● 今日铸造 Today Foundry ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.2285
特邀论文

精密铸造陶瓷型壳用硅溶胶研究进展

李 倩[1],刘智鹏[2],赵 巍[3],李 勇[1],张 强[1],沈 滨[1],周悍坤[1],吕永乐[4],董龙沛[1]
(1. 北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095; 2. 大连理工大学 莱斯特国际学院, 辽宁 大连 124000;3. 空军驻北京地区第六军事代表室,北京 100013; 4.北京科技大学 材料科学与工程学院,北京 100083)

摘 要:硅溶胶是纳米二氧化硅颗粒在水或有机溶剂中的分散溶液,具有高黏度、高热稳定性以及环境友好等优点。精密铸造用陶瓷型壳由耐火材料、黏结剂(硅溶胶)等材料组成。本文综述了各种硅溶胶的制备方法,包括透析法、硅溶解法、离子交换法和溶胶-凝胶法。通过调节硅溶胶的浓度、颗粒尺寸、pH 值、温度、离子浓度等,控制凝胶化行为、干燥时间和制备的外壳强度。同时,对影响凝胶化的各种因素进行了评述,并对硅溶胶的未来发展趋势进行了讨论。

关键词:硅溶胶;精密铸造;凝胶;陶瓷型壳
中图分类号: TG249.5 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2022)11-0989-07

Research Progress on Colloidal Silica for Ceramic Shells in Investment Casting

LI Qian[1], LIU Zhipeng[2], ZHAO Wei[3], LI Yong[1], ZHANG Qiang[1], SHEN Bin[1], ZHOU Hankun[1], LYU Yongle[4], DONG Longpei[1]
(1. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Leicester International Institute, Dalian University of Technology, Dalian 124000, China; 3. The Sixth Military Representative Office of Airforce in Beijing, Beijing 100013, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Colloidal silica is defined as a dispersed suspension of silica nanoparticles with the advantages of high viscosity, high thermal stability and environmental friendliness. The ceramic shell in investment casting is mainly composed of refractory material and binder (colloidal silica). In this review, various methods for preparing colloidal silica (including electrodialysis, silicon dissolving, ion exchange and sol-gel process) have been displayed and discussed. The gelation behavior of colloidal silica (including gelation/drying time and shell strength) is controlled by regulating the colloidal silica concentration, colloidal size, pH value, temperature, and ion concentration. Meanwhile, other influencing factors for gelation have been reviewed, and future trends of colloidal silica in ceramic shells have been discussed.

Key words: colloidal silica; investment casting; gel; ceramic shell

精密铸造型壳是由耐火材料、黏结剂和其他添加物组成,可用于陶瓷型壳的黏结剂主要有硅酸乙酯、水玻璃、硅溶胶[1]。在 20 世纪 50 年代前后,精密铸造主要是使用硅酸乙酯与水玻璃作为黏结剂,直到 20 世纪 60 年代才开始将硅溶胶引入精密铸造中。硅酸乙酯和水玻璃的蒸汽对眼睛、皮肤、黏膜和呼吸道有刺激性,接触以后会产生头痛、恶心、呕吐和呼吸困难等症状。硅溶胶中含有大量的水和羟基,是一种水基型的黏结剂,在使用时对环境的危害远小于硅酸乙酯和水玻璃。随着环保政策越来越严,硅溶胶在精密铸造型壳中的应用也越来越广泛。

1 硅溶胶的制备方法

硅溶胶根据 pH 值可以分为碱性硅溶胶和酸性硅溶胶, 碱性硅溶胶主要应用于精密铸造与涂料工业。硅溶胶的制备方法有渗析法、硅溶解法、离子交换法、酸化法和胶溶法[2]。

1.1 渗析法

在电解电渗析槽中用阳离子交换膜[3]将其分割成阴极区和阳极区,阳极 OH^- 发生氧化反应析出氧气,阴极水分子发生还原反应析出氢气。随着反应的进行,金属阳离子逐渐向阴极室聚集,阳极生成一定浓度的硅酸, 当产生的硅酸浓度大于其在水中的溶解度时,会发生缩聚反应形成硅溶胶。这种方法只能

