

铸造耐磨材料的研究应用现状及发展趋势

宋延沛^{1, 2}, 周 汉¹, 陈丹萍¹, 林小丽¹

(1. 海南科技职业大学机电工程学院, 海南海口 570100; 2. 河南科技大学材料科学与工程学院, 河南洛阳 471023)

摘要: 综述了目前我国铸造耐磨材料和热工艺研究中的关键技术, 综合分析了我国铸造耐磨材料的应用研究现状、存在的问题及应对措施; 并对铸造耐磨材料未来的发展方向、思路和对策提出建议, 为新型铸造耐磨材料的开发研究提供参考。

关键词: 铸造耐磨材料; 研究应用现状; 存在的问题; 发展趋势

耐磨材料被广泛地应用于工业生产的各个领域, 随着科学技术和现代工业的高速发展, 由材料磨损而引起的能源和材料消耗等所造成的经济损失相当惊人。据不完全统计, 世界工业化发达国家约30%的能源是以不同形式消耗在磨损上的。如在美国, 每年由于摩擦磨损和腐蚀造成的损失约1 000亿美元, 占国民经济总收入的4%。我国每年仅在冶金、矿山、电力、煤炭和农机领域由工件磨损而造成的经济损失高达400亿元之多, 每年仍以5%~10%的增长率快速增加。因此, 耐磨材料的发展已成为影响现代生产效率的重要因素, 越来越引起材料科学工作者对零件磨损和耐磨材料研究的高度重视。本文将主要介绍目前我国金属铸造耐磨材料的研究及应用现状、存在的问题及未来发展方向和趋势。

1 耐磨铸钢

我国在耐磨铸钢方面的研究主要集中在铸造奥氏体锰钢、改性铸造奥氏体锰钢、铸造耐磨合金钢等。

1.1 铸造奥氏体锰钢

普通铸造奥氏体锰钢其碳含量在0.9%~1.5%之间, 根据锰在钢中的含量又分为中锰耐磨钢(5%~9%Mn)、高锰耐磨钢(12%~14%Mn)和超高锰耐磨钢(15%~30%Mn)。中锰耐磨钢由于锰含量较低, 其组织稳定性较差, 使用过程中易诱发马氏体转变, 耐磨性比高锰钢好, 但韧性较低, 主要在冲击载荷较小的工况下使用。高锰耐磨钢锰含量较高, 其组织稳定性较中锰钢好, 冲击韧性高, 适用于冲击载荷较高的工况下使用, 超高锰钢锰含量一般在15%以上, 主要用于改善厚大铸件中心组织均匀性, 使厚大铸件中心部位获得完全奥氏体组织, 提高其加工硬化能力。奥氏体锰钢通常用来铸造大型球磨机衬板、颚式破碎机颚板、大型破碎机锤头等部件。为了改善奥氏体锰钢的耐磨性, 通常采用优化工艺, 改变铸造方法, 加入合金元素进行合金化改性或进行变质处理, 目的是改善组织提高其耐磨性和使用性能, 合金元素的加入量一般不超过2.5%。改性后的奥氏体锰钢硬度提高, 冲击韧性略有下降, 耐磨性增加。为了进一步改善奥氏体锰钢的耐磨性, 可对水韧处理后的奥氏体锰钢再进行时效处理, 使其基体上弥散析出大量细小的合金碳化物, 以进一步提高耐磨性^[1-3]。覆砂金属型工艺也是提高奥氏体锰钢性能的又一种方法, 采用覆砂金属型工艺可使高锰钢衬板铸态组织中碳化物数量减少, 铸态冲击韧度提高(达94 J/cm²)。与普通水玻璃砂型生产的高锰钢相比, 其铸态和热处理态的磨损量分别

作者简介:

宋延沛(1957-), 男, 博士, 教授, 主要从事先进耐磨材料及金属基复合材料研究。
E-mail: songyp3@163.com;
sypei@haust.edu.cn

中图分类号: TG135+.6
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2022)12-1477-08

收稿日期:

2022-06-20 收到初稿,
2022-08-20 收到修订稿。

减小36%和28%^[4]。

合金化无疑是改善奥氏体锰钢组织，提高其力学性能和耐磨性的主要方法之一，材料工作者为了提高奥氏体锰钢的耐磨性，通常在奥氏体锰钢中加入W、Cr、Mo、V、Ti等合金元素对钢进行合金化改性，以达到细化晶粒、改善其组织中碳化物形态、数量和厚壁铸件心部的晶粒度，可有效提高钢的抗拉强度、硬度和耐磨性^[5]。

文献[6]在奥氏体锰钢中加入0.5%~1.5%的W可以改变C在中锰钢中的分布状态，起到细化晶粒、有效提高奥氏体锰钢的抗拉强度、冲击韧性和耐磨性。与不含W奥氏体锰钢相比，冲击韧性提高0.4~1.49倍，抗拉强度提高10%，耐磨性提高40%。在ZGMn18钢中加入2%Cr并通过RE和B变质处理，可使厚壁轧臼壁铸件心部的晶粒度达到1级^[7]。若在ZGMn17Cr2基础上添加适量的V、Mo，通过水韧处理+360℃回火处理可使ZGMn17Cr2的组织更加均匀，碳化物形态和数量得到改善，沉淀强化效果更显著，综合力学性能明显提高^[8]。文献[9]采用消失模铸造方法研究了Cr、Mo、V、Ti、Ni多元合金化对ZGMn13组织的影响，发现随合金元素量增加，奥氏体稳定性提高，晶粒细化，钢的显微硬度和宏观硬度均明显提高。高锰钢分别通过轻稀土和钇基重稀土两种包芯线变质剂处理后，高锰钢的耐磨性均提高了10%~20%和20%~30%，且钇基稀土变质线处理后高锰钢的伸长率提高更明显，加工硬化能力更强^[10]。热处理工艺优化也是改善奥氏体锰钢组织和性能的手段之一，研究者^[11]在不同的热处理温度下研究了ZGFe-24Mn-7Al-1C钢的组织 and 性能后发现，加热温度从850℃升高到1100℃时，钢中晶界碳化物逐渐减少，伸长率、抗拉强度、屈服强度和冲击韧性不断增加，在1050℃时综合力学性能达到最优。

