

高硬韧钢铁耐磨材料技术

——兼评我国铸造钢铁耐磨材料技术进展及发展趋势

李卫^{1, 2}

(1. 暨南大学先进耐蚀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: 重点介绍近15年我国高硬韧铸造钢铁耐磨材料产业技术进展及发展趋势。分别阐释和评述了我国钢铁耐磨材料产业及技术概况, 高硬韧耐磨损钢铁材料理论与实践成果, 耐磨奥氏体锰钢、耐(抗)磨白口铸铁、非锰系耐磨合金钢、耐磨球墨铸铁和耐磨铸造复合材料的技术, 耐磨件铸造工艺、耐磨件热处理工艺和耐磨钢铁铸件机械加工工艺技术。磨损工况研究与工业磨损工况模拟及磨损评价技术。我国钢铁耐磨材料与铸件标准化体系。钢铁耐磨材料与铸件产业技术发展趋势。

关键词: 耐磨材料; 钢铁; 高硬韧性; 耐磨性; 铸造; 热处理

1 钢铁耐磨材料产业及技术概况

我国摩擦、磨损和润滑领域年消耗材料约占GDP的3%~5%。磨损、腐蚀与断裂是材料的三大失效方式。磨料磨损工况是消耗钢铁耐磨材料及耐磨件最快的磨损工况。钢铁耐磨件主要用于矿业、冶金、建材、电力、建筑、国防、船舶、铁道、化工和机械工业中的磨料磨损工况, 特别是用于矿业和冶金工业采矿挖掘机和破碎机, 选矿磨矿机(球磨机、半自磨机、自磨机), 金属轧机, 建材工业水泥厂球磨机, 砂石厂矿破碎机和挖掘机, 电力工业燃煤电厂磨煤机等。用量较大的7大类钢铁耐磨件: 筒式磨机磨球与磨段, 筒式磨机衬板, 破碎机耐磨件, 挖掘机斗齿类耐磨件, 渣浆泵过流件与耐磨管道, 轧辊与辊环, 耐磨钢板。我国用于磨料磨损工况的钢铁耐磨材料及耐磨件年用量超500万吨, 我国是世界耐磨损钢铁材料生产和应用最大的国家。矿业、冶金、电力、建材、建筑和机械等工业的破碎、挖掘、研磨、泵送和轧制等机械装备大量消耗钢铁耐磨件。

钢铁耐磨材料及耐磨件产业, 已成为相对独立的行业产业; 钢铁耐磨材料及耐磨件技术, 已成为相对独立的专业领域。钢铁耐磨材料及耐磨件, 通常是合金钢铁及耐磨件。为发挥材料潜力通常须经淬火回火等热处理工序, 形成冶炼-铸造和(或)锻压-热处理-机械加工生产流程(工序)。钢铁耐磨材料与铸件企业, 通常既生产耐磨铸钢件, 也生产耐磨铸铁件, 甚至生产耐磨复合材料铸件, 其“综合性”与众不同。各种钢铁耐磨材料及耐磨件往往有着相同或相似的用户群体, 国内外市场较大且较集中。

钢铁耐磨材料及耐磨件产业技术或成形方式常常分为4大类: (1) 铸造, 钢铁耐磨材料及耐磨铸件是产销量最大的类别, 例如: 磨机衬板、锤头、轧臼壁、破碎壁、颚板、板锤、斗齿、筒式磨机磨球与磨段、磨辊和磨盘衬板; (2) 锻压(压力加工), 也是较大类别, 例如: 锻造磨球、(热)轧制磨球、(热)轧制耐磨钢板; (3) 堆焊, 例如: 堆焊耐磨钢板、堆焊磨辊衬板; (4) 粉末冶金, 例如: 小型硬质合金件。本文以下将重点介绍我国高硬韧铸造钢铁耐磨材料技术进展及发展趋势。

作者简介:

李卫(1963-), 男, 教授, 教授级高工, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为金属耐磨材料。E-mail: Lwxasn@sohu.com

中图分类号: TG246

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

06-0705-16

基金项目:

国家重点研发计划项目2017YFB0305100; 广东省科技计划项目2017B090903005。

收稿日期:

2025-04-07。

过去15年，是我国钢铁耐磨材料和耐磨件产业及技术发展的特殊时期和高速增长阶段。2008年李卫教授和宋量教授级高工牵头提议并组建中国铸造协会耐磨材料与铸件分会，该耐磨协会是国家认可的关于金属耐磨材料的国家二级学协会组织；2009年李卫提出高硬韧耐磨损钢铁材料理论，并在其后不断完善且用于耐磨损钢铁材料设计、研发与应用；2010年暨南大学组建国家钢铁耐磨材料产业技术创新战略联盟（依据国家科技部文件，国内行产学研用38个骨干单位共建）；2010年（西安交大）、2013年（河南科技大学）、2015年（暨南大学）钢铁耐磨材料行业（专业）“节材耐磨损钢铁材料制造技术研发与工业应用”等3项标志性科技成果获得国家科技奖二等奖；2009年开始研制，2011年行业内发布并于2013年在机械工业出版社出版《中国铸造耐磨材料产业技术路线图》^[1-2]，见图1，特别是配套于“中国制造2025”路线图的图形版^[1-2]（图2），引领了行业产业技术发展；2015年国家发展改革委批准依托暨南大学组建“高性能金属耐磨材料技术国家地方联合工程研究中心”，该创新平台是我国第一个以“耐磨材料”命名的国家级研发创新平台；2018年暨南大学牵头组建全国铸造标准化技术委员会耐磨材料与铸件分技术委员会（SAC/TC54/SC8），建立和完善我国钢铁耐磨材料与

铸件标准化体系。过去15年，基本进行两轮钢铁耐磨材料与铸件国家标准（GB）（10项）和机械行业标准（JB）（9项）制修订，国标和行标较全面体现出我国钢铁耐磨材料与铸件共性技术进展，并且开始以我国国标为基础制修订ISO国际标准。过去15年，中铸协耐磨材料与铸件分会连续举办15届中国耐磨材料与耐磨件年会，连续编印刊发22卷（期）《中国耐磨材料与耐磨件》会刊，成功搭建全国较大规模的“金属耐磨材料与耐磨件”互动交流平台，并在行业内产生较大影响。



图1 《中国铸造耐磨材料产业技术路线图》

Fig. 1 Technical roadmap of China's foundry wear resistant materials industry

中国铸造耐磨材料产业技术路线图(图形版)

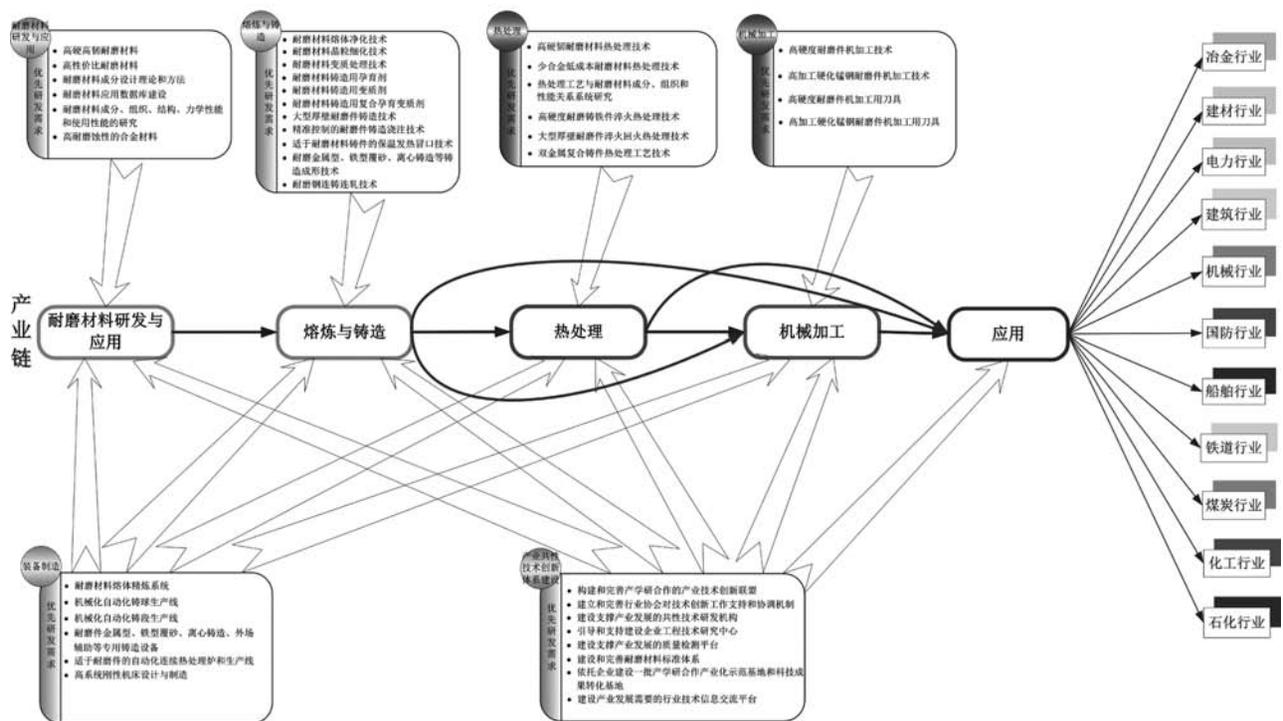


图2 《中国铸造耐磨材料产业技术路线图》图形版

Fig. 2 Technical roadmap of China's foundry wear resistant materials industry

也因如此, 本文将重点介绍近15年我国高硬韧铸造钢铁耐磨材料技术进展及发展趋势, 并以“产业技术”为重点。

2 钢铁耐磨材料与铸件行业产业技术

钢铁耐磨材料与铸件行业产业技术常用于磨料磨损工况, 概括为1个耐磨材料技术理论: 高硬韧耐磨损钢铁材料理论; 5大类钢铁耐磨材料技术: 耐磨奥氏体锰钢、耐磨白口铸铁(抗磨白口铸铁)、耐磨钢(非锰系)(铸钢、锻钢、轧钢)、耐磨球墨铸铁、耐磨铸造复合材料(双金属、镶铸、铸渗、陶瓷颗粒或预制体增硬金属基复合材料等)。

用量较大的这5大类钢铁耐磨材料, 构成钢铁耐磨材料主要体系。钢铁耐磨件按生产方式分类, 钢铁耐磨材料以铸件为主, 锻轧件为辅。宏观、区域(局部)和微观硬韧性匹配贯穿钢铁耐磨材料的设计、研发、生产与应用。

2.1 高硬韧耐磨损钢铁材料理论与实践

该理论要点是耐磨损钢铁材料高硬韧性匹配。

(1) 磨料磨损工况, 钢铁耐磨材料(宏观、区域(局部)、微观)高硬度与高韧性的良好匹配;

(2) 硬度包括磨损硬化能力和初始硬度, 磨损硬化能力包括磨损硬化硬度、磨损层厚度、磨损硬化率, 以磨损硬化硬度为主;