收稿日期: 2022-09-20
基金项目: 国家自然科学基金(52001297, 91860202)
作者简介: 李 倩(1967—),工程师.主要从事陶瓷型芯及先进结构陶瓷技术研究方面的工作. Email: qili01@163.com
通讯作者: 董龙沛(1993—),硕士,工程师.主要从事陶瓷型壳及单晶高温合金叶片制备技术研究方面的工作. Email: donglongpeihit@163.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

生产少量的硅溶胶且生产周期长，不可用于工业生产。其反应方程式[3]为：

阳极反应：$2OH^- \rightarrow H_2O+1/2O_2\uparrow+2e^-$ (1)

阴极反应：$2H_2O+2e^- \rightarrow 2OH^-+H_2\uparrow$ (2)

总反应：$H_2O \rightarrow H_2\uparrow+1/2O_2\uparrow$ (3)

1.2 硅溶解法

单质硅粉在碱做催化剂的条件下，可以与水反应生成水和硅酸单体，水和硅酸在水中逐渐聚合形成硅溶胶，反应方程式[4]为：

$$Si+2OH^-+H_2O \rightarrow SiO_3^{2-}+2H_2\uparrow \quad (4)$$

$$SiO_3^{2-}+H_2O \rightarrow SiO_2+2OH^- \quad (5)$$

$$mSi+(2m+n)H_2O \rightarrow mSiO_2 \cdot nH_2O+2mH_2\uparrow \quad (6)$$

单质硅溶解法制备硅溶胶的过程如图 1 所示。将水玻璃、氨水和去离子水取一定量放在三口瓶中进行搅拌与加热。加热到一定程度分批加入单质硅，硅粉加入前需要去除硅粉表面的惰性膜。控制温度使其反应，反应一段时间后冷却，最后将未反应完的硅粉过滤回收，再利用，并得到粒径为8~15 nm 的硅溶胶。这种方法制备的水凝胶杂质含量少，二氧化硅胶粒的形状、大小、黏度、pH、纯度都容易控制。胶粒外形均匀、结构紧密，硅溶胶的稳定性比较好。在型壳制备时，硅溶胶粒子越小，其湿强度越高，可通过控制氨的用量来控制硅溶胶粒子的大小。

图 1 单质硅溶解法制作硅溶胶流程[4]

Fig.1 Flow chart of colloidal silica preparation by solubilization of elemental silicon[4]

1.3 离子交换法

离子交换法[5]制备硅溶胶需要经过离子交换反应、制备晶核、晶核长大、浓缩、纯化等过程。离子交换法制备硅溶胶的流程如图 2 所示。

(1)离子交换反应　以水玻璃为原料，利用阳离子交换树脂去除水玻璃中的钠离子制备活性的聚硅酸溶液，若制备体系中含有杂质阴离子，可以通过阴离子交换树脂去除溶液中的阴离子，使其体系达到较为稳定的状态。若在制备过程中，阴离子交换树脂与阳离子交换树脂失去离子交换能力，需要加入 NaOH 溶液使阴离子交换树脂进行再生，阳离子交换树脂则需要加入 HCl 进行再生。制备出的活性硅酸 pH 值为 2~4，此时的活性硅酸不稳定，需要加入少量的稳定剂，使得硅溶胶 pH 值达到 8.5~10.5。

(2)制备晶核　将加入少量稳定剂的活性聚硅酸溶液进行结晶。

(3)晶核长大　将聚硅酸溶液按照一定速度加入到含有胶粒的溶液中，加入的快慢可以影响粒径的大小、分布均匀性和胶粒的长大。过快或过慢都不利于得到粒径大小适宜、分布均匀且胶粒正常长大的硅溶胶。

(4)浓缩　以上得到聚硅酸溶液中二氧化硅的量比较少，可利用减压(或常压)恒液位蒸发浓缩法[6-7]或超滤浓缩法[8]得到一定浓度的硅溶胶。

(5)纯化　将上述得到的硅溶胶进行离心分离去除内部的杂质，制得较纯的硅溶胶产品。

1.4 酸化法

酸化法制备硅溶胶的流程如图 3 所示。先将硅酸钙和去离子水加入到反应釜中，并不断搅拌，当反应釜中达到一定温度时，加入工业硫酸并保持搅拌状态，反应完全后进行减压过滤得到低浓度的硅溶胶水溶液，经阳、阴离子交换柱进行净化且控制 pH 值达到所需的要求，反应完全后，加入稳定剂，蒸发提纯得到所需的产品[9]。酸、碱硅溶胶都可以通过这种方法制备，但制备的硅溶胶稳定性差、杂

