DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.06.019

中速磨煤机磨辊材料及表面强化技术研究进展

牛翰卿[1,2],王晓莉[2,3],李正东[3],苏建婷[3],潘有武[3]

(1.兰州兰石集团有限公司 铸锻分公司,甘肃 兰州 730314;2.甘肃省高端铸锻件工程技术研究中心,甘肃 兰州 730314;3.兰州兰石能源装备工程研究院有限公司,甘肃 兰州 730 314)

摘　要:磨辊是中速磨煤机的关键部件,也是易损部件,其性能好坏直接影响磨煤机性能及工作效率。综述了磨辊材料和高铬铸铁表面强化技术的研究现状和进展,并展望了高铬合金铸铁涂层表面强化技术的发展方向。

关键词:磨辊材料;高铬合金涂层;电弧堆焊;等离子熔覆;激光熔覆

中图分类号:TG174　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)06-0576-04

Research Progress of Roller Materials and Surface Strengthening Technology for Medium Speed Coal Mill

NIU Hanqing[1,2], WANG Xiaoli[2,3], LI Zhengdong[3], SU Jianting[3], PAN Youwu[3]

(1. Lanzhou Lanshi Group Co., Ltd., Casting and Forging Branch, Lanzhou 730314, China; 2. Gansu Province Engineering Technology Research Center of High-end Castings and Forgings, Lanzhou 730314, China; 3. Lanzhou Lanshi Energy Equipment Engineering Institute Co., Ltd., Lanzhou 730314, China)

Abstract: Roller is a key part of medium speed coal mill, and it is also a vulnerable part. The research status and progress of grinding roller materials and surface strengthening technology of high chromium cast iron were reviewed. The development trend of surface strengthening technology of high chromium alloy cast iron coating is prospected.

Key words: grinding roller materials; high chromium alloy coating; arc surfacing; plasma cladding; laser cladding

近年来在我国制粉系统中,中速磨煤机以其效率高、电耗低、体积小等优点,备受市场青睐。磨煤机关键核心部件磨辊磨损后,磨煤机效率下降、运行维护工作量大,因此该部件材料的耐磨性能对制粉效率、产品质量和运行成本影响很大。增强磨辊的耐磨性一直是材料学者的研究重点。本文综述了磨辊材料用料及其表面强化技术方面的研究进展,以期为磨辊材料的发展和应用提供参考。

1　磨辊材料

磨辊作为磨煤机的主要碾磨部件,不仅要求具有较高的硬度,同时也需要有一定的韧性,以确保磨辊具有较好的耐磨性和使用寿命。在磨煤机磨辊材料发展历程中,可以分为四代:高锰钢,镍硬铸铁,耐磨合金钢和高铬铸铁,复合材料堆焊和陶瓷-金属基复合材料[1-3]。

收稿日期:2020-02-18

作者简介:牛翰卿(1985-),甘肃兰州人,本科,工程师.主要从事材料成型制造及研究方面的工作.电话13893465620,E-mail:1132214946@qq.com

通讯作者:王晓莉(1986-),女,甘肃兰州人,硕士,工程师.主要从事金属材料耐磨钢研究方面的工作.电话:17793132604,E-mail:wangxiaoli835808@126.com

1.1　高锰钢

高锰钢在承受剧烈冲击载荷下,接触表面会迅速出现硬化现象,因其优异的硬化能力,被广泛应用于抗冲击载荷的耐磨件[4]。但是它只有在冲击载荷足够大时才可引起表面硬化,表现出较高的硬度,耐磨性才能得到一定的提高[5]。另外,在高温或温磨的状况下面临腐蚀磨损问题,同时因其难机加工,故采用高锰钢做磨辊一般采用整体铸造。高锰钢在表面硬化的同时芯部仍能保持极强的韧性,因此高锰钢铸造的磨辊面硬内韧,表面既抗磨损整体又抗冲击。另外,高锰钢磨辊工作接触面受载荷冲击增加,硬化部分可以进一步提高其耐磨性。未充分硬化时,由于高锰钢自身硬度很低(170~230 HB),铸造高锰钢磨辊的耐磨性十分有限。因此,若不能对高锰钢磨辊表面充分硬化,其耐磨性无法充分发挥,磨辊使用寿命并不高。