奥氏体锰钢组织粗大，晶界残留碳化物不能完全消除是导致奥氏体锰钢性能恶化的主要原因。采用合金化和复合变质处理加以优化的铸造工艺和热处理工艺是改善奥氏体锰钢组织，提高其性能的有效方法。

1.2 铸造耐磨合金钢

1.2.1 铸造低合金耐磨钢

铸造低合金耐磨钢，其含碳量通常在0.25%~1.0%之间，合金总量一般在5%以下，对有一定冲击载荷的耐磨件，碳含量应选择中下限，组织应为板条马氏体、贝氏体或板条马氏体+片状马氏体混合组织；对冲击载荷较小，耐磨性要求较高的耐磨件，碳含量应选择中上限。组织应为片状马氏体+少量残余奥氏体+少量碳化物。铸造低合金耐磨钢是在碳钢中加入Cr、Mn、Si、Ni、Mo、Cu、V、Ti等合金元素而获得的，

其目的主要是固溶强化，提高钢的淬透性，改善组织，提高性能和耐磨性，再通过热处理工艺优化以满足不同工况的使用要求。铸造低合金耐磨钢多用于制造衬板、锤头、斗齿等耐磨件。

目前，应用于市场的铸造低合金耐磨钢主要包括珠光体-渗碳体耐磨钢、马氏体耐磨钢、贝氏体耐磨钢和奥氏体-贝氏体耐磨钢。按主要元素可分为Cr系、Mn系、B系和多元系。31Mn2Si是20世纪80年代河南科技大学与中国一拖集团公司联合研制的高锰钢拖拉机履带板代替钢种，该钢种经RE-B复合变质后，其性能达到硬度HRC45~48，抗拉强度1530 MPa，U型缺口冲击韧性大于30 J/cm²，使用寿命较高锰钢履带板提高近50%，生产成本明显降低^[12]。ZG30CrMn2Si是在ZG31Mn2Si钢的基础上加入合金元素Cr开发出的多元低合金耐磨钢，主要用于生产中小型球磨机衬板。该耐磨钢经RE-B复合变质处理后组织明显细化，组织中板条马氏体比例增加，夹杂物也由沿晶界分布的Ⅱ硫化物夹杂转变为晶内分布的球块状RE硫氧化物夹杂，U型缺口冲击韧性由变质前的37 J/cm²提高到62 J/cm²，抗拉强度大于1700 MPa，硬度达到HRC 48~51，使用寿命较高锰钢衬板提高近一倍^[13-14]。C含量对Cr-Si-Mn低合金钢硬度、冲击韧性和磨损特性有显著影响，C含量增加，Cr-Si-Mn低合金钢的组织由板条马氏体向针状马氏体转变，硬度增加，冲击韧性降低，抗冲击磨损性能先增加后降低，磨损机理由塑性疲劳磨损转变为脆性断裂磨损^[15]。

ZG34Mn2SiV是近期研究的一种多元耐磨钢，该钢经870℃淬火，200℃回火后的耐磨性比高锰钢提高20%^[16]。ZG65MnCr是在65Mn钢的基础上将Mn含量提高到1.95%~2.05%，并加入0.95%~1.05%的Cr而研制的一种低合金耐磨钢，其淬透性较65Mn钢大大提高，最大临界淬透直径可达195 mm，淬硬层硬度达HRC58~61，显著提高了厚壁工件的淬透性和耐磨性^[17]。ZG30Cr2Si2MnMoCuTiREB、ZG70Cr2MnNiSi和ZG75Cr2Mn2SiMoREB耐磨铸钢主要针对中大型球磨机衬板和圆锥破碎机衬板研制的一种耐磨钢，经正火+淬火+低温回火或空淬+回火处理后，组织为回火马氏体、索氏体或贝氏体+珠光体混合组织，强度大于1200 MPa，硬度大于HRC40，用于球磨机和圆锥磨衬板，使用寿命比高锰钢提高50%以上^[18-20]。

为了提高低合金钢在不同工况下的耐磨性，材料工作者针对不同工况下使用的低合金耐磨钢进行了热处理工艺研究，通过热处理工艺优化，改善低合金耐磨钢的组织，提高其耐磨性和使用寿命^[21-23]，已获得显著成效。C-Mn-Cr-B低合金耐磨钢经920℃淬火，400℃回火处理后，得到回火马氏体组织，钢的屈服

强度为1 080 MPa, 抗拉强度为1 190 MPa, 伸长率25.5%, -20 °C 冲击功为 39 J, 硬度为HB399, 综合力学性能良好^[24]。Cr-Mo-Ni-Mn-Si低合金耐磨钢经860 °C油淬后, 其组织为细小板条马氏体, 硬度达到HRC44.8, 耐磨性显著改善^[25]。文献[26]在研究了淬火温度对工程机械用低合金耐磨钢组织与力学性能的影响后发现, 钢在840 °C淬火+400 °C回火后, 其硬度和冲击功均达到最大值, 分别为HRC49.2和28.8 J。扩散退火时间对58CrMnSiNiMo 耐磨钢的组织 and 性能有显著影响, 扩散退火时间延长, 试验钢组织均匀性改善, 成分偏析降低, 淬火后板条马氏体增多, 马氏体板片间距增加, 马氏体周围出现残余奥氏体薄膜, 淬火组织中第二相主要为 M_7C_3 、 $M_{23}C_6$ 碳化物。经扩散退火处理的58CrMnSiNiMo 耐磨钢, 其抗拉强度和冲击韧性显著改善, 由1 775 MPa和44 J/cm²提高到2 029 MPa和144 J/cm²^[27]。

