

硅溶胶粒径及浓度对陶瓷型壳组织与性能的影响

屈杨栋¹ 王 飞¹ 储强泽² 何 博¹

(1. 上海工程技术大学材料科学与工程学院, 高温合金精密成型研究中心, 上海 201620; 2. 上海万泽精密铸造有限公司, 上海 201401)

摘 要 选用不同浓度的小粒径(3~5 nm)硅溶胶与普通粒径(8~15 nm)硅溶胶为粘结剂制备了陶瓷型壳, 并对陶瓷型壳的显微组织、力学性能与物理性能进行了研究。结果表明, 小粒径硅溶胶浆料具有良好的流变性、触变性与悬浮率。相同硅溶胶浓度下, 小粒径硅溶胶型壳的坯体强度比普通硅溶胶型壳提高了73%, 1 000 °C焙烧后的强度比普通硅溶胶型壳提高了148%。基于更高的烧结活性, 小粒径硅溶胶型壳具有更大的烧结收缩率和更低孔隙率, 经1 500 °C焙烧后, 相同硅溶胶浓度下小粒径硅溶胶型壳的孔隙率仅为20.7%, 远低于普通硅溶胶型壳的29.3%。

关键词 陶瓷型壳; 硅溶胶; 弯曲强度; 收缩率

中图分类号 TB321; TG242.1; TG249.5; TP311

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250113

Effects of Particle Size and Concentration of Silica Sol on Microstructure and Properties of Ceramic Mould

QU Yangdong¹, WANG Fei¹, CHU Qiangze², HE Bo¹

(1. Research Center of High-Temperature Alloy Precision Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620; 2. Shanghai Wedge Investment Casting Co., Ltd., Shanghai 201401)

Abstract: Taking silica sols of varied concentrations with small particle size (3~5 nm) and common particle size (8~15 nm) as binders, the ceramic shell were prepared, and the microstructure, mechanical properties and physical properties were investigated. The results indicate that silica sol slurry with small particle size exhibits desirable rheological properties, thixotropy and suspension rate. Under identical silica sol concentration, the green body strength of silica sol shell with small particle size is 73% higher than that of common ones, and the strength after calcination at 1 000 °C is 148% higher than that of the common ones. Based on higher sintering activity, silica sol shell with small particle size possesses a larger sintering shrinkage rate and lower porosity. After baking at 1 500 °C, the porosity of silica sol shell with small particle size is only 20.7% under identical silica sol concentration, which is far lower than that of common ones.

Key Words: Ceramic Shell, Silica Sol, Flexural Strength, Shrinkage Rate

熔模铸造以其高尺寸精度、高金属利用率和低表面粗糙度, 广泛用于复杂薄壁铸件的制造, 是目前制备各类精密铸件的理想工艺^[1-2]。陶瓷型壳的制备是精密铸造过程中的关键环节。随着铸件成形难度和质量要求的日益增加, 开发高性能陶瓷型壳成为当前精密铸造技术发展的主要目标之一^[3-5]。

陶瓷型壳需具备适当的强度、透气性、尺寸稳定性、内表面光洁度和化学惰性方能满足精密铸造使用要求^[6-8]。型壳的性能主要取决于制壳耐火材料和粘结

剂的选取。硅溶胶作为目前应用最为广泛的精密铸造粘结剂, 其能够为型壳提供足够的强度, 同时稳定浆料以防止自凝胶和团聚, 硅溶胶的粒径及浓度等参数对型壳的性能影响很大^[9]。

从材料热力学角度来看, 低浓度硅溶胶的使用可降低活性SiO₂粒子在型壳中的占比, 有利于减弱合金熔体与型壳的界面反应^[10-12]。然而, 过低浓度硅溶胶的使用亦可能对陶瓷浆料的流变性能、工艺性能, 特别是对型壳的力学性能产生不利影响。针对不同浓度硅溶

收稿日期: 2025-03-12; 修订日期: 2025-04-22

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2024YFB3713502); 上海市国产攻关专项资助项目(650YJ2025102)

第一作者: 屈杨栋, 男, 2000年出生, 硕士研究生, E-mail: qyd1904236665@163.com

通信作者: 王飞, 男, 1982年出生, 讲师, E-mail: wf@sues.edu.cn

引用格式: 屈杨栋, 王飞, 储强泽, 等. 硅溶胶粒径及浓度对陶瓷型壳组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(6): 955-960.