1.2　镍硬铸铁

镍硬铸铁在普通白口铸铁中加入了镍和铬元素,以提高淬透性,并在铸态就可以得到硬而耐磨的马氏体基体 +M_3C 型碳化物组织。因此,镍硬铸铁磨辊能很好地抵档强硬的刮伤和犁削。同时,抗磨性能远高于非合金和低合金白口铸铁。尽管镍硬铸铁磨辊硬度高、耐磨性好,但由于其韧性不足,应用范围

较小，只有部分用于立磨辊[6]。

1.3 耐磨合金钢和高铬铸铁

20 世纪后半叶以来，随着各类合金钢和高铬铸铁的发展，高锰钢和镍硬铸铁逐步退出，而由合金钢和高铬铸铁逐步替代[6]。耐磨合金钢可以通过调整其含碳量、加入合金元素以及适当的热处理，可以使磨辊在磨损工况下具有较高的强度、硬度、韧性和耐磨性。然而，由于其制造成本高，应用不够广泛[7]。

高铬铸铁具有优良的耐磨性，其硬度、韧性和耐磨性均优于镍硬铸铁，已广泛应用于制造各种耐磨产品[8,9]。高铬铸铁（高铬白口抗磨铸铁）较白口铸铁具有更高的韧性和强度，耐磨性比合金钢更优，同时兼有良好的抗高温和抗腐蚀性能[9]。高铬铸铁基体为马氏体，碳化物为六方晶系的$(Fe,Cr)_7C_3$，呈六角棒状、针状或条状，可以改善力学性能，增强其耐磨性。例如，煤粉属于软磨粒、低应力管道磨料磨损，高铬铸铁可以发挥优良的性能[10]。目前，最常用的是 Cr20 系高铬铸铁，与其它铬系铸铁相比，Cr20 具有硬度高、韧性好、耐磨性能优良的特点[11]。

利用高铬铸铁制造磨辊，一般整体铸造后再通过机加工制造。然而，高铬铸铁机加工性能较差，不利于后续机加处理，故常采用降低铬含量来提高加工性能[12,13]。高铬铸铁的硬度和耐磨性随铬含量增加而降低，硬度和耐磨性相应变差。另外铬含量越高，材料脆性增加，铬含量越低，材料韧性越好。总之，高铬铸铁磨辊硬度高、耐磨性好，但是在立式磨的高冲击条件下，韧性不足，磨损速度快，更换周期短，维护费用高。

1.4 复合材料堆焊和陶瓷/金属基复合材料

近 20 年来，为了解决耐磨件材料硬度与韧性之间的矛盾，陶瓷 / 金属基复合材料被广泛地应用于制造磨煤机耐磨件[6]。陶瓷 / 金属基复合材料磨辊密度低、强度高、硬度高和耐磨性高，并兼有高韧性和可加工性，陶瓷粒子的分散性和界面润湿性很大程度上决定了陶瓷 / 金属基复合材料的性能。由于密度差异，导致陶瓷粒子在金属熔体的表面悬浮，难以确保界面润湿反应，从而降低该材料使用性能[14,15]。

陶瓷颗粒增强硬质相主要为碳化钨、氮化钛、硼化钒、硅化钼等金属陶瓷，或者是 Al_2O_3、ZrO_2、ZTA（氧化锆增韧氧化铝）等非金属高硬韧特殊陶瓷。基体金属材料主要有高铬铸铁、高锰钢、耐热钢、合金钢、碳钢、球墨铸铁等[16-18]。