1.2.2 铸造中高合金耐磨钢

铸造中合金耐磨钢的合金元素含量一般在5%~9%之间, 含碳量在0.3%~1.2%; 而高合金耐磨钢的合金元素含量均在10%以上, 碳含量通常在0.7%~1.5%之间, 中高合金耐磨钢中通常作为强化和提高钢淬透性的元素有Cr、Mn、Si、Mo、Ni和V等, 为改善铸造合金钢组织和性能, 研究者通常也会加入Ti、Nb进行微合金化, 并通过RE变质处理、热处理工艺优化以细化晶粒、改善组织中碳化物形态和分布。铸造中高合金耐磨钢主要用于制造热轧辊、导向辊、破碎机颚板、板锤、球磨机衬板、磨球和杂质泵叶轮等耐磨铸件。其组织主要为珠光体或回火马氏体+碳化物+残余奥氏体。国内在中高合金耐磨钢方面的研究除成分优化和变质处理外, 更多的是集中在热处理工艺优化方面。文献[28]在研究了热处理工艺对低碳(0.2%~0.3%C)中合金耐磨钢和中碳(0.4%~0.5%C)中合金耐磨钢组织和性能影响后发现, 该两种耐磨钢分别经过945 °C淬火+280 °C回火和945 °C淬火+370 °C回火最优热处理后, 两种基体组织明显细化, 均由细小的板条马氏体+少量残余奥氏体和弥散分布的 ϵ 碳化物组成。两种钢的性能分别达到硬度HRC49和HRC48, 冲击韧性224 J/cm²和90 J/cm²。衬板用低碳高合金钢(0.21%C, 9.0% Cr, 0.7%Mo)耐磨钢中增添2%Mn后, 其退火组织为上贝氏体+屈氏体, 淬火回火组织为单相板条马氏体, 这两种组织的硬度和冲击韧性分别为HRC40.2、HRC52.8和11 J/cm²、17 J/cm², 腐蚀速率为0.231 4/(g·m²·h⁻¹)。当锰量继续增加至2.5%~3%时, 该钢退火和淬火回火组织均为单相板条马氏体, 硬度有所增加, 而韧性和腐蚀速率均有所下降^[29]。

高铬铸钢轧辊是高温环境下工作的耐磨件, 它的组织和性能直接影响其使用寿命, 优化的热处理工艺可以改善高合金耐磨钢的组织, 提高其性能。文献[30]在研究了热处理工艺对高铬铸钢轧辊组织和性能影响后, 结果发现, 该轧辊经1 030 °C×1.5 h空冷淬火, 510 °C×(10~30 min)二次回火后, 其组织更加均匀, 硬化效果良好, 硬度达到HV740~760, 使用寿命明显提高。VC具有高的硬度和良好的分布形态, 吸引了耐磨材料研究者的极大兴趣, 文献[31]研究了高钒高速钢中VC硬质相对钢组织及性能的影响, 介绍了高钒高速钢组织中由于存在大量的硬度高、形态好、分布均匀的VC耐磨相抵抗磨损, 使高钒高速钢比高铬铸铁具有更优良的耐磨性。根据高钒耐磨合金钢平衡凝固相图, 可对高钒耐磨合金钢的成分、组织及第二相碳化物(MC, M_7C_3 , M_3C)进行设计计算, 并预测其性能, 通过试验验证, 试验结果与计算结果吻合^[32]。高钒合金钢中V主要以VC的形式存在, 随着钢中V含量的增加, VC的体积分数增加, 钢的耐磨性增加, 但钢的宏观和微观硬度变化不大, 当钢中V量达10%, Cr含量达5%时, 铸态高钒合金钢的耐磨性能最好^[33]。

在实际应用中高合金耐磨钢部件往往因组织中残余奥氏体量过多, 碳化物沿晶界分布, 组织不均匀制约了其进一步应用的范围。

2 铸造耐磨合金铸铁

2.1 铸造白口铸铁

低铬合金白口铸铁是耐磨白口铸铁之一, 通常是在普通白口铸铁中加入1%~5%的铬, 含碳量控制在2.2%~2.8%之间。低铬白口铁的组织为珠光体+合金碳化物($(Fe, Cr)_3C$, 或回火马氏体+合金碳化物, 其维氏硬度HV1 000~1 300。主要用于生产球磨机磨球、衬板, 抛丸机叶片和轴流泵过流部件、热轧辊等耐磨件, 通常采用去应力退火、高温正火或空淬+回火处理。目前国内在铸造低铬合金白口铸铁方面的研究主要集中在合金化、变质处理和热处理工艺优化, 以细化其组织, 改善碳化物形态和分布, 消除网状碳化物和铸造应力, 提高力学性能和耐磨性能。

有学者在研究了低铬白口铸铁化学成分和热处理工艺对其组织性能的影响后发现, 将白口铸铁中的C、Cr含量提高至4.920%和3.231%, 经950 °C淬火+300 °C回火处理的综合力学性能达到最佳^[34]。进一步研究发现, V对低铬白口铸铁硬度和冲击韧性也有较大影响, 钒含量增加, 低铬白口铸铁的硬度和冲击韧性提高, 钒含量达0.5%时, 低铬白口铸铁热处理后的冲击韧性达到最大值(9.13 J/cm²), 钒含量提高到0.75%时, 低铬白口铸铁的硬度达到最大值(HRC 63.3)^[35]。稀

土复合变质处理常用于改善白口铸铁组织，是提高白口铸铁性能的主要方法之一。低铬白口铸铁通过稀土复合变质，可以改善其共晶碳化物的形貌与分布，减少白口铸铁中连续粗大的网状碳化物，获得优良的综合力学性能，用这种低铬白口铸铁生产的磨球表现出优良的耐磨性能^[36]。稀土铝复合变质处理可以细化铸造镍铬钼冷硬铸铁轧辊组织，改善碳化物的形貌和分布，降低冷硬铸铁的界面能，提高其耐磨性。但稀土铝复合变质剂的过量加入，会导致铸态组织恶化，耐磨性下降^[37]。