QU Y D, WANG F, CHU Q Z, et al. Effects of particle size and concentration of silica sol on microstructure and properties of ceramic mould[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(6): 955-960.

胶对型壳力学性能的影响研究,均未发现硅溶胶浓度与型壳力学性能的明显对应关系^[13-14]。目前,精密铸造用硅溶胶的粒径范围普遍在 8~20 nm 范围内^[15]。粒径在 7 nm 及以下的硅溶胶主要应用在无机涂料、造纸、电镀和金属表面处理等领域,在精密铸造中的应用鲜有报道^[16]。随着硅溶胶制备技术的不断成熟,7 nm 以下粒径硅溶胶有望以其比表面积高、粘结性好等特点在精密铸造陶瓷型壳中获得应用。

本研究以不同粒径及浓度的硅溶胶为粘结剂制备了陶瓷型壳,对比分析硅溶胶粒径及浓度对陶瓷型壳显微组织、力学性能、烧结收缩、热膨胀、孔隙率等性能的影响,旨在为相关研究提供借鉴与参考。

1 试验材料与方法

选取粒径为 8~15 nm 的普通硅溶胶和粒径为 3~5 nm 的小粒径硅溶胶,初始 SiO₂ 含量分别为 30% 和 16% (质量分数,下同)。通过在两种初始硅溶胶中分别加

入一定比例的去离子水与乳胶,辅以超声搅拌使硅溶胶均匀稀释与分散,将普通硅溶胶原胶稀释为 G-28、G-15 两种不同浓度的普通硅溶胶,将小粒径硅溶胶原胶稀释为 S-15、S-5 两种不同浓度的小粒径硅溶胶,参数见表 1。选用 325 目的硅酸锆粉与 80/120 目的硅酸锆砂为制壳耐火材料。陶瓷浆料成分配比及部分工艺参数见表 2,浆料的配制过程见图 1。4 种硅溶胶对应的浆料分别命名为 GS-28、GS-15、SS-15、SS-5,对应的型壳分别命名为 GM-28、GM-15、SM-15、SM-5,制壳过程见图 1,具体工艺参数见表 3。型壳反复涂挂 8 层,第 8 层为封浆层,只沾浆不淋砂。封浆后干燥 24 h,将型壳放入蒸气脱蜡釜中进行脱蜡,脱蜡温度和脱蜡压力定为 170 °C 和 0.75 MPa,脱蜡时间为 10 min,脱蜡结束后,将脱蜡釜中的压力卸载,即可将型壳取出。脱蜡后的型壳干燥 8 h 后放入焙烧炉中进行焙烧,升温速率为 5 °C/min,焙烧温度分别控制在 800、1 000、1 200 和 1 500 °C,保温时间为 1 h。

表 1 不同粒径和浓度的硅溶胶黏结剂参数

Tab.1 Parameters for silica sol binders with different particle sizes and concentrations

黏结剂	粒径/nm	w(SiO ₂)/%	聚合物含量/%	pH(25 °C)	密度/(g·cm ⁻³)(25 °C)	黏度/(mPa·s)(25 °C)
G-28	8~15	28	5	10.1	1.195	2.6
G-15	8~15	15	5	9.9	1.035	2.0
S-15	3~5	15	5	11.5	1.108	6.8
S-5	3~5	5	5	10.8	1.035	3.5

表 2 不同陶瓷浆料的成分及工艺参数

Tab.2 Composition and process parameters of different ceramic slurries

成分及工艺参数	黏结剂	耐火材料	润湿剂/%	消泡剂/%	粉液比	流杯黏度/s	pH	密度/(g·cm ⁻³)
GS-28	G-28	硅酸锆 325M	0.3	0.3	3.2~3.7	34~37	8.9	2.78
GS-15	G-15						8.4	2.81
SS-15	S-15						11.0	2.81
SS-5	S-5						10.1	2.98

