我国铸铁生产技术现状与发展趋势

摘要

介绍了我国铸铁业发展现状，我国铸铁业在企业数量和铸件产量方面都处于主导地位，材质结构持续改善，质量稳步提升，技术含量和附加值逐步提升。分析了我国铸铁业特别是“十三五”以来取得的重要进展，铸铁材质强度、塑性和韧性持续提高，铸铁生产技术和检测控制取得长足进步，铸铁件在高铁、核电、机器人等战略新兴产业领域的应用范围逐渐扩大。最后，展望了铸铁生产技术发展趋势，铸铁行业在未来有着光明的前景。

1 我国铸铁产业现状

我国现有铸铁企业1.4万家左右，铸铁件产量占铸件总产量的70%以上，无论企业数量还是铸件产量都处于主导地位，2015-2020年我国铸件及铸铁件产量如图1所示。

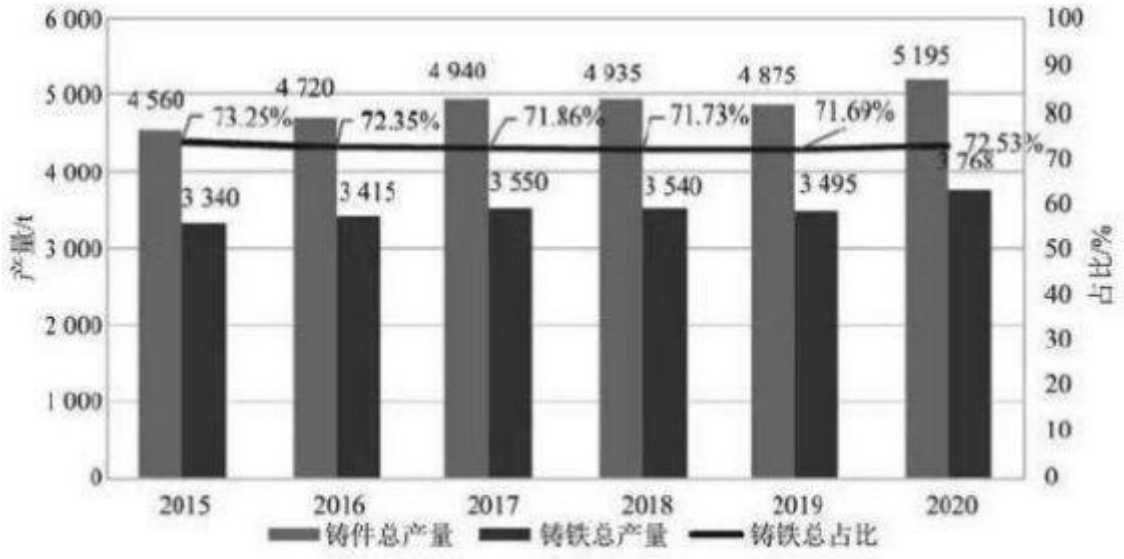


图1　2015-2020年我国铸件及铸铁件产量

近年来，我国铸铁件的材质结构进一步改善，铸铁件质量稳步提升，产量高位运行，2011-2020 年我国铸铁件材质结构变化情况如表 1 所示。球墨铸铁件在铸件中所占比例由 2011 年的 25.3%增至 2020 年的 29.5%，球墨铸铁与灰铸铁的比值由 2011 年的 0.53 上升到 2020 年的 0.70。

表 1 2011-2020 年我国铸铁件材质结构变化情况

年份	铸件产量/万t	灰铁件		球墨铸铁件		球墨铸铁/灰铸铁
		产量/万t	占比/%	产量/万t	占比/%	
2011	4 150	1 980	47.7	1 050	25.3	0.53
2012	4 250	2 010	47.3	1 090	25.6	0.54
2013	4 450	2 055	46.1	1 160	26.1	0.56
2014	4 620	2 080	45.0	1 240	26.8	0.60
2015	4 560	2 020	44.3	1 260	27.6	0.62
2016	4 720	2 035	43.1	1 320	28.0	0.65
2017	4 840	2 115	43.7	1 375	28.4	0.65
2018	4 935	2 065	41.8	1 415	28.7	0.69
2019	4 875	2 040	41.9	1 395	28.6	0.68
2020	5 195	2 175	41.9	1 530	29.5	0.70

