

铸造涂料研究进展与发展趋势

宋会宗

(苏州兴业材料科技股份有限公司, 江苏省苏州市, 215151)

*通讯作者: 宋会宗, 男, 正高, 博士。E-mail: hz.song@chinaxingye.com

摘 要: 本文综述了国内外铸造涂料最新的研究进展及未来趋势。重点综述了国内外利用先进和创新的研究手段如高温激光共聚焦显微镜、SEM-EDS-XRD、急冷-聚焦离子束、高温显微镜等研究涂料与金属液界面反应机理的最新研究成果及其在缺陷控制中的应用。介绍了几种新型涂料的开发如无机陶瓷涂料、3DP 专用涂料、无机砂芯专用水基涂料、防甲醛涂料等。介绍了纳米材料、石墨烯、BN 等高新技术新材料用于提升涂料性能及功能及缺陷控制方面的研究。本文还介绍了最新的涂料智能在线检测技术用以实现涂层精准质量控制。在未来趋势中聚焦 AI 与数字孪生技术、高熵陶瓷等新材料用以突破涂料性能极限。

关键词: 铸造涂料; 界面反应机理; 无机陶瓷涂料; 3DP 涂料; 防甲醛涂料; 无机砂芯; 数字孪生; AI 应用

Research Progress and Development Trends in Foundry Coatings

SONG Hui-zong¹

(1 Suzhou Xingye Materials Technology Co. Ltd. Jiangsu Prov., Suzhou, 215151, PR China)

Abstract: This paper reviews the latest research progress and future trends at home and abroad. The research results and their application in defect control are reviewed focusing on the research methods such as advanced and innovative research means such as high-temperature laser confocal microscope, SEM-EDS-XRD, quench-focused ion beam, heating microscope, etc., which are used to the reaction mechanism of the interface between coating and molten metal. Several kinds of newly developed coatings are introduced, such as inorganic ceramic coatings, 3DP special coatings and inorganic sand core special water-based coatings, formaldehyde-proof coatings, etc. The researches on the use of new materials such as nano materials, graphene, BN, etc., to improve the suspension, thermal conductivity and high-temperature stability of coatings are also introduced. This paper also introduces the latest intelligent online detection technology for foundry coatings to achieve precise quality control of coatings. In the future trend, focus on AI and digital twin technology, high entropy ceramics and other new materials to break through limits of coating performance.

Keywords: Foundry coating; Interface reaction mechanism; Inorganic ceramic coating; 3DP coating; Formaldehyde-proof; Inorganic sand core; Digital twin; AI application

1 前言

铸造作为现代制造业的基础工艺, 其核心目标在于高效、精准地获得内部组织致密、表面质量优良的金属构件。铸造涂料作为涂覆于铸型(芯)表面的功能性涂层, 承担着多重关键作用: 隔离金属

液与铸型材料, 防止化学粘砂与机械渗透; 调控界面传热, 优化铸件凝固进程; 改善铸件表面粗糙度; 降低清理难度。其性能优劣直接影响铸件成品率、表面精度与生产成本。近年来, 随着高端装备制造业对复杂薄壁、近净形铸件的需求激增, 以及全球范围内环保法规的日趋严格, 铸造涂料技术正经历

深刻变革和快速发展^[1-5]。本文旨在综述铸造涂料领域的最新研究动态、最新的研究手段,剖析技术瓶颈,并展望其未来研究的新动向及发展趋势。

2 国内外涂料研究进展

2.1 金属液-涂料界面反应机理研究

近年来国内外对涂料与金属液界面的反应机理进行了深入的研究并成功用于铸造缺陷的有效控制。通过先进和创新的研究手段如原位表征技术与多尺度模拟,揭示了几种关键的涂料-金属液界面相互作用,有利于更好地理解相关铸造缺陷的形成机理并找到解决的办法。

