

我国铸钢技术发展现状及趋势

谢敬佩^{1, 2}

(1. 河南科技大学材料科学与工程学院, 河南洛阳 471023; 2. 有色金属新材料与先进加工技术省部共建协同创新中心, 河南洛阳 471023)



谢敬佩 (1957-), 男, 教授、博士、博士生导师, 河南科技大学原副校长, 材料加工工程学科带头人, 1990年从德国留学回国。国务院政府特殊津贴获得者, 河南省优秀专家, 河南省优秀教育工作者, 河南省杰出人才创新基金获得者; 河南省“创新型科技团队”带头人, 首届河南省杰出专业技术人才获得者, 教育部“有色金属新材料与先进加工技术”省部共建协同创新中心主任。中国有色金属学会理事、中国机械工程学会铸造分会常务理事。

围绕先进复合材料、新型耐磨材料、钨钼钛战略新材料和特大型铸件的关键技术和重要科学问题进行深入研究。解决了空间工程复合材料的界面结构及制备工艺、耐磨材料设计及磨损理论、特大型铸件的熔体结构、凝固特性、成型工艺、保温材料、关键工装设计与制造等相关难题, 在航空航天、重型装备大型铸件关键共性技术研究上取得新突破。已完成国家自然科学基金重点项目、国家军口863项目等国家及省(部)级科研课题35项。获国家科技进步二等奖1项, 三等奖1项, 省部级科技进步一等奖5项、二等奖12项、河南省教学成果一等奖1项。出版著作8部。发表学术论文400余篇, SCI收录150余篇, 授权发明专利48项。

中图分类号: TG26

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2022)04-0395-08

收稿日期:

2022-03-02 收到初稿

2022-03-17 收到修订稿。

摘要: 伴随着高端装备制造业的快速发展, 我国铸钢领域也出现了很多新技术、新工艺、新装备。基础研究和关键技术取得了重大突破, 大型铸钢件的组织、性能及铸件质量得到显著提高。本文重点介绍铸钢熔炼及净化技术、新型铸造合金钢、铸钢数值模拟进展、铸造企业集成制造数字化管理系统、特种铸钢生产新技术、铸钢的质量检验、百吨级大型铸钢件关键成形技术的发展现状及趋势, 展望铸钢技术发展方向。

关键词: 铸钢技术; 大型铸钢件; 发展现状; 趋势

装备制造业是我国的支柱产业, 是国家综合国力的重要体现。

自从2016年以来, 我国装备制造业总产值已超过20万亿元, 占全球比重超过三分之一, 居世界首位。但是, 我国高端装备制造业产值比重仅占10%, 发展缓慢, 其中高端大型铸件是影响高端装备制造业快速发展的瓶颈之一。

大型铸件是装备制造业大型关键零部件的重要组成部分, 是衡量一个国家或一个地区工业发展水平的重要标志。随着国防、航空航天、高铁、矿山、船舶、冶金、电力等行业向大型化的快速发展, 对大型铸件特别是百吨级铸钢件的需求量日渐增加, 且对其质量要求也越来越高, 大型铸钢件生产已成为装备制造业发展的关键环节之一。

我国的大型铸钢件制造能力已成为世界第一, 具备一次组织1 000 t钢液、生产600 t铸件、浇注600 t钢锭的能力。但我国仍不是大型铸钢件生产强国, 关键是缺乏具有自主知识产权的基础研究成果, 致使目前我国生产的大型铸钢件低端产品严重过剩, 高端产品供应不足。百吨级大型铸钢件在生产过程中具有许多难点: ①铸件重量大(100~600 t), 需要多炉同时熔炼高纯净钢液, 夹杂物形态与分布难以控制; ②铸件结构复杂, 压头高, 型腔压力大, 工艺设计没有借鉴, 铸造工艺影响因素多而且复杂; ③铸件凝固时间长, 难以形成自下而上顺序凝固的温度梯度和冒口有效补缩; ④铸件按照国外标准进行超声波、磁粉探伤检测, 技术要求高。

为使我国大型铸件的生产水平达到并能赶超世界先进水平, 急需提升基础研究和关键技术开发水平, 以便满足高端装备制造业快速发展的需要。我国铸造领域的专家学者和工程技术人员密切合作, 针对大型铸件中最具特色的百吨级大型铸钢件生产中的技术难点, 以100~600 t大型铸钢件为研究案例, 利用计算机凝固模拟技术, 耦合流动场和温度场变化, 结合大型铸钢件缺陷形成规律, 开发了大型铸钢件铸造工艺设计原则, 形成了快速充型、加快凝固、防止偏析的多包合浇技术诀窍, 建立了从宏观力学角度分析夹杂物微观力学行为模

型,开发了专用稀土复合精炼变质剂,研制了保温冒口覆盖剂材料。生产出了符合国际船级社、大型矿山装备标准的高质量铸件,解决装备制造用百吨级铸钢件生产的难题。掌握了大型铸钢件在成形过程中的基础理论、关键工艺等核心技术,满足了我国快速发展的装备制造对大型铸钢件的重大需求,有力地推动了大型铸钢件生产的技术进步。