高铬白口铸铁中Cr含量通常为12%~28%，碳含量在2.4%~3.3%，铸造高铬铸铁的组织性能取决于铬和碳的含量，通常高碳高铬铸铁的硬度要高于低碳高铬铸铁的硬度，基体组织为回火马氏体或索氏体组织，晶界有连续网状碳化物存在。高铬铸铁中Cr/C比不同，其组织中碳化物类型不同，主要有 $(Fe \cdot Cr)_3C$ 、 $(Fe \cdot Cr)_7C_3$ 和 $(Fe \cdot Cr)_{23}C_6$ 三种类型。应用中根据不同的使用工况，设计不同的成分，获得不同的碳化物类型。高铬铸铁被广泛用于制作球磨机磨球、衬板，锤式破碎机锤头，热轧机导板；无缝钢管穿孔机导板、渣浆泵、阀过流件、混凝土搅拌机叶片和抛丸机叶片等耐磨件。

为了进一步提高高铬铸铁性能，扩大其应用范围，通常对高铬铸铁进行合金化和热处理工艺优化。文献[38]在290Cr26Mo铸铁中加入钨可提高其组织中二次碳化物 $M_{23}C_6$ 的数量，增加290Cr26Mo铸铁硬度，但不能改变二次碳化物的类型，当W加入量达到2.79%时，290Cr26Mo铸铁的硬度增加至HRC63，韧性有所降低，达 $3.1 J/cm^2$ ，适用于冲刷磨损工况下耐磨件选用。热处理工艺对高铬铸铁组织和性能有着明显影响，淬火温度的升高，高铬铸铁硬度提高，淬火温度在980~1 070 °C，回火温度在400~500 °C时，淬火回火后高铬铸铁的最大硬度可达到HRC58~63，冲击韧性为 $5\sim 15 J/cm^2$ ，耐磨性明显提高^[39-41]。

2.2 耐磨球墨铸铁

耐磨球铁是针对建材、电力和矿山机械研发的一种新型耐磨材料，主要应用于电厂、矿山湿磨工况下使用的耐磨部件。通常采用淬火+低温回火或等温淬火，获得回火马氏体+球状石墨+少量残余奥氏体+少量碳化物组织或贝氏体+碳化物组织。硬度大于HRC54，冲击韧性在 $8\sim 30 J/cm^2$ ，主要用于铸造球磨机磨球、衬板、护板和齿轮。国内学者采用多元合金化与热处理工艺相结合的方法研究了耐磨球铁的成分、组织、力学性能、磨损特性以及其在矿山、电力、水泥等行业的应用，取得了良好效果。文献[42]研究了低合金球铁

的余热淬火工艺，结果发现，采用优化的余热淬火工艺处理的马氏体球铁磨球使用寿命是中锰球铁磨球的3倍，是贝氏体锻钢磨球寿命的2倍。Cu作为非碳化物形成元素，固溶于基体，提高球铁淬透性，改善其组织和基体硬度的均匀性，有效提高了球铁的耐磨性^[43]。河南科技大学针对矿山湿磨条件开发了一种含铜马氏体球铁磨球，通过淬火+回火后硬度达到HRC54~58，冲击韧性为 $8\sim 12 J/cm^2$ ，铁矿湿磨条件下磨耗 $302\sim 403 g/t$ 矿石，破碎率小于1%，耐磨性优良^[44]。为了进一步提高球铁的耐磨性，研究者在 $\Phi 110$ 球铁磨球中加入0.4%Cr合金元素后，磨球表面硬度由HRC50提高到HRC59，磨球内外层硬度差由HRC20减小到HRC3，综合性能显著提高^[45]。为了消除含V、Cr球铁组织中的网状碳化物，研究者在该球铁中加入0.06%的B元素，并经900 °C淬火+230 °C回火后，该球铁的硬度和冲击韧性具有良好的匹配，硬度为HRC58~61，冲击韧性为 $8\sim 11 J/cm^2$ ^[46]。研究表明，应用在矿山、电力、水泥行业的马氏体耐磨球铁磨球，其基体上分布5%~15%的碳化物更具有良好的磨料磨损抗力及良好的冲击疲劳抗力，磨球表面硬度控制在HRC55~57，磨球表面与心部硬度差 $HRC \leq 2$ ，矿山湿磨条件下平均单耗小于 $0.66 kg/t$ 原矿，破碎率 $< 1\%$ ，水泥干磨下平均单耗为 $0.08\sim 0.11 kg/t$ ，破碎率 $< 1\%$ ^[47]。

3 铸造耐磨复合材料

3.1 双金属复合材料

双金属复合材料是将两种不同成分的合金通过复合铸造而获得的一种综合性能优良的耐磨材料，它可以同时满足高硬度、高耐磨和高强韧的性能要求，主要用于既要求高耐磨性，又能承受较大冲击载荷的耐磨部件，以提高机器的工作效率和使用寿命。双金属复合材料的制备工艺主要有固-液复合和液-液复合两种。双金属复合材料制备的关键技术是铸造工艺，如何获得界面结合良好、无铸造缺陷的双金属结合面，是双金属耐磨材料安全应用需要克服的主要困难。目前应用的双金属复合材料主要由碳钢（或低合金钢）和高铬铸铁复合而成，该领域研究的重点主要是界面层的结合状况、界面反应、界面层的组织、耐磨层厚度以及制备工艺对界面层组织和性能的影响。双金属复合件存在一个从碳钢到高铬铸铁的过渡层，过渡层组织一般为珠光体→珠光体+碳化物→马氏体+残余奥氏体+碳化物，良好的界面层为冶金结合^[48]。文献[49-50]通过固-液复合和液-液复合铸造工艺，试制了高铬铸铁/低碳钢双金属复合材料的破碎机锤头。两种金属通过原子的相互扩散，达到良好的冶金结合，界面过渡层厚度约为 $30 \mu m$ ，界面处的显微硬度约为