2.1.1 铁水-涂料界面渗透机理

传统抗粘砂理论认为铁水比钢水的碳硅含量高得多,不容易氧化生成铁橄榄石,机械粘砂主要取决于砂型芯的孔隙大小及铁水压力。德国亚琛工业大学(RWTH Aachen University)首次利用高温激光共聚焦显微镜(HT-CLSM)研究了灰铸铁(C 3.5%, Si 2.0%)铁水于1400℃时在硅质涂料表面的渗透过程,发现在铸铁机械粘砂(Penetration, 渗透性粘砂)的形成过程中在铁水-涂料界面上观测到FeO-SiO₂共晶相(熔点1170℃)的生成,在界面形成低粘度液相层,会显著降低铁水渗透阻力。HT-CLSM显微镜下捕捉到液相层动态铺展(速度>100 μm/s),加速毛细渗透。认为低熔点相是加速渗透的关键诱因,本质上硅酸铁液相的生成降低了铁水对涂料的润湿角,对渗透有促进作用。该研究试验分析了铁水渗透的动力学规律,发现渗透深度 Δd 与时间(t)满足修正的Washburn方程: $\Delta d = K \cdot \sqrt{t}$ (K 为渗透系数)。研究还发现在涂料中添加适量的纳米Fe₂O₃可生成一定厚度的致密FeO隔离层,使渗透显著降低。试验确认FeO隔离层的临界厚度为5 μm,大于临界厚度就可以有效地阻止铁水渗透。该研究揭示了铁水渗透的化学-物理耦合机制,为开发高性能环保涂料提供了理论基础,其研究方法亦有很好的参考价值^[6]。

2.1.2 钢水-涂料界面反应机理

在超超临界汽轮机大型铸钢件的生产中铸件表面经常会出现大量的地图式粘砂现象,严重影响铸件的表面质量,增加成本及供货周期,严重时会使铸件直接报废。针对这一问题辽宁科技大学齐文青等利用SEM+EDS和XRD检测手段分析了钢砂、钢涂、砂涂、钢涂砂几种界面的化学反应以及物相的变化,提出了超超临界钢产生地图式粘砂的机理^[6]。研究中发现超超临界钢

ZG13Cr9Mo1VNbN-II钢水中的活性合金元素[Al]、[Mn]、[Nb]、[Si]、[Fe]与铬铁矿砂及涂料中的SiO₂和FeO等杂质反应生成Al₂O₃-MnO-Nb₂O₅-SiO₂-FeO复杂低熔点液相进而导致了地图式粘砂现象。研究中还发现白刚玉涂料与超超临界钢水在1600℃长时间接触并没有明显的化学反应,也没有低熔点液相产生,但涂有相同涂料的铬铁矿砂与钢水却仍然会发生明显的化学反应并产生大量的液相。也就是说惰性的Al₂O₃涂层并不能有效地阻止钢水与涂料后面的铬铁矿砂发生化学反应。实际生产当中采用白刚玉涂料也会出现地图式粘砂。作者认为是钢水先与涂料中的少量SiO₂、FeO等杂质反应产生少量低熔点液相使涂层出现小孔洞或裂纹,进而导致钢水与铬铁矿砂的化学反应,但作者并没有给出涂层出现孔洞和裂纹明确的证据,可能实际的机理更加复杂,需要进一步的研究。

2.1.3 铝液-涂料界面反应机理

铝合金铸造中,涂料与铝液界面易生成Al₄C₃硬脆相,导致铸件表面夹杂和裂纹,铝液表面的氧化铝膜破裂则会导致表面气孔,某些铸件废品率高达15-30%。传统研究无法解释缺陷形成的机理。针对这一问题美国俄亥俄州立大学(Ohio State University)通过急冷-聚焦离子束(FIB)联用技术研究了涂料与铝液的界面相互作用,发现涂料中的碱金属离子如Na⁺/K⁺离子会从涂料向界面迁移、富集,浓度从0.5wt%上升4.8wt%。低熔点的Na⁺离子会与铝液表面的Al₂O₃膜发生反应,生成低熔点液相,会在Al₂O₃膜内形成多个直径2-5nm的通道。铝液通过这些通道接触涂料有机组分出的活性碳生成Al₄C₃。Al₄C₃会破坏铝液表面氧化膜的连续性,导致铝合金铸件表面气孔、夹杂和裂纹。该研究发现某些金属盐类可抑制Na⁺离子的有害迁移,对研制能够解决铝合金表面缺陷的功能性涂料指导意义^[8]。