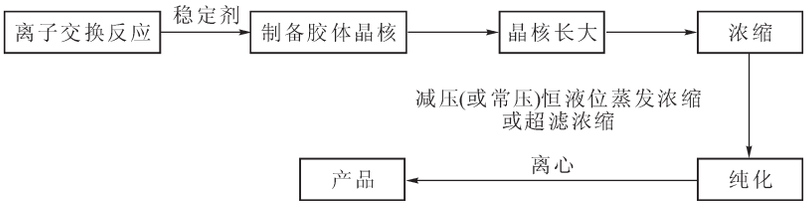


图 2 离子交换法制备硅溶胶流程[5]

Fig.2 Preparation process of colloidal silica by the ion exchange method[5]

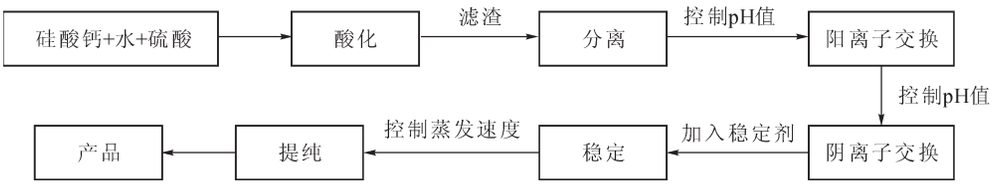


图 3 酸化法制备硅溶胶的流程[9]

Fig.3 Flow chart of colloidal silica preparation by acidification[9]

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

质多。

1.5　胶溶法

胶溶法制备水凝胶与渗析法、溶解法、离子交换法、酸化法都不相同。它是先用酸中和水玻璃溶液形成凝胶，然后把水玻璃制备成凝胶过滤，用水洗后加入稀碱溶液，在加热加压的条件下凝胶分解得到硅溶胶，这种方法得到的硅溶胶胶粒直径分布分散、浓度较低。

以上是制备硅溶胶的 5 种方法，各种方法的优缺点如表 1 所示。

表 1　不同硅溶胶制备方法的优缺点

Tab.1 Advantages and disadvantages of different silica preparation methods

制备方法	优点	缺点
渗析法	制备流程简单	制备周期长、耗能大
硅溶解法	纯度高、稳定性好	制备流程复杂
离子交换法	可根据不同的工艺合成不同性能的硅溶胶	制备流程复杂、纯度低
酸溶法	可制备酸性和碱性的硅溶胶	杂质多、不稳定
胶溶法	制备流程简单	纯度低

2　硅溶胶的凝胶化及其影响因素

硅溶胶是二氧化硅颗粒在水中的一种悬浮液。随着硅溶胶中水分的丢失或颗粒之间静电斥力的减弱，二氧化硅颗粒逐渐聚集沉淀形成凝胶。陶瓷型壳浆料是由耐火材料、硅溶胶等材料组成。浆料在涂挂之前，硅溶胶应尽可能保持溶胶状态，从而使浆料能够均匀涂挂在蜡模上。在浆料干燥时，硅溶胶应由溶胶状态转变成凝胶状态，将耐火材料与蜡模粘附在一起。

2.1　陶瓷型壳硅溶胶的凝胶化

陶瓷型壳浆料由耐火材料、硅溶胶等材料组成。陶瓷型壳浆料的胶凝状态取决于硅溶胶的胶凝状态。

陶瓷型壳硅溶胶凝胶化大致可以分为 4 个阶段[10]：溶胶–凝胶转变、体积收缩干燥、骨架老化和表干干燥阶段，这 4 个阶段没有明显的界限，可以渐变或交叠。

溶胶–凝胶转变阶段主要是内部的水在湿度差的推动下向表面扩散并析出，此时的二氧化硅微粒以氢键结合构成骨架，形成毛细管结构，硅溶胶随着水分的流失，逐渐失去流动性而转变成湿凝胶。体积收缩干燥阶段主要是将吸附在二氧化硅颗粒上的水和极化水层、残留在二氧化硅胶体网络结构微孔中的水和凝胶间隙中的水蒸发。当水分蒸发到一定程度时，骨架强度会逐渐增长，主要依靠羟基架桥作用与少量硅氧键作用。此时溶胶与凝胶还可互相转化，只有羟基之间进行脱水形成硅氧键，才不会发生凝胶–溶胶的转变。随着水分蒸发的进行，蒸发推动力、干燥速率逐渐减小。表干干燥阶段主要脱去羟基水和凝胶中的自由水与吸附水[10]。

