

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

王云霞^{1, 2}, 何泽芬³, 万 鹏⁴, 周建新⁵

(1. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022; 2. 中国机械工程学会铸造分会, 辽宁沈阳 1100223; 3. 科莱恩化工科技(上海)有限公司, 上海 201108;
4. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北武汉 430205;
5. 华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 第75届世界铸造会议共收录包括大会报告、造型材料论坛、活动周论坛和绿色环保论坛等关于造型材料领域的27篇论文。本文根据上述论文, 主要综述了关于铸造用砂、湿型砂、环保型有机和无机黏结剂砂以及铸造涂料等造型材料领域的最新研究进展, 最后对其发展趋势作了展望。

关键词: 造型材料; 人工整形硅砂; 环保型黏结剂; 湿型砂; 铸造涂料

1 概述

第75届世界铸造会议于2024年10月25—30日在四川省德阳市成功举办, 这是继中国承办第61届(1995年, 北京)和第69届(2010年, 杭州)世界铸造会议之后, 时隔14年第三次在国内举行。本届大会以“发展中的铸造业”为主题, 聚焦铸造科学技术、铸造工程应用和铸造人才培养三大领域, 征文457篇, 组织了来自26个国家的9场高水平大会报告和18个分论坛229篇报告, 吸引了中国、波兰、土耳其、西班牙、美国、日本、英国、德国、斯洛伐克、斯洛文尼亚、奥地利、丹麦、印度、澳大利亚、白俄罗斯、埃及、法国、挪威、尼日利亚、巴西、意大利、韩国、罗马尼亚、瑞典、荷兰、新加坡、法国、越南、泰国、马来西亚、瑞士和芬兰等全球32个国家和地区1 500余名铸造及相关领域的专家、学者及铸造工作者到会交流。铸造造型材料技术作为铸造行业的重要发展方向, 本次会议收录了来自中国、德国、美国、波兰、丹麦、日本和白俄罗斯7个国家的27篇论文, 其中铸造用砂3篇、湿型砂5篇、有机黏结剂砂4篇、无机黏结剂砂8篇、添加剂及铸造涂料2篇、其他相关5篇; 17位论文作者分别在大会报告、造型材料论坛、活动周论坛和绿色环保论坛上作学术报告。

2 铸造造型材料新进展

2.1 铸造用砂

2.1.1 铸钢用高硅人工整形硅砂的开发

铸造用砂是砂型铸造的骨架, 对砂型铸造的成功应用起着关键的作用。据统计, 全球铸造用砂的年消耗量超过五千万吨, 其中绝大多数为优质天然硅砂。

由于优质天然硅砂的资源分布不均, 许多铸造厂不得不从数千公里外采购天然硅砂, 这不仅使物流成本远超硅砂本身的成本, 还显著增加了碳排放。随着环保及矿产资源的开发限制, 高质量的天然硅砂, 尤其是用于铸钢件生产的高硅含量的优质硅砂资源已出现短缺, 如何开发高质量的人造砂受到越来越多的企业关注。Jie

作者简介:

王云霞(1976-), 女, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事铸造行业调研与咨询服务工作。
E-mail: wangyunxia@foundrynations.com

中图分类号: TG221

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

06-0721-11

收稿日期:

2025-02-27 收到初稿,

2025-03-31 收到修订稿。

Chen等^[1]介绍了一项人工整形高硅砂的开发与应用技术。该技术是用自然界广泛存在且SiO₂含量大于99%的石英岩作为原料，通过一种创新的破碎和整形技术，成功研制开发出一种硅含量达到98.5%以上、圆度超过0.89的人工整形高硅砂。通过与目前黑色铸造行业广泛采用的福建砂、海南砂等天然硅砂进行的一系列物理化学性能比较，以及破碎试验和工艺性能测试等，

结果表明，人工整形高硅砂在硅含量、圆度和比表面积等方面优于天然硅砂，具有较低的破碎率和较高的耐火度，且在各种型砂工艺下的强度均优于天然硅砂（分别见表1和表2）。最终结论是，在同等强度下，这种人工整形高硅砂可以减少黏结剂的消耗量，在铸钢生产中可以完全替代高质量的资源短缺的天然硅砂。

表1 天然硅砂与人工整形硅砂的物理化学性能
Tab. 1 Physical and chemical properties of sand

硅砂类型	圆形度	比表面积 / (cm ² · g ⁻¹)	含泥量/%	ADV	耐火度/℃	LOI/%	SiO ₂ 含量/%	破碎率/%
福建砂	0.878	89.63	0.41	4.81	1 710	0.19	>98	
海南砂	0.885	82.20	0.33	1.42	1 720	0.11	>99	2.84
整形砂	0.902	75.58	0.30	4.79	1 730	0.15	>99	0.89

表2 人工整形硅砂与天然海砂型砂性能对比
Tab. 2 Comparison of properties between shaped silica sand and natural sand

硅砂类型 (相同的AFS)	24 h终强度/MPa			
	呋喃树脂砂 ^①	碱性酚醛树脂砂 ^②	酯硬化水玻璃砂 ^③	酚醛树脂覆膜砂 ^④
福建砂		0.70		4.11
海南砂	0.96			
整形砂	1.45	0.83	2.55 (抗压强度)	5.48

注：①树脂加入量1.0%，固化剂为树脂重的45%；②树脂加入量1.63%，固化剂为树脂重的20%；③水玻璃加入量 2.7%，有机酯为水玻璃重的18%；④树脂加入量2.5%，乌洛托品为树脂重的15%。

2.1.2 球形陶瓷砂及其性能评价

球形陶瓷砂在铸造生产中的应用前景较好，将部分代替天然硅砂和特种砂，主要用于制造复杂砂型和砂芯，从而解决采用天然硅砂生产中出现的表面粘砂、夹砂、烧结和落砂困难等难题。同时还可以提高砂型铸件生产中旧砂再生利用率，减少废砂和粉尘的排放量。Qingzhou Sun等^[2]介绍了通过熔融吹制、喷雾造粒和滚粒造粒三种不同生产工艺制成的陶瓷铸造砂，研究比较了熔融陶瓷铸造砂和烧结陶瓷铸造砂的表面形态、晶体相、微观结构和密度等特性，并探讨了这些特性对铸造工艺性能的影响。研究结果表明：熔融陶瓷铸造砂和烧结陶瓷铸造砂在表面形态、晶体相、微观结构和密度等方面存在显著差异。这些特性差异导致了它们在铸造工艺性能上的不同表现，其中烧结陶瓷铸造砂在抗冲击、耐磨性和热稳定性方面表现更优；同时表明，熔融陶瓷铸造砂由于其较高的密度，在铸造过程中会增加砂的使用量和发气量。