2020 年年底，我国部分经济指标已经恢复到疫情前的水平，机械工业也得到快速恢复。受下游主机行业的带动，2020 年我国铸件总产量达到 5 195 万 t，同比增长 6.6%，其中，灰铸铁产量 2 175 万 t，同比增长 6.6%，占比 41.9%；球墨铸铁产量 1 530 万 t，同比增长 9.7%，铸铁业发展质量稳步提升。

1.1 铸铁企业规模逐年扩大，产业集中度逐年提高

铸铁企业规模逐年扩大，产业集中度逐年提高，铸铁件单厂产量接近 3 000 t/年，高于平均水平，出现了以产品或材料专业化生产且生产规模超过 40 万 t/年的铸铁专业生产厂。据不完全统计，年产 10 万 t 以上的铸铁厂有 40 多家（不包括铸管厂），年产 5 万 t 以上的有 100 多家，排名前 4 500 家规模企业铸件产量占总产量 70%以上。

1.2 绿色造型制芯技术与装备应用增加

3D 打印、砂型切削等绿色造型制芯技术与装备的应用逐渐增加（图 2），显著缩短了新产品开发周期，满足了客户个性化和定制化需求。中国机械总院、洛阳一拖、广西玉柴、宁夏共享等精密造型中心为周边提供服务，并不断扩大范围，如烟台冰轮 3D 打印智能成形工厂从砂芯制作至铸件成形实现了全自动运行。



（a）中国机械总院无模成形机　　（b）宁夏共享砂型3D打印装备

图 2 绿色造型制芯装备

1.3“专精特新”铸铁企业不断涌现

随着国际交流的广泛深入，我国铸铁件生产技术基本与世界同步，部分骨干企业的规模、装备和生产技术水平已达到国际水平，涌现了一批数字化引领和绿色化示范铸造企业（图 3），并在国际竞争中取得明显优势。



（a）广西玉柴组芯　　（b）烟台冰轮3D打印

图 3“专精特新”铸铁企业生产现场

1.4 铸铁件技术含量和附加值逐步提升

随着制造技术的不断提升和突破，铸铁件在航空航天、核电、高铁等重要领域的应用不断增加，高端铸铁件附加值凸显。近年来，上海铸造展览会涌现出一批优质金奖铸件（图 4），是我国高端铸件的代表和缩影。



（a）60万千瓦开放式低压内缸　　（b）液力变矩器定子

图 4 上海铸造展览会优质金奖铸件

1.5 铸铁标准与国际接轨

近年来，我国积极地参与铸铁国际标准的制定，新制定的铸铁国际标准 ISO 945—4：2019《铸铁金相组织第 4 部分：球墨铸铁球化率评定方法》由我国负责起草并颁布。2015 年发布的 GB/T

32247—2015《低温铁素体球墨铸铁件》标准首次规定了QT350-22牌号-50℃和QT400-18AL牌号-40℃、-50℃、-60℃时的V型缺口试样最小冲击功，高于国际标准，对生产有重要指导意义。2019年对我国2009年发布的《球墨铸铁件》进行了修订，发布了GB/T 1348—2019《球墨铸铁件》，增加了术语和定义，修改了球墨铸铁的低温冲击性能指标，增加了QT450-18、QT500-14和QT600-10三个高强度高塑性铁素体球墨铸铁牌号，增加了并排浇注试块等。同时，根据国内外铸铁技术的发展，加快了标准的修订工作，如修改采用ISO185：2020对GB/T 9439—2010《灰铸铁件》的修订，规定了QT700-10、QT800-6、QT900-5、QT1000-5等高强度高塑性球墨铸铁牌号的团体标准《高强度高塑性球墨铸铁件》编制，提高多个牌号伸长率和增加QTD1600-1牌号的国家标准《等温淬火球墨铸铁件》修订等工作也在进行之中，我国铸铁标准发展逐步与国际接轨。

2 铸铁材质强度、塑性和韧性持续提高

除产业集中度提升，铸铁业最大的进步体现在铸铁材料的强度和塑韧性持续提高。高碳当量、高强度、高刚度、低应力灰铸铁取得较大进展，并在机床、汽车行业中获得应用；蠕墨铸铁实现稳定批量生产；低温高韧性铁素体球铁，轨道交通用QT400-18AL（-60℃）低温高韧性铁素体球铁生产技术取得突破；硅固溶强化铁素体球铁，近几年在风电中得到应用，牌号QT600-10由试验期进入应用期；高强度高塑性珠光体球铁，在铁模覆砂工艺条件下，球铁材质提升到QT1000-5。近些年在铸铁材质的应用与研究方面开展了下列工作。