2.2　硅溶胶凝胶化的影响因素

硅溶胶的胶凝实质上是溶胶中的二氧化硅粒子相互聚集凝结的结果。随着硅溶胶中水分的丢失或颗粒之间静电斥力的减弱，二氧化硅颗粒逐渐聚集形成凝胶。由于二氧化硅颗粒表面带有负电荷，颗粒表面互相排斥，可以使硅溶胶在一段时间内保持稳定。在精密铸造陶瓷型壳浆料时，浆料的涂挂型与胶凝状态取决于硅溶胶的黏附性与胶凝状态。研究硅溶胶的凝胶化能够为陶瓷型壳浆料的胶凝提供理论基础。影响硅溶胶发生胶凝的主要因素有二氧化硅含量、颗粒尺寸、pH 值、温度、离子浓度及改性[11-15]。

硅溶胶中二氧化硅颗粒越多，颗粒之间的碰撞机率也就越大，颗粒之间通过形成硅氧键相互连接在一起，形成凝胶。二氧化硅粒子直径越大，其表面积越小，二氧化硅表面所带的负电荷越少，粒子之间的静电斥力也越小，二氧化硅颗粒越容易聚集，发生凝胶化。

硅溶胶中的胶体粒子在不同 pH 值的条件下表面电荷会有所不同[16]。二氧化硅纳米颗粒在碱性环境下 OH^- 与纳米颗粒的表面反应，使得纳米颗粒的表面产生负电荷，微粒之间相互排斥[17]，如图 4(a)所示[18]。当 pH 值逐渐下降时，粒子的电荷也随着降低，微粒之间相互作用形成硅氧键，微粒逐渐聚集，如图 4(b)所示。pH 值下降到 5 以下时 OH^- 离子消失，二氧化硅微粒表面不带电，微粒之间硅氧键的形成速度也逐渐降低，形成凝胶的时间也逐渐增加，如图 4(c)所示。

随着温度的升高，硅溶胶中水分逐渐丢失，二氧化硅颗粒碰撞几率增加，颗粒之间通过形成硅氧键逐渐沉淀。硅溶胶逐渐从溶胶状态转变成凝胶状态。

硅溶胶中二氧化硅胶体颗粒的凝胶化是一个物理化学过程，它的总相互作用可以近似看成范德华力和静电斥力的总和，形成 Derjaguin Landau Verwey Overbeek (DLVO)电势[19]。在硅溶胶中添加盐溶液，可以降低胶体颗粒之间的静电斥力，并降低抗聚集能垒。然后，胶体颗粒会逐渐絮凝在一起形成凝胶[20]。硅溶胶的表面带有负电，将盐溶液加入到硅溶胶，电解质会产生正、负离子，正离子与硅溶胶表面

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

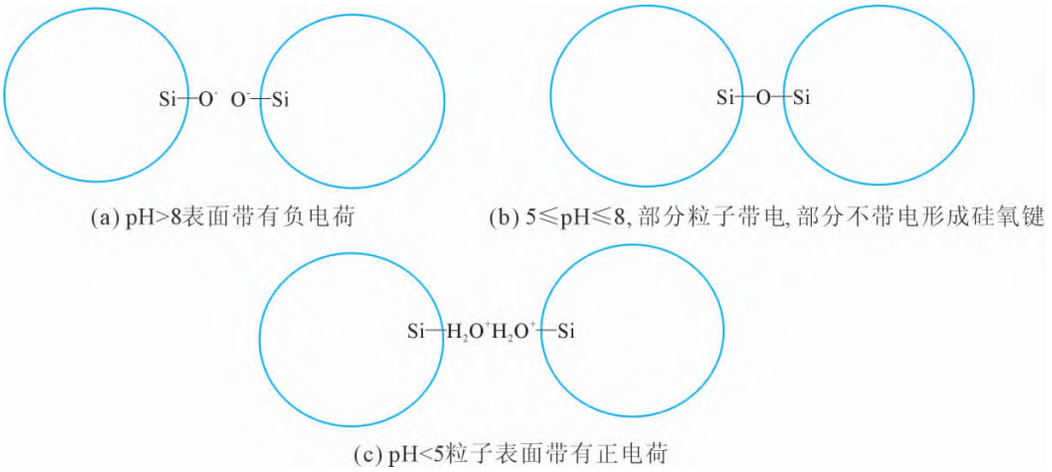


图 4 二氧化硅颗粒在不同 pH 值条件下表面的电荷特点[18]
Fig.4 Surface charge characteristics of the silica particles at different pH values[18]