2.1.3 硅砂粒形快速评定方法的研究

角形因数是表征铸造用砂粒形的一个重要的参

数，它决定了砂子在造型过程中的流动性、填充性和最终铸件的表面粗糙度及铸造过程的效率。Ye Liu等^[3]介绍了一种基于成像技术快速测定原砂形状的方法，通过结合圆形度的计算方法和角形因数的测定原理，推导出圆形度与角形系数的关系，即角形因数可以用圆形度平方的倒数来近似计算。基于此关系，可以通过成像法直接获得原砂圆形度值，然后通过数学换算可快速获得角形因数。通过与现有角形因数实测方法的对比分析，结果表明，通过图像法获得的角形因数指标值与角形因数实测法获得的指标值相近，最大偏差小于0.16%，验证了开发的新方法的准确性，为铸造用砂角形因数指标的测定和标准的制定提供了一种快速评定的新参考方法。

2.2 铸造用湿型黏土砂

2.2.1 环保型无碳湿型砂的开发

当前砂型铸造技术面临四个全球性挑战：①环境污染严重；②能源消耗高；③铸件质量稳定性差；④材料回用率低。Shigeng Zhu^[4]介绍了一种新型的无碳湿型砂铸造技术，该技术是将干的无碳黏土砂和水加入

高速旋转的混砂机中混合120~150 s而制成无碳黏土湿型砂。经生产实践表明,无碳湿型砂铸造技术通过使用无毒无机原材料和改进铸造工艺,实现了铸造过程中不产生废气排放、废砂无毒且可与环境融合、能源及资源消耗低、铸件质量好等优点,解决了传统砂型铸造技术中存在的高污染、高能耗、铸件质量差和资源需求量大等问题。该技术的研发成功,不仅解决了传统湿型砂工艺存在的环境污染问题,还提高了铸件的质量和生产效率。随着该技术的推广应用,有望推动铸造行业的绿色转型和可持续发展。

2.2.2 适应新能源汽车铸铝件用湿型砂工艺的开发

湿型砂工艺以高效且低成本地生产高质量的铸铁件而闻名。随着全球对铝铸件需求的增长,以及降低成本的压力不断增大,促使越来越多的铸造厂和制造商也开始探索将湿型砂工艺用于铝合金铸件的生产中。Per Larsen^[5]从造型制芯工艺、生产效率、造型材料选用、熔炼及浇注和铸件尺寸精度等方面讨论了适合使用湿型砂生产铝合金铸件的工艺,结果表明,湿型砂工艺因生产成本低、适应性强、自动化程度及生产效率高、模具成本低等优势,成为电动汽车铝合金铸件生产所用型砂工艺的理想选择,正变得越来越有吸引力。

2.2.3 湿型砂处理系统中旧砂降温机理的研究

在湿型砂铸造生产中,由于造型制芯生产线节奏快,使得湿型砂处理系统中湿型回收砂温度变高,须研究其降温机理。为此,Yasuhiro Maeda等^[6]对湿型旧砂降温过程进行了现场试验数据采集及理论研究。研究结果表明,对于采用喷水+空气冷却的方式对旧砂进行降温处理时,在冷却初期,砂温主要是以水汽蒸发及型砂与空气间的热交换行为进行快速降温,如公式(1)。在冷却后期,砂温主要是以型砂与空气间的热交换进行较为缓慢的降温,这与仅采用空冷方式进行降温的机理一样,如公式(2)。

水冷:

$$T_{s2}=T_{s1}+\frac{L_s}{\beta_s \times C_s} \Delta w - (T_{s1}-T_1) \frac{1-e^{-H(1-\Phi')t_0}}{1-\Phi'e^{-H(1-\Phi')t_0}} \quad (1)$$

空冷:

$$T_{s2}=T_{s1} - (T_{s1}-T_1) \frac{1-e^{-H(1-\Phi')t_0}}{1-\Phi'e^{-H(1-\Phi')t_0}}$$

$$\Phi' = \frac{C_s m_s}{C_a m_a}$$

$$H = \frac{6\beta_c a}{C_s \gamma_s d_s} \quad (2)$$

式中: T 为温度(K), t 为时间(s), C 为比热(J/

kg·K), w 为含水量(kg/dry.kg), α 为传热系数(W/m²·K), β_s 为砂比热修正因子, β_c 为砂与空间之间传热系数修正因子, m 为重量(kg); 下标: a为空气, s为砂。

通过试验验证,不同状态下修正因子的引入(表3)使得预测结果更加贴近实际情况。

表3 不同状态下的修正因子
Tab. 3 Correction factors under different states

修正因子	比热(β_s)	传热系数(β_c)
静态情况下	0.03	0.72
混砂情况下	0.11	0.50
混砂+空气冷却	0.25	0.60

2.2.4 湿型砂鲕化层形成机理的研究

铸造用湿型砂的回收再利用具有重要的环境和经济价值。然而,在回收的湿型砂中,经高温失活的膨润土层会紧紧附着在砂粒表面,并在多次积累中形成鲕状层,这可能会影响型砂的性能和铸件的质量。为了控制湿型砂系统的鲕状率,稳定砂的质量,提高铸件的产量,Yuyang Qi等^[7]对湿型砂鲕化层的形成机理进行了基础研究。采用热重分析/差热分析(TG/DTG)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)和X射线光电子能谱(XPS)等分析方法,对膨润土在砂表面形成鲕化层的过程进行了研究。结果表明,在600℃以上,膨润土的晶体结构开始被破坏,部分与硅砂形成化学键,开始沉积并形成鲕化层。与使用过的型砂相比,鲕化后的型砂具有相同的表面官能团和相似的成分,均由高温下膨润土的沉积形成。确定了鲕化层是由玻璃质材料、SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃等组成的混合物。