2.1.4 钛合金-涂料界面反应机理

高温熔融钛合金具有极高的化学活性,极易与绝大多数耐火材料发生剧烈的界面反应,从而在铸件表面形成界面反应层,导致铸件质量下降。南昌航空大学的黎阳等研究了TC4钛合金与浸渍了磷酸盐并涂有氧化钇涂层的选区激光烧结砂型之间的界面反应。研究通过SEM及EPMA发现与以前的研究和预期不同,在浇注过程中Ti并没有与熔融陶瓷砂中的SiO₂发生还原反应,钛合金铸件表面也无粘砂夹渣等明显的铸造缺陷,但表面有一层

75-200 μm 的反应层。铸件越厚,反应层也越厚。研究表面,界面反应主要是砂型中的磷酸铝与钛合金液的反应,铸件表面反应层中 P 元素有明显的扩散,相反 Si、Y 等元素则无明显的界面迁移^[9]。

沈阳铸造所的刘鸿羽等通过电镜及 XRD 研究了 ZTA15 钛合金与氧化钇涂料之间的界面反应,发现铸件表面的形成了一层 3~7 μm 厚的扩散层,层内 O 元素的含量高达 13.63%,并且生成了 TiO 、 Ti_6O 和 Ti_2O 等氧化物^[10]。

钛合金砂型铸造用涂料目前还是用比较昂贵的氧化钇,还需要进一步研究新型惰性耐火涂料降低成本。

2.1.5 金属液-涂料界面反应机理

苏州兴业采用德国 HESSE 高温显微镜原位直接观测涂料与金属在加热过程中界面反应、润湿角变化、渗透过程等,用来研究各种材质-涂料组合在高温下的界面反应。发现钢水中的锰元素在铸钢粘砂和渗透过程中起着非常重要的作用。锰元素会强烈降低铁水对涂料的润湿角。还研究了涂料从常温-1600 $^{\circ}\text{C}$ 的烧结、熔化、膨胀、收缩、发气等重要的高温行为,并据此提出缸体缸盖等涂料的成分设计及验证方法^[11~12]。

2.2 新型功能涂料的研究

2.2.1 无机陶瓷涂料

传统铸造涂料采用有机粘结剂,在浇注高温作用下易分解产生大量气体和活性碳,是导致铸件气孔、针孔、渣(气)孔或夹杂物等铸件表面及少数内部缺陷的主要诱因之一。以硅溶胶、磷酸盐或新型复合无机粘结体系为核心的高强度无机陶瓷涂料,正逐步成为解决这一问题的关键技术^[13~17]。这类涂料最突出的优势在于:

(1) 超低发气特性: 高温下热分解极少,发气量可控制在极低水平(通常 $< 10\text{ml/g}$),显著降低铸件气孔缺陷风险,尤其适用于风电主轴、发动机缸体、缸盖等对致密性要求极高的关键铸件。

(2) 卓越的高温强度与热稳定性: 新型无机陶瓷涂料采用硅溶胶、铝溶胶、锆溶胶或磷酸盐等高温粘结剂,浇注过程中与耐火骨料、悬浮剂、微粉等涂料成分相互作用可形成二次莫来石、尖晶石等结合相,形成具有良好高温强度的陶瓷涂层。无机粘结网络在高温下不仅不会分解或熔化,反而可能进一步增强烧结,形成高强度且具有一定韧性的陶瓷层,提供优异的抗金属液冲刷和渗透能力,有效防止粘砂、脉纹及夹杂等缺陷,保证铸件表面光