(3) 耐磨性用简单的硬度与韧性指标表征: 关系模型: 【耐磨性 = $A \times (\text{磨损硬化硬度HRC}) + B \times (\text{韧性}) + C \times (\text{初始硬度HRC})$, 其中系数 $A > B > C$, 韧性应为平面应变断裂韧性(冲击韧性可一定程度上代替断裂韧性)】。例如: 中碳低合金马氏体耐磨钢的硬韧性配合模型: 【 $\text{HRC} = 50 + 2.5X$; $KW_2 = 200 - 50X$, 其中 X 可取 $-1, 0, 1, 2, 3$ 】^[2], 同一中碳低合金马氏体耐磨铸钢硬韧性匹配, 体现出了较高的硬韧性配合: $\text{HRC}47.5$ 的钢, KW_2 约 250 J ; $\text{HRC}50$ 的钢, KW_2 约 200 J ; $\text{HRC}52.5$ 的钢, KW_2 约 150 J ; $\text{HRC}55$ 的钢, KW_2 约 100 J ; $\text{HRC}57.5$ 的钢, KW_2 约 50 J 。

钢铁耐磨件高硬韧性匹配设计与应用, 即合理范围内钢铁耐磨材料及耐磨件硬度与韧性调控匹配: ①耐磨件宏观整体硬韧性匹配设计与应用, 例如: 中高碳低合金贝氏体钢衬板; ②耐磨件局部区域硬韧性匹配设计与应用, 例如: 中碳低合金分区马氏体-贝氏体-珠光体钢斗齿; 金属陶瓷预制体局部增硬合金钢大型锤头; ③耐磨件微观组织硬韧性匹配设计与应用, 例如: 过共晶高碳高铬铸铁渣浆泵过流件(碳化物/基体匹配设计调控)。钢铁(基)耐磨材料及耐磨件硬韧性匹配更优, 因此其应用更广。

过去15年, 在高硬韧耐磨损钢铁材料理论引领下, 行业产业重点开展了高硬韧钢铁耐磨材料技术和产品研发及产业化。

2.2 耐磨奥氏体锰钢

100余年高锰钢(铸造高碳高锰钢)经久不衰, 迄今仍是强烈冲击磨损工况的首选材料。水韧处理后高锰钢显微组织主要是高碳奥氏体, 高碳奥氏体具有较好的磨损硬化和冲击硬化潜能^[3], 因此国内外常将高碳奥氏体高锰钢和中锰钢统称为奥氏体锰钢。当下奥氏体锰钢又常常细分为: Mn13系高锰钢, Mn7系中锰钢, Mn18系(或Mn17系)高锰钢(或超高锰钢), Mn21系(超高锰钢), Mn25系(超高锰钢)。

修改采用ISO 13521: 2015《Austenitic manganese steel castings》并兼具中国特色的中国国家标准GB/T 5680—2023《奥氏体锰钢铸件》^[4], 集中体现了近年来国内外高锰钢及其铸件共性技术进展。

以圆锥式破碎机轧臼壁和破碎壁、旋回式破碎机衬板、大中型颚式破碎机颚板、大型锤式破碎机锤头、大型挖掘机斗齿、坦克等战车履带板和铁路辙叉等为主要目标产品, 国标GB/T 5680—2023《奥氏体锰钢铸件》列入11个共性技术奥氏体锰钢牌号, 分别是ZG120Mn7Mo、ZG110Mn13Mo、ZG100Mn13、ZG120Mn13、ZG120Mn13Cr2、ZG120Mn13W、ZG120Mn13CrMo、ZG120Mn13Ni3、ZG90Mn14Mo、ZG120Mn18和ZG120Mn18Cr2, 其中与ISO 13521: 2015不同并具有中国特色的牌号是ZG120Mn13W和ZG120Mn13CrMo, 其中国内外产销量较大的牌号是ZG120Mn13Cr2、ZG120Mn13CrMo、ZG120Mn18和ZG120Mn18Cr2。11个共性技术奥氏体锰钢牌号及主要化学成分见表1, 共性技术特征是高C、高Mn(只有1个中Mn钢)、低Si和低P。

11个共性技术奥氏体锰钢及其铸件室温条件下布氏硬度应不高于HBW300。经水韧处理后的ZG120Mn13、ZG120Mn13Cr2、ZG120Mn13W、ZG120Mn13CrMo、ZG120Mn13Ni3、ZG120Mn18和ZG120Mn18Cr2奥氏体锰钢及其铸件的室温拉伸性能和冲击性能应符合表2的规定。

“含碳化物高锰钢”是近年关键技术之一。高锰钢屈服强度较低($\geq 370 \text{ MPa}$), 大型半自磨机衬板应用高锰钢常容易变形, 致使衬板早期失效。这一生产实践要求高锰钢屈服强度提高到 $\geq 450 \text{ MPa}$, 成为关键技术难题。通过材料设计和工艺技术研发, 开发出一定体积分数碳化物增强(硬)“高锰钢基复合材料”——“含碳化物高锰钢”。其技术特征是钢降低少部分韧性, 同时获得高强韧和高硬韧配合, 解决高

表1 奥氏体锰钢铸件的材料牌号及主要化学成分
Tab. 1 Material grades and main chemical compositions of austenitic manganese steel castings $w_B/\%$

| 材料牌号 ^a | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | W |
|-------------------|-----------|---------|-------|--------|--------|---------|---------|-----|---------|
| ZG120Mn7Mo | 1.05~1.35 | 0.3~0.9 | 6~8 | ≤0.060 | ≤0.040 | — | 0.9~1.2 | — | — |
| ZG110Mn13Mo | 0.75~1.35 | 0.3~0.9 | 11~14 | ≤0.060 | ≤0.040 | — | 0.9~1.2 | — | — |
| ZG100Mn13 | 0.90~1.05 | 0.3~0.9 | 11~14 | ≤0.060 | ≤0.040 | — | — | — | — |
| ZG120Mn13 | 1.05~1.35 | 0.3~0.9 | 11~14 | ≤0.060 | ≤0.040 | — | — | — | — |
| ZG120Mn13Cr2 | 1.05~1.35 | 0.3~0.9 | 11~14 | ≤0.060 | ≤0.040 | 1.5~2.5 | — | — | — |
| ZG120Mn13W | 1.05~1.35 | 0.3~0.9 | 11~14 | ≤0.060 | ≤0.040 | — | — | — | 0.9~1.2 |
| ZG120Mn13CrMo | 1.05~1.35 | 0.3~0.9 | 11~14 | ≤0.060 | ≤0.040 | 0.4~1.2 | 0.4~1.2 | — | — |
| ZG120Mn13Ni3 | 1.05~1.35 | 0.3~0.9 | 11~14 | ≤0.060 | ≤0.040 | — | — | 3~4 | — |
| ZG90Mn14Mo | 0.70~1.00 | 0.3~0.9 | 13~15 | ≤0.070 | ≤0.040 | — | 1.0~1.8 | — | — |
| ZG120Mn18 | 1.05~1.35 | 0.3~0.9 | 16~19 | ≤0.060 | ≤0.040 | — | — | — | — |
| ZG120Mn18Cr2 | 1.05~1.35 | 0.3~0.9 | 16~19 | ≤0.060 | ≤0.040 | 1.5~2.5 | — | — | — |

a: 可加入微量V、Ti、Nb、B和RE等元素。

表2 奥氏体锰钢及其铸件的拉伸和冲击性能
Tab. 2 Tensile and impact properties of austenitic manganese steel and its castings

| 牌号 | 屈服强度 | 抗拉强度 | 断后伸长 | 冲击吸收 |
|---------------|-----------------------|------------------|----------|--------------------|
| | $R_{p0.2}/\text{MPa}$ | R_m/MPa | 率 $A/\%$ | 能量 KU_2/J |
| ZG120Mn13 | ≥370 | ≥700 | ≥25 | ≥118 |
| ZG120Mn13Cr2 | ≥390 | ≥735 | ≥20 | ≥96 |
| ZG120Mn13W | ≥370 | ≥700 | ≥25 | ≥118 |
| ZG120Mn13CrMo | ≥390 | ≥735 | ≥20 | ≥96 |
| ZG120Mn13Ni3 | ≥370 | ≥700 | ≥25 | ≥118 |
| ZG120Mn18 | ≥370 | ≥700 | ≥25 | ≥118 |
| ZG120Mn18Cr2 | ≥390 | ≥735 | ≥20 | ≥96 |

锰钢屈服强度较低、容易变形的难题，“含碳化物高锰钢”衬板，较成功应用于冶金矿山半自磨机。

锰钢材料各有特点，应分类使用。“高锰钢与超高锰钢选材研究与优化应用技术”是近年关键技术之一。Mn13系高锰钢适用于中小冲击磨料磨损工况，磨损中磨损硬化效果较好，硬韧性配合良好，见图3；Mn18系超高锰钢适用于中大冲击磨料磨损工况，磨损中磨损硬化效果较好，硬韧性配合良好，见图4。

耐磨铸造奥氏体锰钢近年技术进步还包括冶金质量的提高。P和S含量减少，特别是控制较低的P含量（≤0.04%）。氢和氧等气体含量减少。合金元素使用更科学：Cr、Mo、W、Ni；V、Ti、Nb、Zr、RE，依据具体磨损工况选材应用。控制晶粒度，细化晶粒。钢热处理表面氧化减少（例如：密封较好的罩式炉应用），热处理（水韧处理）效率和效果提高。进而充

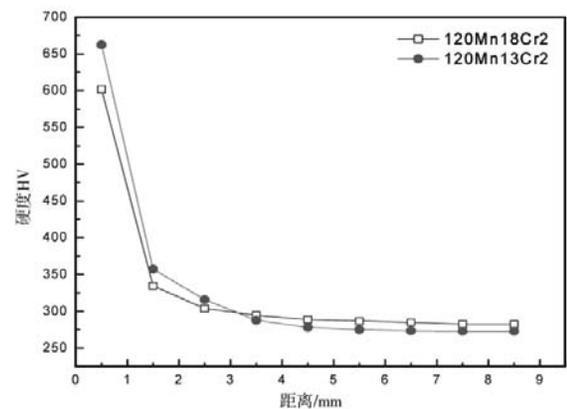


图3 冲击磨料磨损试验机1 J冲击能量下锰钢的磨损硬化曲线
Fig. 3 Wear hardening curve of manganese steel under 1 J impact energy of impact abrasive wear testing machine

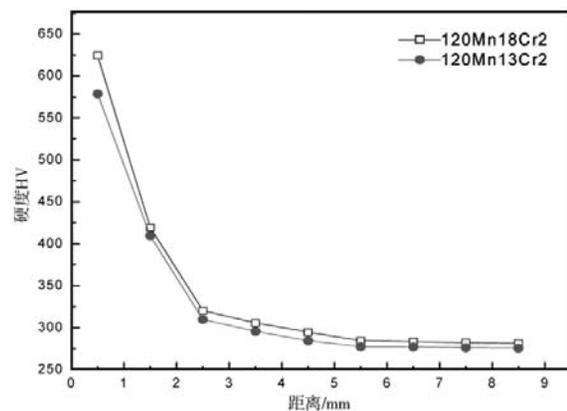


图4 冲击磨料磨损试验机5 J冲击能量下锰钢的磨损硬化曲线
Fig. 4 Wear hardening curve of manganese steel under 5 J impact energy of impact abrasive wear testing machine