HV333, 界面结合强度较高, 双金属复合锤头在机制砂工况下的使用寿命是高锰钢锤头的2倍以上, 锤头综合性能满足实际生产使用要求。最近研究者采用消失模铸造工艺生产液液碳钢/高铬铸铁双金属复合锤头取得了成功, 锤头复合界面呈波浪状冶金结合, 过渡层组织均匀, 锤头硬度达到HRC55~60, 锤柄硬度为HRC40~50^[51]。

3.2 铸造表面复合材料

表面复合材料实际上是通过铸渗技术或离心铸造工艺获得部件表面耐磨层的复合材料, 铸渗技术就是铸件表面获得耐磨合金铸渗层的生产工艺。铸件表面铸渗层通常是用铬铁粉、钼粉和碳化钨粉等按不同比例混合后加入溶剂和粘剂搅拌成铸渗合金涂料, 然后涂刷在铸件需复合的部位, 烘干后浇入母体合金液, 铸渗而成耐磨合金层, 铸渗部件母材通常为碳钢、低合金钢或奥氏体锰钢等黑色金属基体。河南科技大学研究的铸渗复合技术已广泛应用于生产热轧钢生产线的导卫板部件, 通过铸渗使导卫板磨损部位获得5~8 mm厚的耐磨层, 大幅提高了导卫板的使用寿命, 取得了良好的经济效益^[52-53]。中锰钢铸件采用铸渗技术可获得7.22 mm厚的铸渗硬化层, 硬度高达HV897, 耐磨性比中锰钢基体提高5.41倍^[54]。TiC是一种高硬度的耐磨相, 常作为耐磨钢的增强相, 提高其耐磨性。文献[55-56]采用热力学和溶质偏析模型模拟计算和试验的方法研究了不同凝固速度下TiC形成过程及对低合金耐磨钢硬度及耐磨性的影响, 研究结果显示, TiC相是在凝固过程中通过离异共晶反应形成, 钢中Ti含量增加有助于TiC颗粒的形成, 而凝固速度是影响TiC颗粒形成的主要因素, TiC颗粒的形成提高了钢的耐磨性, 但基体的硬度降低。原位自生TiC颗粒增强钢基表面复合材料是通过铸渗与界面反应相结合的方法制备而成。复合层中的碳化物为TiC和 $(Fe, Cr)_7C_3$, 复合层与铸钢母体之间有良好的冶金结合界面, 重载干摩擦磨损条件下表现出优异的耐磨性^[57]。

WCP/Fe-C表面复合材料是应用于高温高速线、棒材热轧辊环的新材料, 通过离心铸造方法制备的WC颗粒增强铁基复合材料辊环是由WCP/Fe-C表面复合耐磨层和高强韧芯部铁基体层组成, 表面复合层内WCP体积分数高达到80%~85%, 耐磨复合层厚10~30 mm, 在100 m/s滑动速度和200 N载荷下的耐磨性是高速钢的10倍, 使用寿命与硬质合金辊环相当, 成本降低50%^[58-59]。文献[60]利用真空实型铸渗技术制备的WC颗粒增强钢基表面复合材料, 研究了不同温度下的磨损性能及磨损机理, 研究表明, 表面复合层中WC颗粒体积分数24.4%, 400 ℃以下具有良好的耐磨性。消失模铸渗工

艺也是制备钢基复合材料的一种新方法, 采用消失模铸造工艺制备的SiC颗粒增强的钢基表面复合层厚度达到4 mm。但碳化硅颗粒尺寸影响复合层表面质量, 颗粒直径的增加, 复合层表面质量下降, 碳化硅颗粒直径在600~850 μm之间复合效果良好^[61]。文献[62]采用消失模铸渗技术制备的WC、Fe-Cr颗粒增强ZGMn13表面复合材料锤头, 锤头表层形成的强化相: Fe-Cr、 Cr_7C_3 、 Fe_3C 和WC使ZGMn13复合材料锤头的耐磨性相比基体合金提高了4~5.24倍。自蔓延高温合成法可以通过粉体合金间的反应在铸件表层形成复合材料耐磨层。

文献[63]采用自蔓延高温合成法制备了由Ti、 B_4C 和Ti-Fe混合粉体系反应形成的TiC和 TiB_2 颗粒增强45钢基复合材料, 并研究了 B_4C 粉末粒度对复合材料组织和性能的影响。研究表明, 随着 B_4C 粉末粒度减小, 复合层和过渡层中TiC和 TiB_2 增强颗粒数量增多, 硬度明显提高。 B_4C 粉末粒度为500 μm时, 复合材料层的硬度达到HV1 693, 大大改善了钢的耐磨性。采用粉末冶金方法先将钨铁粉、钛粉、石墨粉、高碳铬铁粉、铁粉混料烧结成预制增强坯体, 再利用铸造烧结法制备 $(Ti, W)_C_4+TiC$ 少量、WC、 Fe_3W_3C 和 M_7C_3 增强铁基表面复合材料, 可获得增强表面层与基体结合良好, 过渡层和预制体区域硬度比高铬铸铁基体更高的表面复合材料, 基体硬度达到HRC59.3, 抗磨损性能是高铬铸铁基体的1.2倍^[64-65]。构型复合材料(陶瓷颗粒非均匀分布增强钢铁基复合材料)由于具有优异的耐磨性, 成为国内外高性能耐磨材料研究和应用的热点。在非冲击磨料磨损条件下, 构型复合材料的耐磨性显著高于常规颗粒均匀分布增强的复合材料, 但在高冲击磨料磨损工况下构型复合材料的耐磨性远不如无冲击工况下的耐磨性, 甚至比基体耐磨性更差^[66]。文献[67]采用铸渗技术制备原位VC陶瓷颗粒增强钢基表面复合材料耐磨合金层, 在磨粒磨损和冲击磨损工况下, 复合层内最佳的V含量为5.5%和5.1%。复合层中原位生成VC陶瓷颗粒有微米和纳米两种尺度。在磨损过程中微米VC颗粒可抵抗磨粒对材料的划伤, 纳米VC可有效增强钢的基体。由于微米VC陶瓷和纳米VC陶瓷的双重作用使复合层的磨粒磨损性能和冲击磨损性能较Cr20白口铸铁分别提高2.5和1.9倍。