复合材料堆焊是根据实际磨煤机磨辊辊芯形状大小，利用低合金铸钢铸造出毛坯，然后机加工出辊芯外形，然后依据所需实际辊体尺寸，在辊芯外围依次堆焊打底层、过渡层、耐磨层。利用复合材料堆焊的磨辊可以使材料的性能优势充分发挥，达到延长磨辊使用寿命的效果。缺点是过渡层可能存在脆性交界面，当受到冲击载荷作用时可能导致堆焊层剥离[19,20]。另外，堆焊工艺往往需要反复热循环，因此会造成堆焊层组织和成分的不均匀分布，影响磨辊的使用性能。

2 表面强化技术

在磨辊实际生产过程中，需考虑其硬度、耐磨性及切削性能之间存在的问题，硬度的强化常常仅限于磨辊表面。因此，开展磨辊表面强化技术研究，对其综合使用性能的提升有重要意义[21]。

2.1 电弧堆焊

高铬合金铸铁堆焊熔覆不仅可以大幅度的提高堆焊零部件的使用寿命，而且堆焊修复所需成本可能是更换零部件的一半，甚至更低。高铬铸铁堆焊合金的基本成分为：1.5%~5.0%C，15%~32%Cr，适量加入 Ni、Si、Mn、B、Nb、Co、Mo、Cu 和 RE 等。堆焊层的基体组织中分布有大量的残余奥氏体+共晶碳化物，其中初生碳化物$(Cr,Fe)_7C_3$呈细长杆状，硬度可达到 1 300～1 800 HV，可使基体与碳化物的结合作用极大地增强，碳化物为堆焊层中主要的抗磨相。高铬铸铁堆焊修复的耐磨层中初生碳化物的生长随含碳量增加，其生长方向垂直于堆焊层表面[23,24]。在堆焊材料中加入某些合金元素，可改善高铬铸铁堆焊合金的性能。当加入 0.1%~0.9%B 时，堆焊层中硬质相$(Cr,Fe)_7C_3$的密度随 B 元素含量的增加而显著增加[20]。当 4%~5%B 时，堆焊层中会形成大量的 FeB，可显著改善堆焊层的耐磨性和硬度。应力释放致使堆焊层金属的裂纹倾向很大，会在表面产生细密的网状裂纹，这有利于防止堆焊层大面积剥落。实践表明，堆焊层表面的裂纹不会扩展，对耐磨性无明显的影响。堆焊前，须用砂轮将待焊磨辊表面的砂眼、裂纹或局部剥落等缺陷清理并磨平整。堆焊时首先堆焊过渡层，待过渡层堆焊完成后再堆焊耐磨层，最后进行去应力处理。

2.2 等离子弧熔覆

等离子弧熔覆是在基材表面添加熔覆材料，利用高能密度的等离子弧使之与基材表层熔凝，在基材表层形成冶金合金涂层。等离子弧主要有激光束、电子束、离子束等，由于其能量密度高，穿透性强，广泛应用于金属表面修复或改性[24,25]。

张国栋[20]以 Q235 为堆焊基体材料，实验堆焊粉末采用高铬铸铁合金粉末和含 30%WC 的高铬铸铁基粉末，高铬铸铁堆焊层的平均硬度为 1 243 HV，而 WC 增强型的平均硬度为 1 632 HV，堆焊层材料向母材扩散程度非常有限，这样可以有效地保证堆焊层各项性能的完整。但是 WC 增强型高铬铸铁的耐磨性略低于高铬铸铁，这可能是其硬质相缺乏基体的支撑作用，易产生破碎和剥落所致。

采用 Fe-C-Cr 合金粉末在 C 级钢表面做等离子熔覆试验，在 900 ℃高温氧化熔覆层仍然具有良好的抗氧化性能，且抗氧化性比调质 C 级钢提高 2 倍[26]；在 600 ℃高温干滑动磨损条件下，熔覆层同样具有优异的耐磨性。