分发挥出奥氏体锰钢及其铸件的优势潜力（高韧性和高磨损硬化能力）。

2.3 耐（抗）磨白口铸铁

白口铸铁历史悠久，具有先进新材料技术内涵的“耐磨白口铸铁（又称抗磨白口铸铁）”在中国近50年发展迅速，特别是近15年我国实现了多项共性技术突破。耐（抗）磨白口铸铁是目前少无冲击的磨料磨损工况中难以替代的材料，它实质上是一类“碳化物增硬合金钢基复合材料”。

我国耐磨白口铸铁技术历经镍铬合金耐磨白口铸铁（镍硬白口铸铁）、锰系白口铸铁、硼系白口铸铁、钨系白口铸铁、钒系白口铸铁、锰钨白口铸铁、钨铬白口铸铁、铬合金耐磨白口铸铁（铬系耐磨白口铸铁）研发阶段。近年来国内外耐磨白口铸铁及其铸件共性技术进展较集中体现在中国国家标准GB/T 8263—2025《耐磨白

口铸铁件》^[5]、GB/T 17445—2022《铸造磨球》^[6]、GB/T 32219—2015《筒式磨机 铸造磨段》和GB/T 33939—2017《立式辊磨机 磨辊与磨盘铸造衬板 技术条件》。

以立式磨机磨辊、磨盘、磨环衬板，球磨机衬板、磨球及磨段，渣浆泵过流件，反击式破碎机板锤，金属轧机轧辊，混凝土搅拌机叶片和衬板，耐磨管道及溜槽衬板等为主要目标产品，国标GB/T 8263—2025《耐磨白口铸铁件》依据主要合金元素种类和含量列入3类及17个牌号耐磨白口铸铁及其铸件，其中较成熟、稳定、高性价比、批量生产及应用的铬合金耐磨白口铸铁及镍铬合金耐磨白口铸铁13个共性技术耐磨白口铸铁及其铸件的牌号与主要化学成分见表3，室温下耐磨白口铸铁及其铸件的硬度应符合表4的规定。共性技术特征是高碳（C）含量和高硬度。受到冲击试验机及冲击试验方法的部分限制，耐磨白口铸铁的冲击韧性暂未列入这一国标。

表3 耐磨白口铸铁及其铸件的牌号与主要化学成分
Tab. 3 Grades and main chemical compositions of wear resistant white cast iron and its castings $w_B / \%$

| 类别 | 牌号 ^a | C | Si | Mn | Cr | Mo | Ni | W | Cu | S | P |
|----------------|-----------------|---------|---------|---------|-----------|------|---------|---|------|-------|-------|
| 镍铬合金耐 磨白口铸铁 | BTMNi4Cr2-DT | 2.5~3.0 | ≤0.8 | ≤0.8 | 1.5~3.0 | — | 3.0~5.5 | — | — | ≤0.10 | ≤0.10 |
| | BTMNi4Cr2-GT | 3.0~3.6 | ≤0.8 | ≤0.8 | 1.5~3.0 | — | 3.0~5.5 | — | — | ≤0.10 | ≤0.10 |
| | BTMCr9Ni5-DT | 2.4~2.8 | 1.5~2.2 | 0.2~0.8 | 8.0~10.0 | — | 4.0~5.5 | — | — | ≤0.06 | ≤0.06 |
| | BTMCr9Ni5-ZT | 2.5~3.5 | 1.5~2.5 | 0.3~0.8 | 8.0~10.0 | — | 4.5~6.5 | — | — | ≤0.06 | ≤0.06 |
| | BTMCr9Ni5-GT | 3.2~3.6 | 1.5~2.2 | 0.2~0.8 | 8.0~10.0 | — | 4.0~5.5 | — | — | ≤0.06 | ≤0.06 |
| 铬合金耐磨 白口铸铁 | BTMCr2 | 2.1~3.6 | ≤1.5 | ≤2.0 | 1.0~3.0 | — | — | — | — | ≤0.10 | ≤0.10 |
| | BTMCr8 | 2.1~3.6 | 1.5~2.2 | ≤2.0 | 7.0~10.0 | ≤3.0 | ≤1.0 | — | ≤1.2 | ≤0.06 | ≤0.06 |
| | BTMCr12-DT | 1.1~2.0 | ≤1.5 | ≤2.0 | 10.0~14.0 | ≤3.0 | ≤2.5 | — | ≤1.2 | ≤0.06 | ≤0.06 |
| | BTMCr12-GT | 2.0~3.6 | ≤1.5 | ≤2.0 | 10.0~14.0 | ≤3.0 | ≤2.5 | — | ≤1.2 | ≤0.06 | ≤0.06 |
| | BTMCr15 | 2.0~3.8 | ≤1.2 | ≤2.0 | 14.0~18.0 | ≤3.0 | ≤2.5 | — | ≤1.2 | ≤0.06 | ≤0.06 |
| | BTMCr20 | 2.0~3.6 | ≤1.2 | ≤2.0 | 18.0~23.0 | ≤3.0 | ≤2.5 | — | ≤1.2 | ≤0.06 | ≤0.06 |
| | BTMCr26 | 2.0~3.5 | ≤1.2 | ≤2.0 | 23.0~30.0 | ≤3.0 | ≤2.5 | — | ≤1.2 | ≤0.06 | ≤0.06 |
| | BTMCr35 | 3.0~5.0 | ≤1.0 | 1.0~3.0 | 30.0~40.0 | ≤1.5 | ≤1.0 | — | ≤1.2 | ≤0.06 | ≤0.06 |

a: 可加入微量V、Ti、Nb、Zr、B和RE等元素。

注: 牌号中, “DT” “ZT” 和 “GT” 分别是 “低碳” “中碳” 和 “高碳” 的汉语拼音大写字母, 表示该牌号含碳量的高低。

磨球和磨段是我国耐磨铸件中最大产品类别，也是耐磨白口铸铁最大产品类别。牌号BTMCr12-GT是我国当前磨球和磨段等球磨机研磨介质产品的主要牌号，含Cr≥10.0%，Cr/C≥4，结合液体淬火介质淬火热处理，实现了高铬铸铁磨球和磨段的高硬度和高耐磨性，特别是高性价比。

以BTMCr9Ni5为代表的镍硬铸铁，特殊热处理可以获得硬度HRC≥60，在国外仍有一定市场。

过共晶马氏体Cr20高铬铸铁、Cr26高铬铸铁及

Cr35超高铬铸铁研究、开发及应用，是我国近年取得的较明显的技术进步。共性技术进步特点体现在高铬铸铁含碳量逐渐提高，不断突破禁区，由亚共晶→共晶→过共晶，导致高铬铸铁硬度HRC逐渐提高（58→60→63→65）。与此同时通过碳化物可控细化^[7]与耐磨件形状结构调整，实现高铬铸铁硬韧性匹配。特别是高C、高Cr与Nb、V、Ti和Zr合金调控，细晶控制碳化物形态，解决高体积分数碳化物过共晶铸铁硬脆和易早期失效难题，实现材料显微区域高硬碳

表4 耐磨白口铸铁及其铸件的硬度
Tab. 4 Hardness of wear resistant white cast iron and its castings

| 类别 | 牌号 | 表面硬度 | | | | | |
|----------------|--------------|------------|------|-------------|------|-------|------|
| | | 铸态或铸态去应力处理 | | 硬化态或硬化态回火处理 | | 软化退火态 | |
| | | HRC | HBW | HRC | HBW | HRC | HBW |
| 镍铬合金耐 磨白口铸铁 | BTMNi4Cr2-DT | ≥48 | ≥480 | ≥48 | ≥480 | — | — |
| | BTMNi4Cr2-GT | ≥50 | ≥510 | ≥50 | ≥510 | — | — |
| | BTMCr9Ni5-DT | — | — | ≥49 | ≥500 | — | — |
| | BTMCr9Ni5-ZT | — | — | ≥53 | ≥555 | — | — |
| | BTMCr9Ni5-GT | — | — | ≥57 | ≥630 | — | — |
| 铬合金耐磨 白口铸铁 | BTMCr2 | ≥45 | ≥435 | — | — | — | — |
| | BTMCr8 | ≥46 | ≥450 | ≥56 | ≥600 | ≤41 | ≤400 |
| | BTMCr12-DT | — | — | ≥50 | ≥500 | ≤41 | ≤400 |
| | BTMCr12-GT | ≥46 | ≥450 | ≥58 | ≥650 | ≤41 | ≤400 |
| | BTMCr15 | ≥46 | ≥450 | ≥58 | ≥650 | ≤41 | ≤400 |
| | BTMCr20 | ≥46 | ≥450 | ≥58 | ≥650 | ≤41 | ≤400 |
| | BTMCr26 | ≥46 | ≥450 | ≥58 | ≥650 | ≤41 | ≤400 |
| BTMCr35 | ≥48 | ≥450 | ≥60 | — | ≤41 | ≤400 | |

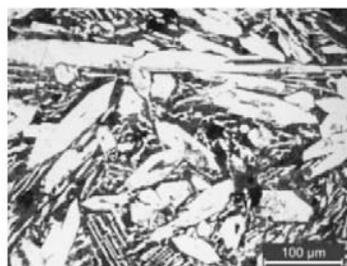
注1: 洛氏硬度值(HRC)和布氏硬度值(HBW)之间没有精确的对应值, 这两种硬度值应独立使用。

注2: 铸件断面深度40%处的硬度不低于表面硬度值的92%。

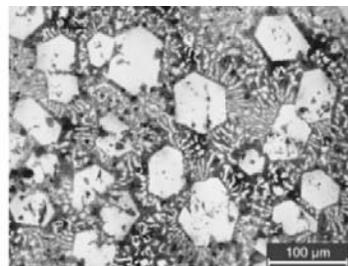
注3: 布氏硬度所能测试的最大硬度值是HBW650。

化物与韧性基体匹配和高硬韧性突破。例如含Nb过共晶高铬铸铁(4.8%C、35%Cr、0~1.0%Nb)^[8], 硬度HRC65, 无缺口冲击韧度3.19 J(采用150 J冲击试验机), 碳化物形态见图5。最终高铬铸铁及其铸件的耐

磨性和使用寿命不断提高。过共晶马氏体高铬铸铁较好地应用于冲刷腐蚀磨料磨损工况的渣浆泵过流件和冲击磨料磨损工况的反击破板锤, 碾压式高应力三体磨料磨损工况的立磨磨辊和磨盘衬板。



(a) 0.48%Nb



(b) 0.82%Nb

图5 增加含Nb量促使过共晶Cr35高铬铸铁初生碳化物形态趋向细小团块状

Fig. 5 Increasing the Nb content promotes the primary carbide morphology of hypereutectic Cr35 high chromium cast iron to trend towards finer agglomerates