1 铸钢熔炼及净化技术

铸钢件具有较高的强度和良好的韧性,适用于制造承受重载荷及经受冲击和震动的零件。近几年来,中国铸钢件产量在铸件占比中稳步增涨,截止2020年底产量占比升至12.2%。好的铸钢件需要优质的钢液,通过机械化、自动化、数字化、智能化技术不断发展及深入应用,工艺技术的不断改进,采用炼钢新技术,国内外在铸钢熔炼及净化技术水平方面都有很大的提升,钢液质量不断提高。

铸钢生产上应用最广泛的是电弧炉炼钢,在一些小型铸钢件的生产中,感应电炉应用也比较普遍。通过电弧炉炼钢,在钢液中仍存在气体和非金属夹杂物,微量元素也难以控制,对于质量要求较高的铸件很难达到标准要求,影响铸钢件性能。随着炉外精炼技术和真空处理技术的发展,与电弧炉和感应电炉相配合,形成联合熔炼精炼技术,极大提高了钢液的纯净度和冶炼,使钢的力学性能,特别是韧性大为提高,为高强度铸钢、超高强度铸钢、特种铸钢和不锈钢的生产创造了条件。

国内一些企业和研究单位对铸钢熔炼和净化技术也开展了很多研究工作,大型铸钢件金属熔炼中成分的精确控制技术,杂质及有害元素去除技术,真空净化除气技术等方面都取得了显著成效,对促进大型铸钢件向高水平、高质量发展有着重要作用。但目前我国一些钢种的洁净度水平还低于国外先进水平, O、N、S、P、H等杂质元素总和比国外高 20×10^6 左右^[1]。

目前我国铸钢市场产能过剩,市场竞争越来越激烈。劳动力成本和铸造原材料成本的增加,普通铸件的价格反而越来越低。企业的根本出路是提高技术和管理水平,生产高质量、高附加值的铸件。目前,铸钢冶炼领域的发展趋势主要是以下几个方面^[2-3]。

(1) 钢液熔炼向高纯净度钢液技术发展,严格控制熔炼过程,控制 $S \leq 0.005\%$ 、 $P \leq 0.012\%$ 、 $O \leq 30 \times 10^{-6}$ 和 $H \leq 5 \times 10^{-6}$ 。通过钢液精炼,控制微量元素,提高钢液质量和保证铸件质量稳定性。

(2) 开展绿色铸造技术,提高清洁化生产水平,钢液熔炼向智能化方向发展,通过机械化与智能化控制冶炼过程,减少人为操作过程的不确定性。

(3) 在冶炼和铸造工艺设计过程中,采用计算机模拟技术,了解冶炼材料特性,模拟铸件的充型、凝固过程,从而优化工艺,提高铸件质量。

(4) 继续开展高端铸件的材料及冶炼工艺研究,尤其对高端铸件熔炼过程中有害元素及标准成分的优化问题。完善铸造材料工程应用基础数据,如海工装备用耐海水腐蚀双相铸造不锈钢材料体系等,建立起以服役条件为指导的质量及制造体系。

(5) 开展新型发电设备用大型高端铸钢件铸造技术,通过技术创新和工艺改进摆脱对部分核电设备用大型不锈钢铸件和新型火电设备用耐高温铸件进口的依赖。国内特大型合金钢铸锭熔铸过程内部缺陷控制技术和极端工作条件下服役过程可靠性仍需攻关。

2 新型铸造合金钢

随着科技的发展,各个行业对铸件的使用要求愈来愈高,为满足市场需求,国内外企业在现有钢种基础上进行不同程度的优化和创新^[4]。为响应国家政策,铸造业朝着轻量化、绿色化方向发展,国家在铸造新技术发展趋势中提到开发新型铸造合金钢,发展含氮不锈钢等性价比高的铸钢材料。

2.1 新型抗蠕变铸钢

抗蠕变铸钢是一种被广泛应用于超临界和超临界汽轮机上的特殊钢材。材料成分复杂、标准范围窄、技术要求高,生产难度极大;国内厂家设备、工艺相对落后,生产的铸件常因气孔、裂纹等缺陷报废。而欧洲研制出含Cr量9%~12%的新型抗蠕变铸钢GX-12CrMoWVNbN10-1-1,主要应用于机组中的重要部件如主汽门阀壳、再热主汽门阀壳等^[5],在100 MPa、600 °C的使用环境下,寿命可达100 000 h以上。

2.2 低碳镍铬钼铸钢

该类钢在大型重载装备上应用较为广泛,典型材质如1E4762,属高韧性低碳镍铬钼铸钢,等同于国内ZG20CrNi2Mo牌号,具有强度高、耐磨性好、拥有高强度高耐磨性的同时具备良好的塑韧性,在-40 °C条件下,V型冲击功达50 J以上。主要用于斗轮挖掘机等超重载作业的矿山装备。