洁度和尺寸精度。

(3) 环境友好性: 涂料成分主要为天然或无机材料,不含或仅含微量有机挥发物(VOC),生产过程及使用后废弃处理环境压力小,符合绿色制造要求。

2.2.2 3DP 专用涂料

砂型/芯 3D 打印技术的快速普及,对配套涂料提出了独特要求,主要关注点及解决办法如下:

(1) 与普通砂型相比,砂型表面粗糙、紧实度低,铸件粘砂的倾向较大,要求涂料渗透适中、覆盖良好,与铁水的润湿性要低。主要通过调整骨料的种类、粒度、粒形、流平助剂等改善涂料覆盖性及流平性。

(2) 分层打印的砂芯微观上呈阶梯状,层间开裂倾向高于普通砂型,铸件披缝倾向较大,要求涂料的流平、填缝的能力、高温烧结及抗裂性能要好。另外,使用醇基涂料时在保证涂料有足够的整体渗透性前提下,溶剂的渗透要尽量少,否则砂芯容易开裂。这主要通过骨料合理组合和烧结助剂、流变助剂的优化添加达到以上目的。

(3) 3DP 砂芯中树脂加入量普遍较高,因此砂芯的发气量偏大,涂料要有良好的屏蔽性,隔离阻止有害气体进入型腔。但有些砂芯形状复杂,无法设置排气通道时,则要求涂料透气性要好,借助涂料排气,否则容易出现砂芯内部压力过高而导致涂层剥落形成结疤及涂料夹杂缺陷。

(4) 形状复杂,深腔、孤岛等结构对抗粘砂脉纹及涂挂流变性能提出很高的要求。

铸造实践当中要根据具体砂芯的结构、大小、材质等选择合适的涂料。目前国内外已研制出多种 3DP 专用涂料^[18~20]。另外,涂料的涂敷工艺对 3D 打印砂芯的涂敷效果影响也要得到足够的重视。研究表明,涂料波美度和浸入时间对砂芯表面粗糙度的影响大于浸涂次数的影响^[21]。

2.2.3 无机砂芯专用水基涂料

新型无机粘结剂具有优越的环保优势,但由于其抗吸湿性差,普通水基涂料无法使用。使用醇基涂料又与环保的初衷相悖。针对这一问题国内外已研发出无机砂芯专用的水基涂料,可最大限度减轻水基涂料对砂芯强度的不良影响,其关键技术是通过调整涂料 pH 值或加入固化促进剂防止硅酸钠因水溶而软化^[22~23]。

2.2.4 新型防甲醛水基涂料

国内外已有多个报道,特殊设计的水基涂料可以减少冷芯在烘干过程中的甲醛释放。此类涂料中

含有一定量的能够吸收甲醛的添加剂如多元酚、三聚氰胺、木质素、尿素等可明显减少砂芯烘干时释放的甲醛数量。[24~25]

2.2.5 新材料应用

近年来,材料科学发展迅速,各种具有特殊功能的高新材料如纳米材料、石墨烯、溶胶-凝胶等不断涌现[26~35]。这些新材料已经被用于铸造涂料中并赋予涂料一些特殊的性能。例如,国外将纳米锂皂石作为新型超级悬浮剂用于涂料可在超低加入量保证涂料的悬浮稳定性,同时也将悬浮剂对涂料高温性能的影响降到最低。石墨烯、碳纳米管、纳米 BN 等被用于提升涂料的导热和激冷能力[27]。BN 还以其优越的高温稳定性、良好的导热能力以及卓越的不润湿性被用于铝、钛、锆等特殊合金的铸造中。丹麦理工大学的 U. C. Nwaogu 等人分别采用环氧硅烷和正丁醇铝作为硅的铝的前驱体研制出一种新型砂芯用硅铝基溶胶-凝胶铸造涂料,并对其在提高铸件表面质量方面的性能进行了研究[34~35]。这些研究成功地将溶胶-凝胶技术应用于铸造涂料的制备,与传统的商品涂料具有相当的性能,开辟了铸造涂料技术研究的新领域。

