

无机温芯盒粘结剂与原砂适配性能及其界面附着机理

王长旭, 袁永, 杨宗锋, 张杨, 周国栋, 刘伟伟,
马丽, 张用吉, 张丽娟, 刘焯

(济南圣泉集团股份有限公司, 山东济南 250204)

摘要: 无机粘结剂技术是环境友好型铸造材料的重要发展方向之一, 近三十年来在铸铝、铸铁及铸钢领域不断取得突破。本研究以圣泉集团SQ无机粘结剂为对象, 系统比较了该粘结剂在不同细度的宝珠砂与硅砂两种原砂中的性能差异, 并对原砂进行了粒度、光学显微镜、电导率、角形因数、比表面积和扫描电镜等表征。结果表明, 原砂类型显著影响粘结剂性能。在低粘结剂用量下, 宝珠砂试样的即时抗弯强度和1 h抗弯强度显著优于硅砂试样, 甚至优于硅砂试样在高粘结剂用量时的强度, 这主要归因于宝珠砂特殊的表面结构所带来的强附着强度。通过SEM表征还发现, 原砂表面粘结剂膜厚存在差异, 宝珠砂表面粘结剂膜厚的实测值显著低于理论计算值, 而硅砂的实测值略低于计算值, 这一发现进一步证明了原砂表面结构对粘结剂强度性能的正面影响。本研究揭示了原砂特性对无机粘结剂性能的影响, 为深入理解无机粘结剂与原砂的界面作用机制, 优化造型工艺条件, 拓展宝珠砂在铸铝领域的应用提供了依据和数据支撑。

关键词: 无机粘结剂; 原砂; 宝珠砂; 硅砂; 抗弯强度; 界面作用; 表面结构; 温芯盒法

中图分类号: TG221 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 04-0352-09

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0050

Adaptability and Interface Adhesion Mechanism of Inorganic Warm Core Box Binder with Base Sand

WANG Chang-xu, YUAN Yong, YANG Zong-feng, ZHANG Yang, ZHOU Guo-dong,
LIU Wei-wei, MA Li, ZHANG Yong-ji, ZHANG Li-juan, LIU Ye
(Jinan Shengquan Group Share-Holding Co., Ltd., Jinan 250204, Shandong, China)

Abstract: The inorganic binder technology is one of important developing directions of environmentally friendly foundry materials, which has been achieved breakthroughs continuously in aluminum, iron, and steel casting fields for recent thirty years. In this investigation, taking the SQ inorganic binder of Shengquan Group as object, the differences of the binder performances were systematically compared in two kinds of base sands of ceramite sand and silica sand with different fineness levels, and the characterizations of particle size, optical microscope, electrical conductivity, angularity factor, specific surface area, SEM, and so on were carried out for the base sands. The results demonstrate that the base sand type obviously affects the binder performance. Under the condition of a low binder addition, the initial flexural strengths and 1-hour flexural strengths of the ceramite sand samples are obviously higher than that of the silica sand samples, even higher than that of the silica sand samples under the condition of a high binder addition, and this is primarily attributed to the strong adhesive strength resulted from the unique surface structure of the ceramite sand. It is also found through SEM characterization that the binder film thicknesses on the surfaces of base sands exist difference. The measured values of the binder film thicknesses on the surfaces of ceramite sands are much lower than the theoretical calculation values, while the measured values for silica sands are a little more than the calculation values, and this discovery further verified the positive effect of the base sand surface structure on the strength property of binder. This investigation revealed the influence of base sand characteristics on the binder performances, and provided basis and essential data for in-depth understanding of the interfacial interaction mechanism between the inorganic binder and base sand, optimizing the molding process conditions, and expanding the application of ceramite sand in aluminum casting field.

Key words: inorganic binder; base sand; ceramite sand; silica sand; flexural strength; interface interaction; surface structure; warm-box process

基金项目: 圣泉技术创新项目 (2024637010000935)。

收稿日期: 2026-01-04 收到初稿, 2026-03-10 收到修订稿。

作者简介: 王长旭 (1986-), 男, 博士, 工程师, 主要从事铸造无机粘结剂、宝珠砂应用相关研究工作。E-mail: wangchangxu@shengquan.com

引用格式: 王长旭, 袁永, 杨宗锋, 等. 无机温芯盒粘结剂与原砂适配性能及其界面附着机理 [J]. 铸造, 2026, 75 (4): 352-360.
WANG Changxu, YUAN Yong, YANG Zongfeng, et al. Adaptability and interface adhesion mechanism of inorganic warm core box binder with base sand [J]. Foundry, 2026, 75 (4): 352-360.

无机粘结剂技术因其环境友好性，已成为绿色铸造的重要发展方向。该技术近期在铸铝、铸铁、铸钢领域都取得了突破性进展^[1-3]。特别是2003年铸博会上推出的双组分温芯盒无机粘结剂系统，在型砂的流动性、溃散性和再生性等方面取得了突破，拓展了无机粘结剂在铸铝领域的应用^[4]。目前，该技术已成功应用于发动机缸体、缸盖和副车架等关键铸件的生产^[5]。尽管双组分无机粘结剂在硅砂上的应用效果已被广泛研究，但不同原砂与粘结剂的相互作用机制，仍是当前研究的薄弱环节。

宝珠砂凭借低热膨胀系数、高耐火度及近球形粒形等优异的物理化学特性，已在铸造领域逐步取代传统硅砂。宝珠砂在碱性酚醛树脂、冷芯盒及覆膜砂等有机粘结剂体系中性能突出，已被行业广泛认可^[6]。近年来，无机粘结剂宝珠砂体系在铸钢领域的应用也多有报道，例如陈兆杰等发现其可以有效改善烧结和粘砂问题^[7]。然而，宝珠砂在无机粘结剂砂型铸造铝合金铸件方面的应用和研究仍相对欠缺。