2.3 超级马氏体不锈钢

04Cr13Ni5Mo是针对水电站研制的一种水电专用不锈钢^[6],属于典型的超级马氏体不锈钢,在普通马氏体不锈钢基础上降低C、N、S含量,增加一定量的Ni、Mo等合金元素。凭借其优良的综合性能被广泛应用于水电项目,如水轮机、叶片的原材料,同时在采

矿设备、化工设备、食品工业、运输和高温纸浆生产设备等领域拥有巨大的潜力^[7]。

2.4 无钼镍高强度耐磨铸钢

该钢中不含Ni、Mo等高成本合金元素，以廉价Si、Mn为主要合金元素，并加入少量Cr，同时用B和N改善铸钢淬透性，用Ca、Ti、Mg和钇基稀净化凝固组织^[8]，该钢淬火后能抑制碳化物析出，获得无碳化物的贝氏体、铁素体和残余奥氏体。此铸钢原料来源丰富，价格低廉，工艺简单，综合性能优越，使用寿命比高锰钢提高100%~300%^[9]。

2.5 25Cr-20Ni系耐热钢

日本研究开发了25Cr-20Ni系耐热钢材，即在奥氏体系耐热钢基础上（如Fe-20Ni-25Cr耐热钢）添加特殊元素，提高合金的高温强度及热稳定性，该材料作为新型薄壁耐热钢已应用于轿车、卡车等发动机排气系统。

2.6 新型锰-钼-钒系合金钢

代表性材质ZG12MnMoV，ZG12MnMoV是我国为某核电工程主泵蒸发器支承件研制的锰-钼-钒系合金钢，具备传统铸钢领域无法达到的特殊要求，如安全性、可靠性、抗震性和耐久性。主要应用于核电工程主泵蒸发器支承件，该材质的成功研制大大提高了核电站的系统安全，乃至核安全^[10]。

3 铸钢数值模拟进展

铸钢件充型凝固数值模拟研究最早开始，我国由大连理工大学、沈阳铸造研究所、西北工业大学、哈尔滨工业大学、清华大学、华中科技大学等在20世纪70年代、80年代陆续开展。经过近五十年努力，已经建立了较为完善的铸造过程模拟仿真研究体系，包括各种铸造方法，如砂型铸造、消失模铸造、精密铸造等。开发的模拟分析软件包括传热分析、充型流动、应力变形、组织模拟等，也在逐渐将充型凝固过程的模拟扩展到整个铸件生产过程，如铸件凝固后冷却、落砂清理、后续热处理等，初步实现了全过程的模拟仿真^[11]。

国外铸造模拟仿真研究早在20世纪60年代就已经开始对铸造凝固过程进行数值模拟。近60年发展，铸造数值模拟物理量已经从最初的凝固过程温度场扩充至三维的流动场、应力场、浓度场、电磁场等，在宏观方面已经较为成熟。后续基础研究重点正由宏观模拟走向微观模拟，包括毫米级、微米级和纳米级，涉及结晶形核长大、树枝晶与柱状晶转变到金属基体控制及宏、介、微观之间模型的耦合计算等各个方面^[12-13]。

另外，质量控制模拟正在由原来的控形向微观组织模拟、性能及使用寿命预测的控性方向发展。

目前，商业化的铸造CAE软件主要采用的方法是有限差分法、有限元法、有限体积法等。采用有限差分法的铸造CAE软件如国内清华大学的“铸造之星”、华中科技大学的华铸CAE、德国的MAGMASOFT，采用有限元法的铸造CAE软件如法国的ProCAST^[14-16]。

钢锭凝固过程中常产生宏观偏析等缺陷，易导致铸钢锭的微观组织和力学性能产生差异。国内外也开展了钢锭在凝固过程中的宏观传热、流动与微观传质行为数值模拟研究。从20世纪60年代开始，宏观偏析的溶质再分配模型经过几十年的发展，铸钢锭凝固过程偏析数值模拟已经取得了较大的进展，如国内清华大学、沈铸所、华科大等单位做出了较多成果^[17-20]，物理场方面拓展考虑了温度、成分以及速度等；尺度方面已经实现宏观与微观尺度的结合，并向原子尺度扩展。因此，多物理场耦合和多尺度模拟也成为了其发展趋势。相对于铸钢件充型凝固过程，钢锭的商业化软件成熟度要低一些。目前较多的应用是结合具体的实例，影响力较大的商业化软件还需进一步的应用研究。

4 铸造企业集成制造数字化管理系统

21世纪信息技术的爆发带动了整个制造业的发展，制造系统集成式创新不断发展，形成了新一轮工业革命的主要驱动力^[21]。计算机集成制造系统（CIMS）于20世纪提出，例如铸造行业ERP，作为传统铸造与现代管理及信息化高新技术相结合的典范，它是铸造企业长期建设和发展的方向，也是助力铸造企业腾飞的生产力^[22]。铸造企业的信息化建设，是企业生存和发展的需要^[15]，对信息化技术的开发和利用已经成为铸造企业提升核心竞争力的最重要手段之一^[23]。