2.3 涂料应用及检测技术研究

近年来,涂料应用技术也在不断进步,FOSECO、HA、ASK 等跨国涂料供应商都相继推出智能化涂料配比优化系统[36~38]。兴业股份也推出了自己的 CPS-1000 智能配料系统。共享装备、潍柴、亚新科等国内知名企业也都积极研发或采用这些先进的涂料应用技术及设备。

最新报道显示,近期国外又推出基于实时数据反馈的涂层厚度精准检测及控制技术及设备[38]。如通过脉冲辐射或激光扫描红外热波技术可无损实时检测涂层厚度并可实现涂层厚度的分布显示,对于现场精确、实时控制涂层厚度,稳定产品质量很有价值。另外国外基于平衡扭转谐振器(BTR)的检测技术已成功用于精密铸造生产中,可同时实现快速、在线实时检测涂料的粘度、温度和密度,提升质量控制水平[39]。

3 未来铸造涂料发展趋势

未来铸造涂料将遵循智能化、数字化、绿色化和功能化的大方向发展。其中,数字孪生技术和人工智能(AI)驱动的材料设计与工艺优化将在铸造涂料的研究、生产和应用中发挥越来越重要的作用[40~42]。

3.1 数字孪生及 AI 技术在涂料配方设计、制造及铸造生产中的应用

数字孪生作为连接物理世界与虚拟世界的核心技术,与快速发展的 AI 的加持,将在包括铸造涂料在内的诸多领域引发深刻变革[42~43]:

虚拟配方设计与优化: 建立涵盖涂料组分、微观结构、流变性能、干燥/固化行为、高温性能及其与铸件质量关联关系的多尺度数字孪生模型。在虚拟空间中快速筛选和优化配方,预测涂料性能(如悬浮性、流平性、渗透性、涂层强度、发气特性、绝热/激冷效果),大幅减少实验试错成本和时间。

智能生产与过程控制: 将涂料生产过程(配料、分散、研磨、调整)和涂覆应用过程(智能配涂、施涂、干燥等)的数字孪生体与实际产线实时联动。基于模型预测和实时数据反馈,实现生产参数的动态优化调整(如搅拌时间与粒度分布控制、粘度、密度或波美度等自动调节)、涂覆工艺的精准闭环控制,保证产品质量一致性,实现柔性化生产。

传感与检测: 应用非接触式在线测厚新技术,如激光三角测量、光学干涉、超声波、电容法等,实时监测喷涂或流涂过程中涂层的厚度及其分布。应用声波振动等传感器实时监测涂料的粘度变化。

数据驱动控制: 将实时厚度数据反馈给控制系统,由控制系统动态调整喷涂设备的工艺参数(如喷涂压力、流量、喷枪移动速度、轨迹、距离;流涂的流速、浸涂时间、倾斜角度等)。

自动化执行: 集成机器人或高精度数控执行机构,实现涂覆过程的自动化、智能化,确保复杂型腔表面涂层厚度的均匀一致。

定制化生态: 模块化基础配方库与深度定制解决方案并行发展。

服役行为预测与质量追溯: 在铸造过程模拟中,集成涂料数字孪生模型(包含其高温物理化学行为),更准确地预测涂层在浇注和凝固过程中的表现(如对充型、传热、应力、缺陷形成的影响)。同时,利用数字孪生记录涂料批次、应用参数、过程数据,实现铸件质量问题的精准追溯和根因分析。

AI 将在先进涂料研发、驱动配方设计、涂料生产及应用等方方面面大显身手,已在海外获得越来越多的应用(如福特汽车缺陷率降 93%)、Nemak 墨西哥铝合金铸造厂智能浸涂生产线。模拟涂料渗透深度与砂芯孔隙率的关联性,避免气孔缺陷,产品合格率大幅度提升并减少涂料消耗量 [4]。