的负电荷结合，降低了胶体粒子之间的静电排斥，硅溶胶稳定性下降，使得胶体粒子聚集，凝胶化时间缩短[21]。硅溶胶中加入不同的盐溶液，凝胶化的时间会有所不同，且同一种盐溶液不同的浓度也会对凝胶化时间有影响，如图 5 所示。

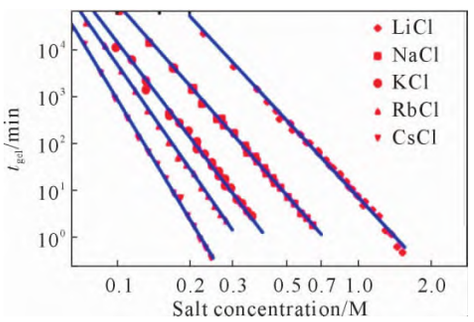


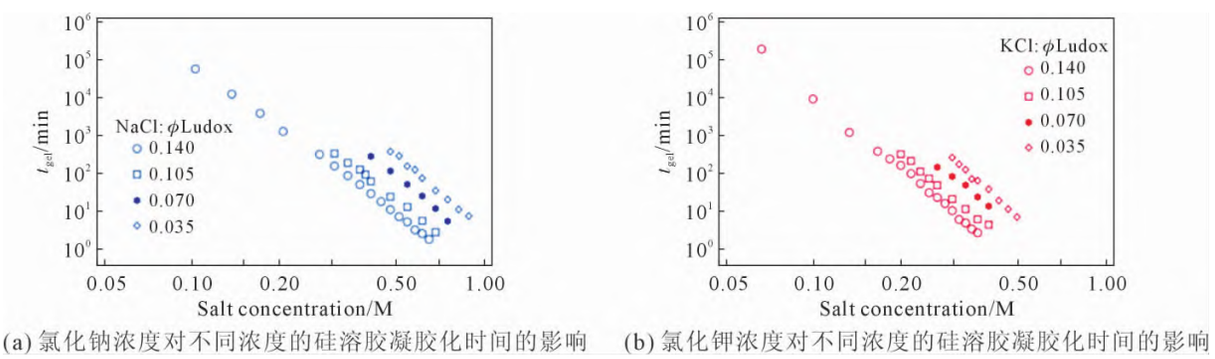
图 5 硅溶胶凝胶化时间与盐浓度的关系[19]
Fig.5 Relationship between the gelation time of colloidal silica and salt concentration[19]

图 6 是氯化钠、氯化钾浓度对不同浓度的硅溶胶凝胶化的影响[19]。在硅溶胶浓度相同的情况下，随着盐浓度的增加，硅溶胶的凝胶时间逐渐降低；在相同盐浓度的情况下，随着硅溶胶浓度的增加，凝胶化时间逐渐降低。

在精密铸造中，控制硅溶胶凝胶化对浆料的胶凝状态和涂挂型有较大影响。未改性的硅溶胶可以通过改变二氧化硅的含量、颗粒尺寸、pH 值、温度来控制硅溶胶的凝胶化过程。硅溶胶的改性是通过改变二氧化硅颗粒表面电荷来影响二氧化硅颗粒的聚集，从而控制硅溶胶凝胶化的发生。经 3-氨丙基三甲氧基硅烷改性的硅溶胶表面带有大量的氨基[22]，在酸性条件下，该硅溶胶带有正电荷；中性条件下，氨基不带电荷；碱性条件下，氨基可以去质子化并带有负电荷。每个 3-氨丙基三甲氧基硅烷中的 3 个甲氧基可以与多个 3-氨丙基三甲氧基硅烷分子连接成复杂的网络结构，这些复杂的网络结构可以将二氧化硅颗粒连接起来，发生不可逆转的凝聚。