4 铸造耐磨材料的发展方向

我国铸造耐磨材料经历了从高锰钢、普通白口铸铁、合金白口铸铁、耐磨合金钢和耐磨复合材料等几个阶段的研究和发展, 基本形成了耐磨材料系列和相应的国家标准和企业标准。但在我国铸造耐磨材料的应用过程中仍存在一些误区, 多数铸造耐磨材料生产企业仍然受传统生产理念的影响, 生产的耐磨材料产

品不能满足不同工况对产品的性能要求,这就要求生产企业更新理念,改革创新,采用系列化、市场化和精准化组织生产,以满足不同工况需求的耐磨材料产品,最大限度发挥耐磨材料的潜能。未来我国耐磨材料仍然要从洁净化、合金化和复合化等方向发展。

4.1 洁净化处理

耐磨材料在熔炼过程中,其熔液质量直接影响耐磨产品的性能,往往被生产企业所忽略。众所周知,合金液中的气体和有害元素对耐磨钢的性能影响极大,无论是奥氏体锰钢、合金耐磨钢还是耐磨铸铁,控制熔炼合金液的质量可有效提高耐磨材料性能,因此,研究相应的熔炼工艺,采用熔炼+精炼技术、电渣熔铸技术均可降低耐磨合金液中的气体和有害元素,提高耐磨合金的力学性能、耐磨性和使用寿命。

4.2 新材料新工艺

耐磨材料的组织决定了其性能及产品质量,并影响着产品的使用寿命。耐磨材料组织中各相的尺寸、形态和分布对耐磨材料的力学性能、耐磨性能和使用寿命均有较大影响。加快新型耐磨材料开发,采用多元合金化+复合变质处理能充分发挥各元素的强化作用和变质作用,优化耐磨合金组织,细化晶粒,改善夹杂物和碳化物的形态和分布,这无疑是提高耐磨材料性能和使用寿命的措施。针对不同的工况条件和产品,研究与之相适应的新型耐磨材料,并配以先进的铸造工艺和优化的处理工艺,可有效改善耐磨材料的组织,消除铸造缺陷,提高产品质量、耐磨性及使用

寿命。高强韧的基体、高硬度多尺度协同作用的优质耐磨相以及耐磨相与基体良好的结合,无疑是获得优质耐磨材料的必要条件。

4.3 局部复合和原位自生复合

通过大量铸造耐磨材料产品的失效分析可知,有相当一部分铸造耐磨材料的失效是由产品局部磨损而导致的,为了节约材料,降低生产成本,采用局部复合也是一种提高产品寿命的有效方法。包括局部镶铸、局部表面铸渗、预制体局部复合等,局部复合使产品承受耐磨的部分具有高硬度高耐磨性,承载部分具有高强韧性,实现材料的最优组合,满足高强韧高耐磨的工况要求,可有效发挥不同材料的潜能。因此,研究不同耐磨件的局部复合工艺和界面特性也是耐磨材料的发展方向之一。

原位自生复合材料是通过合金元素的高温原位反应而获得局部耐磨复合材料或整体自生复合材料,原位自生复合材料未来研究焦点是合金成分设计、局部复合方式、复合工艺和界面特性等。

5 结束语

随着现代工业技术的飞速发展,高温、高速、重载等严酷工况对耐磨材料性能将提出更高要求,未来铸造耐磨材料的发展应朝着洁净化、合金化、功能化、局部复合及硬韧组合的方向发展。跨尺度协同、构型化设计、多尺度混杂复合、界面设计及调控将成为铸造耐磨复合材料未来的研究热点。

参考文献:

- [1] 宋延沛, 祝要民, 朱景芝. 回火温度对变质高碳中锰钢性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2000 (6) : 42-43.
- [2] 高波, 杨攀, 王剑. 时效处理对高锰钢组织及耐磨性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (2) : 193-195, 199.
- [3] 李卫, 邓世萍, 宋量, 等. 铸造耐磨材料 [J]. 铸造设备与工艺, 2019 (1) : 61-68.
- [4] 钟敏, 张世胜, 鲁新国, 等. 覆砂金属型铸造高锰钢衬板的组织与性能 [J]. 铸造, 2015, 64 (9) : 897-900.
- [5] 苏冬雪, 崔宇琳, 王满富, 等. 合金化处理对高碳高锰钢组织与性能的影响 [J]. 大连交通大学学报, 2018, 39 (6) : 82-87.
- [6] 廖畅, 李卫, 刘晋琿, 等. 钨对高锰钢显微组织和冲击韧性的影响 [J]. 铸造, 2011 (4) : 390-392, 396.
- [7] 李震刚, 史东丽, 曹松. 超高锰钢大型轧臼壁的试制 [J]. 热加工工艺, 2013, 13: 60-62.
- [8] 赵君壮, 刘永驰, 陈忠华, 等. 大型半自磨机超高锰钢衬板工艺优化与力学性能 [J]. 铸造, 2015, 36 (10) : 1008-1012.
- [9] 马幼平, 周淑义, 李秀兰, 等. 合金化对消失模铸造高锰钢凝固组织的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32 (6) : 555-558.
- [10] 刘燕平, 杨清, 朱福生. 钇稀土复合多元合金变质包芯线在高锰钢中的应用研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (3) : 361-368.
- [11] 彭世广, 宋仁伯, 谭志东, 等. 衬板用Fe-24Mn-7Al-1C耐磨钢的热处理工艺对组织和性能影响 [J]. 材料热处理学报, 2016, 37 (4) : 88-94.
- [12] 张祖临, 陈贵斌, 王晓颖, 等. 硼在中碳马氏体铸钢中作用的研究 [J]. 水利电力机械, 1997 (5) : 62-64.
- [13] SONG Yan-pei, LUO Quan-shun, CHEN Quan-de. Effects of RE-B modification on the strength and toughness of 30CrMn2Si cast steel [J]. Journal of Materials Science, 1994, 29: 1492-1496.
- [14] 宋延沛, 陈全德, 孙新军, 等. 稀土变质剂对中碳马氏体铸钢中夹杂的影响 [J]. 洛阳工学院学报 (自然科学版), 1990, 11 (2) : 23-29.