3.2 新材料革命

新材料革命将使铸造涂料具备更高的性能和更多的特殊功能, 解决高端铸件的铸造难题。

高熵陶瓷是一种新型多元素固溶体材料, 在材料科学领域具有重要的研究价值和应用前景, 其优异的高温性能使其在航空、航天、电子、冶金、能源转换等领域具有广泛的应用前景。其优异的高温性能已引起铸造工作者的高度关注。研究表明高熵陶瓷涂料在航空、航天、核电等极端条件下应用的铸件铸造中显示出突出的优势。溶胶-凝胶技术在高熵陶瓷涂料的制造中也有其独到的优势。纳米材料、石墨烯、BN 等也将在铸造涂料得到越来越多的应用。

4 结语

(1) 高温激光共聚焦显微镜、高温显微镜等先进的研究手段为研究涂料与金属液界面反应机理和铸造的缺陷控制提供了多种新颖、有力的工具和广阔的应用前景。

(2) 高性能无机陶瓷涂料、造型新工艺专用涂料以及绿色环保涂料等代表了铸造涂料的发展方向。

(3) 纳米材料、石墨烯、BN 以及高熵陶瓷等高新技术新材料可望突破传统铸造涂料的技术瓶颈, 大幅度提升铸造涂料的性能及功能。

(4) 数字孪生及 AI 技术在涂料配方设计、制造及铸造生产中有广泛的应用前景, 可大幅度提升铸造涂料的制造及应用水平。

(5) 未来铸造涂料的研究方向将更加多元化, 重点聚焦于提升涂料的综合性能、开发新型环保材料、以及智能化应用上。

参考文献:

- [1] 丁锋. 绿色铸造产业环境下的铸造工艺升级及其节能减排的标准体系扩能, 2025 重庆市铸造年会论文集, 2025-05-11
- [2] 宋会宗. 铸造涂料的研究进展, 2023 中国铸造活动周论文集, 2023-11-13
- [3] 宋会宗. 汽车业铸造涂料新技术及发展趋势, 2021 中国铸造活动周论文集, 2021-10-21
- [4] Song Huizong, New Technologies and development trend of foundry coatings for automotive industry, International Forum on Modeling Materials and Techniques, 2021, Shenyang
- [5] 祝建勋. 绿色铸造粘结剂的现状及发展趋势, 2017 中国铸造活动周论文集, 2017-11-15
- [6] Schmitz, G.J., et al. In-situ observation of molten iron penetration into refractory coatings by HT-CLSM: The role of interfacial reactions and nano-Fe₂O₃ addition. Acta Materialia, 248, 118766, 2023
- [7] 齐文青, 超超临界钢铸造过程中地图式粘砂机理研究, 辽宁科技大学硕士研究生论文, 2023.3
- [8] Zhang, L., et al. (2023). Aluminum-coating interfacial reactions: The role of alkali migration and carbide formation. Journal of Materials Science & Technology, 142, 22-31.
- [9] 黎阳等. 基于 SLS 技术的 TC4 钛合金砂型铸造微观组织及界面反应层研究, 特种铸造及有色合金, 2025-06-27 15:25
- [10] 刘鸿羽, 赵军, 金磊, 等. ZTA15 大型钛合金熔模精密铸件界面反应研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(3): 890~896.
- [11] 宋会宗. 汽车铸造涂料高温特性研究及实践, 中铸协汽车铸件分会 2019 年会, 2019-8-13~14, 山东潍坊
- [12] 宋会宗. 缸盖涂料的高温性能与化学成分, 17th 中铸协铸造年会论文集, 2021-5-25, 上海
- [13] 王云霞;何泽芬;万鹏;周建新. 国内外铸造造型材料研究应用的新进展—第 75 届世界铸造会议造型材料研究及应用技术综述, 铸造, 2025,74(06)
- [14] 谢华生等. 铸铁件用复合陶瓷涂料的关键技术研究, 沈阳铸造研究所研究成果, 2010-06-17
- [15] 谢华生等. 稀土氧化物对铸造用纳米氧化铝陶瓷化涂层显微组织及性能的影响, 铸造, 2010-03-10
- [16] 许士龙等. 无机涂料的种类、机理及展望, 山东陶瓷, 2021-02-25
- [17] Ainara L. et al. Experimental Evaluation of Ceramic Coatings for Die Protection, Coatings. 2024, 14,643 in Low-Pressure Die-Casting Process
- [18] 李天才. 3D 打印型砂专用水基流涂涂料的研究, 材料导报 . 2024 ,38 (S2)
- [19] 高天娇. 3D 打印砂型芯用水基涂料流变性能的研究, 铸造, 2022, 71 (12)
- [20] 李玲等. 铸钢件 3D 打印砂型芯用水基涂料的开发与应用, 铸造 . 2019 ,68 (04)
- [21] 丁业腾等. 水基涂料涂覆工艺对 3D 打印砂型表面质量影响的研究, 中国铸造装备与技术 . 2024 ,59 (05)
- [22] US20220371081A1 (1)-HA 无机铸型用水基涂料
- [23] DE102018004234,ASK 无机铸型用水基涂料
- [24] MX2021001050A-HA 防止冷芯盒甲醛析出的涂料