3 陶瓷型壳用硅溶胶的研究进展

硅溶胶将耐火材料黏结在一起，用于制备陶瓷型壳的浆料[1]。浆料的涂挂性、稳定性主要取决于硅溶胶的黏附性和稳定性。硅溶胶的凝胶化会降低浆



(a) 氯化钠浓度对不同浓度的硅溶胶凝胶化时间的影响 (b) 氯化钾浓度对不同浓度的硅溶胶凝胶化时间的影响

图 6 氯化钠、氯化钾浓度对不同浓度的硅溶胶凝胶化的影响[19]
Fig.6 Effects of the concentration of sodium chloride and potassium chloride on the gelation of colloidal silica with different concentrations[19]

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

料的使用寿命，在浆料涂挂前应控制硅溶胶不发生凝胶化，保持良好的流动性，使得浆料能够均匀的涂挂在蜡模上。浆料涂挂后进行干燥，在干燥时硅溶胶逐渐凝胶化，形成由硅氧键连接的骨架。凝胶形成的骨架增加了陶瓷型壳的湿强度，防止陶瓷型壳在脱蜡时开裂。

3.1　硅溶胶的物理性质对陶瓷型壳浆料的影响

硅溶胶黏结剂在使用时，应确定黏结剂中二氧化硅的含量和粒径。在选用时，可以根据其颜色、分层情况、沉积物、杂质、气味等容易观察的特征来评估硅溶胶[16,23-24]。硅溶胶的固相含量是表征黏结剂的一个重要参数，对其性能有很大影响[16,25]。

硅溶胶的浓度越大，所含的二氧化硅颗粒越多。在制备型壳时，由于二氧化硅表面具有较高的活性，能够在较低的温度下形成莫来石相，提高型壳的强度。制备型壳时，硅溶胶浓度越高，型壳的湿强度越高[26]。这是因为在干燥过程中，二氧化硅颗粒凝胶形成了一个硅氧烷键的网络[27-28]。随着二氧化硅含量的增加，黏度明显增加；而随着剪切速率的增加，硅溶胶所配置的浆料黏度出现明显的剪切变稀现象。

硅溶胶的黏度随二氧化硅浓度的增加而增加，在粉液比相同的情况下，浆料的黏度也会随硅溶胶黏度的增加而增加[29]，但制备的型壳透气性会下降，无法承受金属液的冲击而产生裂纹，降低型壳寿命。因此，在制备型壳时应选用合适的硅溶胶浓度和粉液比，使制备的型壳具有良好的湿强度和透气性，以满足制备工艺的要求。

二氧化硅颗粒较小，比表面积较大，表面带负电荷的质点越多，越有利于胶体的分散和稳定悬浮。在使用硅溶解法制备硅溶胶时，氨的质量分数会对硅溶胶的粒径产生较大的影响。在熔模铸造中使用硅溶胶时，粒径大小会对它的黏度、涂挂性和悬浮性等产生影响[28]。肖克[30]选用了4种二氧化硅颗粒直径不同的硅溶胶进行试验，结果表明，粒径较小的二氧化硅粒子配制的浆料具有较好的悬浮性与涂挂性。

3.2　硅溶胶改性及其对陶瓷型壳影响的研究

由于蜡模的热膨胀系数大于型壳的热膨胀系数，所以在精密铸造用陶瓷型壳的脱蜡过程中会产生裂纹，裂纹对型壳的寿命、铸件的质量会产生较大影响[31-34]。有学者研究发现通过对硅溶胶进行改性可以提高陶瓷型壳的湿强度，从而降低裂纹出现的机率。

改性硅溶胶是在硅溶胶的基础上进行增强，主要分为2个方面，即表面改性和添加高聚物[35-36]。表面改性是将金属离子添加到胶体固定层，使胶体表面结构发生变化，这种改性可以增强硅溶胶的湿强度，加快硅溶胶的凝胶化，降低干燥时间，同时也降低了硅溶胶的稳定性。在硅溶胶中加入高聚物可以增强它的湿强度，在陶瓷型壳制备时，可在上一层壳层未完全干燥时进行下一层壳层的添加，且不会出现回溶现象。