在 45 钢表面熔覆铁基合金涂层，熔覆层组织由平面晶、胞状晶、树枝晶、等轴晶、共晶体、大块碳、硼化合物等组成，等离子熔覆层的主要相为 $M_{23}C_6$、Fe_2B、γ-Fe(Me)等，熔覆层的显微硬度是基体硬度的 3～4 倍[27]。E. Q. Correa 等人通过等离子弧制备的 Fe-Cr-C-Nb-V 堆焊合金，大量的 NbC 弥散分布在亚稳态的奥氏体基体中，V 有效地细化了硬质相，比高碳高铬合金具有更好的耐磨性和韧性。工件经过等离子弧熔覆以后，表明硬度明显提高，使得熔覆曾具有良好的耐磨性。研究认为熔覆曾耐磨主要有四大原因，分别为①固溶强化；②细晶强化；③弥散强化；④沉淀强化。

2.3 激光熔覆

激光束比等离子弧的能量密度更为集中，所以对激光照射不到的部位影响极小，因此快速凝固时表面可生成细小晶粒组织或亚结构，同时在熔覆表层形成弥散分布的碳化物硬质相，使熔覆层具有良好的耐磨性。由于激光束较为集中，所以基体受到的热影响较小、不易变形。通过激光束熔覆不同材料，可得到具有不同耐磨、耐腐蚀、耐高温抗氧化性能的熔覆层，达到改善材料表面性能的目的，并降低贵重金属的消耗。激光熔覆材料体系主要有铁基合金，镍基合金，钴基合金及金属陶瓷等[28-30]。其性能取决于熔覆层的组织和相组成，而其化学成分和加工工艺又决定了熔覆层的组织结构。

采用 5 kW 横流 CO_2 激光器在高铬铸铁表面进行激光熔覆试验，当熔覆速率增加时，可以获得的组织由细小变得粗大，熔覆层和基体的结合是冶金结合，并且熔覆层的显微硬度高于原高铬铸铁基材，可以达到 62 HRC[31]。对比发现，高铬铸铁激光熔覆层平均硬度比电弧堆焊层提高了 300 HV，熔覆层回火后耐磨性好，相同条件下磨损质量减少 50%以上[28]。

3 存在的问题与展望

高铬合金铸铁因其硬度高、耐磨性好而被广泛应用于粉磨设备中，但是其长时间工作依然会导致缓慢磨损，进而导致磨损量过大而使粉磨效率急剧下降。因此，磨辊的修复也得到了广泛的关注和研究。今后应该从以下几个方面开展工作：