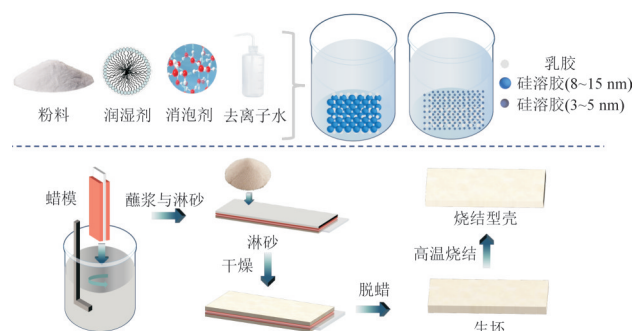


图 1 陶瓷型壳制备流程图

Fig.1 Flow chart of preparation process for ceramic shell

浆料的流变性和触变性采用 NDJ-8S 数显黏度计测量;浆料的悬浮率根据 JB/T9226-2008 标准测量。首先将浆料倒入 100 mL 量筒中,然后测量澄清溶液的体积,计算浆料的悬浮率 α :

$$\alpha = \frac{100 - V}{100} \times 100\% \quad (1)$$

式中, V 为澄清溶液体积。

使用热分析仪(PerkinElmer STA 6000)对型壳进行热分析;使用 X 射线衍射仪(X'Pert pro PANalytical)对型壳进行物相分析;无需对试样进行机械研磨、抛光及腐蚀,直接使用扫描电镜(Hitachi S-3400N)对型壳的表面微观结构进行表征;采用热膨胀仪(Netzsch TMA 402F3)对型壳的热膨胀率进行测量;采用阿基米德排水法对型壳的孔隙率进行测量。

使用万能试验机(AG-25TA)对型壳的三点弯曲强度进行测试,跨距长度为 40 mm。使用测试设备以 1 mm/min 的恒定速度对试样中部施加载荷,使用下式计算试样的弯曲强度,测试标准参考 HB 5352.1-2004。

三点弯曲强度 σ 可根据下式计算:

表3 陶瓷型壳的制壳工艺参数
Tab.3 Process parameters for ceramic shell-making

型壳体系	浆料体系	淋砂材料	环境温度/℃	环境湿度/%	风干速度/(m·s ⁻¹)	干燥时间/h
GM-28	GS-28	硅酸锆 80/120M	20~25	50~70	0.5	6~8
GM-15	GS-15					
SM-15	SS-15					
SM-5	SS-5					

$$\sigma = \frac{3FL}{2wh^2} \tag{2}$$

式中, F 为断裂力; L 为跨距; w 和 h 分别为试样的宽度和高度。为了验证试验的准确性,取6个试样的平均值作为最终结果。

2 试验结果与讨论

2.1 浆料性能分析

图2为浆料的流变性、触变性及悬浮率。由图2a可知,随着剪切速率增加,浆料的黏度逐渐降低。当浆料中的剪切应力小于屈服极限时,网络结构不会被破坏,仅发生弹性变形,浆料不会流动。当剪切应力达到屈服极限时,三维网络中最弱的节点首先被破坏,浆料开始流动。随着剪切速率增加,网络拓扑结构发生变

化,连接键的力减弱,浆料黏度降低。特定的剪切速率对应于一定程度的网络节点损坏。随着剪切速率增加,水平连接的数量减少,因此浆料的黏度下降。GS-28和SS-15浆料的黏度随着剪切速率的增加而显著下降,表现为明显的假塑性流体特征。同时,GS-28和SS-15浆料的触变环面积较大(见图2b),表明其触变性较强,搅拌时需要更大的剪切力来破坏网络。GS-15和SS-5浆料的触变环面积较小,其触变性较差。GS-15和SS-5浆料的黏度随着剪切速率的增加先下降后增加,这是由于浆料悬浮性较差(见图2c),沉积较快造成的。随着剪切速率增加,SS-15浆料的黏度最高,GS-28浆料次之,这说明虽然SS-15浆料中硅溶胶浓度较低,但由于硅溶胶粒径较小(3~5 nm),胶粒数量较多,胶粒与耐火材料间形成的三维网络节点之间的力较强,表现为浆料稳定后的黏度较大。