- [15] WANG Xiao-dong, CHEN Yun-bo, WEI Shi-zhong, et al. Effect of carbon content on abrasive impact wear behavior of Cr-Si-Mn low alloy wear resistant cast steels [J]. *Frontiers in Materials*, 2019, 6: 153.
- [16] 王珊, 刘敬平, 张冬梅. 低合金耐磨钢ZG34Mn2SiV的研制 [J]. *金属热处理*, 2016, 41 (2): 32-34.
- [17] 陈涛, 吴春京, 赵爱民, 等. 厚断面低合金耐磨钢淬火组织及成分优化 [J]. *热加工工艺*, 2016, 45 (2): 196-199.
- [18] 庄巧玲. 新型耐磨低合金钢衬板的研究与应用 [J]. *中国铸造装备与技术*, 2020, 55 (4): 93-95.
- [19] 胡海明, 朱波, 李新富, 等. 回火温度对ZG75CrMnNi Mo钢组织和性能的影响 [J]. *金属热处理*, 1995, 19 (2): 27-28.
- [20] 王星贺, 杨涤心, 谢敬佩, 等. 回火工艺对ZG70Cr2MnNiSi铸钢组织和性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2013, 38 (7): 42-45.
- [21] 孙学, 贤张戈, 袁林. 热处理工艺对低合金耐磨钢组织和硬度的影响 [J]. *内蒙古科技大学学报*, 2020, 39 (4): 343-347.
- [22] 武兆洋, 平宪忠, 郑宝超, 等. 不同水基淬火介质对ZG30CrMnSiMo低合金钢组织和耐磨性的影响 [J]. *金属热处理*, 2021, 46 (5): 60-65.
- [23] 赵云冲, 杨兴亚, 龙伟漾, 等. 热处理工艺对TBM刀盘低合金耐磨钢的耐磨性影响研究 [J]. *热加工工艺*, 2020, 49 (12): 135-137.
- [24] 宋欣, 杨海峰, 王川, 等. C-Mn-Cr-B系低合金耐磨钢组织性能的研究 [J]. *轧钢*, 2020, 37 (2): 26-33.
- [25] 杨进德, 丁旭. 淬火对Cr-Mo-Ni-Mn-Si低合金耐磨钢组织与硬度的影响 [J]. *铸造技术*, 2021, 42 (7): 613-616.
- [26] 董娜, 徐永新, 杨晓. 淬火温度对工程机械用低合金耐磨钢组织与力学性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2020, 49 (22): 123-125.
- [27] PEI Zhong-zheng, SONG Ren-bo, XU Jie, et al. The influence of holding time on the microstructure and mechanical properties of a 58CrMnSiNiMo wear-resistant cast steel during diffusion annealing [J]. *Steel Research*, 2019, 90 (9): 1900130.
- [28] 周鹏, 刘兰俊, 刘建升, 等. 两种多元合金耐磨钢的强韧化研究 [J]. *铸造技术*, 2012, 33 (3): 304-307.
- [29] 孙国栋, 刘长华, 杜晓东, 等. 锰含量对衬板用低碳高合金钢组织和性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2007, 36 (22): 1-4.
- [30] 曹燕, 张军田, 殷福星, 等. 高铬铸钢轧辊的热处理工艺及其组织和性能 [J]. *机械工程材料*, 2010, 34 (6): 13-16, 20.
- [31] 魏世忠, 徐杰. 钢铁耐磨材料研究进展 [J]. *金属学报*, 2020, 56 (4): 523-538.
- [32] YANG Yong-wei, FU Han-guang, JU Jiang, et al. Phase diagram calculation and analyze on cast high vanadium wear-resistant alloy [J]. *Metallurgical Research & Technology*, 2017, 114: 314.
- [33] JU J, Fu H G, FUu D M, et al. Effects of Cr and V additions on the microstructure and properties of high-vanadium wear-resistant alloy steel [J]. *Iron making & Steel making*, 2018, 45 (2): 176-186.
- [34] 张燕瑰, 程和法, 邵围, 等. 低铬白口耐磨铸铁组织和性能的研究 [J]. *精密成形工程*, 2011 (3): 29-31.
- [35] 车广东, 刘向东. 不同钒含量对低铬合金铸铁组织和性能的影响 [J]. *铸造*, 2014, 35 (1): 75-77.
- [36] 邹克武, 柴增田, 刘春哲. 低铬白口铸铁变质处理的研究与应用 [J]. *铸造技术*, 2017, 38 (1): 181-184.
- [37] 郭克星, 夏鹏举. 稀土铝变质处理对镍铬钼冷硬铸铁耐磨性的影响 [J]. *稀土*, 2020, 41 (2): 71-77.
- [38] 李卫. 含钨量对淬回火290Cr26MoW耐磨铸铁组织和力学性能的影响 [J]. *铸造*, 2007, 28 (12): 1262-1265.
- [39] 于洪军, 宋传颂馨, 程福超, 等. 不同热处理条件下亚共晶高铬铸铁的组织性能 [J]. *金属热处理*, 2021, 46 (8): 56-60.
- [40] 梁秀娟, 嵇海旭. 淬火工艺对Cr26高铬耐磨铸铁组织与硬度的影响 [J]. *金属热处理*, 2020, 45 (4): 141-143.
- [41] 李峰, 左立杰, 颜敏辉, 等. 球化退火及后续热处理对高铬耐磨铸铁组织与性能的影响 [J]. *铸造*, 2016, 65 (12): 1185-1188.
- [42] 张宏斌, 赵华, 蔡玉丽, 等. 余热淬火低合金马氏体球墨铸铁磨球的生产应用 [J]. *铸造技术*, 2014, 35 (7): 1581-1584.
- [43] 王志, 刘德志, 黄蕾, 等. Cu对球墨铸铁耐磨性能的影响 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40 (5): 492-497.
- [44] 宋延沛, 罗全顺, 陈全德, 等. 含铜球墨铸铁磨球的研究及应用 [C]//*耐磨材料及磨损失效分析*. 北京: 机械工业出版社, 1993: 130-134.
- [45] 胡小锋, 闫德胜, 喻传宏, 等. Cr对马氏体球墨铸铁磨球组织和性能的影响 [J]. *铸造*, 2017, 66 (6): 598-602.
- [46] 姜利坤, 锯子来, 李卫红, 等. 硼对含碳化物马氏体球墨铸铁组织和性能的影响 [J]. *铸造*, 2017, 66 (2): 192-194.
- [47] 蔺百潮, 薛小敏, 高义民, 等. 马氏体球墨铸铁磨球的研制和生产应用 [J]. *铸造技术*, 2002, 23 (5): 288-289.
- [48] 朱永长, 魏尊杰, 荣守范, 等. 双液金属复合耐磨板厚度对复合层组织和性能的影响 [J]. *材料工程*, 2016, 44 (8): 17-22.
- [49] 熊映, 刘晨辉. 双金属复合锤头的试制 [J]. *科技创新与应用*, 2019 (29): 109-110.
- [50] 冯波, 龙骏, 郑志斌, 等. 钢/铁双金属复合锤头的界面组织及性能研究 [J]. *铸造技术*, 2019, 40 (7): 667-670.
- [51] 闫志飞, 王婵, 吕建军, 等. 双金属复合锤头界面特征分析 [J]. *铸造技术*, 2016, 37 (3): 504-506.
- [52] 陈振华, 沈百令, 魏世忠, 等. 铸件表面合金化工艺的研究 [J]. *洛阳工学院学报 (自然科学版)*, 1989, 10 (4): 7-14.
- [53] 魏世忠, 魏洪涛, 吴逸贵, 等. ZG45铸造表面合金化层的组织与性能分析 [J]. *洛阳工学院学报 (自然科学版)*, 1996, 17 (3): 11-14.
- [54] 关振民, 周春英, 谢敬佩, 等. 中锰奥氏体钢的铸造表面合金化 [J]. *铸造技术*, 2004, 25 (8): 605-606, 609.
- [55] WANG Yong-fu, YANG Chang-lin, LI Jian-bin, et al. Effects of TiC formation on the microstructure and hardness of wear-resistant steel [J]. *Materials Science and Technology*, 2020, 36 (13): 1419-1430.
- [56] DU Gang, LIU Feng, LI Jian-bing. Evolution of microstructures and divorced eutectic TiC formed during solidification of the wear-resistant steel [J]. *Materials Letters*, 2020, 265: 127406.