在铸造生产智能排产方面，优化生产计划是提高资源利用率和企业运行效益的关键环节。例如基于人工蚁群算法解决打磨工序调度问题^[24]、回溯搜索算法与教与学算法解决热处理装料问题^[25]。科学地部署生产计划能够有效提升整个企业水平，在实现生产车间硬件的管理的同时，将遗传算法^[26]等优化算法引入进来，对于单件小批量砂型铸造企业而言，建立熔炼浇注炉次计划等的组合优化问题模型、基于炉次计划模型开发炉次计划系统具有重要的工程意义^[27]。

在铸造工艺智能设计与质量智能检测方面，近年来，学者基于多源数据、大数据、深度学习等新思路新技术，实现工艺分析优化与缺陷识别。华中科技大学材料学院针对钛合金铸件内部缺陷提出了选择性搜

索与均布式卷积神经网络^[28]、改进的深度密集卷积神经网络^[29]，可有效解决缺陷检测识别问题。

智能制造的前景与应用被广泛认可，近些年学者将目光聚焦于如何让数字孪生在制造业实现应用。北航自动化学院的陶飞等人^[30]提出数字孪生车间概念，阐述了其组成、特点等，为数字孪生未来的应用提供了技术和工具参考。北理工机械与车辆学院的熊辉团队^[31]提出了多层次三维可视化监控模式并开发了原型系统。2021年关于铸造企业数字孪生的研究开始有一些报道。

在我国铸造行业，已有部分企业在智能制造方向走在了前列。在未来发展过程中，笔者认为具备双向数据集成与安全控制的智能化铸造装备技术、高柔性化铸造生产与检验装备技术、大数据与数据云端技术、人工智能技术等都会是铸造企业实现阶段式突破的源动力。智能化铸造将会从部分点的智能化应用逐步向“多点”乃至“面”的智能化应用方向发展，进而催发越来越多的新兴技术。

5 特种铸钢生产新技术

随着航空航天、军工、化工和高端汽车等行业高速发展，传统铸造方法已无法满足高品质要求，特种铸造生产新技术，如电渣熔铸、连铸连铸、消失模铸造、半固态铸造和激光熔覆等技术得到大力推广。通过优化铸型制造工艺、改善充填及凝固条件等方法，实现铸件近净成形、质量优异、尺寸精度高、生产效率高和环境污染少，并逐步实现自动化、智能化。

5.1 电渣熔铸技术

电渣熔铸技术具有组织致密、纯净度高和成分均匀等特点^[32-33]，应用于综合性能要求较高零部件毛坯。国外以美国、德国和瑞典等为代表，其电渣重熔装备和技术较为成熟，并大范围推广应用在航空航天、军工和核电等行业。我国在理论研究方面，如热平衡计算、渣系开发和热平衡计算等贡献了较多独创性工作。沈阳铸造研究所采用电渣熔铸技术制造出水轮机导叶铸件，具有杂质元素低、组织致密、材料利用率高等特点，显著提高了产品塑韧性、抗疲劳和抗汽蚀性能。电渣重熔冶金新技术以电渣连铸、可控气氛和液态电渣浇注为代表，未来将与钢铁冶金流程紧密结合，有着广阔应用前景。

5.2 连铸连轧技术

中国拥有较多薄板坯连铸连轧生产线，在高效连铸、电磁连铸技术等方面发展迅速，但双辊薄带连铸技术距离国外先进水平仍有一定差距。珠钢、宝钢

等企业与科研院所联合开发了薄板坯连铸连轧流程微合金化技术，实现钢带晶粒和析出物的细化，制备出高强度和良好塑韧性钢带^[34]，已应用于工程机械、特种设备等领域。河南科技大学开发了半熔态连续铸轧复合技术^[35]，实现低铸轧力下宽幅铜板带和铝液无氧化短流程复合成形。未来连铸连轧技术将围绕更广泛高附加值合金、更大规格、高效节能和智能化控制等方向发展。

5.3 消失模铸造技术

消失模铸造技术以近无余量、精确成形的特点^[36]，大量推广应用于形状复杂的管状、箱体和缸体类等，多用于耐磨、耐热和耐腐蚀等铸钢件。M.R. Barone等^[37]建立了消失模中金属液与泡沫模气体扩散和热量传递等模型，可较好指导充型凝固过程。为解决铸钢件增碳问题，除了减少泡沫模型含碳量，富氧燃烧技术、负压燃烧空壳铸造、排碳法和无薄膜密封等消失模铸造新技术逐步推广应用。随着中大型规格和综合性能要求更高铸钢件需求与日俱增，消失模铸造技术正值快速发展期，未来将重点围绕先进技术、新型泡沫模材料、材料成分设计、合成涂料、废气环保净化和智能化生产等方面发展。