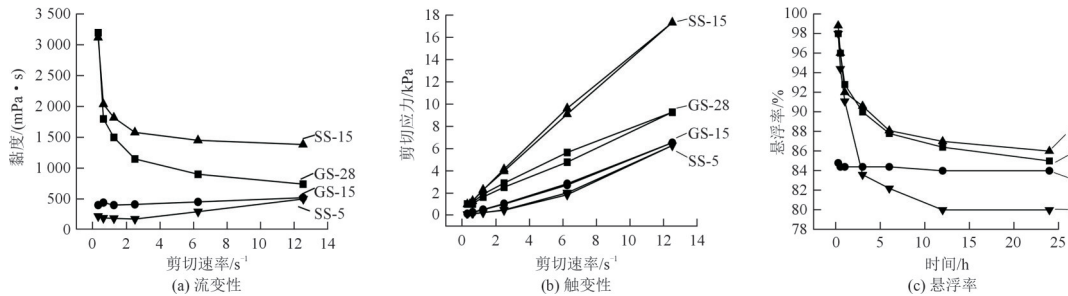


图2 陶瓷浆料的性能
Fig.2 Properties of different ceramic slurries

2.2 型壳相分析

为了研究不同硅溶胶粒径对型壳相组成的影响,分别对GM-28、SM-15两种型壳进行热分析,TG-DSC曲线见图3。可以看出,两种型壳的DSC曲线均存在两个放热峰,其中第一个放热峰均伴随着型壳的质量损失。由于型壳试样中残留的蜡料数量存在差异,因此两种型壳的质量损失率及对应的放热峰峰值温度表现出一定差异。两种型壳在1 100 ℃以上的放热峰为硅溶胶中的无定形SiO₂发生析晶反应形成方石英所致。由于硅溶胶的粒径越小、活性越高,高温下亦越易析出方石英,因此,SM-15型壳中的方石英析出峰值温度低于GM-28型壳。更低的方石英析出温度表明相比普通硅溶胶,小粒径硅溶胶具有更高的烧结活性,这对

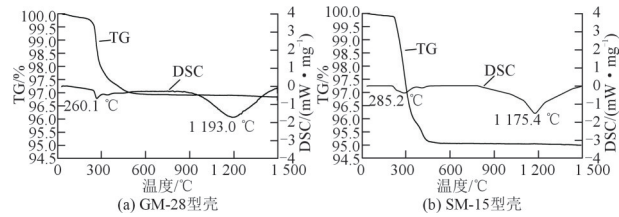


图3 陶瓷型壳的热分析曲线
Fig.3 TG-DSC curves of different ceramic shells

型壳的显微组织与性能都有较大影响。
GM-28、SM-15两种型壳不同焙烧温度下的XRD图谱见图4。可以看出,在不同焙烧温度下,型壳中可见的衍射峰均为ZrSiO₄(19.9°、26.9°、35.4°和53.2°),ZrSiO₄可在1 500 ℃下保持稳定^[17]。硅溶胶中的SiO₂粒子经高温焙烧会析出方石英相,然而由于其相对含量较低,因此在图谱中未观察到。

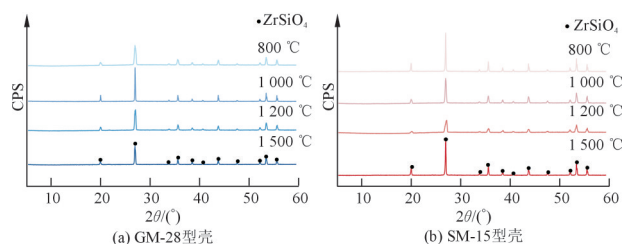


图4 陶瓷型壳的XRD图谱

Fig.4 XRD patterns of different ceramic shells

2.3 型壳显微组织分析

4种型壳坯体的显微组织见图5。可以看出,4种型壳的显微组织分布都比较平整均匀,呈现出浆料层与淋砂材料紧密镶嵌的典型结构。相比GM-28、GM-15型壳,SM-15、SM-5型壳浆料层厚度略薄,这主要是由于小粒径硅溶胶的黏度比普通硅溶胶更高,导致小粒径硅溶胶浆料的粉液比略低于普通硅溶胶浆料。对于同类型硅溶胶型壳,硅溶胶浓度降低,浆料层厚度会有所降低,结构上表现为孔隙率有所增加。结合型壳坯体孔隙率数据可知,GM-28型壳坯体最为致