2.2.5 湿型砂铸件侵入性气孔缺陷的研究

气孔是湿型砂生产各类铸件常见的铸造缺陷之一,其形成主要归因于气体生成与透气性之间的相互作用。Zefen He^[8]介绍了湿型砂生产差壳铸件时气孔产生的原因和型砂性能对气孔的影响,以及通过调整湿型砂性能改善气孔的途径。研究结果表明:湿型砂铸件在生产过程中容易出现侵入性气孔缺陷。为有效降低此类缺陷的发生概率,可以通过减少湿型砂中的水分含量、降低灼烧减量、提高透气性以及增加气体逸出率等措施改进。此外,调整湿型砂的配方能够显著减少侵入性气孔的形成。选择合适的抗脉纹添加剂并控制其用量,不仅能够确保铸件的质量,甚至可以省去表面涂料的使用,简化铸造过程。

2.3 有机黏结剂砂

2.3.1 新型呋喃树脂黏结剂的开发

为满足高质量发展的需求,铸造业对树脂砂提出了更高的性能要求。针对市场上现有呋喃树脂存在的不足,Shuzhong Xie等^[9]研究开发了一种兼具酸固化和热固化特性的酚醛树脂,其性能与传统尿素改性呋喃树脂相当。在特定条件下,将该树脂与传统尿素甲醛改性呋喃树脂共聚复合,制备出一种透明、稳定性优异的多组分树脂。所开发的树脂不仅继承了传统尿素甲醛改性呋喃树脂常温强度高和溃散性好的优点,还具备酚醛树脂高温强度高、发气平稳且不产生氮气的特点。此外,该树脂游离甲醛含量低,并可减少约20%的糠醇用量,从而显著降低树脂成本,尤其在糠醇价格较高时效果更为明显。这种复合树脂在生产厚大球墨铸铁件时表现出显著优势。

传统呋喃树脂主要以糠醇为主要原料制备,含有不可再生的石化资源成分,对环境 and 人类健康有害。因此,开发一种可生物降解且对环境友好的生物基呋喃树脂(含有呋喃环)显得尤为迫切,具有巨大的发展潜力和社会经济价值。Yanbing Shen等^[10]介绍了利用5-羟甲基糠醛等生物基化合物制备呋喃树脂的研究进展。基于木质素改性、单宁酸等效替代和腰果酚改性树脂等研究,开发多款生物基呋喃树脂,并研究了生物基化合物5-羟甲基糠醛的合成机制(如图1),优化了产品配方。通过与传统树脂的性能对比试验、污染物排放测试以及实际生产验证,试验结果及各项数据均表明:该生物基呋喃树脂具有低小分子有机物含量、低游离糠醇、高活性、快速固化速度和低固化剂

消耗等特点,显著降低了工作场所中游离甲醛、NO₂和SO₂等有害气体的排放,达到《铸造企业清洁生产综合评价方法》中的一级标准,分别见表4和表5。

表4 生物基呋喃树脂与传统呋喃树脂性能对比
Tab. 4 Comparison of properties between modified and conventional furan resin

序号	性能	性能数据	树脂类型	
			传统型	生物基
1	环保性能	VOC/(g·L ⁻¹)	≤300	≤50
2		残碳率/%	≥50	≥60
3		游离酚/%	≤0.3	-
4		游离甲醛/%	≤0.3	≤0.01
5	常温性能	24 h室温抗拉强度/MPa	≥1.8	≥2.8
6	高温性能	负载热变形(500℃/60 s)/mm	≤2.5	≤1.0
7		热变形持续时间/s	100~110	90~100

表5 污染物排放测试结果
Tab. 5 Test results of pollutant emissions

测试地点	污染物	实测值	一级标准	二级标准
实验室混砂区 (传统呋喃树脂)	甲醛/(mg·m ⁻³)	0.27	0.15	0.3
	SO ₂ /(mg·m ⁻³)	2.56	2	3
	NO ₂ /(mg·m ⁻³)	0.09	0.15	3.5
实验室混砂区 (生物基呋喃树脂)	甲醛/(mg·m ⁻³)	0.14	0.15	0.3
	SO ₂ /(mg·m ⁻³)	1.25	2	3
	NO ₂ /(mg·m ⁻³)	0.07	0.15	3.5