5.4 半固态铸造技术

半固态铸造技术具有近终成形、生产效率高、组织均匀和气孔偏析少等特点^[38]，广泛应用于汽车、航空航天和电子等高端零部件领域。近年来利用模锻、轧制等传统技术与半固态金属流变和触变成形相结合，开发出复合铸造法和铸锻成形等新技术，可明显改善材料的组织和性能。英国布鲁内尔大学开发出半固态金属双螺旋流变挤压工艺，通过双螺旋杆转动产生较强剪切速率和紊流获得半固态金属浆料，实现多种金属高效制备成形。北京科技大学研制了高熔点黑色金属的半固态铸造成形装置，实现了高碳工具钢、不锈钢等钢种的制备。但是，我国受制于成形设备研发，距离国外先进水平仍有差距。随着高品质、精密铸件产品需求增大，未来技术将朝向高性能合金材料开发、数值模拟仿真、新型制浆及流变成形一体化等方面发展。

5.5 激光熔覆技术

激光熔覆技术具有熔覆层组织致密、强度高和高耐磨性等特点，广泛应用于船舶、航空航天和工程机械等行业^[39]。国际上Trumpf、Rofin和Laserline等技术处于领先，已实现标准化和规范化。美国AeroMet公司激光熔覆制备的Ti-6Al-4V钛合金飞机零部件疲劳

寿命可提高两倍。Zhu等^[40]采用激光熔覆与超声波相结合在45#钢表面熔覆了Inconel 718合金,熔覆层实现了晶粒细小、气孔率低和耐磨性能优异。激光熔覆技术综合了材料、光学及控制工程多学科,未来将围绕数值模拟、熔覆材料设计、工艺参数和智能化等方面发展。

6 铸钢件的质量检验

大型铸钢件由于铸造工艺复杂、生产周期长、工序较多,不可难免产生一些铸造缺陷。这些缺陷不同程度地影响其外观及内在质量,进而影响其使用性能。为了获得优质的大型铸钢件,必须进行规范的质量检验。

在铸钢件的质量检验中,铸钢件的尺寸检测、力学性能检测以及无损检测作为上述核心关键部件制造工艺优化和质量控制的重要支撑。

6.1 大型铸钢件的尺寸测量

目前,大型铸钢件普遍使用的尺寸测量方法有传统的手工测量、三维划线仪等。由于传统方法测量精度差、效率低,易出现人为和计算错误、严重制约铸钢件生产效率的提高。同时,由于大型铸钢件尺寸及形状设计越来越复杂,对大型铸钢件的质量要求越来越高,因此,传统尺寸检测方法已无法满足大型铸钢件的测量需要。目前,大型铸钢件尺寸检测经过多年的发展,已成功运用光学及智能化空间坐标测量技术^[41-44]。因其具有高精度、高效率的特点,并且能够自动拟合分析及计算,正逐渐取代传统的测量技术。

6.2 力学性能检测

目前,铸钢件的力学性能检测主要包括拉伸、冲击及硬度等测试方法,这些传统的力学性能大都是在铸钢件附铸试块进行取样、加工并进行相关试验。这种传统的抽样式、破坏性的方法检测结果代表性差、效率低,且无法获得整体的力学性能分布状态。为突

破传统的力学性能抽样、破坏性检测技术存在的局限性,国外学者率先提出并发展了一种力学性能微磁无损检测新方法,以适应特定产品的性能检测需求^[45]。国外已开发出力学性能微磁无损检测仪,例如芬兰 Stresstech公司开发的巴克豪森噪声检测仪;德国 Fraunhofer-IZFP研制的3MA-II型多功能微磁测量仪。国内团队针对微磁技术与仪器也做了大量研究^[46],例如北京工业大学利用研制的微磁无损检测仪对铸钢大齿轮本体性能进行了应用研究。

6.3 无损检测

铸钢件无损检测主要采用磁粉、超声波和X射线检测等方法。磁粉探伤只能检测工件表面缺陷而不能检测工件内埋藏较深的缺陷。超声波检测对检测物表面平整度有极严格的要求,且缺陷显示不直观,评判困难,因而在很多场合受到一定的限制。低能X射线胶片照相检测又存在穿透能力差、检测效率低、读片及档案管理不便等缺点^[47]。而已应用于生产中的铸钢件高能X射线数字化辐射成像系统(DR)具有穿透能力强、检测速度快、评判直观方便、数字化档案管理方便等优点,实现了铸钢件内部缺陷的快速实时在线检测^[48];但其具有影像重叠的缺点,使得更高精度要求的检测和测量变得十分困难,实际应用中将工业CT技术和DR技术相结合可以弥补这一缺点^[49-50]。因此,高能X射线工业CT/DR检测系统已成为无损检测研究和应用的重要趋势,在铸钢件内部质量的快速和高精度检测等领域具有巨大的发展空间。