圣泉集团开发的SQ系列双组分无机温芯盒粘结剂，具有优异的流动性、抗湿性及溃散性。我们在对该粘结剂进行强度测试时发现，其与宝珠砂配合使用表现出了优异的性能，这表明原砂类型对粘结剂性能具有重要影响。为深入探究原砂的作用机制，本研究针对SQ系列产品，重点考察原砂的影响，采用不同细度的宝珠砂和硅砂，测试其性能差异，对砂粒进行表征，并对硅砂和宝珠砂表面的水玻璃粘结膜进行系统的测量与比较。

1 试验材料及方法

1.1 试验仪器设备

试验使用的主要仪器设备：液压万能强度试验机（SWY）、温芯盒射芯机（MLWA1）、树脂砂混砂机（SHY）、电子天平（AX8200）、X射线衍射仪（XRD-6100）、场发射扫描电镜（TESCAN CLARA）、X荧光光谱仪（ARL-PERFORMX）、光学显微镜（VHX-5000）、动态图像颗粒分析仪（BT-2900）和原砂比表面积测定仪（SMT）等。

1.2 试验材料

主要试验材料：宝珠砂（洛阳凯琳），硅砂（河北东伟），液体组分（SQ-SWB100），粉体促进剂（SQ-BL500）。

1.3 试验方法

首先对宝珠砂和硅砂进行了筛分和级配^[8]，将原砂

筛分出30-140目砂子，然后配比得到5种不同AFS细度（45-70）的级配砂，其中40、50、70、100目的四筛砂占比90%。向其加入SQ温芯盒粘结剂，并进行性能测试。

试样制备：使用温芯盒射芯机（MLWA1）制备抗弯试块。将不同规格的原砂，与液体粘结剂（占砂重1.2wt.%或2.0wt.%）和粉体组分（占砂重0.6wt.%或1.0wt.%）在混砂机中混合2 min直至均匀。再将混合料加入温芯盒射芯机中，设定芯盒温度为160℃，热空气温度为200℃，使用标准抗弯试块模具进行射砂，制备待测抗弯试块。

强度测试：使用液压万能强度试验机（SWY）测定试样的强度，包括即时抗弯强度、1 h抗弯强度和24 h抗弯强度。每组数据取5个试样的平均值。

粘结膜微观表征：选取经人工破碎后的抗弯试块断裂砂粒，对砂粒进行喷金处理后进行SEM观察。利用SEM图像衬度差异测量砂粒表面粘结剂膜的实际厚度（多点测量取平均值）^[9-10]。同时，对宝珠砂断面进行EDS线扫分析，观察元素（Al、Si、O等）跨界面的分布特征。

粘结膜厚度计算：根据粘结剂体积加入量与砂粒总比表面积，计算理想状态下均匀覆盖的粘结剂膜厚度^[10]。

$$\delta_{\text{厚度}} = \frac{v_{\text{粘结剂}}}{S_{\text{砂面积}}} = \frac{m_{\text{粘结剂}}}{S_{\text{砂面积}} \cdot \rho} \quad (1)$$

式中： $m_{\text{粘结剂}}$ 为粘结剂的质量； ρ 为水玻璃密度，取1.4 g/cm³； $S_{\text{砂面积}}$ 由原砂比表面积测试仪测出。

2 结果与分析

2.1 宝珠砂与硅砂的 XRF 表征

试验用宝珠砂和硅砂的化学成分如表1所示。使用这几种原砂进行筛分并级配。其中，宝珠砂（洛阳凯琳）是典型的电熔陶粒砂，氧化铝含量大于72%，其主要物相为莫来石相和刚玉相。硅砂（河北东伟）的SiO₂含量为90%~92%。两者都是行业常用的铸造用砂。

2.2 宝珠砂和硅砂的形貌

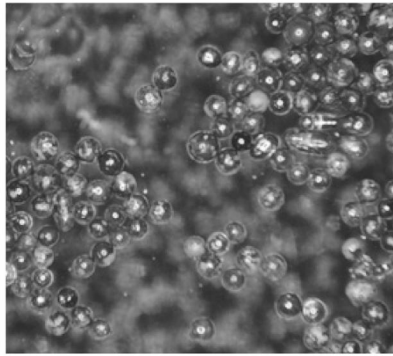
试验用宝珠砂和硅砂的形貌如图1所示。宝珠砂颗粒呈近球形轮廓，且新砂表面较为光洁。宝珠砂的球形形貌能显著提升粘结剂的包覆效率^[11]。如图1（c）所示，经扫描电镜高倍放大后可发现，宝珠砂表面并非完全光滑，而是均匀分布着由熔融莫来石在结晶过程中形成的微观沟槽结构。与烧结法陶粒砂内部也存在的开孔不同，宝珠砂的孔隙结构主要集中于颗粒表层区域，这种表面形貌对粘结剂-砂粒界面结合具有重要

表1 试验用宝珠砂和硅砂的化学成分

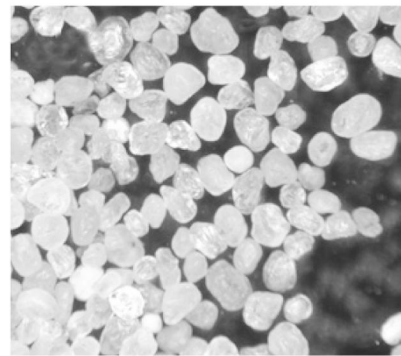
Tab. 1 The chemical compositions of the ceramite sand and silica sand used in the experiments