2.1 高强度、高刚度、低应力灰铸铁取得较大进展，

在机床、汽车行业中获得应用

随着汽车轻量化要求的不断提高，薄壁高强度灰铸铁的应用迅速推进，国内发动机的一些缸体已采用 HT300，甚至 HT350 铸铁制作。通过优化熔炼工艺，成分设计及合金化工艺等措施，解决了缸体材质高强度与高速切削的问题；“高废钢配比+增碳”工艺的合成铸铁在灰铸铁中的应用也日益增多，有效降低有害微量元素、减小收缩和白口倾向。

郑州机械研究所等单位开发了高碳当量、高强度、高弹性模量、低应力铸铁件成套技术，应用于高档数控机床用床身铸件，提高了床身的精度及精度保持性。广西玉柴机器股份有限公司在相同生产条件和工艺下向灰铸铁中加入不同量的改性 SiCp，发现改性 SiCp 弥散在晶粒中或晶界处，阻碍了位错的滑移与攀移，同时使灰铸铁的晶粒明显细化，使等强温度下的高温拉伸性能显著提升。清华大学选取了另外一个角度，通过主裂纹密度和裂纹深度两个指标找到了抗拉强度和热导率的最佳组合，发现灰铸铁的热疲劳行为与石墨片周围的氧化基体密切相关，提高热导率并降低裂纹扩展通道是有效提高灰铸铁耐热疲劳性能的方法。

2.2 蠕墨铸铁实现稳定批量生产

通过采用炉前铁液智能分析、精确加入处理等技术，蠕铁铸件蠕化率稳定控制在 80%以上，综合缺陷率和废品率显著降低，牌号提高到了 RuT500

MPa，应用范围扩大到了高铁制动盘、汽车制动鼓和增压器涡轮等。要求高蠕化率的发动机缸体、缸盖，多采用二步法稳定生产，除引进了国外 OCC 和 Sinter Cast 精确蠕化处理控制技术和设备外，国内研发也开始得到应用。

广西玉柴借鉴硅固溶强化铁素体对球铁的强化原理，开发了硅固溶强化铁素体蠕墨铸铁，其力学性能满足国标 RuT400~RuT500 的要求。

2.3 低温高韧性铁素体球墨铸铁

风电、高铁等领域对低温高韧性球铁的力学性能要求越来越高，某些风电装备的球铁件要求-40℃时三个 V 型缺口试样冲击功平均值要≥12 J；高铁京哈线、哈大线和出口俄罗斯等高寒地带的高铁车关键球铁零部件已要求 QT400-18AL 在-50℃、-60℃时的冲击功≥12 J。轨道交通用 QT400-18AL（-60℃）低温高韧性铁素体球铁生产技术取得突破，通过精细控制，可把塑性－脆性转变温度由-74.3℃降低到-81.3℃。专业厂常州华德 80%以上铸件为低温铁素体球铁，此外，锦州捷通、戚墅堰工艺所、山东新忠耀、郑州机械研究所等也批量生产低温铁素体球铁。

2.4 硅固溶强化铁素体球铁

为了降低加工成本，取消热处理和少加合金元素以降低铸件成本，发展了硅强化铁素体球铁。近年来研制的具备高强度和高韧性的 QT600-10 和 QT500-14 等硅固溶强化铁素体球铁在风电中得到应用，成功地由试验期进入应用期，宁波日月、江苏吉鑫每年生产 1 万多吨

QT500-14 和 QT600-10 材质铸件，不断满足风电主机朝着大功率的研发方向发展对铸件轻量化的进一步需求。

2.5 高强度高塑性珠光体球墨铸铁

随着发动机爆发压力的增加，普通材质的球墨铸铁曲轴已无法满足增压发动机对曲轴疲劳弯矩的要求，高强度高塑性珠光体球铁凭借其强度高、塑性好的优点，经过轴颈滚压强化后，曲轴的结构疲劳强度大幅度提高。

2020 年，广西玉柴在铁模覆砂工艺条件下成功开发的 QT1000-5（图 5），将普通珠光体基体球墨铸铁的力学性能稳定提升到“四位数”强度门槛，其制备工艺完全基于铸造车间生产条件，不添加贵重金属组分，仅通过工艺创新和攻关，解决了材料超高强度和高伸长率的矛盾，是铸铁材质的一次飞跃。