7 百吨级大型铸钢件关键成形技术

大型铸件是装备制造业大型关键零部件的重要组成部分,是衡量一个国家或一个地区工业发展水平的重要标志。随着矿山、船舶运输、冶金、电力等行业向大型化的快速发展,对大型铸件特别是百吨级铸钢件的需求量日渐增加(如图1),且对其质量要求也越



(a) 18 500 t油压机下横梁(365 t)

(b) 18 500 t油压机上横梁(520 t)

图1 18 500 t油压机上、下横梁

Fig. 1 Upper and lower beams of 18 500 t oil press

来越高,其生产已为装备制造业发展的关键环节。针对船舶制造业、矿山机械等行业百吨级大型铸钢件,掌握了其成形过程中的关键基础数据、基础工艺和基础实验为核心的基础共性技术,满足了我国快速发展的装备制造业对大型铸钢件的重大需求,有力地推动了装备制造业大型铸钢件生产的技术进步^[51-56]。

(1) 基于百吨级大型铸钢件的铸造过程中流场与温度场的相互影响,采用充型和传热的耦合数值模拟,结合顺序凝固方式,建立“完全开放式”浇注系统概念,从而实现顺序凝固。制定了大型铸钢件铸造工艺设计原则:冒口设计采用有效补缩距离控制,变截面采用等热容补贴和间接外冷铁,浇注系统采用从冒口入水的最短流程钢液充型设计,钢液顺向入型,控制由远及近、自下而上的温度梯度。控制铸件上升速度为5~20 mm/s,铸件本体浇注时间大于50 s,最佳充型时间为90 s/100 t钢,确保铸件具备合理充型温度场和凝固收缩正温度梯度场,保证获得高品质铸件。

(2) 针对大型铸钢件中存在的不同类型、形状与分布的夹杂物,计算了在变载荷作用下夹杂物及其周围基体等效应力场的分布,建立了从宏观力学角度分析夹杂物微观力学行为模型,据此开发了专用稀土复合精炼变质剂,消除基体粗晶组织,改善夹杂物形态与分布,提高了铸件力学性能。

(3) 依据相图,通过研究SiO₂、CaF₂、酸性石墨对覆盖剂导热性、熔点、膨胀性的影响,研制了一种以硅酸盐为主体系的、且适合于百吨级大型铸钢件用的保温冒口覆盖剂材料,优化了加入方式,提高铸件工艺出品率5%~8%。

8 结论与展望

(1) 铸钢熔炼及净化技术的发展机遇和挑战共存。良好的政策、旺盛的高端市场需求以及迫切的技术发展需求,将促进铸钢熔炼及净化技术往优质、高效、智能和绿色方向发展。同时,也将面临需要工艺水平不断提高、环保政策不断严苛、高水平同行的竞争日趋激烈、先进材料成形技术的激烈竞争,以及需要系统完备的铸钢冶炼及净化理论等方面的严峻挑

战。

(2) 提高铸件质量的一个关键点是提高铸件内在质量,也就是从材质上来根本性地解决问题。单一材料的性能已经远远不能满足当今制造业的高要求,发展新型铸造合金材料势在必行,这同时也使得合金材料的铸造技术成为目前国内铸造技术发展的必然趋势与方向。

(3) 提高双向数据集成与安全控制的智能化铸钢生产装备技术和高柔性化铸钢生产与检验装备技术,加快铸钢智能排产系统、图像与深度学习驱动的铸钢件缺陷检测技术和质量大数据分析技术及铸钢企业应用。

(4) 提高高精度缺陷量化预测技术、热物性参数反求技术、智能化铸造工艺设计与优化技术和铸造全流程模拟技术,推进铸造全流程模拟与数字化管理融合。

(5) 随着国家“碳达峰,碳中和”目标的提出,具有轻量化、高性能、近净成形和低耗能等特点的铸件产品需求量与日俱增。新技术发展需加强创新,重点围绕材料成分设计开发、高性能先进铸造设备国产化与智能化、交叉学科融合,尤其是先进成形基础理论研究工业化应用的协同创新等方面发展。

(6) 随着铸钢件质量及服役安全验证要求的不断提升,传统的质量检验已无法满足实时、在线、快速作业的需要,可视化无损检测技术应运而生。将可视化技术应用于产品质量检测与评估,具有清晰、直观、精准等优点,对提高产品检测效率和精度,实现大规模工业化、信息化、智能化检测具有重要意义。

致谢: 论文写作过程中得到了以下单位人员的大力支持与帮助,在此表示由衷的感谢!