密,SM-15型壳次之,SM-5型壳再次,GM-15型壳孔隙率最高。

GM-28与SM-15型壳经不同温度焙烧后的显微组织见图6。可以看出,经800 °C焙烧后,由于乳胶等聚合物的烧失,加之型壳在此温度下难以实现充分焙烧,型壳中的孔隙明显增加,见图6a和图6e;当焙烧温度为1 000 °C,颗粒间桥连紧密,型壳中形成了稳定的网状结构,见图6b和图6f;随着焙烧温度增至1 200 °C,硅溶胶中的无定形SiO₂已明显析出大量方石英,型壳的烧结程度明显增加,型壳中的浆料层出现大幅烧结收缩,见图6c和图6g;当焙烧温度达到1 500 °C,型壳的烧结程度达到最大,组织结构变得致密,型壳中孔隙大幅降低,见图6d和图6h。对比GM-28与SM-15型壳焙烧后的显微组织,可见由于小粒径硅溶胶更高的烧结活性,在相同焙烧温度下,相比GM-28型壳,SM-15型壳的烧结程度更高,组织更为致密。结合型壳收缩率与型壳孔隙率数据可知,SM-15型壳经不同温度焙烧后的收缩率均高于GM-28型壳,同时,SM-15型壳经不同温度焙烧后的孔隙率亦低于GM-28型壳。