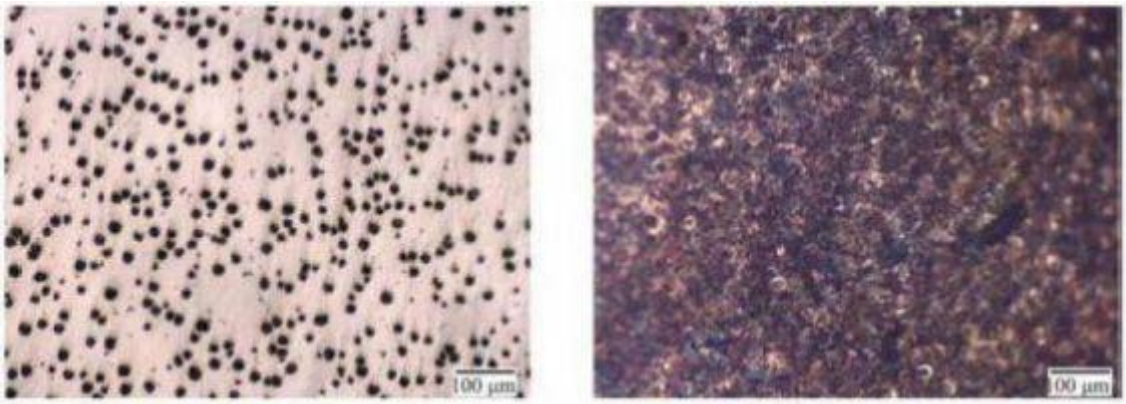


图 5　QT1000-5 金相组织

2.6 等温淬火球铁（ADI）

我国 ADI（包括 CADI）年产量约 20 万 t，工程结构件和抗磨、耐磨件（包括 CADI 磨球和奥贝磨球等）大约各占一半，其中工程结构件包括汽车悬挂件、支架、控制臂、转向节、铁路机械、农机和工程机械零件以及齿轮、曲轴等。随着原辅材料、球铁质量的提高，等温淬火球铁（ADI）由一般代用转为根据 ADI 性能特点改变设计，轻量化效果显著，应用范围不断扩大，向矿山、农机、工程机械耐磨零件扩展。

近年来，国内开展了 ADI 低温性能、双相 ADI 等温热处理、ADI 精细组织及铸态组织对等温热处理性能影响等试验研究工作，并建立了热处理专业厂（如湖北十堰奥贝科技有限公司、迁西奥帝爱、苏州艾普、长春艾普等），热处理工艺得到进一步发展。

2.7 耐高温高镍奥氏体球铁扩大应用

柴油机功率不断提高，增压器的应用越来越多，气体的排放温度越来越高；当排放温度超过 850℃，增压器壳体、排气歧管等需要用抗冲击性、抗蠕变性能强，耐蚀性、高温抗氧化性能好的高镍奥氏体球铁来制造。各国的奥氏体铸铁件标准差异很大，西峡县内燃机进排气管有限责任公司从实际生产出发，提出了其化学成分标准，将 D5S 的 C 定为 2.30%，S 含量规定为 0.03%，P 含量规定为 0.05%，由于奥氏体球墨铸铁的残留 Mg 量偏高，尚未规定标准。依据相应的标准来组织指导生产，高镍奥氏体球铁排气歧管已成为西峡县内燃机进排气管有限责任公司的主导产品。

2.8 双金属复合材料扩大应用

双金属复合材料在重型载重汽车制动鼓、制动盘上扩大应用，显著提高了制动鼓的寿命和安全性。传统的制动盘是灰铸铁材质，整体砂型铸造，驻马店恒久双金属复合材料制动盘（图 6）采用钢-铁复合结构具有安全性好（彻底杜绝脖颈处开裂）和总体重量轻（比传统盘轻 20%~25%）的优点，减少混砂、造型、制芯、落砂四大工序，更加高效节能、清洁环保。驻马店恒久镶铸法双金属复合材料为 2015 年开发，2020 年销售 100 万件，收入 5 亿元。



图 6 商用车双金属复合材料制动盘

3 铸铁生产技术取得长足进步

得益于生产技术和检测控制等方面的不断提升，铸铁业的高质量发展取得长足进步。炉前铁液热分析等技术手段日益受到重视，应用逐步增加。质量控制和检测（特别是在线检测）水平稳步提升。一大