华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室的周建新、殷亚军、计效园; 中信重工机械股份有限公司: 王行、贾冠飞、宋亚虎、元亚莎; 河南科技大学材料科学与工程学院及有色金属新材料与先进加工技术省部共建协同创新中心: 王爱琴、马窦琴、王建、柳培、毛志平。

参考文献:

- [1] 张立峰, 王新华. 洁净钢与夹杂物 [C]//第十三届全国炼钢学术会议论文集, 2004: 12-51.
- [2] 陈瑞, 田雨, 吴铁明, 等. 铸造技术路线图: 铸钢 [J]. 铸造, 2017, 66(8): 6-12.
- [3] 于波, 孙逊. 铸造技术的发展现状与趋势 [J]. 铸造设备与工艺, 2017(2): 72-77.
- [4] SONG Y P, LUO Q S, CHEN Q D. Effects of RE-B modification on the strength and toughness of 30CrMn2Si cast steel [J]. Journal of Materials Science, 1994, 29: 1492-1496.
- [5] 王强, 吴铁明, 蔡娟. 1000 MW超临界汽轮机9%~12%Cr铸钢件焊接与热处理工艺实践 [J]. 铸造技术, 2016, 37(3): 4.
- [6] 曹阳. 超级马氏体不锈钢04Cr13Ni5Mo焊接性能研究 [J]. 四川水力发电, 2021, 40(5): 59-65.

- [7] 王治宇, 许海刚, 宋红梅. 04Cr13Ni5Mo超级马氏体不锈钢焊接性能研究 [J]. 宝钢技术, 2016 (4): 21-25.
- [8] 柴增田. 球磨机衬板用新型抗磨铸钢 [J]. 铸造技术, 2014, 35 (12): 2948-2951.
- [9] 王定祥. 球磨机衬板用钢的研究与应用 [J]. 铸造技术, 2009, 30 (12): 1540-1542.
- [10] 张争险, 黄放, 张晏. ZG12MnMoV铸钢热物理力学性能及淬火组织预测 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (12): 75-78.
- [11] 周建新, 殷亚军, 沈旭, 等. 铸造充型凝固过程数值模拟系统及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [12] 张昂, 郭志鹏, 蒋斌, 等. 合金凝固组织和气孔演变相场模拟研究进展 [J]. 中国有色金属学报, 2021, 31 (11): 2976-3009.
- [13] 王同敏, 魏晶晶, 王旭东, 等. 合金凝固组织微观模拟研究进展与应用 [J]. 金属学报, 2018, 54 (2): 193-203.
- [14] 周建新. 铸造计算机模拟仿真技术现状及发展趋势 [J]. 铸造, 2012, 61 (10): 1105-1115.
- [15] 周建新, 殷亚军, 计效园, 等. 熔模铸造数字化智能化大数据工业软件平台的构建及应用 [J]. 铸造, 2021, 70 (2): 160-174.
- [16] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造行业“十四五”技术发展规划 [EB/OL]. <http://zhuzhaotoutiao.com/xw/html/4101.shtml>.
- [17] 徐达鸣, 司广蹙, 李庆春, 等. 钢锭凝固与偏析形成的多元合金连续介质模型 [J]. 机械工程学报, 2002 (9): 136-139.
- [18] 沈厚发, 陈康欣, 柳百成. 钢锭铸造过程宏观偏析数值模拟 [J]. 金属学报, 2018, 54 (2): 151-160.
- [19] 汪洪. 螺旋电磁场下铸造熔炼和凝固过程多物理场耦合数值模拟 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [20] 周建新. 铸造熔炼过程模拟与炉料优化配比技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [21] 周建新, 计效园. 铸造企业数字化管理系统及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [22] 颜秋余, 张爱斌, 计效园, 等. 基于华铸ERP的航空钛合金铸造大纲式工艺管理 [J]. 铸造, 2020, 69 (3): 292-296.
- [23] JI X, YE H, ZHOU J, et al. Digital management technology and its application to investment casting enterprise [J]. China Foundry, 2016, 13 (5): 301-309.
- [24] 陈发源, 卢旭锋, 侯蔼麟, 等. 基于改进人工蜂群算法的砂型铸造打磨工序并行机调度 [J]. 铸造, 2021, 70 (5): 582-589.
- [25] ZHOU J, YE H, JI X, et al. An improved backtracking search algorithm for casting heat treatment charge plan problem [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30 (3): 1335-1350.
- [26] 张明珠, 计效园, 周建新, 等. 砂型铸造企业熔炼批量计划与调度模型及求解方法 [J]. 铸造, 2018, 67 (5): 414-419.
- [27] JI X, YE H, ZHOU J, et al. An improved teaching-learning-based optimization algorithm and its application to a combinatorial optimization problem in foundry industry [J]. Applied Soft Computing, 2017, 57 (4): 504-516.
- [28] JI X, YAN Q, HUANG D, et al. Filtered selective search and evenly distributed convolutional neural networks for casting defects recognition [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 292 (2): 117064.
- [29] WU B, ZHOU J, YANG H, et al. An ameliorated deep dense convolutional neural network for accurate recognition of casting defects [J]. Knowledge-Based Systems, 2021, 226 (8): 107096.
- [30] TAO F, QI Q. Make more digital twins [J]. Nature, 2019, 573: 490-491.
- [31] 赵浩然, 刘检华, 熊辉, 等. 面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (6): 1432-1443.
- [32] 张达, 叶凯, 唐政刚, 等. 等离子体冶金的现状与发展 [J]. 中国有色金属学报, 2021 (7): 1907-1921.
- [33] 曹江海, 侯自兵, 郭东伟, 等. 模具钢电渣重熔铸坯凝固组织形貌的分形特征 [J]. 钢铁研究学报, 2019, 31 (3): 286-295.
- [34] 张剑君, 毛新平, 王春峰, 等. 薄板坯连铸连轧炼钢高效生产技术进步与展望 [J]. 钢铁, 2019, 54 (5): 1-8.
- [35] 张衡, 谢敬佩, 尚郑平, 等. 铸轧法制备铜-铝-铜复合板的界面组织与性能 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2015, 36 (3): 1-8.
- [36] 黄乃瑜, 叶升平, 樊自田. 消失模铸造原理及质量控制 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
- [37] BARONE M R, CAULK D A. A foam ablation model for lost foam casting of aluminum [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 4132-4149.
- [38] 毛卫民. 半固态金属成形技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [39] 徐一飞, 孙耀宁, 王国建, 等. 高速激光熔覆铁基金属涂层的组织及性能研究 [J]. 中国激光, 2021, 48 (10): 216-224.
- [40] ZHU L, YANG Z, XIN B, et al. Microstructure and mechanical properties of parts formed by ultrasonic vibration-assisted laser cladding of Inconel 718 [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 410: 126964.
- [41] 马金鑫, 李文定, 马文治. 光学空间尺寸测量技术在大型铸钢件尺寸检测过程中的应用 [J]. 中国铸造装备与技术, 2021, 56 (2): 37-40.
- [42] 沙学录, 马金鑫, 赵树文, 等. 大型铸件尺寸数字化检测方法的研究与应用 [J]. 铸造设备与工艺, 2020 (3): 26-42.
- [43] 陈瀚, 张思瑾, 高见, 等. 基于多个线激光传感器旋转扫描的铸钢车轮在线三维测量技术 [J]. 中国激光, 2019, 46 (7): 0704006.
- [44] 许昊, 朱耀华, 仝芮华, 等. 三维检测技术在铲斗头部机加工中的应用 [J]. 金属加工 (冷加工), 2021 (7): 73-76.
- [45] STUPAKOV O, PEREVERTOV O, TOMAS I, et al. Evaluation of surface decarburization depth by magnetic Barkhausen noise technique [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011, 323 (12): 1692-1697.
- [46] 刘秀成, 尚万里, 王贤贤, 等. 力学性能与残余应力的微磁无损检测技术研究进展 [C]//2018年全国固体力学学术会议, 2018.
- [47] 郑世才, 王晓勇. 数字射线检测技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 144-145.
- [48] 卢艳平, 王珏, 李卫兵, 等. 铁道货车铸钢件高能X射线数字化辐射成像无损检测系统研制及应用 [J]. 中国铁道科学, 2009, 30