 $w_B/\%$

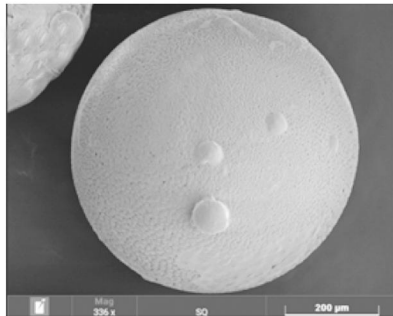
序号	名称	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO
1	宝珠砂 (40-70)	72.73	19.42	1.92	2.99	0.49	0.037	0.45	0.16
2	宝珠砂 (50-100)	73.17	19.48	2.01	2.94	0.23	0.029	0.43	0.17
3	硅砂 (40-70)	3.28	92.64	0.26	0.045	1.55	0.59	0.11	0.12
4	硅砂 (50-100)	4.18	90.12	0.32	0.043	2.34	0.89	0.11	0.13



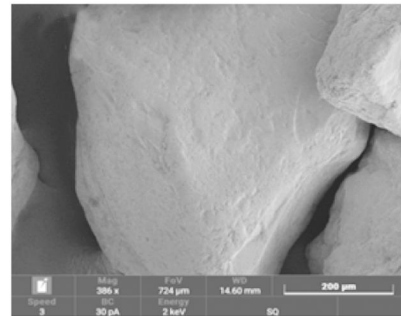
(a) 宝珠砂光学照片



(b) 硅砂光学照片



(c) 宝珠砂电镜照片



(d) 硅砂电镜照片

图1 试验用宝珠砂和硅砂形貌

Fig. 1 Morphologies of the ceramite sand and silica sand used for experiments

影响^[12]。图1(d)为硅砂的形貌,其颗粒普遍呈现不规则的棱角。这种不规则的粒形和粗糙的表面状态会对粘结剂膜在颗粒表面的附着产生不利影响,进而削弱砂型的整体强度^[13]。

2.3 宝珠砂和硅砂的常规检测指标

宝珠砂和硅砂的常规检测指标如表2和表3所示。5种级配后的宝珠砂和硅砂的AFS细度相近,其范围在51

至65之间。宝珠砂的pH接近中性,角形因数为1.07,显著优于硅砂的角形因数1.31。由于角形因数的差异,在AFS细度相近的情况下,宝珠砂的比表面积明显小于硅砂。同时,宝珠砂的含泥量、酸耗值和电导率等指标较低^[7]。

综合结果表明,5种级配宝珠砂的主要区别在于其粒度指标。后续将结合SQ无机粘结剂的强度测试结果,进一步对比分析硅砂与宝珠砂的性能差异。

表2 不同细度宝珠砂的常规检测指标

Tab. 2 Conventional test results of ceramite sands with different finesses

序号	AFS细度	pH	含泥量/%	灼减/%	角形因数	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	酸耗值/mL	电导率/(μS·cm ⁻¹)
宝珠砂-1	51.12	6.78	0.03	0	1.073	7.07	2.13	43.60
宝珠砂-2	54.76	6.92	0.03	0	1.087	7.72	2.12	42.28
宝珠砂-3	59.48	7.08	0.03	0	1.064	8.49	2.12	41.35
宝珠砂-4	62.55	6.99	0.03	0	1.051	9.11	2.09	39.70
宝珠砂-5	65.19	7.06	0.03	0	1.052	9.63	2.08	38.11

表3 不同细度硅砂的常规检测指标

Tab. 3 Conventional test results of silica sands with different finesses

序号	AFS细度	pH	含泥量/%	灼减/%	角形因数	比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	酸耗值/mL	电导率/($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)
硅砂-1	50.54	6.5	0.04	0	1.311	7.86	3.27	50.30
硅砂-2	55.17	6.31	0.03	0	1.293	8.41	3.15	45.92
硅砂-3	58.46	6.65	0.04	0	1.307	9.35	2.98	47.28
硅砂-4	62.78	6.47	0.06	0	1.289	10.84	3.39	45.95
硅砂-5	65.01	6.42	0.09	0	1.275	11.56	3.49	42.90

2.4 宝珠砂中液体组分 1.2% 加入量的强度测试结果

表4为SQ温芯盒粘结剂加入不同规格宝珠砂后的抗弯强度检测结果。当液体组分加入1.2%，粉体组分加入0.6%时，试样即时强度均超过1.6 MPa，1 h抗弯强度可达5.7 MPa以上。可见，随着宝珠砂AFS细度增大（即颗粒细化），其比表面积相应（由原砂比表面仪测量值）增大，其计算粘结膜厚度也相应变薄。具体而言，当比表面积从7.72 m^2/kg 增至9.11 m^2/kg 时，相应1 h抗弯强度提高了约26%。肖惠康等研究铸铁用无机粘结剂时，也观察到了相同的变化趋势。其双组分粘结剂应用于50/100的球形陶瓷砂的1 h抗拉强度，相比40/70砂从2.98 MPa提高至4.29 MPa，即提高了43.96%^[14]。

树脂砂的强度源于粘结桥的强度及其数量。其中，粘结桥的数量与粒度、级配和粒形等因素相关。而粘结桥强度，在使用同种粘结剂的情况下，主要受树脂膜厚度影响^[15-16]。一般认为，在粘结剂加入量不变时，砂比表面积的增大会导致粘结膜变薄，从而削弱单个粘结桥强度，最终降低整体强度^[17-19]。然而，本试