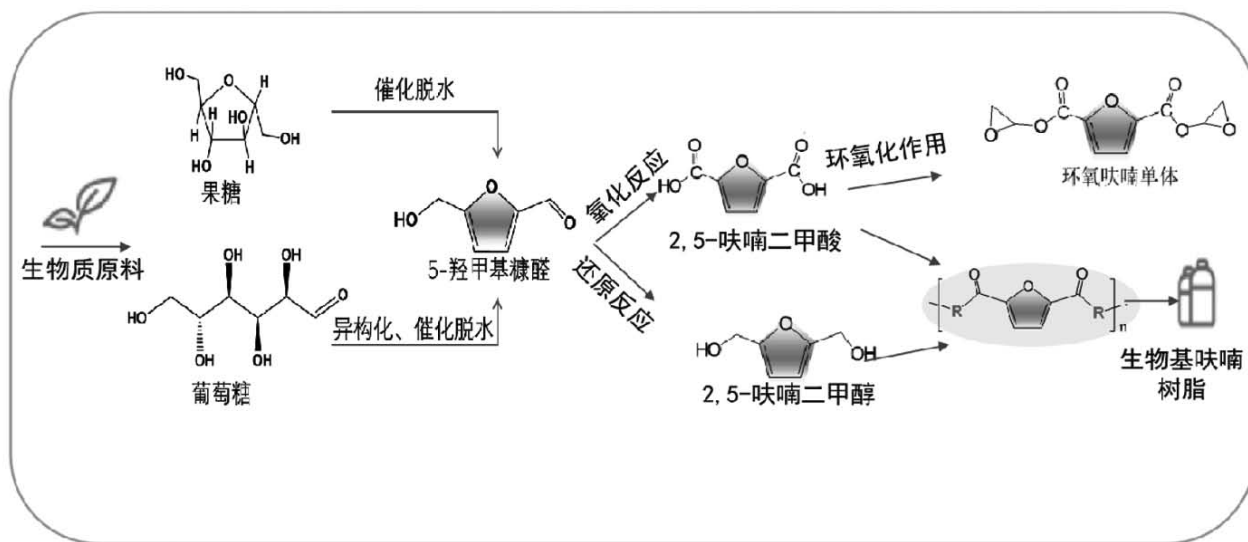


图1 生物基呋喃树脂的生产工艺

Fig. 1 Technology roadmap of the bio-based furan resin

2.3.2 3DP打印砂型过程中与呋喃树脂配套固化剂（催化剂）的开发

3D砂型打印技术的应用，加快了铸造产品样件的快速开发和单件生产。强度和尺寸精度是影响3D砂型打印（3DP）所制砂型（芯）质量的两个重要因素，它们不仅与呋喃树脂的反应性以及硅砂的相变密切相关，还与呋喃树脂的催化剂有关。Ruiling Yu等^[11]以呋喃树脂体系为例，采用3DP打印的砂型，研究了催化剂对3DP砂型（芯）强度的影响，还探讨了砂型（芯）的压实度、黏结桥数量和面积、催化剂的结晶和再溶解对砂型（芯）强度的影响。试验结果表明：①催化剂的用量对砂型强度有显著影响，在3DP打印砂型中，最适宜的催化剂用量为砂重的0.22%~0.25%；②与自硬砂试样相比，3DP试样的黏结桥更少且更小，因此在相同黏结剂和催化剂用量下，3DP试样强度低于自硬砂；由于压实度较低，液态黏结剂在较大空间内因重力和表面张力而略有流动，导致凝胶时间延长，从而降低样品强度；③在3DP过程中，催化剂的硫酸会结晶并在干燥过程中重新溶解，这需要足够的酸量来提高拉伸强度；过多的催化剂会导致腐蚀问题，因此需要开发能够在短时间内凝胶化的催化剂，或者开发无结晶或腐蚀的新催化剂。

2.3.3 降低有机废气排放的新型有机黏结剂的开发

铸造行业作为向大气中释放有害气体（例如氮氧化物（ NO_x ）、二氧化硫（ SO_2 ）、PM2.5中的多环芳烃、苯系物（BETX）等）及颗粒物的主要源头之一，对从业人员的职业健康和城市地区的空气质量产生显著影响。此外，铸造过程亦会伴随大量废弃物的产生，据统计，仅在欧洲地区，每年就有约600万吨铸造废砂被采取填埋的方式进行处理。

Rafał Dańko等^[12]介绍的克拉科夫AGH大学在参与欧洲“Green Casting Life”项目中，以灰铁铸件为研究对象，对自硬酚脲烷树脂黏结剂体系与无机黏结剂体系在铸造生产过程中的有害气体排放进行了监测及分析对比。其中对自硬酚脲烷树脂黏结剂体系的检测结果表明：①在苯系物（BTEX）中，苯在气体混合物中所占比例最大；②在多环芳烃类化合物中，萘在气体混合物中所占比例最大；③浇注约15 min后，排放出的CO、 CO_2 、 SO_2 、 NO_x 和TVOC气体的浓度达到最大值；④总的来看，释放出的多环芳烃化合物的浓度最高。

监测结果也表明，用无机黏结剂取代有机黏结剂，有害气体的排放量显著减少。

减少排放、促进碳中和是世界各国可持续发展的必然选择，也是有机黏结剂发展的技术难点，开发出

少污染或无污染的新的有机树脂黏结剂品种，使铸造过程中有害气体排放大幅度下降，甚至完全消除是目前行业研究的趋势和方向。Jian Tan等^[13]介绍了在环保型铸造黏结剂方面的一些研发成果。

（1）碱性酚醛树脂：碱性酚醛树脂因其优异的高温稳定性而被广泛应用于铸钢件生产中，但其回收利用难度较大。欧区爱铸造材料有限公司（以下简称“HA”）通过改性处理，显著提升了再生性能。采用机械再生法时，仅需添加15%的新砂即可维持再生砂强度的平衡，并且可减少30%的VOCs排放。

（2）呋喃树脂：HA开发了一种低氮（<1%）且固化剂不含硫酸（<1%）的产品，可减少70%的 NO_x 与 SO_2 排放。

（3）冷芯盒树脂：HA开发的最新一代环保冷芯树脂，在基础树脂的生产中引入无机成分，减少50%以上的排放。

2.4 环保无机黏结剂砂

随着全球对环境保护意识的增强，工业界如何实现绿色转型，特别是铸造行业如何通过采用环保的生产方法来减少对环境的负面影响，成为了一个亟待解决的问题。铸造用无机黏结剂，具有生产现场气味小、劳动条件友好和成本相对低廉等优势，是未来铸造黏结剂发展的主要方向之一。

2.4.1 铸造用硅酸盐和磷酸盐无机黏结剂开发应用概况

Zitian Fan^[14]介绍了铸造用无机黏结剂（主要是硅酸盐无机黏结剂）及其固化方法的研究及应用现状，重点介绍了正在研发的磷酸盐无机黏结剂和3D打印用无机黏结剂研究与应用情况，就无机黏结剂应用中的难点问题进行了较详细的比较分析，并指出了铸造用无机黏结剂的未来发展方向。

（1）对于硅酸盐类无机黏结剂，在提高型（芯）砂常温强度、改善旧砂溃散性及再生回用性是未来该类无机黏结剂发展追求的目标，需重点解决旧砂的稳定再生回用问题。应根据不同黏结剂的性能特征，结合企业生产实际，选择合适的低成本的再生工艺装备，以获得最大化实现旧砂的循环回用。

（2）对于磷酸盐类无机黏结剂砂，需要深入研究黏结剂的粘结和硬化机理，优化黏结剂的合成工艺、材料和性能等，以提高磷酸盐无机黏结剂的工业适用性。

（3）对于3DP打印用无机黏结剂，重点需围绕合适的材料和硬化方法等方面开展，并开发适应于无机黏结剂环境的喷头装置，解决砂型（芯）坯体黏结强度和精度低的问题。

2.4.2 无机黏结剂在黑色金属铸造中应用的新突破

无机黏结剂系统（IOBs）已被广泛应用于汽车铝合金铸件的批量生产中，为其在黑色铸件应用领域

（包括灰铸铁、球墨铸铁以及钢铸件）开辟了道路。尽管无机黏结剂系统的应用潜力巨大，但在黑色铸件生产企业中应用还存在若干问题，详情如表6。

表6 无机黏结剂（IOBs）在黑色铸造领域应用存在的问题
Tab. 6 Problems existing in the application of inorganic binders (iobs) in the ferrous casting field