(1) : 139-143.

- [49] 高金生, 宋全知, 刘莹, 等. 铁道铸钢件大型卧式高能工业CT/DR检测系统及其应用 [J]. 铁道车辆, 2015, 53 (12) : 47-49.
- [50] 陈志强, 李亮, 冯建春. 高能射线工业CT最新进展 [J]. CT理论与应用研究, 2005, 14 (4) : 1-4.
- [51] 岳宗格. 大型磨机端盖铸造工艺研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [52] 张慧敏. 远洋货轮挂舵臂铸造工艺优化及冒口覆盖剂研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2007.
- [53] 庞富伟. 大型齿轮圈计算机凝固过程模拟及MH型覆盖剂的研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2009.
- [54] 王爱琴, 谢敬佩, 王文焱, 等. 大型磨盘铸钢件计算机工艺优化 [J]. 矿山机械, 2002, 33 (10) : 50-51.
- [55] 谢敬佩, 李卫, 宋延沛, 等. 耐磨铸钢及熔炼 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [56] 谢敬佩, 王爱琴, 王鹏飞, 等. 百吨级铸钢件铸造技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.

Development Status and Trend of Steel Casting Technology in China

XIE Jing-pei^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China; 2. Provincial and Ministerial Co-Construction of Collaborative Innovation Center for Non-Ferrous Metal New Materials and Advanced Processing Technology, Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract:

With the rapid development of high-end equipment manufacturing industry, many new technologies, processes and equipment have been applied to the field of steel casting in China. Due to major breakthroughs in basic theoretical research and key preparation technologies, the microstructure, performance and casting quality of the large steel castings have been significantly improved. This paper focused on the development status and trend of the steel casting technology, such as the smelting and purification technology of the cast steel, new cast alloy steel, progress in numerical simulation of the cast steel, digital management system of integrated manufacturing of foundry enterprises, new technology of the special cast steel production, quality inspection of the cast steel, and key forming technology of the 100-ton large steel castings. The development direction of the steel casting technology is prospected.

Key words:

steel casting technology; large steel castings; development status; trend