验研究发现，在一定粒度范围内，无机粘结剂应用于宝珠砂时，粒度变细反而对强度有明显的提升。这可能受以下两个因素的影响：

(1) 粘结桥数量的增加，对粘结剂的强度起到了一定的补偿和增强作用。冀运东等^[20]研究了微观结构对拉伸强度的影响，结果表明，当粘结剂加入量确定时，砂粒的粒径减小，会增加砂表面积，从而减小砂表面粘结膜的厚度。但是，也会增加砂粒之间的粘结桥数目。

(2) 这表明宝珠砂的特殊形貌会影响粘结剂的固化与粘结桥的形成，进而提高强度。李伟华发现，宝珠砂表面的沟槽和微孔能够增强粘结剂的结合强度，粘结剂渗入并填充这些微结构后，可以有效增强粘结剂在砂粒表面的附着^[12]。肖惠康发现，人造砂中含有高比例的莫来石相。在高温条件下，晶相中的铝氧键可以在碱性环境中同硅氧键反应，从而加强网络结构、提升强度^[21]。同时，也有研究认为晶体表面的铝离子能够进入硅氧铝网络结构，从而加强粘结桥强度^[22]。

表4 1.2%粘结剂加入量的不同细度宝珠砂的抗弯强度测试结果

Tab. 4 Flexural strength test results of ceramite sands with different finesses and 1.2% binder addition content

序号	AFS细度	比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	即时强度/MPa	1 h强度/MPa	24 h强度/MPa	1 h强度变化/%	计算粘结膜厚度/ μm
宝珠砂-1	51.12	7.07	1.66	5.71	5.63	100	1.21
宝珠砂-2	54.76	7.72	1.82	6.08	5.63	107	1.11
宝珠砂-3	59.48	8.49	2.03	6.45	5.64	113	1.02
宝珠砂-4	62.55	9.11	2.06	6.83	5.85	120	0.94
宝珠砂-5	65.19	9.63	2.15	7.21	6.76	126	0.89

2.5 硅砂中液体组分 1.2% 和 2.0% 加入量的强度测试结果

硅砂的强度测试结果如表5所示。其中，液体加入量为2.0%，粉体为1.0%。与表4对比可知，尽管采用了更高的加入量（2.0%），硅砂的强度结果仍显著低于宝珠砂（1.2%）。这一现象在自硬无机粘结剂中也已有报道。如章顺亮等发现，自硬无机粘结剂应用于宝

珠砂时，相比于硅砂，其24 h抗拉强度从0.18 MPa上升到了0.91 MPa^[23]。李伟华等发现，使用宝珠砂可降低55%的粘结剂用量，同时获得不低于甚至优于硅砂的强度性能^[12]。

为了进一步同宝珠砂对比，我们在硅砂中使用了与宝珠砂相同的加入量（1.2%液体组分+0.6%粉体），结果如表6所示。与表5对比可发现，硅砂在低粘结剂

表5 2.0%粘结剂加入量的不同细度硅砂的抗弯强度测试结果
Tab. 5 Flexural strength test results of silica sands with different finesses and 2.0% binder addition content

序号	AFS细度	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	即时强度/MPa	1 h强度/MPa	24 h强度/MPa	1 h强度变化/%	计算粘结膜厚度/μm
硅砂-1	50.54	7.86	1.72	4.33	4.27	100	1.82
硅砂-2	55.17	8.41	1.73	4.27	4.19	98.6	1.7
硅砂-3	58.46	9.35	1.76	4.16	4.05	96.1	1.53
硅砂-4	62.78	10.84	1.77	4.12	3.85	95.1	1.32
硅砂-5	65.01	11.56	1.81	4.09	3.78	94.4	1.24

表6 1.2%粘结剂加入量的不同细度硅砂的抗弯强度测试结果
Tab. 6 Flexural strength test results of silica sands with different finesses and 1.2% binder addition content

序号	AFS细度	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	即时强度/MPa	1 h强度/MPa	24 h强度/MPa	1 h强度变化/%	计算粘结膜厚度/μm
硅砂-1	50.54	7.86	1.05	2.12	1.1	100	1.09
硅砂-2	55.17	8.41	1.04	1.91	1.14	90.10	1.02
硅砂-3	58.46	9.35	0.93	1.83	1.05	86.30	0.92
硅砂-4	62.78	10.84	0.89	1.47	0.91	69.30	0.79
硅砂-5	65.01	11.56	0.73	1.31	0.41	61.70	0.74

加入量时,其强度性能显著衰减。这是由于砂粒表面的粘结剂膜厚度显著减小,进而导致粘结膜的完整性受到破坏。如硅砂-1的计算粘结膜厚度从1.82 μm降低到1.09 μm。而硅砂因其角形因数高、颗粒形貌不规则,导致颗粒间接触区域复杂。过薄的粘结剂膜难以充分填充颗粒间的缝隙,从而引发强度的下降^[24]。

同时可以发现,随着粒度细化,硅砂的强度呈现逐渐下降趋势。当AFS细度从50.54增加到65.01时,1.2%加入量硅砂的1 h强度,降低约40%。当粘结剂加入量不变时,颗粒细化导致比表面积显著增大,粘结剂膜厚减小,粘结膜更加不完整,最终造成整体强度下降^[19]。如佟乐乐等发现呋喃树脂在JNY-450#宝珠砂(AFS=34-45)上的抗压强度,要远大于在JNY-650#(AFS=55-65)上的强度^[18]。综合对比可知,在1.2%粘结剂用量下,宝珠砂不仅有更高的强度,其强度随粒度变化的趋势也同硅砂相反。