指标	应用要求	目前存在的问题
耐高温性	黑色铸件需要砂芯能承受 1 400 ℃ 以上的高温	在这个温度下，无机黏结剂系统可能会软化或失去强度，这会影 响铸件的断芯缺陷
高温强度	型芯需要在高温下保持强度及结构完整性	型芯的热强度不足会导致其变形或塌陷，从而影响铸件的质量
落砂性能	无机黏结剂砂型溃散性差	提升溃散性势必会增加工艺的复杂性及生产成本
脉纹及 其他缺陷	IOBs对脉纹的形成不敏感，但如果管理不当， 仍然会导致渗透粘砂缺陷产生	砂型表面必须使用涂料，但此操作会增加工艺过程的复杂性及生 产成本
生产效率	造型制芯工艺必须符合生产节拍要求	造型制芯过程（包括固化及烘干工艺）的总运营成本要有市场竞 争力
投资成本	无机黏结剂造型制芯系统的初始投资费用，涵 盖相应的设备和无机黏结剂材料的成本很高	投资成本高限制了IOBs在铸造企业，尤其是小型企业的应用

针对上述问题，Ajax Rangel等^[15]以制动卡钳球墨铸铁件（材料牌号：GJS600）、差速器壳体球墨铸铁件（材料牌号：GJS500）及制动盘灰铸铁件（材料牌号：GJL250）为研究对象，研究评估了无机黏结剂在灰铸铁和球墨铁铸件生产应用的可行性，重点探讨了其在高温强度、水基涂层兼容性和砂芯回收方面的技术改进。通过在已成熟应用于铝合金铸件生产中的无机黏结剂体系中添加不同比例的添加剂，显著提高了无机黏结剂砂型（芯）的性能，具备以下特点：①易操作，混制后的型砂流动性较好；②具体良好的耐高温使用性能；③砂型砂芯致密性好和表面光滑，通常情况下，表面无需施涂涂料；④在浇注过程中无有害气体产生，砂型溃散性好，易清理；⑤在黏土砂中使用，再生性能好。

研究证明：通过适当调整，无机黏结剂在黑色金属铸造应用具有可行性，尤其是在灰铸铁和球墨铸铁生产方面，能够生产出质量一致性和效率都令人满意的黑色金属铸件，减少对耐火涂层的需求，并改善铸造生产环境，降低碳排放。

2.4.3 新型无机黏结剂系统的环保优势

基于欧盟LIFE项目和国家环境保护与水资源管理基金的支持，Angelika Kmita等^[16]介绍了对一种新型无机黏结剂系统（IIBs）及目前常规使用的有机黏结剂系统进行的铸造过程中产生的气体排放的测试研究结果，旨在评估新型无机粘合剂系统在减少铸造过程中排放方面的潜力。

通过测试铸造过程中BTEX、PAHs、苯酚、甲醛和异氰酸酯（MDI/TDI）等有害物质的释放体积和释放速度，并通过计算每克黏结剂和每克造型砂的排放量，对不同黏结剂系统的排放性能进行比较，保护涂层对总BTEX排放的影响，以及不同硬化技术对PAHs排放的影响。结果表明，新型无机黏结剂系统（IIBs）在铸造过程中显著减少了有害物质的排放，与有机黏结剂相比具有显著优势，如图2。通过引入新型无机黏结剂系统，铸造行业可以实现更清洁和更生态的生产方法，将对铸造行业的发展产生积极影响。

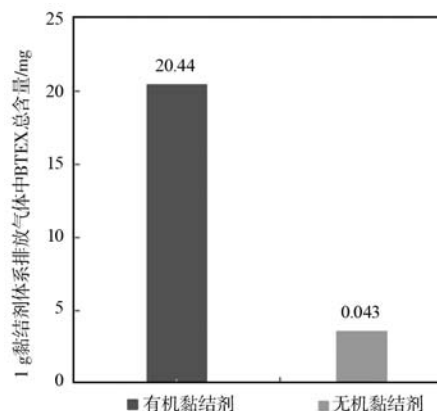


图2 有机黏结剂与无机黏结剂在铸造生产中BTEX排放对比
Fig. 2 Exemplary results of BTEX content in emitted gases from molding sands with organic and innovative inorganic binder system (IIBs)

2.4.4 新型环保无机发泡黏结剂砂工艺的开发

Tianjiao Gao^[17]介绍了通过添加发泡剂和发泡促进剂对无机黏合剂系统进行改性,制备出一种高强度、清砂性能优越的绿色环保无机发泡砂。这种发泡砂通过挤入加热模具中硬化成形,形成空心砂型/芯。通过低成本和简单的设备(如振动和气流)去除砂模,简化了铸造工艺。这种发泡砂通过添加发泡剂和发泡促进剂,不仅提高了流动性,还增强了模具的清洁性能,为铸造行业提供了一种环保且经济的新型材料。图3和图4分别为采用无机发泡砂制造的水套芯和清砂后的铸件表面情况。



图3 采用绿色无机发泡砂制芯

Fig. 3 Core-making using green inorganic foamed



图4 清砂后的铸件表面

Fig. 4 The surface of the casting after sand cleaning

2.4.5 无机覆膜湿型砂的开发与应用

Yin Xiong^[18]介绍了将无机胶凝材料应用于硅酸盐和磷酸盐体系中,成功开发了无机覆膜湿型砂。该技术主要基于无机硅酸盐胶凝材料,通过添加具有不同等电点特性的其他无机凝胶材料进行化学掺杂,形成了以水为溶剂的无机体系。在热(温)芯盒工艺的应用过程中,溶剂蒸发并以蒸汽形式排出,同时激发体系内无机材料间的化学集合反应,形成具有高强度的无机凝胶,使砂粒固结成一体成为砂型(芯)。

在抗吸湿性方面,通过控制胶凝体系的离子强弱

关系,在促进体系凝胶效率提高的同时,控制胶凝体系电化学均匀性和稳定度,实现胶凝体系固化后的多维网状凝胶体对水敏感性等大幅降低,获得提高多维网状凝胶体对水和水汽的抗潮解能力,明显改善无机砂芯(型)的抗吸湿性。不同固化时间下的无机覆膜湿型砂抗吸湿性见表7,无机覆膜湿型砂的常温及高温性能见表8。

该无机覆膜湿型砂成功应用于铸铝件、铸铁件和铸钢件的生产中,显著提高了铸件质量,减少了铸造缺陷,提高了生产效率,且在混砂、制芯、浇注和再生过程中无废气、固体废物和废水排放,环保方面具有明显优势,能够节省环保设备投资和降低相应的运营成本。