(1)增强高铬合金堆焊涂层的韧性，降低堆焊涂层的开裂倾向，采用后处理工艺改善合金堆焊涂层的性能。

(2)针对磨辊堆焊合金涂层时的预热处理和后热处理进行研究，预热可以一定程度上防止裂纹的产生，但不能完全避免。

(3)改善合金碳化物的分布和形态，并通过优化合金元素来改良高铬合金铸铁的性能，使其既保持高硬度，又具有良好的韧性。

参考文献：

[1] 李茂林. 我国金属耐磨材料的发展的应用[J]. 铸造，2002, 51(9): 525-529.
[2] 符寒光. 铸造金属耐磨材料研究的进展 [J]. 中国铸造装备与技术, 2006, (6): 2-6.
[3] 李卫，王洪发，周平安，等. 耐磨材料与磨损技术新进展—21 世纪全国耐磨材料大会评述[J]. 铸造，2001，50(1): 7-13.
[4] 马歆. 新型高锰钢衬板的组织及性能的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学，2015.
[5] 邵飞杰. 高锰钢热处理工艺及其冲击磨料磨损研究[D]. 长沙：湖南大学，2014.
[6] 王超，蔡红. 磨煤机耐磨件的研究进展[J]. 热处理，2014，29(6): 1-4.
[7] 张华聪，胡庆权，高立发. 中速磨煤机耐磨材料研究及应用[J]. 重庆电力高等专科学校学报，2017,22(1): 48-49.
[8] 齐纪渝，杨企泰，贾建民，等. 中速磨煤机高铬铸铁易磨损件的研究与试制[J]. 华北电力学院学报，1995，22(3): 35-40.
[9] 杨威，潘健，黄智泉. 高铬铸铁合金研究与发展的探讨[J]. 新世纪水泥导报，2010，16(1): 42-46.
[10] 龚正春，刘产军. 热处理对高铬铸铁磨损特性的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报，2001，6(6): 58-62.
[11] 张金山，赵沛廉，覃静. Cr20-Ni1-Mo2-Cu1高铬铸铁热处理工艺的研究[J]. 太原工业大学学报，1994，25(1): 86-91.
[12] 项海亮，姚成武，李铸国. 高铬铸铁合金涂层的研究进展[J]. 热加工工艺，2012，41(14): 156-160.
[13] 姚庭奎. 热轧连轧机用高铬铸铁轧辊的生产 [J]. 热加工工艺，2010，39(3): 170-172.
[14] 范志国，王飚. 金属基陶瓷复合材料的制备方法及其新进展[J]. 昆明理工大学学报，2003，28(4): 49-56.
[15] 张玉军，尹衍升. 金属基化合物 / 陶瓷复基合材料研究进展[J]. 兵器材料科学与工程，2000，23(8): 8-11.

（下转第 587 页）

行了探索和建设进行了探讨，详述了 3D 打印梦工厂建设方案：通过完善教学设施建设，实现传统基础实训、开放性创新实验和 steam 教学相结合的全新的教学模式。增强了学生的实践学习兴趣，推动了学生的创新创业教育与思政教育的融合发展，提升了学生从创意到创新创业的动手能力，提高了 3D 打印模块所有设备的利用率，得到学生、实训指导人员以及学校一致好评。3D 打印梦工厂的建设模式为其他模块的发展建设提供了参考，并给国内高校工程训练中心的模块建设提供借鉴作用。

参考文献：

[1] 周学智，吴小林. 适应新工科发展要求提升学生工程实践素养[J]. 中国高校科技，2019(Z1):73-75.

[2] 章云，李丽娟，杨文斌，等. 新工科多专业融合培养模式的构建与实践[J]. 高等工程教育研究，2019(2):50-56.

[3] 姜晓坤，朱泓，李志义. 新工科人才培养新模式[J]. 高教发展与评估，2018，34(2):17-24，103.

[4] 周珂，赵志毅，李虹. "学科交叉、产教融合"工程能力培养模式探索[J]. 高等工程教育研究，2019(3):33-39.

[5] 刘吉臻，翟亚军，荀振芳. 新工科和新工科建设的内涵解析——兼论行业特色型大学的新工科建设 [J]. 高等工程教育研究，2019(3):21-28.

[6] 林健. 面向未来的中国新工科建设 [J]. 清华大学教育研究，2017，38(2):26-35.

[7] 纪阳，吴振宇，尹长川. 适变能力、工程认知与敏捷教改[J]. 高等工程教育研究，2018(6):139-144.

[8] 王爱华，余艳，霍国良，等. 全开放工程训练教学模式的探索与创新[J]. 实验室研究与探索，2018，37(10):171-175.

[9] 王文成，侯崇升，吴小进，等. 实验室开放管理的新工科人才培养探索[J]. 实验室研究与探索，2019，38(6):231-234.

[10] 卿剑波，陈松茂，鲁忠臣，等. "7-11"式工程训练开放实验室探讨及实践[J]. 实验室研究与探索，2017，36(8):166-168.

[11] 朱妍妍，李忠新，吕唯唯. 基于 3D 打印技术的开放实验教学模式探索与实践[J]. 实验技术与管理，2017，34(7):192-195.

[12] 马红亮，王琳，特伦斯·卡瓦诺，等. 应用 3D 打印提升空间能力的有效性研究[J]. 开放教育研究，2019，25(3):113-120.

[13] 高奇，曾红，张德强. 基于 3D 打印技术的快速模具制造开放实验探讨[J]. 实验技术与管理，2016，33(1):205-207.