2.6 宝珠砂断面电镜和能谱表征

对砂粒的断面进行了电镜和线扫表征,结果如图2所示。其中,Al与Si元素在宝珠砂的破碎界面呈现明显的梯度分布特征。这是因为宝珠砂体相主要由莫来石和刚玉相组成,其铝含量相对较高。在加入粘结剂后,宝珠砂的外表面被水玻璃覆盖,导致其Si元素含量显著上升。而破碎界面内侧的宝珠砂体相区域未受水玻璃渗透影响,仍维持较高的Al含量。因此,在破碎界面两侧可观察到Si、Al元素含量发生显著变化。借助这一特征,可以确定宝珠砂的外表面和体相,进而确

定水玻璃粘结膜的具体位置。

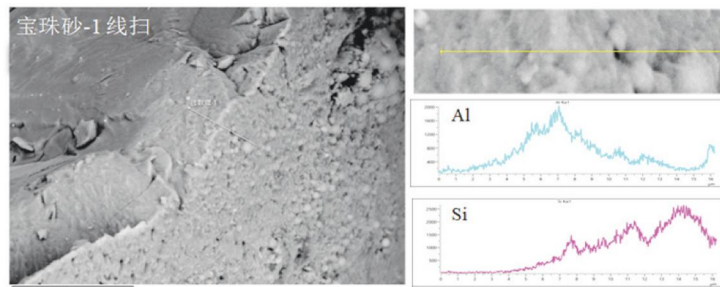
2.7 宝珠砂和硅砂表面粘结膜厚度的测量

对1.2%粘结剂加入量的宝珠砂和硅砂进行了电镜表征,测量其表面粘结膜厚度,如图3所示。为测定砂粒表面固化后的粘结剂膜厚度,选取破碎砂粒的截面进行观测。通过能谱线扫和SEM图像中的衬度差异可清晰区分粘结剂膜与砂粒基体。使用10~15个测量值的平均值作为砂粒表面粘结膜的厚度,结果如表7所示。

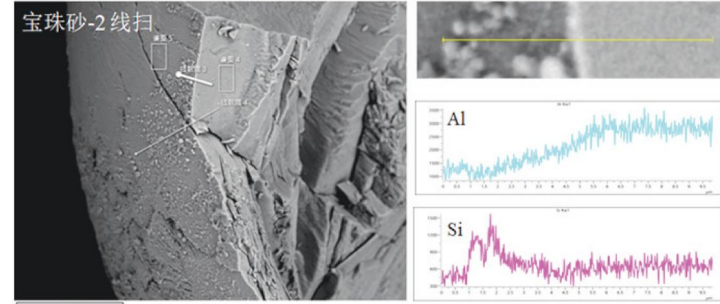
对于粘结剂加入量为1.2%的硅砂试样,通过公式计算得到的膜厚分别为1.09、1.02、0.92、0.79和0.74 μm,而SEM实测值则分别为0.92、0.89、0.82、0.73和0.71 μm。理论值与实测结果较为接近,表明随

表7 宝珠砂和硅砂的粘结膜厚度
Fig. 7 The binding film thicknesses on ceramite sands and silica sands

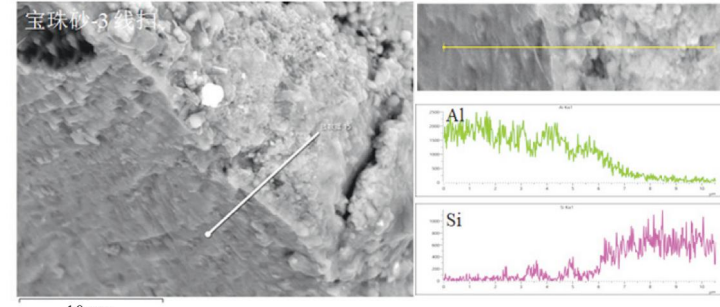
序号(1.2%液体组分加入量)	计算厚度/μm	测量厚度/μm
宝珠砂-1	1.21	0.89
宝珠砂-2	1.11	0.61
宝珠砂-3	1.02	0.58
宝珠砂-4	0.94	0.47
宝珠砂-5	0.89	0.40
硅砂-1	1.09	0.92
硅砂-2	1.02	0.89
硅砂-3	0.92	0.82
硅砂-4	0.79	0.73
硅砂-5	0.74	0.71