共性技术进步亮点之一是高铬铸铁定向结晶控制脆性技术, 通过铸件凝固温度场调控, 提高铸件表层局部区域过冷度, 实现高碳高铬铸铁(近)定向凝固结晶^[9], 铸件晶粒细化, 碳化物垂直磨损方向, 提高高铬铸铁及其铸件的耐磨性和使用寿命。例如用于碾压式高应力三体磨料磨损工况的立磨磨辊衬板, 见图6。

共性技术进步另一亮点是耐磨白口铸铁热处理淬火介质技术, 用聚合物和水玻璃等水基淬火介质淬

火, 替代空气、风和雾冷淬火, 提高耐磨白口铸铁淬透性、淬硬性、热处理效率和性价比, 进而提高耐磨白口铸铁及其铸件的耐磨性和使用寿命。

2.4 非锰系耐磨钢

非锰系耐磨钢即奥氏体锰钢之外的耐磨合金钢, 在铸造钢铁耐磨材料行业产业与专业领域常简称其耐磨钢, 它是铸造钢铁耐磨材料的五大类别之一。耐磨

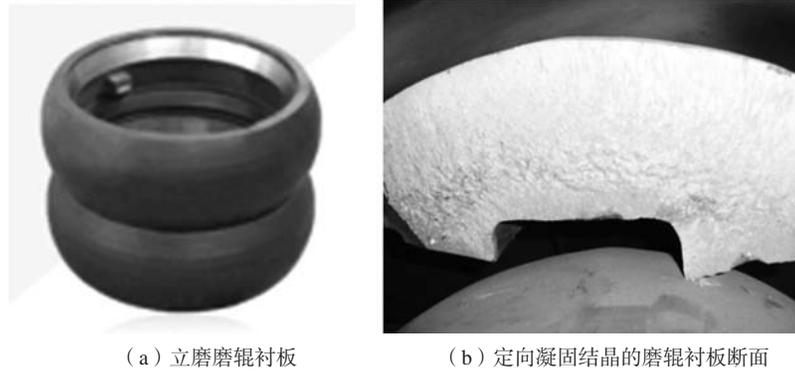


图6 立磨磨辊衬板及其定向凝固结晶的磨辊衬板断面

Fig. 6 Vertical grinding roller lining plate and the cross section of grinding roller lining plate obtained through directional solidification crystallization

钢的市场较大，可调控范围大，硬韧性和强韧性潜力很大^[10]，是一类可塑性很强的钢。近年来国内外耐磨钢及其铸件共性技术进展集中体现在中国国家标准GB/T 26651—2025《耐磨钢铸件》^[11]。

以颚式破碎机中小型颚板、圆锥式破碎机中小型轧臼壁和破碎壁、锤式破碎机锤头、挖掘机中小型斗齿、筒式磨机（球磨机、半自磨机、自磨机）衬板、

拖拉机履带板、金属轧机轧辊和导卫板、铁路辙叉和车轮等为主要目标产品，国标GB/T 26651—2025《耐磨钢铸件》依据主要显微组织将耐磨钢及其铸件分为3个类别，依据合金元素含量将耐磨钢及其铸件分为20个牌号，见表5。室温下耐磨钢及其铸件的硬度和冲击韧性应符合表6的规定。共性技术特征是中高碳（C）含量、较高硬度、较高韧性和高硬韧性。

表5 耐磨钢及其铸件的牌号与主要化学成分

Tab. 5 Grades and main chemical compositions of wear resistant steel and its castings

 $w_B / \%$

| 类别 | 牌号 ^a | C | Si | Mn | Cr | Mo | Ni | Cu | S | P |
|------------|-------------------|-----------|---------|---------|----------|---------|---------|-------|-------|-------|
| 马氏体 耐磨钢 | ZGM30Mn2Si | 0.25~0.35 | 0.5~1.2 | 1.2~2.2 | — | — | — | — | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM30Mn2CrSi | 0.25~0.35 | 0.5~1.2 | 1.2~2.2 | 0.5~1.2 | — | — | — | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM30CrMnSiMo | 0.25~0.35 | 0.5~1.8 | 0.5~1.8 | 0.5~1.8 | 0.2~0.8 | ≤0.5 | — | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM30CrNiMo | 0.25~0.35 | 0.4~0.8 | 0.4~1.0 | 0.5~2.0 | 0.2~0.8 | 0.3~2.0 | — | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM40Mn2CrSi | 0.35~0.45 | 0.5~1.2 | 1.2~2.2 | 0.5~1.2 | — | — | — | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM40CrNiMo | 0.35~0.45 | 0.4~0.8 | 0.4~1.0 | 0.5~2.0 | 0.2~0.8 | 0.3~2.0 | — | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM42Cr2Si2MnMo | 0.35~0.48 | 1.5~1.8 | 0.8~1.2 | 1.5~2.0 | 0.1~0.5 | — | — | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM45Cr2MoSi | 0.40~0.48 | 0.8~1.2 | 0.4~1.0 | 1.7~2.0 | 0.8~1.2 | ≤0.5 | — | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM25Cr10MnSiNiMo | 0.15~0.35 | 0.5~2.0 | 0.5~2.0 | 7.0~13.0 | 0.2~0.8 | 0.3~2.0 | ≤1.0 | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM45Cr3Mo | 0.40~0.50 | 0.4~1.0 | 0.5~1.2 | 2.5~3.5 | 0.2~0.8 | ≤0.5 | — | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM30Cr5Mo | 0.25~0.35 | 0.4~1.0 | 0.5~1.2 | 4.0~6.0 | 0.2~0.8 | ≤0.5 | — | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM40Cr5Mo | 0.35~0.45 | 0.4~1.0 | 0.5~1.2 | 4.0~6.0 | 0.2~0.8 | ≤0.5 | — | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM50Cr5Mo | 0.45~0.55 | 0.4~1.0 | 0.5~1.2 | 4.0~6.0 | 0.2~0.8 | ≤0.5 | — | ≤0.04 | ≤0.04 |
| ZGM60Cr5Mo | 0.55~0.65 | 0.4~1.0 | 0.5~1.2 | 4.0~6.0 | 0.2~0.8 | ≤0.5 | — | ≤0.04 | ≤0.04 | |
| 贝氏体耐磨 钢 | ZGM32Cr2Si2MnMo | 0.25~0.40 | 1.0~2.5 | 0.5~1.5 | 1.5~2.5 | 0.2~0.8 | ≤1.0 | ≤0.35 | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM45Cr2Si2MnMo | 0.40~0.50 | 1.0~2.5 | 0.5~1.5 | 1.5~2.5 | 0.2~0.8 | ≤1.0 | ≤0.35 | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM65Cr2Si2MnMo | 0.50~0.80 | 1.0~2.5 | 0.5~1.5 | 1.5~2.5 | 0.2~0.8 | ≤1.0 | ≤0.35 | ≤0.04 | ≤0.04 |
| 珠光体耐 磨钢 | ZGM45Cr2MnMo | 0.40~0.50 | 0.4~1.0 | 0.5~1.5 | 1.5~2.5 | 0.2~0.8 | ≤1.0 | ≤1.0 | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM60Cr2MnMo | 0.50~0.70 | 0.4~1.0 | 0.5~1.5 | 1.5~2.5 | 0.2~0.8 | ≤1.0 | ≤1.0 | ≤0.04 | ≤0.04 |
| | ZGM85Cr2MnMo | 0.70~0.95 | 0.4~1.0 | 0.5~1.5 | 1.5~2.5 | 0.2~0.8 | ≤1.0 | ≤1.0 | ≤0.04 | ≤0.04 |

a: 可加入微量V、Ti、Nb、Zr、B和RE等元素。

表6 耐磨钢及其铸件的硬度和冲击韧性
Tab. 6 Hardness and impact toughness of wear-resistant steel and its castings

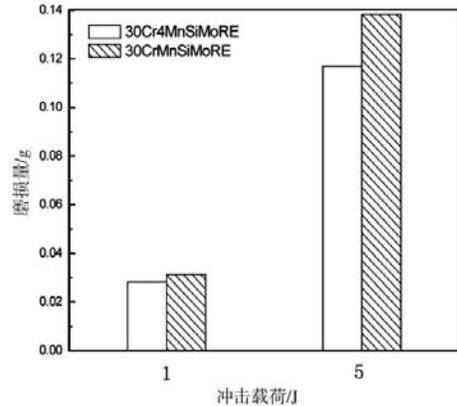
| 类别 | 牌号 | 表面硬度 ^a /HRC | 冲击吸收能量KV ₂ /J | 冲击吸收能量KW ₂ /J |
|------------|-------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 马氏体 耐磨钢 | ZGM30Mn2Si | ≥46 | ≥10 | — |
| | ZGM30Mn2CrSi | ≥46 | ≥10 | — |
| | ZGM30CrMnSiMo | ≥46 | ≥10 | — |
| | ZGM30CrNiMo | ≥46 | ≥10 | — |
| | ZGM40Mn2CrSi | ≥50 | — | ≥25 |
| | ZGM40CrNiMo | ≥50 | — | ≥25 |
| | ZGM42Cr2Si2MnMo | ≥50 | — | ≥25 |
| | ZGM45Cr2MoSi | ≥50 | — | ≥25 |
| | ZGM25Cr10MnSiNiMo | ≥40 | — | ≥50 |
| | ZGM45Cr3Mo | ≥45 | — | ≥25 |
| | ZGM30Cr5Mo | ≥42 | ≥8 | — |
| | ZGM40Cr5Mo | ≥45 | — | ≥25 |
| | ZGM50Cr5Mo | ≥47 | — | ≥15 |
| | ZGM60Cr5Mo | ≥49 | — | ≥10 |
| 贝氏体 耐磨钢 | ZGM32Cr2Si2MnMo | ≥40 | ≥20 | — |
| | ZGM45Cr2Si2MnMo | ≥44 | ≥15 | — |
| | ZGM65Cr2Si2MnMo | ≥48 | ≥10 | — |
| 珠光体 耐磨钢 | ZGM45Cr2MnMo | ≥30 | — | ≥35 |
| | ZGM60Cr2MnMo | ≥30 | — | ≥25 |
| | ZGM85Cr2MnMo | ≥32 | — | ≥20 |

a: 铸件断面深度40%处的硬度应不低于表面硬度值的92%。

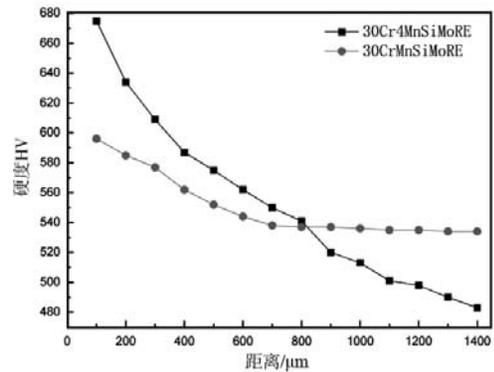
注: KV₂、KW₂分别表示V型缺口和无缺口试样使用2 mm摆锤锤刃测得的冲击吸收能量。