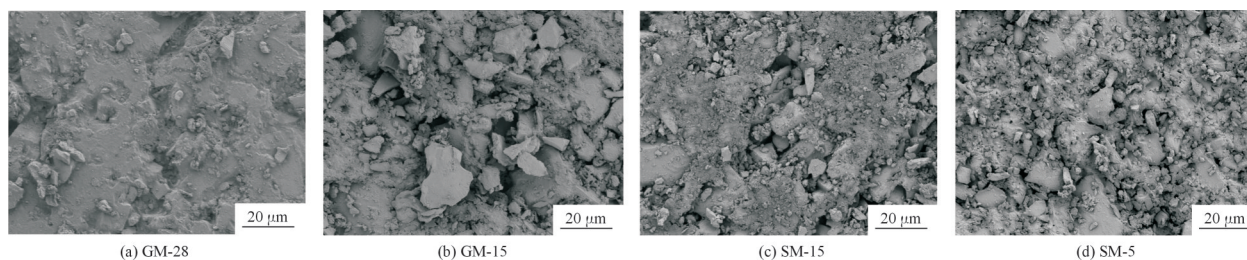


图5 陶瓷型壳坯体的SEM图像

Fig. 5 SEM images of green bodies of ceramic shells

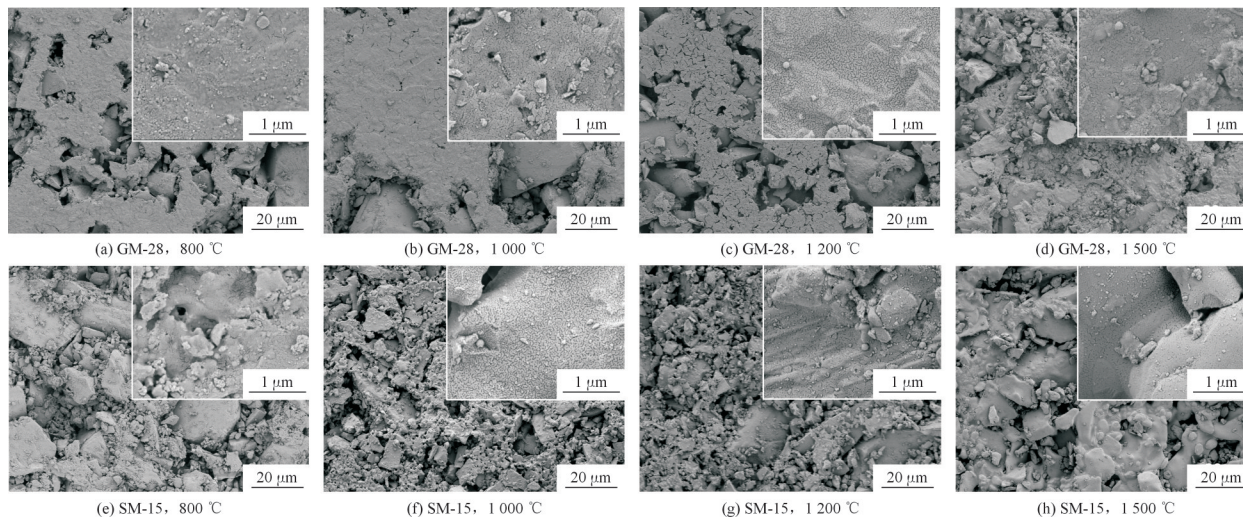


图6 陶瓷型壳经不同温度焙烧后的SEM图像

Fig.6 SEM images of ceramic shells sintered at different temperatures

2.4 型壳弯曲强度分析

型壳的弯曲强度见图7。可以看出,4种型壳的坯体强度均达到5 MPa以上,皆具有良好的坯体强度。

经800 °C焙烧后,由于聚合物的烧失及颗粒间烧结不充分,型壳的强度略有下降;随着焙烧温度达到1 000 °C,型壳的强度开始提升并超越坯体强度;当焙烧温度达

到 1 500 °C, SM-15、GM-28 型壳的强度大幅增长至 26.3 MPa 和 18.8 MPa。

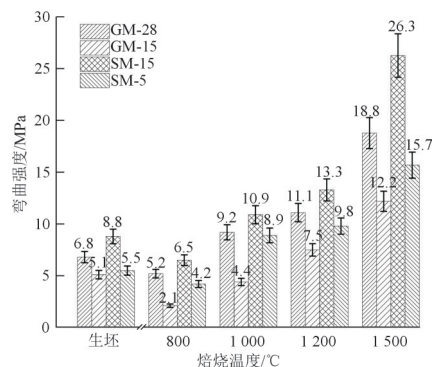


图 7 陶瓷型壳的弯曲强度

Fig.7 Flexural strength of different ceramic shells

对比发现,无论是坯体还是焙烧后试样,型壳强度均表现为一致的趋势,从高至低依次为:SM-15、GM-28、SM-5、GM-15。可见,小粒径硅溶胶对型壳强度的影响远超普通硅溶胶。SM-15 型壳的坯体强度达到 8.8 MPa,比 GM-28 型壳的 6.8 MPa 高出近 30%;经 1 000 °C 焙烧后,SM-15 型壳的强度升至 10.9 MPa,比 GM-28 型壳的 9.2 MPa 高出 18%。相同硅溶胶浓度下,小粒径硅溶胶型壳的强度优势更为明显,SM-15 型壳的坯体强度(8.8 MPa)比 GM-15 型壳(5.1 MPa)高出 73%;经 1 000 °C 焙烧后,SM-15 型壳的强度(10.9 MPa)比 GM-15 型壳(4.4 MPa)高出 148%。由此可见,小粒径硅溶胶型壳可在更低的硅溶胶浓度下获得更高的型壳强度。当合金熔体的活性较高,需降低型壳中活性较高的 SiO₂ 含量时,小粒径硅溶胶型壳有望提供一种新的解决方案。

2.5 型壳热膨胀分析

型壳室温至 1 500 °C 的热膨胀率见图 8。可以看出,当温度低于 900 °C 时,4 种型壳的热膨胀率数值相近且走势大致相同,均随温度的升高呈增加趋势。但随着温度的持续升高,4 种型壳的热膨胀率走势完全不同。当温度达到 958 °C 时,SM-5 型壳的热膨胀率达到峰值,随着温度持续升高,型壳热膨胀率迅速降低而