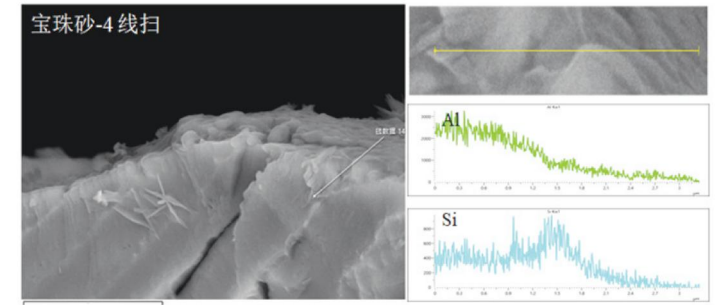
25 μm (a) 宝珠砂-1砂粒断面的电镜和线扫结果



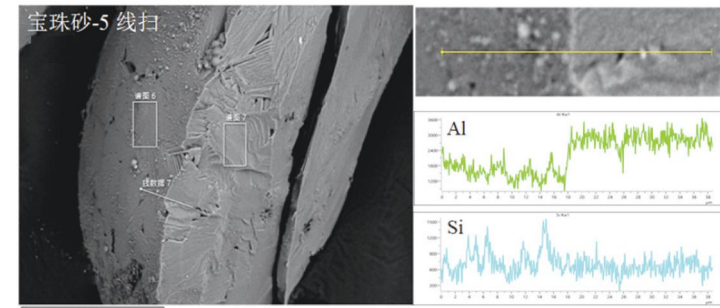
50 μm (b) 宝珠砂-2砂粒断面的电镜和线扫结果



10 μm (c) 宝珠砂-3砂粒断面的电镜和线扫结果



5 μm (d) 宝珠砂-4砂粒断面的电镜和线扫结果



100 μm (e) 宝珠砂-5砂粒断面的电镜和线扫结果

图2 宝珠砂断面的电镜和能谱表征

Fig. 2 SEM and EDS characterizations of the fracture surfaces of ceramite sands

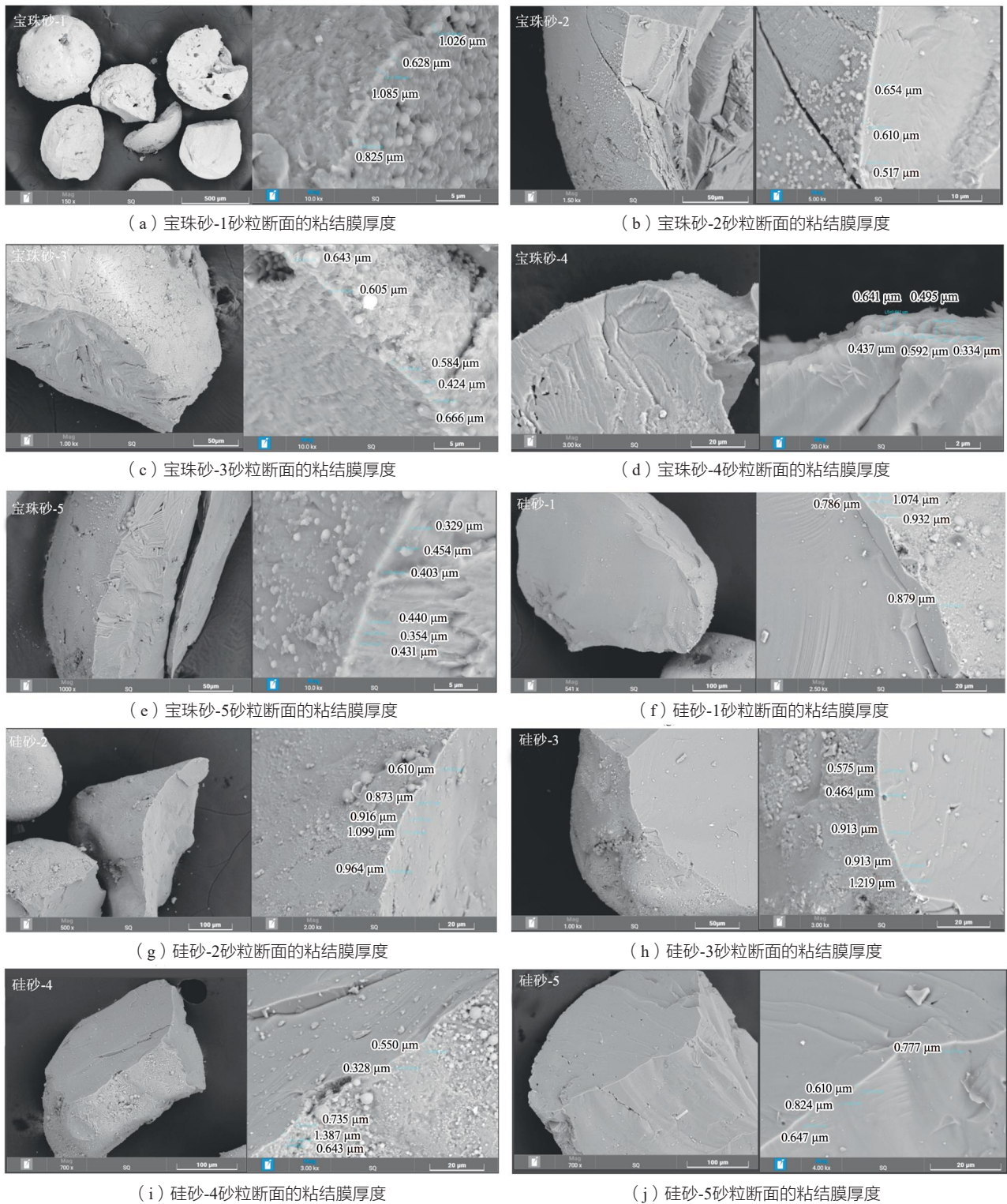


图3 1.2%粘结剂加入量的宝珠砂和硅砂表面粘结膜厚度的SEM表征

Fig. 3 SEM characterizations of the binding film thicknesses on the surfaces of ceramite sands and silica sands with 1.2% binder additions

着硅砂比表面积增大，其表面所形成的粘结剂膜厚度相应减小。采用同样的方式对1.2%加入量的宝珠砂进行了相应的计算与测量。其计算值分别为1.21、1.11、1.02、0.94和0.89 μm，但SEM实测结果则为0.89、0.62、0.58、0.47和0.40 μm。与硅砂相比，宝珠砂的理论计算粘结膜厚度较高，但其SEM实际测量结

果显著低于硅砂。造成该差异的主要原因可能与其表面结构特性相关：在混砂过程中，部分粘结剂渗入砂粒表面沟槽而被消耗，导致实际可用于成膜的有效粘结剂量减少。值得注意的是，尽管宝珠砂的实际粘结膜较薄，其试块强度反而更高，这说明粘结剂与砂粒表面的附着强度对宝珠砂试样的整体力学性能起着更