耐磨钢硬韧性匹配优异, 硬度与韧性可在大范围内调控, 以马氏体中碳低合金铸钢为例, 该类钢可在硬度HRC47.5~55和冲击韧性KW₂ 50~250 J范围内调控, 因此该钢可塑性强而应用于诸多冲击磨料磨损工况, 具有很好发展前景。

共性技术进步亮点之一是高硬化率耐磨合金钢技术。冲击磨料磨损工况, 耐磨钢加入适量合金元素, 不仅提高钢淬透性, 还提高钢磨损硬化率和磨损硬化效果。马氏体中合金钢30Cr4MnSiMoRE和马氏体低合金钢30CrMnSiMoRE, 在1 J和5 J的冲击载荷、硅砂为磨料的冲击磨料磨损试验结果(图7)表明, 中合金钢比低合金钢冲击磨损硬化率提高20%以上, 中合金钢磨损硬化硬度较高, 工业试验中球磨机衬板寿命提高50%以上。从表6还可见, 马氏体中合金钢的(初始)硬度和冲击韧性分别比马氏体低合金钢的低, 而工业冲击磨料磨损工况应用中马氏体中合金钢磨损硬化率比马氏体低合金钢的高, 磨损硬化效果更好, 高磨损硬化率导致马氏体中合金钢的耐磨性和耐磨寿命较



(a) 磨损量



(b) 硬度

图7 马氏体中合金钢和低合金钢冲击磨料磨损试验结果
Fig. 7 Impact abrasive wear test results of martensitic medium-alloy steel and low-alloy steel

高。这一现象也较好地佐证了高硬韧性理论的应用。

共性技术进步亮点之二是高硬韧耐磨贝氏体合金钢技术。显微区域硬韧性匹配优异的耐磨贝氏体钢, 在强冲击磨料磨损工况优势凸显, 例如大型半自磨机铸造衬板, 高锰钢衬板易变形, 珠光体钢衬板耐磨性较低, 马氏体钢衬板易断裂, 而等温淬火贝氏体钢, 具备高硬韧、高强韧和高磨损硬化率特性, 进而提高衬板使用寿命。如表6所示, 三种典型高硬韧耐磨贝氏体合金钢, ZG32Cr2Si2MnMo, 硬度HRC≥40, 冲击韧性KV₂≥20 J; ZG45Cr2Si2MnMo, 硬度HRC≥44, 冲击韧性KV₂≥15 J; ZG65Cr2Si2MnMo, 硬度HRC≥48, 冲击韧性KV₂≥10 J。可用于大型半自磨机衬板、球磨机衬板、锤头、斗齿和铁路辙叉等耐磨铸件。

共性技术进步亮点之三是高硬韧耐磨珠光体合金钢技术。显微区域硬韧性匹配优异的耐磨珠光体钢, 在强冲击磨料磨损工况有一定优势, 例如大型半自磨机和球磨机铸造衬板, 高锰钢衬板易变形, 马氏体钢衬板易断裂, 而珠光体钢衬板虽然耐磨性不是很高, 但其具备较高屈服强度而不易变形。特别因珠光

体本身一定的硬度和较高的断裂韧性而使得耐磨珠光体合金钢在强烈冲击磨料磨损工况体现出高硬韧性，使得耐磨件不易断裂，保证了耐磨件一定的使用寿命。如表6所示，三种典型高硬韧耐磨珠光体合金钢，ZGM45Cr2MnMo，硬度HRC≥30，冲击韧性 $KW_2 \geq 35$ J；ZGM60Cr2MnMo，硬度HRC≥30，冲击韧性 $KW_2 \geq 25$ J；ZGM85Cr2MnMo，硬度HRC≥32，冲击韧性 $KW_2 \geq 20$ J。耐磨珠光体合金钢可用于大型半自磨机和球磨机衬板、大型E型磨机空心磨球等耐磨铸件。需要进一步说明，与耐磨珠光体合金钢相近化学成分的合金钢如果经过调质热处理，可以获得更高硬韧性组合的耐磨回火索氏体合金钢。

共性技术进步亮点还体现在，钢液冶金质量提高，精炼效益显著；钢的P和S含量减少；钢显微组织设计与调控珠光体（P）、马氏体（M）、贝氏体（B）、马贝奥混合基体（M+B+A），适用不同磨损工况；耐磨件热处理表面氧化减少；多元合金元素协同使用，提高钢淬透性和磨损硬化率；聚合物和水玻璃等水基淬火介质的使用，替代淬火油，环保提质；依据具体工况选材，耐磨钢使用范围较广。

共性技术进步的突出亮点，是针对冲击磨料磨损工况，结合高硬化耐磨高锰钢和非锰系高硬化耐磨合金钢，创立和应用系列高硬化耐磨合金钢优化设计及应用评价技术。依据工况冲击程度，设计、研制、生产和应用高硬化耐磨合金钢，解决耐磨钢冲击磨损寿命低，磨损硬化设计不当和硬度与韧性匹配不佳难题，实现耐磨件整体宏观区域耐磨钢高硬韧性匹配。结合图8及上述表格所示，高硬化耐磨合金钢分别应用于五类典型冲击磨料磨损工况，①钢 KW_2 10~100 J适用工况，金属矿山（湿磨）球磨机衬板和水泥火电（干磨）球磨机衬板，建议选用高硬化耐磨马氏体中合金钢；②钢 KW_2 100~200 J适用工况，挖掘机斗齿和锤式破碎机锤头，建议选用高硬化耐磨马氏体低合金钢；③钢 KW_2 200~400 J适用工况，中小型圆锥式破碎机轧臼壁和破碎壁以及中小型颚式破碎机颚板，建议选用

高硬化耐磨Mn13系列高锰钢；④钢 KW_2 400~600 J适用工况，大型轧臼壁和破碎壁以及颚板等，建议选用高硬化耐磨Mn18系列高锰钢；⑤钢 $KW_2 > 600$ J适用工况，特大型破碎机耐磨件，建议选用高硬化耐磨Mn21或Mn25系列高锰钢。

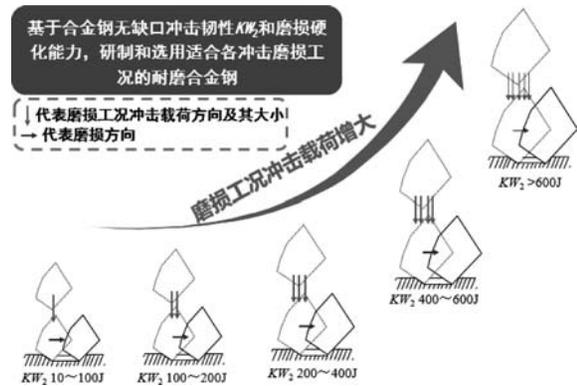


图8 高硬化耐磨合金钢分别应用于五类典型冲击磨料磨损工况
Fig. 8 High hardening wear-resistant alloy steels applied to five typical impact abrasion conditions respectively

2.5 耐磨球墨铸铁

耐磨球墨铸铁是中国特色的钢铁耐磨材料，它为铸造钢铁耐磨材料的五大类别之一。连续冷却淬火含锰硼贝氏体球墨铸铁及其磨球始于1980年代，连续冷却淬火（或含少量碳化物）马氏体球墨铸铁及其磨球和衬板也始于1980年代。然而伴随半自磨机和大型球磨机等扩大应用，近些年等温淬火含碳化物球墨铸铁（QTMCD或CADI）磨球市场扩大。

近年来耐磨球墨铸铁及其铸件共性技术进展较集中体现在我国机械行业标准JB/T 11843—2014《耐磨损球墨铸铁件》，该标准预计在2025—2026年组织修订。以半自磨机和大型球磨机磨球等为主要目标产品，机械行业标准《耐磨损球墨铸铁件》依据热处理方式和主要显微组织将耐磨损球墨铸铁及其铸件分为5个牌号，见表7。室温下耐磨损球墨铸铁及其铸件的

表7 耐磨损球墨铸铁及其铸件牌号与主要化学成分
Tab. 7 Grades and main chemical compositions of wear resistant ductile iron and its castings

| 名称 | 牌号 ^a | C | Si | Mn | Cr | P | S |
|------------------|-----------------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
| 连续冷却淬火奥铁体球墨铸铁件 | QTML-1 | 3.2~3.8 | 2.0~3.0 | 2.0~3.0 | - | ≤0.05 | ≤0.03 |
| 连续冷却淬火马氏体球墨铸铁件 | QTML-2 | 3.2~3.8 | 2.0~3.0 | 0.5~1.5 | - | ≤0.05 | ≤0.03 |
| 等温淬火奥铁体球墨铸铁件 | QTMD-1 | 3.2~3.8 | 2.0~3.0 | 0.5~1.5 | - | ≤0.05 | ≤0.03 |
| 低温等温淬火奥铁体球墨铸铁件 | QTMD-2 | 3.2~3.8 | 2.0~3.0 | 0.5~1.5 | - | ≤0.05 | ≤0.03 |
| 等温淬火含碳化物奥铁体球墨铸铁件 | QTMCD | 3.2~3.8 | 2.0~3.0 | 0.5~3.0 | 0.2~1.5 | ≤0.04 | ≤0.02 |

a: 允许加入适量Mo、Cu、Ni等元素和微量V、Ti、B、RE、Mg等元素，且要求残留Mg≥0.03。

硬度和冲击韧性见表8。共性技术特征是高碳(C)含量、较高硬度和较高硬韧性。

共性技术进步的亮点之一是高硬韧等温淬火含碳化物奥铁体球墨铸铁(QTMCD或CADI)技术。通过少量Cr和Mn合金化促使结晶出少量高硬度碳化物并使碳化物与原球墨铸铁组织伴生,通过等温淬火热处理促使原球墨铸铁基体组织转变成成为高韧性的奥铁体组织,进而使得等温淬火含碳化物奥铁体球墨铸铁具备较高硬韧性。

共性技术进步的亮点之二是等温淬火热处理技术。正常情况下盐浴等温淬火球墨铸铁,质量(性能)比较稳定,但是盐浴等温淬火技术对盐浴等温淬

火热处理炉的要求比较高,特别是生产较大球墨铸铁件和大批量球墨铸铁件时,比较困难。为此,我国于1980年代开始先短时间盐浴等温淬火+箱式热处理炉中温保温工艺试验;近年为简化盐浴等温淬火工艺和低成本批量生产,我国研发出“先短时间油浴淬火激冷+箱式热处理炉中温保温工艺”,生产出含碳化物奥铁体球墨铸铁(QTMCD)磨球,安徽宁国在此项新工艺技术的研发和生产应用方面贡献比较突出^[12-13],成为全国等温淬火含碳化物球墨铸铁(QTMCD)磨球产业化示范基地(HRC \geq 56)。这一简化工艺的等温淬火QTMCD磨球,堪称中国特色耐磨磨球。