- [57] 程凤军, 王一三, 张欣苑. 原位Fe-TiC表面复合材料的组织与耐磨性能研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36 (S3): 470-474.
- [58] SONG Yan-pei, LI Xiu-qing, BI Shuang-xu. Application research of ferrous matrix composites in roller ring used in high-speed wire/bar rolling mill [J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 6346-6349.
- [59] SONG Yan-pei, YU Hua, MAO Xie-min. Wear behavior of WCP/Fe-C composites under high-speed dry sliding [J]. Journal of Materials Science, 2008, 43 (8): 2686-2692.
- [60] 王志胜, 李祖来, 蒋业华, 等. WC颗粒增强钢基表面复合材料的高温摩擦磨损性能 [J]. 铸造, 2010, 31 (3): 280-283.
- [61] 周永欣, 赵西城, 吕振林, 等. 消失模铸渗法制备SiC颗粒增强钢基表面复合材料 [J]. 机械工程材料, 2007, 31 (5): 33-35, 54.
- [62] 谭建波, 王子超. 颗粒增强ZGMn13耐磨表面复合材料的制备 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (8): 116-118.
- [63] 韩文华, 宋博宇, 刘桂荣. B4C 粒度对45 钢基表面复合材料组织的影响 [J]. 铸造技术, 2019, 40 (10): 1067-1070.
- [64] 董晓蓉, 郑开宏, 王娟, 等. 铸造烧结法制备 (Ti, W) C表面增强铁基复合材料 [J]. 铸造技术, 2021, 42 (8): 679-682.
- [65] 张飞, 王兴宇, 李祖来, 等. WC预制体柱增强铁基复合材料的显微组织和性能 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (6): 677-680.
- [66] 卢德宏, 蒋业华. 构型陶瓷/钢铁耐磨复合材料研究进展 [J]. 精密成形工程, 2021, 13 (3): 40-48.
- [67] XU Liu-jie, WANG Fang-fang, ZHOU Yu-cheng, et al. Fabrication and wear property of in-situ micro-nano dual-scale vanadium carbide ceramics strengthened wear-resistant composite layers [J]. Ceramics International, 2021, 47 (1): 953-964.

Research Status and Application of the Cast Wear-Resistant Materials and the Future Development Trend in China

SONG Yan-pei^{1,2}, ZHOU Han¹, CHEN Dan-ping¹, LIN Xiao-li¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Hainan Vocational University of Science and Technology, Haikou570100, Hainan, China; 2. Mat.Sci.& Eng.College, Henan University of Science and Technology, Luoyang471003, Henan, China)

Abstract:

Key technologies of cast wear-resistant materials and hot process were overviewed in this article. Production and application status, the existing problems and countermeasures of the cast wear-resistant materials in china were synthetically analyzed. It is also discussed that the direction on future development on the casting wear-resistant materials, which provides a reference for the investigation of the new-type casting wear-resistant materials.

Key words: cast wear-resistant materials; application status; existing problems; future development