为关键的作用。如朱玉龙发现，用高温改性硅砂可以增强无机粘结剂和砂粒表面的结合强度，从而显著增强试块强度^[13, 25]。尽管SEM测量结果可能受到观察角度，粘结剂水分含量等因素的影响，但仍为无机粘结剂在不同原砂表界面的附着机制提供了新的认识。

2.8 宝珠砂和硅砂粘结桥的电镜和能谱表征

对1.2%粘结剂加入量的宝珠砂和硅砂表面的粘结桥进行了电镜和能谱表征，测量表面粘结膜厚度，如

图4所示。相对于硅砂，宝珠砂表面的粘结桥面积较小，砂粒间更接近点接触。宝珠砂表面的粘结桥呈现出典型的环形凹陷形貌^[12]，表现出更接近于内聚断裂特征。然而，由于粘结剂加入量较低，砂粒表面形成的粘结膜厚度较薄，导致断裂后的凹陷内部暴露出砂粒基底^[26]。这一点可由图4(e)的能谱面扫结果进一步证实：在凹陷区域检测到明显的Al元素分布，对应宝珠砂表面中的莫来石组分。这表明，断裂粘结桥呈现出混合断裂的复杂情况。

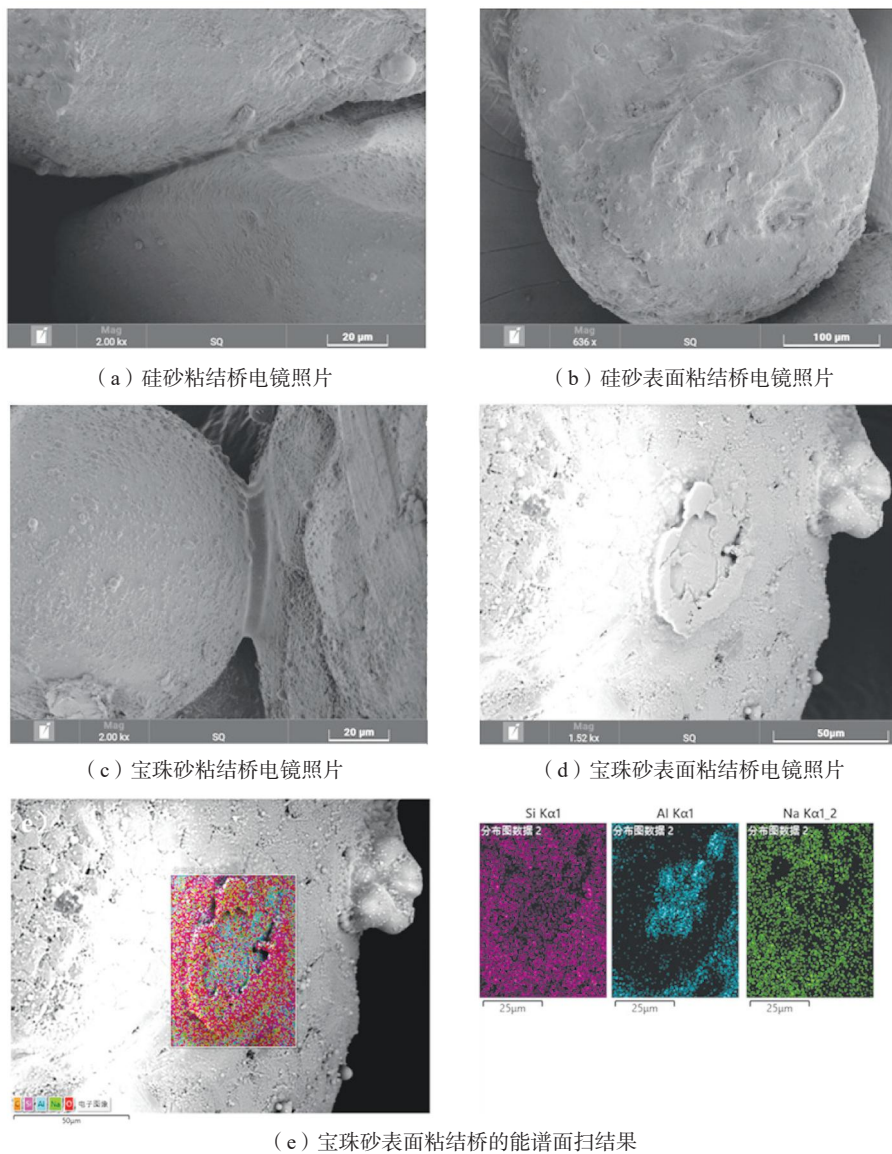


图4 1.2%粘结剂加入量的宝珠砂和硅砂表面粘结桥的的SEM及能谱表征

Fig. 4 SEM and EDS characterizations of the bonding bridges on the surfaces of ceramite sands and silica sands with 1.2% binder additions

3 结论

系统对比了圣泉集团SQ系列双组分无机温芯盒粘结剂在不同细度宝珠砂与硅砂中的性能差异，并结合

多种表征手段深入分析了界面附着机理。主要结论如下：

(1) 显著的性能优势：在低粘结剂用量下，SQ粘结剂应用于宝珠砂时展现出突出的性能优势。其即时

抗弯强度超过1.6 MPa, 1 h抗弯强度超过5.7 MPa, 不仅远优于相同用量下的硅砂, 甚至优于硅砂在较高粘结剂用量时的强度。

(2) 独特的粒度效应: 在研究的粒度范围内, 宝珠砂的强度随颗粒细化而呈现明显的上升趋势(最高提升26%)。这与硅砂在相同粘结剂用量下强度随细化而显著下降的表现截然相反。

