
- [17] 胡永平, 唐启玲, 潘复生, 等. 金属基复合材料的应用现状[J]. 铝加工, 1998, 21(6): 49—53.
HU Yong-ping, TANG Qi-ling, PAN Fu-sheng, et al. Application Status of Metal Matrix Composites[J]. Aluminum Processing, 1998, 21(6): 49—53.
- [18] 上官宝, 陈跃. 高铬铸铁铸渗层的冲击磨损性能研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2004(1): 21—23.
SHANGGUAN Bao, CHEN Yue. Study on Impact Wear Properties of Cast-permeated Layer of High Chromium Cast Iron[J]. Casting Equipment and Technology of China, 2004(1): 21—23.
- [19] 祁小群, 李秀兵, 高义民. WC颗粒增强高铬铸铁基表面复合材料喷射口衬板的研制[J]. 铸造技术, 2000, 23(5): 282—284.
QI Xiao-qun, LI Xiu-bing, GAO Yi-min. Development of Ejector Liner for High Chromium Cast Iron Matrix Composite Reinforced by Tungsten Carbide Particles[J]. Casting Technology, 2000, 23(5): 282—284.
- [20] 李祖来, 蒋业华, 卢德宏, 等. 铸渗法制备铁基表面复合材料的组织及性能[J]. 铸造, 2005, 54(8): 783—786.
LI Zu-lai, JIANG Ye-hua, LU De-hong, et al. Micro-structure and Properties of Iron-base Surface Composites Prepared by Casting Infiltration[J]. Casting, 2005, 54(8): 783—786.
- [21] 李杰. 不同颗粒增强铁基复合材料磨损性能的对比[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(5): 660—664.
LI Jie. Comparative Investigation on Wear Behavior of Iron Matrix Composites Reinforced by Different Ceramic Particles[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2010, 31(5): 660—664.
- [22] 曹新建. 不同类型颗粒混合增强铁基复合材料的磨损性能[J]. 材料工程, 2017, 45(8): 62—67.
CAO Xin-jian. Wear Resistance of Iron Matrix Composites Reinforced by Mixed-type Particles[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(8): 62—67.
- [23] 田山雪. Al_2O_3 陶瓷增强高锰钢基复合材料耐磨性能的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2017.
TIAN Shan-xue. Research on Wear Resistance of Al_2O_3 Ceramic Reinforced High Manganese Steel Matrix Composite[D]. Guangzhou: Jinan University, 2017.
- [24] ZHANG G S, XING J D, GAO Y M. Impact Wear Resistance of WC/Hadfield Steel Composite and Its Interfacial Characteristics[J]. Wear, 2006, 260(7/8): 728—734.
- [25] 张国祥. WC颗粒增强高锰钢基表面复合材料的研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2011.
ZHANG Guo-xiang. Investigation on WC Particles Reinforced High Manganese Steel Matrix Surface Composites[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2011.
- [26] 包昂, 卢德宏. WCP/高锰钢基复合材料及复合结构的冲击磨损性能[J]. 材料工程, 2018, 46(4): 91—98.
BAO Ang, LU De-hong. Impact Wear Resistance of WCp/Hadfield Steel Somposite and Composite Structure[J]. Materials Engineering, 2018, 46(4): 91—98.
- [27] 周侗. 基于耦合仿生的强冲击磨料磨损部件耐磨性研究及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
ZHOU Ti. Research and Application of Wear Resistance of Strong Impact Abrasive Components Based on Coupling Bionics[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [28] 敖敦其其格. 新型柱状碳化钨表面增强耐磨复合材料的磨粒磨损性能[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2016.
AODUN Qi-qi-ge. Abrasive Wear Properties of New Columnar Tungsten Carbide Surface Reinforced Wear-resistant Composites[D]. Huhhot: Neimeng Gu University of Technology, 2016.
- [29] 贾元伟. 蜂窝空间结构 ZTAp/高锰钢基复合材料制备及耐磨性能[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
JIA Yuan-wei. Preparation and Wear Resistance of ZTAp/ High Manganese Steel Matrix Composites with Honeycomb Space Structure[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [30] AIA Engineering Ltd. Metal Matrix Ceramic Composites with Improved Wear Resistance, WO: 2013084080A1[P]. 2013-06-13.
- [31] AIA Engineering Ltd. Wear Resistance Metal Matrix Ceramic Composite Parts and Methods of Manufacturing, USA: 8147980B2[P]. 2012-03-03.
- [32] Magotteaux International SA. Cast Parts with Enhanced Wear Resistance, USA: 7935431B2[P]. 2011-05-03.
- [33] Magotteaux International SA. Composite Wear Component, USA: RE39998E[P]. 2008-01-08.
- [34] 宋怀江. 碳化钨增强高锰钢基复合材料冲击磨损性能的研究[J]. 铸造技术, 2005, 26(6): 468—477.
SONG Huai-jiang. Study on Impact Wear Properties of Tungsten Carbide Reinforced High Manganese Steel Matrix Composites[J]. Casting Technology, 2005, 26(6): 468—477.
- [35] 隋育栋. 合金粉末对 WC/钢复合材料组织和冲击磨料磨损性能的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
SUI Yu-dong. Effects of Alloy Powder on WC/Steel Composite Structure and Impact Abrasive Wear Properties[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.
- [36] 李烨飞, 高义民, 邢建东, 等. 一种破碎机复合材料锤头及其铸造方法: 中国, 200910021871[P]. 2009-04-03.
LI Ye-fei, GAO Yi-min, XING Jian-dong, et al. A Crusher Composite Hammer Head and Its Casting Method: China, 200910021871[P]. 2009-04-03.