表7 无机覆膜湿型砂抗吸湿性能

Tab. 7 Anti-humidity performance of the inorganic wet coated sand

固化 时间/s	即时 强度/MPa	常温 强度/MPa	24 h强度 (85%相对湿度)/MPa	24 h强度 损失/%
30	1.140	4.503	0.822	82
60	1.563	4.142	2.603	37
90	1.843	3.803	2.656	33

表8 无机覆膜湿型砂(无机黏结剂占砂重的3.5%)的常温及高温性能

Tab. 8 Room temperature and high temperature properties of the inorganic wet coated sand (Inorganic binder accounts for 3.5% of the sand weight)

序号	温度 /℃	初始抗拉 强度/MPa	高温下残留 强度/MPa	溃散率 /%
1	600	1.6	0.02	98.75
2	800	1.64	0.01	99.39
3	1300	1.58	0.02	98.73

2.4.6 无机黏结剂砂芯用于高压铸造生产

高压压铸工艺生产的复杂零部件,其空腔一般是在模具中放置盐芯、钢芯或陶瓷芯,但因操作复杂或不易于后续处理等,限制了铸件结构的复杂化。随着汽车行业从内燃机(ICE)向电池电动车(BEV)的转型,对车身结构件的设计和制造提出了新的挑战。如何在高压铸造(HPDC)中实现大型中空铸件的生产,同时保持铸件内部结构的清晰展示,是当前研究的主要问题。Christian Lustig等^[19]介绍了一种采用无机黏结剂制芯,并在其表面涂覆高压铸造专用的水基涂料,来替代传统压铸模具型芯的制备方法。通过试验测试,成功证明了无机砂芯在高压铸造中的应用可行

性。该技术的应用有助于汽车行业从传统内燃机向电池电动车的转型,满足了对复杂、轻质结构的需求,同时推动了铸造行业的可持续发展。研究结果为无机砂芯在高压铸造中的应用提供了坚实的基础,并指出了进一步研究和优化的方向,为铸造行业带来了新的发展机遇。

2.4.7 无机黏结剂砂再生技术及评价体系的建立

为了实现可持续发展,各国落实碳足迹追踪和相关政策。无机粘结剂对于铸造行业的可持续发展是一项重要方案,许多国际头部汽车零部件企业已经开始使用无机黏结剂,实现了铸造过程零排放,而无机黏结剂废砂再生是完成整个环保闭环的最后环节,国内外许多企业都投入了大量精力对其进行研究。现阶段无机废砂的再生技术已经趋于成熟,欧洲许多企业已经批量使用无机再生砂,国内企业也有成功应用案例。但国内客户普遍反应再生砂的质量稳定性,再生砂质量的控制标准,以及应用的特殊性方面缺少理论支持。

Yunkai Shi^[20]通过市场调研以及大量的试验数据分别从无机黏结剂的特点,无机砂再生技术,无机再生砂的质量控制和评判几个方面对于无机黏结剂的再生技术进行了汇总并提供了基础标准。为相关企业提供一定的借鉴意义。

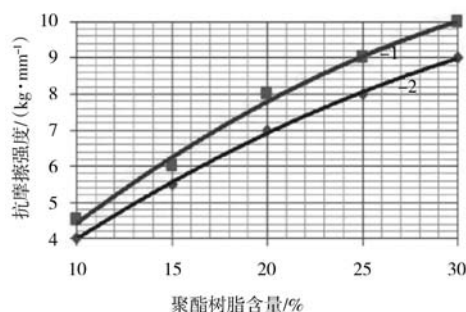
2.5 铸造涂料及添加剂

2.5.1 新型金属型铸造涂料的开发

金属型铸造的经济效益很大程度上取决于金属模具的使用寿命,而铸造涂料是提高金属模具使用寿命的有效措施之一。Yabo Hou^[21]介绍了一种用于金属型铸造的粉末涂料的开发,通过对涂层厚度、耐磨强度、黏结性能、静电涂覆工艺参数等方面的研究,评估了涂层在金属铸型表面形成所需厚度保护层的能力,建立了铸造粉状涂料强度模型及粘结性能模型,确定了金属铸型粉末涂料静电涂覆工艺的最佳参数。图5表示涂料中聚酯树脂含量对耐磨强度的影响,图6表示涂层厚度对涂料附着性能的影响。

铸造粉末涂料技术的发展为铸造行业提供了显著的成本节约和效率提升,同时满足了环保和安全的要求,由于其在减少浪费、降低成本、提高耐用性和多样性方面的优势,铸造粉末涂料在未来的铸造行业中将具有广阔的应用前景。

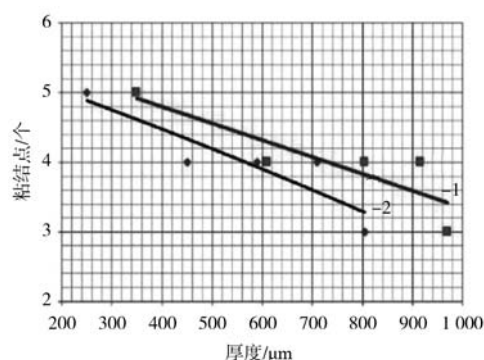
水基涂料因其优异的悬浮性、触变性和流平性而备受青睐。此外,该类涂料无毒无味,符合节能、减排及环保的要求,因此在市场上具有广阔的应用前景。目前,国内外众多研究机构与铸造企业已对水基



1. 蓝晶石-硅线石; 2. 隐晶质石墨

图5 铸造粉末涂料的耐磨性

Fig. 5 Abrasion strength of foundry powder coatings



1. 蓝晶石-硅线石; 2. 隐晶质石墨

图6 铸造粉状涂料的黏结性

Fig. 6 Adhesive properties of foundry powder coatings

涂料展开了广泛的研究,但限制水基涂料广泛应用的瓶颈主要集中在干燥时间较长和干燥设备的专用需求方面,这不仅提高了生产成本,还延长了生产周期。Bao Liu^[22]研究开发了一种水基快干涂料,通过单因素试验研究了以水为载体液体的耐火骨料、粘合剂和其他成分对涂料性能的影响;通过正交试验确定了该涂料的最优配比,该涂料在温度为 $(25 \pm 5)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $\leq 50\% \text{ RH}$ 的条件下,干燥时间 $\leq 50 \text{ min}$,气体释放量为 9.3 mL/g ,磨损量为 0.0217 g ,悬浮性能为99%,高温抗裂性为I级;通过采用扫描电子显微镜和傅里叶变换红外光谱对水基涂料的成膜机理进行了研究,结果表明:该涂料具有成膜致密光滑、干燥速度快、膜强度高和发气量低等优点,能够满足铸造生产的需要。