表8 耐磨损球墨铸铁及其铸件的硬度和冲击韧性
Tab. 8 Hardness and impact toughness of wear-resistant ductile iron and its castings

| 名称 | 牌号 | 表面硬度HRC | 冲击吸收能量 KW_2/J |
|------------------|--------|-----------|-----------------|
| 连续冷却淬火奥铁体球墨铸铁件 | QTML-1 | ≥ 50 | 10 |
| 连续冷却淬火马氏体球墨铸铁件 | QTML-2 | ≥ 52 | 8 |
| 等温淬火奥铁体球墨铸铁件 | QTMD-1 | ≥ 43 | 25 |
| 低温等温淬火奥铁体球墨铸铁件 | QTMD-2 | ≥ 48 | 20 |
| 等温淬火含碳化物奥铁体球墨铸铁件 | QTMCD | ≥ 52 | 6 |

注1:铸件断面深度40%处的硬度应不低于表面硬度值的90%。注2: KW_2 表示无缺口试样使用2 mm摆锤锤刃测得的冲击吸收能量。

2.6 耐磨铸造复合材料

耐磨铸造复合材料是铸造钢铁耐磨材料的五大类别之一。耐磨铁基复合材料及其铸造技术是近年国内外进步较大,发展较快的耐磨材料技术^[14-16]。我国耐磨铁基复合材料及其铸造技术多数领域为国际先进水平,部分领域,例如镶铸合金复合材料及其铸件和双液铸造双金属复合材料及其铸造技术为国际领先水平。耐磨铁基复合材料及其铸造技术本身源于解决耐磨件宏观硬韧性难题,如何保证耐磨件不断裂和不变形的情况下,进一步提高耐磨件的硬度和耐磨性,源于此,设计将较高韧性的钢铁材料与较高硬度的陶瓷或铁基材料复合成形,硬韧匹配,促使耐磨铁基复合材料及其铸件市场不断扩大,应用前景可期。

近年来国内外耐磨铁基复合材料及其铸造共性技术进展集中体现在中国国家标准GB/T 26652—2025《耐磨损复合材料铸件》^[17]。

以立式磨机磨辊和磨盘衬板、反击式破碎机板锤、锤式破碎机锤头、颚式破碎机颚板,筒式磨机(球磨机、半自磨机、自磨机)衬板等为主要目标产品,国标GB/T 26652—2025《耐磨损复合材料铸件》依据复合成形工艺和耐磨损增硬体材料,将耐磨铁基复合材料及其铸件分为4个类别及8个牌号,见表9。室温下耐磨铁基复合材料铸件增硬体硬度应符合表10的

规定。室温下耐磨铁基复合材料铸件中的基体奥氏体锰钢冲击韧性应符合GB/T 5680的规定,其他合金耐磨钢冲击韧性应符合GB/T 26651的规定。共性技术特征是具有高硬度的增硬体材料、较高韧性的钢铁材料基材,耐磨损复合材料及其铸件,具有显著的高硬韧性特征。

共性技术进步的亮点是预制体增硬铁基铸造复合材料技术。我国在颗粒和小块陶瓷预制体增硬铁基铸造复合材料研制与应用方面有成功经验,例如铸造复合材料导卫板和镶铸合金复合材料大型锤头等耐磨件。国外马克托公司等先于我国首先研制和应用大块陶瓷预制体增硬高铬铸铁基铸造复合材料,较好地用于立式磨机磨辊和磨盘衬板和反击式破碎机板锤等耐磨件。因大块陶瓷预制体制备的成本难题,ZTA陶瓷被引入。因ZTA陶瓷与钢铁不润湿,复合界面结合强度成为共性关键技术难题。冶金复合界面的铸造复合材料质量(性能)优异,而其他复合界面也值得探究。预制体增硬铁基铸造复合材料用于碾压式高应力三体磨料磨损(例如磨辊和磨盘)工况优势显著;用于较低角度冲刷(蚀)磨损(例如板锤、锤头、过流件)工况也有一定优势;用于高角度冲刷(蚀)凿削式磨损(例如轧臼壁、颚板)工况优势可能减少,甚至须重新考量设计预制体。

表9 耐磨铁基复合材料铸件的牌号及组成
Tab. 9 Grades and components of wear resistant ferrous matrix composite material castings

| 类别 | 名称 | 牌号 | 复合材料组成 | 铸件耐磨损增硬体材料 |
|------------|----------------|------------|--------------------|---|
| 镶铸合金复合材料铸件 | 镶铸合金复合材料 I 铸件 | ZFFeM-XZ-1 | 硬质合金块/铸钢或铸铁 | 硬质合金 |
| | 镶铸合金复合材料 II 铸件 | ZFFeM-XZ-2 | 耐磨白口铸铁块/铸钢或铸铁 | 耐磨白口铸铁 |
| 双液铸造复合材料铸件 | 双液铸造双金属复合材料铸件 | ZFFeM-SY-1 | 耐磨白口铸铁层/铸钢或铸铁层 | 耐磨白口铸铁 |
| | 双液铸造三金属复合材料铸件 | ZFFeM-SY-2 | 耐磨白口铸铁层/钢板层/铸钢或铸铁层 | 耐磨白口铸铁 |
| 铸渗合金复合材料铸件 | 铸渗合金复合材料铸件 | ZFFeM-ZS | 增硬体颗粒/铸钢或铸铁 | 硬质合金, 和 (或) 耐磨白口铸铁, 和 (或) 碳化钨和 (或) 碳化钛等陶瓷 |
| | 铸渗镶铸复合材料铸件 | ZFFeM-ZSXZ | 增硬预制体块/铸钢或铸铁 | 氧化铝和 (或) 氧化锆和 (或) ZTA 等陶瓷 |
| | 粘结铸渗镶铸复合材料铸件 | ZFFeM-ZJZS | 增硬体颗粒/非金属粘结剂/铸钢或铸铁 | 氧化铝和 (或) 氧化锆和 (或) ZTA 等陶瓷, 和 (或) 碳化钨和 (或) 碳化钛等陶瓷, 和 (或) 硬质合金, 和 (或) 耐磨白口铸铁等 |
| 粘接复合材料铸件 | 粘接复合材料铸件 | ZFFeM-ZJ | 增硬体块/非金属粘结剂/铸钢或铸铁 | 氧化铝和 (或) 氧化锆和 (或) ZTA 等陶瓷, 和 (或) 碳化钨和 (或) 碳化钛等陶瓷, 和 (或) 硬质合金, 和 (或) 耐磨白口铸铁等 |

注1: ZFFeM-ZJZS复合界面为非冶金或者部分冶金结合界面, ZFFeM-ZJZS可用于承载压应力的特殊磨损工况。

注2: ZFFeM-ZJ复合界面为非冶金结合, ZFFeM-ZJ可用于承载压应力的特殊磨损工况。

表10 耐磨铁基复合材料铸件增硬体硬度
Tab. 10 Hardness of the hardenites of wear resistant ferrous matrix composite castings

| 类别 | 名称 | 牌号 | 铸件耐磨损增硬体硬度 | 铸件耐磨损增硬体硬度HRA | 铸件耐磨损增硬体硬度HV |
|------------|----------------|------------|-------------------------------|---------------|--|
| | | | HRC | | |
| 镶铸合金复合材料铸件 | 镶铸合金复合材料 I 铸件 | ZFFeM-XZ-1 | — | ≥79 (硬质合金) | — |
| | 镶铸合金复合材料 II 铸件 | ZFFeM-XZ-2 | ≥56 (耐磨白口铸铁) | — | — |
| 双液铸造复合材料铸件 | 双液铸造双金属复合材料铸件 | ZFFeM-SY-1 | ≥58 (耐磨白口铸铁) | — | — |
| | 双液铸造三金属复合材料铸件 | ZFFeM-SY-2 | ≥58 (耐磨白口铸铁) | — | — |
| 铸渗合金复合材料铸件 | 铸渗合金复合材料铸件 | ZFFeM-ZS | — | ≥82 (硬质合金) | — |
| | | | ≥58 (耐磨白口铸铁) | — | — |
| | — | — | ≥1 700 (碳化钨); ≥2 800 (碳化钛) | | |
| 铸渗合金复合材料铸件 | 铸渗镶铸复合材料铸件 | ZFFeM-ZSXZ | — | — | ≥1 200 (氧化铝和 (或) 氧化锆和 (或) ZTA 等陶瓷) |
| 粘接复合材料铸件 | 粘接复合材料铸件 | ZFFeM-ZJ | — | ≥82 (硬质合金) | ≥1 200 (氧化铝和 (或) 氧化锆和 (或) ZTA 等陶瓷); ≥1 700 (碳化钨); ≥2 800 (碳化钛) |
| | | | ≥58 (耐磨白口铸铁) | — | — |
| — | — | — | — | — | ≥1 200 (氧化铝和 (或) 氧化锆和 (或) ZTA 等陶瓷); ≥1 700 (碳化钨); ≥2 800 (碳化钛) |

共性技术进步的亮点之一，是与铁液润湿的陶瓷预制体增硬铁基铸造复合材料技术。陶瓷预制体可以是颗粒或块状的铁基硬质合金、耐磨白口铸铁、碳化钨和碳化钛等，铸造方法包括镶铸或铸渗技术。技术特征是解决陶瓷与耐磨钢铁的界面冶金结合难题，实现耐磨件易磨损部位即局部区域的陶瓷/钢铁冶金结合，耐磨损复合材料及其铸件具有显著的高硬韧性特征。典型牌号包括镶铸合金复合材料Ⅰ铸件（ZFFeM-XZ-1）、镶铸合金复合材料Ⅱ铸件（ZFFeM-XZ-2）和铸渗合金复合材料铸件（ZFFeM-ZS）。例如外植入0.5~5 mm颗粒金属陶瓷预制体增硬铁基耐磨复合材料及其重力铸渗冶金复合制造技术，可使耐磨铸件宏观硬化耐磨层厚度0~15 mm可控、硬度HRC \geq 66，磨料磨损耐磨性是淬回火态380Cr25Mo耐磨高铬铸铁的2倍；破碎高温烧结矿齿辊破碎机锤头（齿冠）使用寿命是耐磨高锰钢的4倍；热轧钢机导卫板耐磨性是Cr29Ni19耐热钢的9倍以上，是低碳Cr26高铬铸铁的25倍以上，破碎汽车和矿石大型锤式破碎机锤头使用寿命是耐磨高锰钢的2倍以上。铸造复合材料及其铸件耐磨性（寿命）比原耐磨基材较大幅度提高（见图9-图11）。