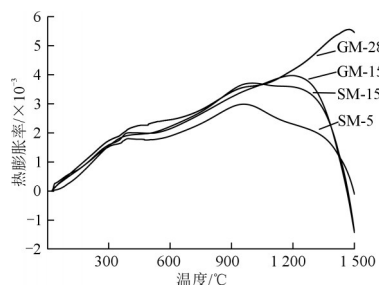


图 8 陶瓷型壳的热膨胀率

Fig.8 Thermal expansion rate of ceramic shells

SM-15、GM-15 型壳的热膨胀率峰值分别为 1 000 °C 和 1 193 °C、GM-28 型壳的热膨胀率峰值温度最高,达到 1 471 °C。

型壳的热膨胀率主要与以下因素有关:①型壳材料本身的烧结活性。②型壳骨架的强度。型壳材料的烧结活性越高、型壳骨架强度越低,型壳越易发生收缩,热膨胀率越低。硅溶胶的粒径减小,无疑增加了型壳的烧结活性,且小粒径硅溶胶中一般稳定剂 Na₂O 的含量较普通硅溶胶更高。Na₂O 含量的增加有助于型壳在高温下形成更多液态玻璃相,从而加速型壳的烧结收缩,降低型壳的热膨胀率。因此,SM-15、SM-5 两种型壳的热膨胀率达到峰值后快速降低,1 500 °C 时分别降至 -1.44×10^{-3} 、 -1.13×10^{-4} 。GM-15 型壳的热膨胀率下降较快主要是由于其型壳骨架强度较低,对烧结收缩的阻碍较小,其 1 500 °C 时的热膨胀率降至 -1.42×10^{-3} 。热膨胀率降为负值表明型壳的尺寸表现为收缩。GM-28 型壳的烧结活性最低,且型壳骨架强度较高,所以热膨胀率最高,1 500 °C 热膨胀率达到 5.45×10^{-3} 。

2.6 型壳收缩率和孔隙率分析

型壳经不同温度焙烧后的烧结收缩率见图 9。可以看出,随着焙烧温度升高,4 种型壳的烧结收缩率均呈增加的趋势,当焙烧温度从 800 °C 升至 1 500 °C,型壳的烧结收缩率从 1.09%~1.41% 升高至 2.36%~2.83%。在不同焙烧温度下,SM-15 型壳的烧结收缩率大于 GM-28 与 GM-15 型壳,这表明更小的硅溶胶粒径赋予型壳更大的烧结活性,使型壳产生更大的烧结收缩,更大的烧结收缩使型壳易于形成更为致密的组织结构,进而具有更高的强度。

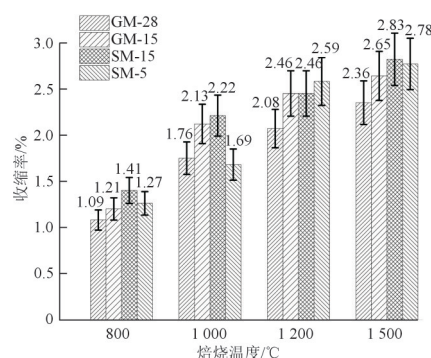


图 9 陶瓷型壳经不同温度焙烧后的烧结收缩率

Fig.9 Sintering shrinkage rates of ceramic shells after roasting at different temperatures

型壳经不同温度焙烧后的孔隙率见图 10。可以看出,4 种型壳坯体的孔隙率较为接近,随着焙烧温度升高,型壳的孔隙率整体呈先增加后降低的趋势。型壳

孔隙率的增加是由于型壳中乳胶等聚合物的逐渐烧失造成的。当型壳中的乳胶完全烧除后,随着焙烧温度升高,型壳烧结得更加充分,孔隙率逐渐降低。在1 000~1 500 ℃范围内,4种型壳的孔隙率整体呈下降趋势,但GM-28、GM-15型壳下降趋势较为平缓,SM-15、SM-5型壳下降趋势更为明显,此温度范围内型壳的孔隙率从低到高依次为SM-15、SM-5、GM-28、GM-15。当温度达到1 500 ℃,4类型壳的孔隙率已呈现较大差距,SM-15型壳的孔隙率最低,仅为20.7%,而GM-15型壳的孔隙率最高,达到29.3%。可见,硅溶胶粒径越小,型壳的烧结收缩越大,型壳孔隙率越低。对于相同粒径的硅溶胶,硅溶胶浓度越高的型壳,型壳孔隙率越低。

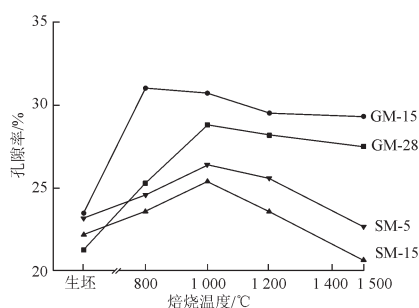


图10 陶瓷型壳经不同温度焙烧后的孔隙率

Fig.10 Porosities of ceramic shells after roasting at different temperatures

3 结 论

(1)小粒径硅溶胶浆料具有良好的流变性、触变性与悬浮率,完全满足熔模铸造对陶瓷型壳浆料的性能要求。

(2)相比普通硅溶胶,小粒径硅溶胶的化学活性更高,具有更低的方石英析出温度,且更易与耐火材料实现烧结,同时型壳具有更低的热膨胀率、更高的烧结收缩率和更低的孔隙率。