- [25] Genzler, C., Reducing Formaldehyde Emissions from Water-Based Coatings, Foundry Practice No. 270 (Foseco International Ltd; 2021)
- [26] BYK Additives, Technical Data Sheet: Laponite® RD (2024)
- [27] Smith, R. et al. (2023). Graphene-enhanced foundry coatings for ultrarapid solidification of Al wheels. Carbon, 214, 118345
- [28] Nanoparticle-Enhanced Coatings for Reduced Burn-On Defects in Sand Casting" (AFS Transactions 2019) 纳米氧化铝氧化锆用于改善锆英粉涂料的抗粘砂性能
- [29] CN 116765317
- [30] 龚卫等. 石墨烯在特种涂料中的应用研究, 防腐蚀涂料年会, 2017, 深圳
- [31] 王凯歌等. 我国石墨烯涂料的研发概况, 上海涂料, 第 54 卷第 3 期, 2016
- [32] CN111333792A
- [33] 杜瑶. 有机硅高温涂料的纳米改性机制研究, 中国科学技术大学, 硕士论文, 2020
- [34] U. Nwaogu* 1, T. Poulsen 2, B. Gravesen 3 and N. Tiedje 1, Using sol-gel component as additive to foundry coatings to improve casting quality, International Journal of Cast Metals Research 2012 VOL 25 NO 3, 176~187
- [35] U. C. Nwaogu, T. Poulsen, R. Stage, C. Bischoff and N. S. Tiedje, "New Sol-Gel Refractory Coatings on Chemically-Bonded Sand Cores for Foundry Applications to Improve Casting Surface Quality," Science and Coatings Technology, Vol. 205, No. 16, 2011.
- [36] Christoph Genzler, Density controlled coating or the benefits of intelligent automatic coating control, Foundry Practice VOL. 274
- [37] 陈翔宇等. 一种铸造用智能化涂料流涂浸涂工作站. 中国铸造装备与技术, 2019 年.03 期; p93_96
- [38] 翁开尔. 新型非接触式在线涂层测厚技术与传统膜厚仪对比研究, 2024
- [39] Manpreet Dash et al. Foundry 4.0 – Smart Precision Casting Needs Viscosity Control of Ceramic Slurries, Incast, 2021(1)
- [40] 官邦等. 基于砂铸生产大数据的铸件缺陷质量分析 [J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44 (11): 1471 - 1478.
- [41] 王辉等. 铸造行业数字化转型打造数字孪生工厂_铸造设备与工艺, 2021(6)
- [42] Michal FRIDRICH, Ivo ŠPIČKA digital twin in foundry-industry, Metal, 2021
- [43] Carlos Rodríguez "Digital Twin-Driven Optimization of Coating Penetration in Aluminum Casting Cores", Foundry Management & Technology (May 2024, Volume 152 Issue 5)