2.5.2 铸铁件用型砂添加剂和铸造涂料

无机黏结剂在铸铝件生产中的应用日趋成熟,但在铸铁生产中的应用仍需铸造工作者付出艰辛的努力。Ayax Rangel等^[15]采用与铸铝件相同的无机黏结剂生产球铁铸件,通过添加一种可以替代涂料的添加剂

IA001, 生产制动卡钳和差速器壳体等球铁铸件时, 砂型(芯)表面不需涂覆涂料, 即可获得高表面质量的铸件, 图7为使用IA001添加剂且砂芯表面无涂料生产的铸件。

采用无机黏结剂生产材质为GJL250的刹车盘灰铁

铸件, 通过添加一种含少量热固剂和表面改性剂的粉末添加剂, 并配合使用水基涂料, 浇注后的铸件表面质量高, 且砂芯溃散性好。图8为待浇的砂芯及浇注并清理后的表面质量。

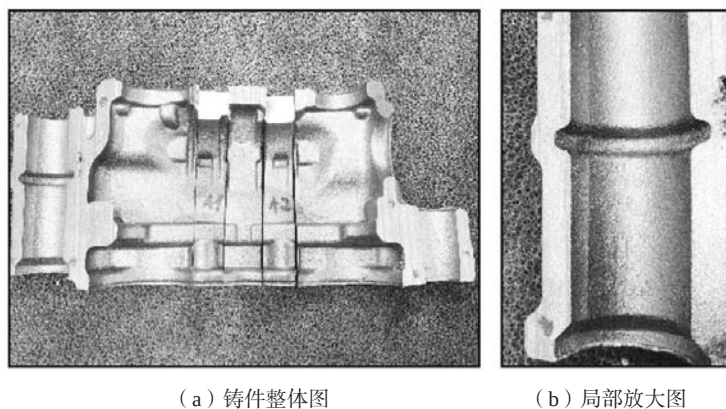
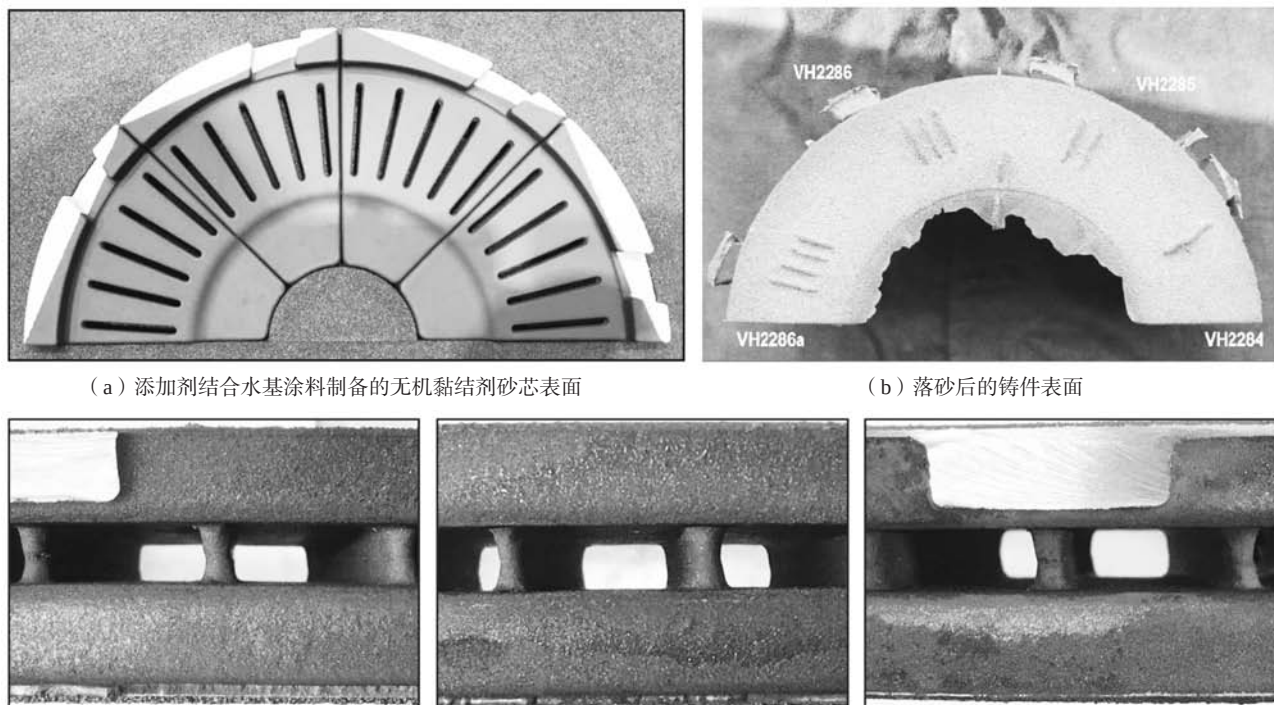


图7 使用IA001添加剂且无涂料的铸件表面质量

Fig. 7 The surface quality of the castings using IA001 additive and without coating



(c) - (e) 铸件局部区域落砂后的表面与打磨后表面对比

图8 添加剂结合水基涂料制备的砂芯及浇注后的铸件表面

Fig. 8 The surface of the sand core with additive and waterborne dip-coating and casting after shaking-out

3 结语与展望

3.1 结语

(1) 人工整形高硅砂具有二氧化硅含量高、粒形较圆整、黏结剂加入量少和破碎率低等优点, 在铸钢生

产中可替代资源短缺的天然硅砂作原砂。

(2) 作为砂型铸造的主要型砂工艺, 湿型黏土砂因生产成本低、适应性强、自动化程度及生产效率高和模具成本低等优势, 在以下方面取得了进展: 取代煤粉

的无碳黏土砂的开发与应用；非铁合金铸件湿型砂工艺在生产中的应用；砂处理系统中旧砂冷却降温机理的研究和旧砂表面鲕化层形成机理的研究；铸件侵入性气孔缺陷防止措施的研究等。