(3)小粒径硅溶胶对型壳强度的影响远超普通硅溶胶。SM-15型壳的坯体强度比GM-28型壳高出近30%;经1 000 ℃焙烧后,SM-15型壳的强度比GM-28型壳高出18%。相同硅溶胶浓度下,小粒径硅溶胶型壳的强度优势更为明显,SM-15型壳的坯体强度比GM-15型壳高出73%;经1 000 ℃焙烧后,SM-15型壳的强度比GM-15型壳高出148%。

参 考 文 献

[1] WEI Q, ZHONG J W, XU Z L, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of ceramic shell moulds for investment casting of turbine blades by selective laser sintering [J]. Ceramics International, 2018, 44(11): 12 088-12 097.

[2] 王立新,包学春,王胜良. 复杂型腔产品精密铸造工艺设计及改进实例[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(5): 701-703.

[3] 孙宝德,王俊,康茂东,等. 高温合金超限构件精密铸造技术及发展趋势[J]. 金属学报, 2022, 58(4): 412-427.

[4] 纪艳卿,李飞. 某发动机泵体铸件自动化制壳工艺设计与涂挂性能验证[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(2): 253-257.

[5] 龙宪翼,刘亮,余欢,等. DZ22B高温合金与Al₂O₃陶瓷型壳的界面反应[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(5): 525-528.

[6] 陈晓燕,肖旅,余建波,等. 熔模铸造高温合金与陶瓷材料界面反应研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(8): 844-848.

[7] 马月婷,尹绍奎,于瑞龙,等. 硅酸锆含量对增材制造硅基陶瓷型壳性能的影响[J]. 铸造, 2022, 71(6): 735-740.

[8] 樊振中. 熔模精密铸造在航空航天领域的应用现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2019, 62(9): 38-52.

[9] WANG F, LI F, HE B, et al. Gel-casting of fused silica based core packing for investment casting using silica sol as a binder[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2013, 33(13-14): 2 745-2 749.

[10] DENG L J, QIAO L, ZHENG J W, et al. Injection molding, debinding and sintering of ZrO₂ ceramic modified by silane coupling agent [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(4): 1 566-1 573.

[11] LI Q, SONG J X, WANG D G, et al. Effect of Cr, Hf and temperature on interface reaction between nickel melt and silicon oxide core[J]. Rare Metals, 2011, 30: 405-409.

[12] WANG L L, LI J R, TANG D Z, et al. Effect of directional solidification condition on interfacial reaction between DD6 single crystal superalloy and zirconia-silica ceramic core [J]. Advanced Materials Research, 2014, 926-930: 72-76.

[13] 宁英,于兴福,王铁军,等. 硅溶胶中二氧化硅含量对单晶型壳性能的影响[J]. 铸造, 2011, 60(9): 895-898.

[14] 姚建省,刘晓光,唐定中,等. 矿化剂加入量及硅溶胶浓度对陶瓷型壳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2009, 38(S2): 1 222-1 225.

[15] 张飞宇,丁琪,武振强,等. 精密铸造用硅溶胶黏结剂研究现状[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(1): 6-14.

[16] 赵玉奇. 硅溶胶的研究现状与应用[C]//2018年全国无机硅化物行业年会暨长江经济带发展研讨会论文集. 山东青岛, 2018.

[17] 王迪,李九霄,董安平,等. 熔模铸造型壳用材料研究进展[J]. 精密成形工程, 2023, 15(4): 205-216.

(编辑:张正贺)

欢迎登陆期刊官网

投稿、查稿、审稿

欢迎登陆《特种铸造及有色合金》杂志官方网站投稿、阅读、审稿,期刊论文彩色版本均可在网站免费在线阅读或下载pdf文件,并可体验AI导读功能,网址:www.special-cast.com,欢迎访问!