[14] 吴爱华，侯永峰，杨秋波，等. 加快发展和建设新工科主动适应和引领新经济[J]. 高等工程教育研究，2017(1):1-9.

[15] 杨南粤，周敏，李争名. 基于 3D 打印技术的产品开发与模具设计实训教学[J]. 实验室研究与探索，2017，36(8):243-246.

[16] 王晓岗，许新华，郝志显，等. 以培养本科生自主学习能力为目的的大型仪器开放实验教学 [J]. 实验室研究与探索，2019，38(6):181-184，234.

（上接第 578 页）

[16] 陈忠华，熊晖，孙桂祥. 耐磨铸件铸渗陶瓷技术的初探[J]. 新世纪水泥导报，2015，2(2): 10-15.

[17] AIA Engineering Ltd., Metal matrix ceramic composites with improved wear resistance[P]. WO: 2013084080Al, 2013-06-13.

[18] 李宗耀，温新林，刘伟. 陶瓷金属复合材料在磨煤机中的应用[J]. 电站辅机，2018，39(3): 33-37.

[19] 智慧，王清宝. Fe-Cr-C 耐磨堆焊合金中初生碳化物生长方向的控制[J]. 焊接学报，2004，25(1):103-106.

[20] 张国栋，李莉，曹红美. 离子弧堆焊 WC 增强型高铬铸铁的组织和性能[J]. 中国表面工程，2015，28(6): 111-118.

[21] 谢晓利. 磨辊材料及铸造强化技术的研究进展 [J]. 铸造技术，2016，37(3): 452-454.

[22] 曹红美，张国栋，徐锦飞，等. 等离子堆焊 Q235 电解打壳锤头的组织和性能[J]. 中国表面工程，2012,25(3): 47-51.

[23] Palani P K, Murugan N. Development of mathematical models for prediction of weld bead geometry in cladding by flux cored arc welding [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 30(7): 669-676.

[24] 卢金斌，梁存，彭竹琴. 等离子弧熔覆添加 Al_2O_3+TiO_2 铁基合金涂层组织和耐磨性[J]. 焊接学报，2008，29(12): 33-36.

[25] 吴玉萍. 等离子弧熔覆 Fe 基合金 +TiC 涂层中的陶瓷相行为与相结构[J]. 焊接学报，2001，22(6): 89-91.

[26] 刘均波. 离子熔覆高铬铁基涂层高温耐磨性与耐空蚀性 [J]. 潍坊学院学报，2010，10(4): 1-4.

[27] 高华. 中碳钢等离子熔覆 Fe 基合金涂层的研究[D]. 南京：河海大学，2008.

[28] 孙宜华，李晨辉，熊惟皓，等. 铁基高铬合金激光熔覆层和堆焊层的组织性能对比[J]. 机械工程材料，2008，32(1): 59-62.

[29] 张瑞林，李林杰，唐明奇，等. 激光熔腐技术的研究进展[J]. 热处理技术与装备，2017，38(3): 7-10.

[30] 王璐，胡树兵，单炜涛，等. 激光熔腐 NiCrMn-WC 复合涂层的组织与耐磨性[J]. 中国有色金属学报，2014，24(1): 145-151.

[31] 陈长军，张敏，常庆明，等. 高速钢轧辊的激光熔覆试验研究[J]. 热加工工艺，2009，38(8): 79-81.

精铸用

石英砂、石英粉、铝矾土、高铝砂

灵寿县德泰矿产品有限公司是一家专业从事非金属矿物的生产厂家，设备先进，技术力量雄厚。

让客户满意是我们的宗旨

化学成分

石英砂	石英粉	铝矾土	高铝砂
SiO_2≥98.7%	SiO_2≥98.7%	Al_2O_3≥55%	Al_2O_3≥52%

地　址：河北省灵寿县洞里工业区
电　话：0311-82617801(传真)，15175156717
联系人：刘喜亮