(3) 作为铸造有机黏结剂，两类新型呋喃树脂的研发进展是：酚醛改性呋喃树脂，兼具传统呋喃树脂常温强度高、溃散性好和酚醛树脂高温强度高、不含氮、游离甲醛含量低的特点；利用5-羟甲基糠醛等生物基化合物制备呋喃树脂，取代糠醇和甲醛，其树脂具有低小分子有机物含量、低游离糠醇、高活性、快速固化速度和低固化剂消耗等特点，可大幅度降低生产场所中游离甲醛、 NO_2 和 SO_2 等有害气体的排放。

(4) 在铝合金铸件用无机黏结剂系统中添加其他材料，得到一种新型无机黏结剂，将其应用于黑色铸件生产领域，尤其是在灰铸铁和球墨铸铁生产方面，其具备易操作、混制后的型砂流动性和砂型（芯）致密性好、浇注过程中无有害气体产生和砂型溃散性好等特点。

(5) 铸造涂料的研究及应用进展是：铸造粉末涂料，其具有节约成本和提升效益，同时满足环保和安全的要求等优势；水基快干涂料，在具有优异的悬

浮性、触变性和流平性的基础上，还具有干燥时间缩短、涂层强度高，无毒无味，符合节能、减排及环保的要求。

3.2 展望

(1) 绿色造型材料仍是今后亟待开发研究的重点方向。

(2) 为推广人工整形硅砂在铸造（铸钢）生产中的应用，亟待进行人工硅砂主要性能指标（化学成分、含泥量、含水量、角形因素、平均细度和粒度分布等）检测方法及其评价体系的研究，弄清其作为原砂对不同型砂工艺性能的影响。

(3) 有机黏结剂具有化学硬化强度高、硬化速度快、生产效率高、铸件内外质量和落砂性能优良、旧砂回用率高等优点，但其环保性能差是其最大的劣势，故须重点关注环保性能，开发无毒、无味和低味有机黏结剂；对铸造生产中的有机废气进行净化，做到达标排放等。

(4) 用于不同合金材质的无机黏结剂砂成套技术将成为未来研究的重点方向，尤其是在铁基铸件生产中替代传统有机黏结剂砂工艺仍需深入研究。

参考文献：

- [1] ZHU Jianxun, CHEN Jie, XING Zhenguo, et al. Development and application of crushing-shaped silica sand with high silica content and roundness from quartzite crushing and shaping [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 861–862.
- [2] SUN Qingzhou, ZHAO Wei, WANG Jinhui, et al. Study on the specificity of artificial spherical ceramic casting sands [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 853–854.
- [3] LI Na, YUAN Yong, LIU Ye, et al. A quick method for determining angularity of foundry sand [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 893–894.
- [4] ZHU Shigen. A study on the application of carbon-free green sand casting technology [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 881–882.
- [5] LARSEN Per. Production of aluminum castings in green sand [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 855–856.
- [6] YASUHIRO Maeda, YOSHIDA Shingo, ITO Yuuka, et al. Cooling behavior by water spray and air-blow on green sand with high-temperature [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 863–864.
- [7] QI Yuyang, HE Zefen, PENG Xin, et al. Formation of oolitic layer in green sand under heat effect [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 883–884.
- [8] HE Zefen, MA Jun, Tongshun Liu, et al. New solution on invaded gas hole formation from green sand process [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 899–900.
- [9] XIE Shuzhong, LIU Chunjing, LIANG Jiahao, et al. Research on high-performance furan urea-formaldehyde phenol-formaldehyde copolymer/composite resin [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 867–868.
- [10] WANG Jincheng, TAO Xuyi, YU Ling, et al. Research Progress of Modified Furan Resins [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 897–898.
- [11] YU Ruilong, TAN Rui, YIN Shaokui, et al. Effect of catalyst on quality of 3D printing sand mold/core [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 737–738.
- [12] DAŃKO Rafał, KMITA Angelika, HOLTZER Mariusz, et al. Getting closer to green casting foundry - sustainable development [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 875–876.
- [13] TAN Jian, MA Yanxia. Development trends of eco-friendly binder for foundry molding [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang.

- 2024: 889–890.
- [14] GONG Xiaolong, HU Shengli, FAN Zitian. Research, application and development of inorganic binder for casting process [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 885–886.
- [15] RANGEL Ayax, HAANAPPEL V A C. Viable inorganic binder solutions for ferrous applications [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 879–880.
- [16] KMITA Angelika, DAŃKO Rafał, HOLTZER Mariusz, et al. Eco-friendly casting by using innovative inorganic binder systems (IIBs) [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 873–874.
- [17] LI Yanhai, GAO Tianjiao, YU Zhiyong, et al. Cavity forming mechanism of green inorganic foamed sand [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 895–896.
- [18] XIONG Ying, LUO Weisong. The application of CCITEK® inorganic technology for foundry sand [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 901–902.
- [19] LUSTG Christian, POTATURINA Ekaterina. Revolutionizing metal casting: integrating inorganic binders with refractory coatings for structural applications [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 859–860.
- [20] SHI Yuankai, MA Yanxia. Latest development about inorganic sand reclaim technology [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 925.
- [21] HOU Yabo, Yury Nikalaichyk. Development of the foundry powder coatings for chill mold [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 877–878.
- [22] LIU Bao, LIU Weihua, SONG Lai. Research on water-based quick-drying coatings for foundry and the film-forming mechanism [C]//The 75th World Foundry Congress, Deyang. 2024: 887–888.

New Advances in Research and Application of Molding Materials both Domestically and Internationally

——Overview of Research and Application Technology of Molding Materials Presented at the 75th World Foundry Congress

WANG Yun-xia^{1,2}, HE Ze-feng³, WAN Peng⁴, ZHOU Jian-xin⁵

(1. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd. CAM, Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Foundry Institution of China Mechanical Engineering Society, Shenyang 110022, Liaoning, China; 3. Clariant Chemical Technology(Shanghai)Co., Ltd, Shanghai, 201108, China; 4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China; 5. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract:

The 75th World Foundry Congress included 27 papers in the field of molding materials, covering topics from general conference reports, molding materials forum, activity week forum, and green environmental protection forum. Based on these papers, this paper mainly reviewed the latest research progress in molding materials, including foundry sand, green sand, environmentally friendly organic and inorganic binder sand, and foundry coatings. Finally, the development trends in these areas were discussed.

Key words:

molding materials; artificial shaped silica sand; environmentally friendly binder; green sand; foundry coating