共性技术进步的亮点之二，是ZTA等陶瓷（氧化铝或氧化锆或ZTA等陶瓷）预制体（块状）增硬铁基

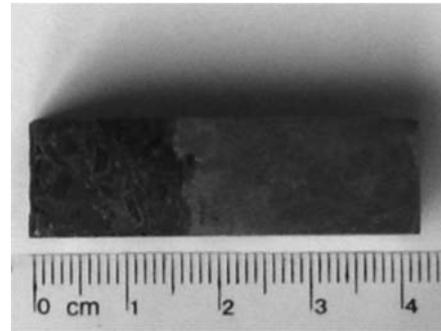


图9 铸造复合耐磨层厚度可达15 mm

Fig. 9 Thickness of the cast composite wear-resistant layer can reach 15 mm

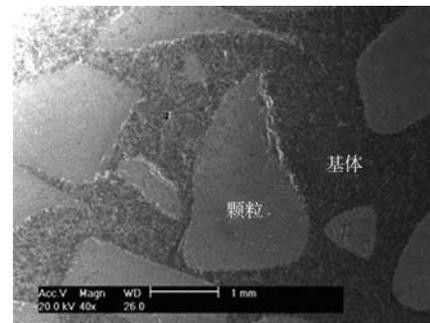


图10 铸造复合材料内部结构

Fig. 10 Internal structure of cast composite materials

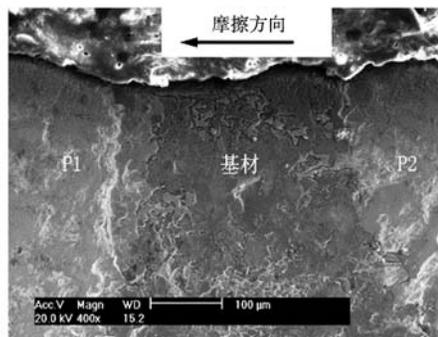
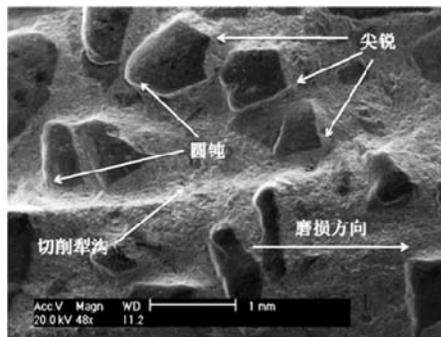


图11 硬质陶瓷凸起于基材发挥耐磨作用

Fig. 11 Hard ceramics protruded on the substrate play a role of wear resistance

铸造（镶铸或铸渗）复合材料技术。技术特征是通过ZTA等陶瓷预处理，解决ZTA等陶瓷与铁液不润湿难题，实现耐磨件易磨损部位即局部区域的陶瓷/钢铁冶金结合，耐磨损复合材料及其铸件具有显著的高硬韧性特征。典型牌号是铸渗镶铸复合材料铸件（ZFFeM-ZSXZ），在磨料磨损工况，高硬度ZTA结合周边一定硬韧性钢铁基材支撑，使得高硬韧铸造复合材料及其铸件耐磨性（寿命）比原耐磨基材高出2倍以上^[18]，且具有较高的综合性价比，促使耐磨铁基复合材料及其铸件应用市场不断扩大。例如ZTA预制体增硬高铬铸铁基铸造复合材料，结合ZTA/高铬铸铁复合界面电

镜观察（图12）与界面过渡区附近化学成分扫描和（或）线扫描分析，可以表征该复合界面是冶金结合界面。

生产应用实践中，非冶金结合铁基复合材料铸件在特定磨料磨损工况也有一些较好的应用。典型牌号包括粘结铸渗镶铸复合材料铸件（ZFFeM-ZJZS），ZFFeM-ZJZS复合界面为非冶金或者部分冶金结合界面；粘接复合材料铸件（ZFFeM-ZJ），ZFFeM-ZJ复合界面为非冶金结合。

大块ZTA陶瓷预制体增硬铁基铸造复合材料技术，我国从跟跑到并跑，现今已取得部分技术领先。

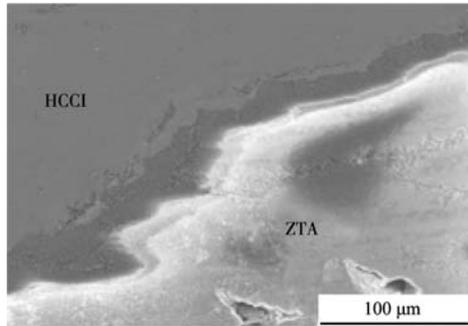


图12 ZTA/高铬铸铁复合界面（左上方高铬铸铁、右下方ZTA、中间为过渡区）

Fig. 12 ZTA/high chromium cast iron composite interface (high chromium cast iron in the upper left, ZTA in the lower right, and transition zone in the middle)

但是迄今铸造复合成形技术稳定性和复合材料扩大应用领域方面尚需创新研发及实践。

2.7 耐磨件铸造工艺技术

先进铸造技术的研发和采用，使耐磨钢铁铸件质量和使用寿命大幅度提高。较有显示度的共性先进铸造技术应用示例如下。

钢铁液冶炼工艺向少无杂质方向发展，中频感应电炉熔炼炉底吹氩、AOD炉精炼，[N]、[H]和[O]的控制，夹杂物形性控制并量化定级。

硅砂普及，陶瓷砂和宝珠砂的发展及应用。水玻璃砂采用改性水玻璃，促使旧砂回用处理简易化。耐磨钢铁铸件成形多用含粘结剂的砂型，发展到消失

模，而有些铸件又发展了V法造型。耐磨钢铁铸件成形为使晶粒细化而采用金属型，批量化生产又发展到覆砂金属型自动线。耐磨白口铸铁件成形为使碳化物定向结晶而采用专用金属型。采用振动凝固技术使耐磨钢铁铸件成形中晶粒进一步细化。耐磨钢铁铸件铸后清整浇冒口采用的预应力缺口锤击，发展到气压机械冲击锤击。

2.8 耐磨件热处理工艺技术

先进热处理技术研发和采用，使耐磨钢铁铸件质量和使用寿命大幅提高。较有显示度的共性先进热处理技术应用示例如下。

单一水和油冷却介质之后，发展出水玻璃水溶液介质及含聚合物水溶液冷却介质。高铬铸铁件可用水溶液介质淬火。罩式热处理炉研制和应用，节能的同时明显减少耐磨钢铁件表面氧化。盐浴等温淬火技术及专用装备在大中型耐磨钢件上应用。淬火前扩散正火或退火技术得到较多认同。减少应力防断裂的低温长效回火技术得到开发实施。

耐磨钢铁铸件水溶液介质淬火处理技术装备明显进步，特别是适于耐磨奥氏体锰钢件水韧处理技术装备的发展。例如适用于高锰钢件热处理的少氧化强密封高温热处理炉；高锰钢件热处理表面氧化减少，解决表面层脱碳而易磨损难题；适用于高锰钢件水韧处理的三维方向平移动行架式热处理台架车的应用；高锰钢件入水快，水冷效果好，能提高高锰钢铸件的综合性能（高韧性、高磨损硬化能力），示意图见图13。



图13 适用于高锰钢件水韧处理的三维方向水平移动行架式热处理台架车的应用

Fig. 13 Application of three dimensional horizontal moving frame type "heat treatment bench vehicle" for water toughening treatment of high manganese steel parts

2.9 钢铁铸件机械加工技术

淬火热处理后高硬度耐磨钢铁铸件机切加工技术已扩大应用。高强韧陶瓷刀具的研制及使用，特殊机加工工艺开发优化，解决了高硬度耐磨件（HRC \geq 50）难以车削加工的难题。

高硬度高铬铸铁件（HRC \geq 60）可以有效车削加工，例如渣浆泵护套与叶轮，立式磨机磨辊与磨盘衬板等。

高加工硬化硬度的高锰钢件可以有效车削加工，例如圆锥式破碎机轧臼壁与破碎壁、颚式破碎机颚板等。

3 磨损工况研究与工业磨损工况模拟及磨损评价技术

(1) 工业磨料磨损工况复杂多变，如何分类以

及磨损失效分析技术的应用。低应力冲刷(蚀)磨料磨损工况,例如:气送物料管道。低应力冲刷(蚀)腐蚀磨料磨损工况,例如:渣浆泵叶轮和护套、金属矿山尾矿输送管道。碾压式高应力三体磨料磨损工况,例如:立式磨机磨辊与磨盘。中小冲击磨料磨损工况,例如:水泥厂和燃煤电厂球磨机磨球与衬板。中小冲击腐蚀磨料磨损工况,例如:金属矿山球磨机磨球与衬板。大冲击腐蚀磨料磨损工况,例如:金属矿山半自磨机衬板与磨球。大冲击凿削式磨料磨损工况,例如:轧臼壁和颚板。冲击+冲刷复合磨料磨损工况,例如:斗齿、锤头和板锤。高温磨料磨损工况,例如:烧结厂齿辊破碎机齿冠。粘着磨损+磨料磨损复合磨损工况,例如:钢铁厂轧辊和导卫板。

(2) 研制和选用类型各异磨损试验机模拟不同工业磨料磨损工况,研制出相应的磨损试验方法,建立分类磨损评价技术,卓有成效。例如,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等研发检测单位,针对金属耐磨材料不同磨料磨损工况,研制和优化选用15台磨损试验机,可模拟不同工业磨损工况,并为全行业提供服务。此工程化模拟试验验证手段及磨损评价技术被国内业界高度评价。

4 我国钢铁耐磨材料与铸件标准化体系

15年来,钢铁耐磨材料与铸件行业产业与专业领域,重点开展和建立耐磨损钢铁材料关键技术、共性技术与系列国家标准的有机结合,致力于耐磨材料共性技术与系列国家标准的紧密关联,将耐磨材料共性技术及时纳入国家标准。

回顾15年来,耐磨材料行业十分重视关键技术研发与生产应用,行业技术领军单位和龙头企业致力于将成熟的关键技术上升为共性技术,再有计划地将面向行业产业的共性技术及耐磨铸件纳入系列国家标准,通过系列国家标准的规范、支撑、引领及辐射作用,扩大共性技术及产品在全行业产业的生产与应用,从而建立起特色鲜明的中国钢铁耐磨材料与铸件标准化体系。

15年来,为保障和支撑我国钢铁耐磨材料与铸件标准化体系建设,先后组建了若干钢铁耐磨材料与铸件标准化组织。2011年成立全国铸造标准化技术委员会耐磨材料标准化工作组;2012年依托中铸协耐磨分会率先开展中国铸造协会团体标准制定工作;2018年成立全国铸造标准化技术委员会耐磨材料与铸件分技术委员会(SAC/TC54/SC8);2019年成立全国矿山机械标准化技术委员会金属耐磨材料工作组(SAC/TC88/

WG3)。

15年来,基本进行了两轮钢铁耐磨材料与铸件系列国家标准的制修订,特别是修订时不断纳入新的共性技术及耐磨件,便于全行业产业共享。迄今我国钢铁耐磨材料与铸件标准化体系主要为系列国家标准(GB)和机械行业标准(JB),还包括耐磨件应用行业冶金(YB)、建材(JC)、电力(DL)和铁道(TB)等行业标准以及中国铸造协会(团体)标准(T/CFA)。系列标准被全行业产业高度重视,责无旁贷地贯标和采标生产与应用。