(3) 界面附着机理: 宝珠砂表面存在独特的微观沟槽结构, 而硅砂表面粗糙且颗粒呈不规则棱角状。特殊的表面结构显著提高了粘结剂与宝珠砂颗粒的界面附着强度, 是宝珠砂在低粘结剂用量和细粒度条件

下仍能保持高强度的根本原因。

(4) 应用价值: 揭示了宝珠砂在无机温芯盒粘结剂体系中的优异性能及其内在机制, 为优化铸铝造型工艺(如降低粘结剂用量、选择合适粒度)提供了科学依据, 并进一步拓展了宝珠砂在环境友好型铸造技术中的应用领域。

本研究聚焦于原砂同粘结剂的界面作用机理, 下一步计划开展工艺试验, 系统评估不同原砂对铸件表面质量(如气孔缺陷等)的实际影响。这也是该技术走向工业化应用的关键后续工作。

参考文献:

- [1] 王云霞, 何泽芬, 万鹏, 等. 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[J]. 铸造, 2025, 74(6): 721–731.
- [2] ANWAR N, MAJOR-GABRYŚ K, JALAVA K, et al. Effect of additives on heat hardened inorganic solid foundry binder [J]. International Journal of Metalcasting, 2025, 19(1): 129–144.
- [3] SONG L, DU X, SONG G, et al. Effect of complex modifier on properties of heat-hardened sodium silicate-bonded sand for castings production [J]. International Journal of Metalcasting, 2024, 18(1): 269–277.
- [4] MÜLLER J, DETERS H, OBERLEITER M, et al. 无机粘结剂体系领域的进步[J]. 铸造, 2016, 65(5): 431–435.
- [5] 龚小龙, 胡胜利, 樊自田. 铸造用无机粘结剂的研究应用及发展[J]. 铸造, 2025, 74(1): 1–15.
- [6] 马丽, 袁永, 刘焯, 等. 碱性酚醛树脂熔融陶瓷砂烧结层的形成机理与解决对策[J]. 铸造, 2022, 71(4): 443–448.
- [7] 陈兆杰, 李忠泽, 刘满对, 等. 宝珠砂的特点及其在铸造生产中的应用[J]. 铸造, 2018, 67(12): 1131–1135.
- [8] 邢贝贝, 宋向阳, 靳存文, 等. 硅砂平均细度对呋喃树脂砂性能的影响[J]. 铸造工程, 2023, 47(3): 53–56.
- [9] 夏祥麟. 改善水玻璃砂表面安定性的涂层研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.
- [10] 张启勋, 汪宝堂. 树脂膜厚度与树脂砂强度的关系[J]. 铸造技术, 1998(2): 44–45.
- [11] 金军, 刘轶, 周志军, 等. 宝珠砂在砂型3D打印技术中的研究与应用[J]. 材料导报, 2025(8): 1–10.
- [12] 李伟华, 董选普, 李建军, 等. 宝珠砂在酯硬化水玻璃自硬砂中的应用[J]. 铸造, 2011, 60(5): 481–485.
- [13] 赫振梅, 郑金康, 李育慧. 硅砂、陶粒砂和宝珠砂铸造工艺性能研究[J]. 铸造, 2024, 73(2): 248–252.
- [14] 肖惠康, 殷亚军, 文艺贝, 等. 新型无机粘结剂砂抗拉强度的试验研究[J]. 铸造, 2022, 71(8): 1012–1016.
- [15] 游敏, 郑小玲. 原砂粒度对树脂砂强度影响的理论分析[J]. 铸造, 1999(2): 42–44.
- [16] XIN F, LIU W, SONG L, et al. Study on influence of silicate modulus and cation type on tensile strength for sand core [J]. International Journal of Metalcasting, 2023, 17(1): 314–321.
- [17] CHOE K C, KIM R C. Effect of sodium phosphate on the properties of sodium silicate and collapsibility of sodium silicate sand [J]. International Journal of Metalcasting, 2023, 17(1): 297–304.
- [18] 佟乐乐, 周建新, 殷亚军, 等. 原砂粒度、树脂加入量对呋喃树脂砂强度的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(2): 139–142.
- [19] 王振, 刘文文, 姚平坤, 等. 粒径对选择性激光烧结覆膜宝珠砂打印质量的影响[J]. 中国铸造装备与技术, 2025, 60(5): 33–39.
- [20] 冀运东, 郑凯东, 曹东风, 等. 基于内聚力行为和扩展有限元的砂/树脂复合材料拉伸失效行为的数值计算[J]. 复合材料学报, 2019, 36(12): 2851–2859.
- [21] 肖惠康. 铸铁件用新型硅酸盐无机粘结剂砂性能的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [22] 周春苗, 史翎, 张军营. 莫来石/硅酸盐低膨胀率粘接材料固化机理与结构性能[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2010, 37(4): 67–72.
- [23] 章顺亮, 殷亚军, 万鹏, 等. 新型硅酸盐自硬粘结剂砂性能的研究[J]. 铸造, 2024, 73(2): 154–159.
- [24] 刘卫东, 曹文. 型砂级配树脂砂抗拉强度的影响[J]. 铸造, 2012, 61(4): 422–424.
- [25] 朱玉龙, 蔡震升, 胡汉起. 硅砂表面高温改性提高水玻璃砂强度的机理[J]. 北京科技大学学报, 1998(2): 174–177.
- [26] ANWAR N, JALAVA K, ORKAS J. Experimental study of inorganic foundry sand binders for mold and cast quality [J]. International Journal of Metalcasting, 2023, 17(3): 1697–1714.