批企业使用了国际先进水平的熔化、造型和检测设备，配有炉前氮氢氧测定仪、真空直读光谱仪和扫描电镜等先进设备和检测手段。

3.1 计算机技术的应用

计算机 CAD/CAE/CAM 包括产品数值模拟技术的发展，以及生产管理过程的自动化、数字化等，普遍提高了铸造产品研发设计数字化、铸造自动化水平。

“数字化虚拟制造技术+3DP 快速成形”在行业中的应用逐渐增多，集成 CAD/CAM/CAE 增材制造等技术，工艺流程紧凑，技术集成度提高，对技术人员综合素质要求提高，生产更加快捷，过程更加可控，浪费更少，效益显著提高。在线检测技术在造型、制芯、熔化、产品质量检验等主要工序上得到了良好应用，过程控制工序化，提高了产品质量和一致性。

3.2 新型绿色造型工艺

在造型、制芯方面，组芯造型、壳型造型以及机械手的应用逐渐扩大，视觉化机械控制造型组芯技术可提高铸件尺寸精度、减少加工余量。新型环保造型材料如宝珠砂等的研发和应用，显著提高了型砂的回收利用效率。

3D 打印、砂型切削等无模造型制芯技术与装备应用逐渐增加，缩短新产品开发周期，满足客户个性化、定制化需求。

3.3 原材料及加料技术

优质生铁、高纯生铁和废钢等原辅材料供应品种和质量有了很大改善，例如超高纯生铁的研发，为高质量铸件的生产制造提供更优质的原材料，球化剂和孕育剂的品种和质量稳步提升。计算机配料加料系统与装备的研究与应用日益增多，通过加料装备实现精确加入炉料及合金。

3.4 高质量铁液熔炼和处理技术

在铁液熔炼方面，电炉应用增长较快，处于主导地位。但对于大批量流水线生产，需要大量铁液的工厂（例如潍柴、一汽等），采用能保证铁液冶金质量、节能环保达标的大型热风、水冷、无（薄）炉衬长炉龄冲天炉或与电炉双联熔炼具有显著的优点。

3.5 铁液球化、蠕化和孕育处理技术

先进的球化、蠕化和孕育处理工艺技术与装备，如喂丝机、包芯线的研究与应用，使整个熔化、球化、蠕化和孕育处理过程连贯，数字化程度高，减少镁光烟尘，采用喂丝球化的铸铁厂达到 3 000 多家。“两步法”蠕化处理工艺与在线测控系统成功用于铸造工厂，采用红外感应、快速计算的智能化随流孕育机提高了孕育的精确度。

球化剂、孕育剂、脱硫剂、预处理剂以及包芯线等品种、规格有所发展，质量有较大提高，能满足不同用户要求。除原有球化剂外，近来新增效果比较突出的是含镧球化剂在薄壁件及低温铁素体球铁件上的应用。

3.6 铁液搬运与浇注

铁液自动化转运、定量化浇注装置的研制与应用，可缩短铁液的出炉、检测与转运时间，增加安全性，改善吊车和人工推拉小车转运铁液现状，提高熔炼设备效率；定量浇注可保证铸件质量、节约铁液用量，降低熔炼和浇注过程中的能源消耗，实现熔炼和浇注过程的绿色化。

3.7 清理打磨

近年来，打磨机器人在清理打磨环节研究与应用逐渐增多，通过打磨加工方式的选择、柔性工装夹具的设计、适度的视觉系统及偏差补偿、动力头及打磨工具的匹配等集成技术研究，机器人作业（图7）与铸造工艺、工装夹具有效融合提升自动打磨效率及质量等，显著改善了劳动环境，减少清理打磨现场的粉尘和噪音污染，提高了清理打磨效率。合肥铸锻厂针对不同类别产品、不同工艺特性实施差异化的“以机代人”清理自动化装备改造方案技术，取得了良好的效果。



图7 机器人打磨线

4 铸铁应用领域逐步拓宽

制造业高质量发展离不开关键核心零部件的支撑。随着我国高速列车、核电、军工、风力发电、汽车等行业的快速发展，对超低温铁素体球墨铸铁、等温淬火球墨铸铁（ADI）、超大断面球墨铸铁（壁厚≥300 mm）、高强度高韧性球墨铸铁以及硅固溶强化球墨铸铁需求量日益增大。近年来，铸铁件应用范围不断扩大，在高铁、核电、机

器人等战略新兴产业的应用逐渐增多，高铁机车转向架轴箱、变速箱、电机壳以及 12

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。

如要下载或阅读全文，请访问：

https://d.book118.com/867045166166006062