(1) 国家标准 10项。GB/T 5680—2023《奥氏体锰钢铸件》、GB/T 13925—2025《铸造高锰钢金相》、GB/T 8263—2025《耐磨白口铸铁件》(合并修订GB/T 8263—2010《抗磨白口铸铁件》和GB/T 24597—2009《铬锰钨系抗磨铸铁件》)、GB/T 17445—2022《铸造磨球》、GB/T 26651—2025《耐磨钢铸件》、GB/T 26652—2025《耐磨损复合材料铸件》、GB/T 32219—2025《筒式磨机 铸造磨段》、GB/T 31205—2014《耐磨耐蚀钢铸件》(计划2025年修订)、GB/T 33939—2017《立式辊磨机 磨辊与磨盘 铸造衬板 技术条件》(计划2025年修订)

(2) 机械行业标准(与大型装备机械配套)9项。JB/T 11843—2014《耐磨损球墨铸铁件》(计划2025—2026年修订)、JB/T 11001—2019《球磨机用磁性衬板 技术条件》、JB/T 6880.3—2014《泵用铸件 第3部分:泵用抗磨蚀白口铸铁件》、JB/T 13653—2019《锤式破碎机 铸造锤头 技术条件》(计划2025—2026年修订)、JB/T 13654—2019《反击式破碎机 铸造板锤 技术条件》(计划2025—2026年修订)、JB/T 13675—2019《筒式磨机 铸造衬板 技术条件》(计划2025—2026年修订)、JB/T 14325—2021《颚式破碎机 颚板 技术条件》、JB/T 14273—2021《矿山挖掘机 铸造斗齿 技术条件》、JB/T 14604—2025《圆锥破碎机 轧臼壁和破碎壁 技术规范》。

(3) 中国铸造协会(钢铁耐磨材料与铸件)团体标准 18项。《铸造磨球冲击疲劳寿命试验方法》(T/CFA 010604-1-2012)、《耐磨钢铁冲击试验方法》(T/CFA 010604-2-2014)、《锤式破碎机 铸造锤头 技术条件》(T/CFA 02010204-1-2014)、《筒式磨机 铸造衬板 技术条件》(T/CFA 02010204-3-2014)、《耐磨耐蚀铸铁件》(T/CFA 02010204-2-2015)、《反击式破碎机 铸造板锤 技术条件》(T/CFA 02010204-4-2015)、《钢铁材料冲击磨料磨损试验方法》(T/CFA 010604-3-2016)、《耐磨耐热钢铸件》(T/CFA 02010204-5-2016)、《耐磨耐热铸铁件》(T/CFA 02010204-6-2016)、《钢铁材料冲击腐蚀磨料磨损试

验方法》(T/CFA 010604.05-2017)、《铸造用钒钛生铁》(T/CFA 0202050201.02-2017)、《金属材料三体磨料磨损试验方法》(T/CFA 010604.06-2018)、《挖掘机 铸造斗齿 技术条件》(T/CFA 02010204.7-2018)、《耐磨损铸造管子和管件 技术条件》(T/CFA 020102048-2019)、《铸造高速钢轧辊》(T/CFA 020101161-2020)、《含碳化物的等温淬火球墨铸铁磨球》(T/CFA 020101242-2021)、《等温淬火球墨铸铁件》(T/CFA 020101243-2021)、《重型履带板铸钢件》(T/CFA 020102049-2022)。

我国钢铁耐磨材料与铸件标准化体系建设及系列国家标准的应用,推动钢铁耐磨材料共性技术与铸件产品的实施与生产应用。在钢铁耐磨材料高硬韧性理论的指导下,两轮系列国家标准的制修订及其应用,坚持以“硬度”或“硬度+韧性”为核心技术性能考核指标,一定程度反映出材料的耐磨性与耐磨铸件的耐磨寿命。在此情况下,系列国标标准的实施,可较好地扩大行业产业共性技术的推广应用,可规范、支撑和引领钢铁耐磨材料行业的发展。

5 钢铁耐磨材料与铸件产业技术发展趋势

(1) 钢铁耐磨材料与铸件行业产业的严峻形势与任务。耐磨铸件市场疲软和需求不足;国际关系及国际贸易战对耐磨件出口的影响;国内绿色生产及高环保要求对钢铁耐磨材料与铸件产业的挑战;耐磨材料行业研发投入少、耐磨件技术创新不足和产品质量有待提高。面对形势与挑战,接下来钢铁耐磨材料与铸件行业产业重点的任务是:研发、生产及应用高质量钢铁耐磨材料及其耐磨件,耐磨件寿命的延长(耐磨损、不断裂、不变形)和高性价比。

(2) 钢铁耐磨材料与铸件产业化技术发展方向。以提高纯净度为目标的冶炼精炼生产技术;随形金属型和铁型覆砂生产技术;以提高晶粒度等级为目标的钢铁细晶控制技术;含碳化物(陶瓷相)高锰钢技术;高硬度过共晶高铬铸铁技术;高硬化率耐磨中高碳贝氏体合金钢技术;陶瓷颗粒与预制体增硬钢铁基耐磨损复合材料技术;机器人与机械手的应用技术;

耐磨钢先铸后锻技术;耐磨钢铁挤压铸造成形技术;以成分均匀化为目标的热处理技术;以延寿为目标的先进高效专用热处理技术;绿色环保的铸造和热处理技术(减少粉尘、烟尘、气味、固废);耐磨件再制造修复技术;冶金行业耐磨低合金钢钢板制造技术。

(3) 钢铁耐磨材料与铸件产品近期研制热点和市场增长点。半自磨机衬板及其配套研磨介质(磨球)^[19-20];陶瓷增硬铁基铸造复合材料及其铸件;破碎废钢和矿石用大型锤式破碎机锤头;渣浆泵过流件。

(4) 钢铁耐磨材料与铸件产品行业影响力。部分领域领跑,如:等温淬火含碳化物奥铁体球墨铸铁件、双金属(双液和镶铸)铸件、铸造磨球与磨段;部分领域跟跑,如:过共晶高铬铸铁渣浆泵过流件和大块陶瓷预制体增硬铁基复合材料;大部分领域并跑;我国钢铁耐磨材料与铸件产品由大变强尚需进一步努力。

(5) 钢铁耐磨材料与铸件产业发展趋势。因产品低端及市场与环保压力,部分耐磨铸件企业关停或重组;产品质量及性价比高,管理水平高的耐磨铸件企业并购部分同行企业,产业集中度提高;企业加大环保投入,满足绿色制造要求;通过学习和实践,企业及企业家管理水平提升;企业重视质量管理体系建设与实施;企业愈加重视产品及技术研发与企业技术改造;企业愈加重视研发平台、质检平台、商务贸易平台的投入与建设;企业愈加重视国家标准和机械行业标准对产业的规范、支撑、指导和引领作用;企业愈加重视产品达标生产,同时着力制定和实施生产工艺控制标准,稳定持续产出高质量耐磨件;企业愈加重视以产学研合作为核心,政行产学研用合作,培养工程技术和人才,研发新技术和新产品,提高产品及技术研发水平。

致谢:中国机械工程学会铸造分会、中国铸造协会耐磨材料与铸件分会、全国铸造标准化技术委员会耐磨材料与铸件分技术委员会(TC54/SC8)、钢铁耐磨材料产业技术创新战略联盟、机械工业铸造耐磨材料工程研究中心、中信重工机械股份有限公司等耐磨件制造企业。

参考文献:

- [1] 李卫. 中国铸造耐磨材料产业技术路线图[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [2] 李卫. 中国铸造耐磨材料的发展——兼介中国铸造耐磨材料产业技术路线图[J]. 铸造, 2012, 61(9): 967-984.
- [3] LI Jie, XU Liujie, FENG Yu, et al. Hardening mechanism of high manganese steel during impact abrasive wear[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 154: 107716.
- [4] 奥氏体锰钢铸件: GB/T 5680—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

- [5] 耐磨白口铸铁件: GB/T 8263—2025 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
- [6] 铸造磨球: GB/T 17445—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [7] 郭强, 符寒光. 过共晶高铬铸铁中碳化物细化研究进展 [J]. 铸造, 2021, 70 (4): 401–408.
- [8] ZHANG Zhiguo, YANG Chengkai, ZHANG Peng, et al. Microstructure and wear resistance of high chromium cast iron containing niobium [J]. China Foundry, 2014, 11 (3): 179–184.
- [9] 平兆福, 郑宝超, 涂小慧, 等. 定向凝固技术在高铬铸铁中的应用 [J]. 铸造, 2021, 70 (8): 899–905.
- [10] 袁军平, 李卫. 铸钢及其熔炼 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2024.
- [11] 耐磨钢铸件: GB/T 26651—2025 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
- [12] 姚永茂, 周健, 陈全心, 等. 两种热处理工艺对CADI铸球力学性能和耐磨性的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (7): 749–753.
- [13] 陈灿光, 姚永茂, 陈全心, 等. 水-空交替等温淬火CADI磨球的工业实践及应用 [J]. 铸造, 2022, 71 (8): 1017–1020.
- [14] 高义民. 陶瓷颗粒增强铁基表面复合材料的研究现状与最新进展 [J]. 铸造, 2012, 61 (9): 985–990.
- [15] 魏世忠. 硬质相增强型金属耐磨材料 [M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [16] 蒋业华, 李祖来, 卢德宏, 等. 陶瓷颗粒增强钢铁基空间构型耐磨复合材料 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [17] 李卫, 王永喆, 平宪忠, 等. 国家标准GB/T 26652—2025《耐磨损复合材料铸件》[S]. 北京: 机械工业出版社, 2025.
- [18] 刘侃, 徐方伟, 涂小慧, 等. ZTA 颗粒增强高铬铸铁基复合材料界面研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (5): 398–403.
- [19] 刁晓刚, 李卫, 王春民, 等. 矿山耐磨材料的选择与应用 [J]. 矿山机械, 2020, 48 (1): 71–75.
- [20] 刁晓刚, 李卫, 陈佳侠, 等. 国内某铁矿半自磨机衬板磨损失效分析 [J]. 矿山机械, 2019, 47 (12): 30–34.

High Hardness and Toughness Wear-Resistant Iron and Steel Technology —A Perspective of the Technological Progress and Development Tendency of High Hardness and Toughness Wear-Resistant Cast Iron and Steel in China

LI Wei^{1, 2}

(1. Institute of Advanced Wear and 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:

This perspective focuses on the technological progress and development tendency of high hardness and toughness wear-resistant cast iron and steel industry in China during the past 15 years. It elaborates and evaluates China's iron and steel wear-resistant material industry and technology with addressing the theoretical and practical achievements of high hardness and toughness for iron and steel wear-resistant materials, wear-resistant austenitic manganese steel, wear-resistant white cast iron, non-manganese wear-resistant alloying steels, wear-resistant ductile irons, wear-resistant cast composite material technology, casting process, heat treatment process, wear-resistant iron and steel casting machining technology, wear working condition research and industrial wear working condition simulation and wear evaluation technology, China's standardization system for iron and steel wear-resistant materials and castings, and the development trend of iron and steel wear-resistant materials and casting industry technology.

Key words:

wear resistant materials; iron and steel; high hardness and toughness; wear resistance; casting; heat treatment