金属离子改性硅溶胶与锆英粉混合形成的浆料具有较好的稳定性，在陶瓷型壳制备中能够减少因干燥速度过快或铸件结构复杂引起的壳裂。金属离子表面改性要比添加高聚物改性的成本高，并且在制备陶瓷型壳时，浆料的涂挂性和渗透性较差且制备的壳层较厚。利用镁离子对硅溶胶改性，随着镁离子浓度的增加，二氧化硅的粒径逐渐减小，当镁离子浓度超过15%，二氧化硅的粒径有较小的增加。在制备陶瓷型壳时，二氧化硅的粒径越小，陶瓷型壳的气孔率越小，抵抗金属液冲击的能力越低[35]。

用聚合物改性硅溶胶制备的陶瓷型壳具有黏附性强、湿强度高、浮沙较少、透气性高的特点。高聚物在高温下会被烧坏，可以在壳层留下大量的小孔，从而提高型壳的透气性[36]。可用于硅溶胶改性的聚合物有聚乙烯醇、甲基纤维等水溶性高聚物和含氨基类聚合物。Dave等[37]用聚乙烯醇对硅溶胶进行改性[37]，随着聚合物含量的增加，陶瓷型壳的气孔率逐渐增加，这主要与聚合物烧坏后留下的小孔有关。李毓飞等[38]在硅溶胶中加入不溶于水的有机纤维研制出了ZF-801型快干硅溶胶，可以快速发生胶凝并提高型壳的湿强度。有机纤维在型壳干燥时可以起到毛细管的作用，加快内部水分的蒸发并且在高温焙烧时纤维会被烧掉，在型壳内部留下小孔增加型壳的透气性。

4　结语

硅溶胶的制备方法有电解电渗析法、离子交换法、硅溶解法、酸化法和胶溶法，这几种方法各有优缺点。离子交换法可以制备不同性能的硅溶胶，但是在制备时初始水玻璃的浓度不能过高，否则制备时间长、能耗大。电解电渗析法制备硅溶胶可以提高硅溶胶的质量，但能耗较大。硅溶解法制备的水凝胶杂质含量少，二氧化硅胶粒的形状、大小、黏度、pH、纯度都容易控制，胶粒外形均匀、结构紧密，硅溶胶的稳定性比较好。

硅溶胶在制备陶瓷型壳时，从低黏性的溶液逐步形成凝胶，再从湿凝胶转化成干凝胶需要很长的

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

时间，可以向硅溶胶中添加金属离子或聚合物对其进行表面改性，提高湿强度、浆料涂挂性、黏附性并降低干燥时间。综上所述，精密铸造陶瓷型壳用硅溶胶具有一定的发展潜力，未来会从以下方面进行技术提升和发展。

(1)根据陶瓷型壳用硅溶胶的胶凝机理特点，未来如何提升硅溶胶的使用寿命以及稳定性至关重要，需要开发出新型硅溶胶体系或在已有体系中进一步改性，以实现溶胶稳定性与胶凝行为可控性之间的平衡。

(2)根据硅溶胶与陶瓷型壳耐火材料结合的浆料特点，未来将进一步研究陶瓷耐火材料对硅溶胶胶凝转变过程的复杂影响因素。

参考文献：

[1] 陈合芝. 熔模铸造硅溶胶型壳的研究进展[J]. 金属加工：热加工，2016, 3(11): 67-69.

[2] 张锡平，阎双景，吕志刚，等. 熔模铸造用硅溶胶粘结剂综述[J]. 特种铸造及有色合金，2002, 1(2): 39-41.

[3] 刘红梅，衣宝廉. 电解电渗析法制备硅溶胶[J]. 化工学报，1996, 47(3): 340-345.

[4] 田立朋，王力，王丽君. 单质硅溶解法制备硅溶胶工艺研究[C]// 中国无机盐工业协会无机硅化物分会 2006 年度年会暨全国无机硅化物行业技术与信息交流大会论文集. 青岛：中国无机盐工业协会，2006. 14-19.

[5] 任之君，陈姚，于欣伟，等. 乙二醇纳米硅溶胶的制备及应用[J]. 电子元件与材料，2010, 29(10): 45-48.

[6] 陈荣三，毛延. 硅溶胶的制备、性质及其应用[J]. 化工进展，1985, 2(2): 12-17.

[7] 吴本梅，沈金浩，袁玉琴，等. 应用离子交换新工艺制备硅溶胶系列产品[J]. 广西化工，1989, 1(4): 9-11.

[8] 吴大天，刘立成，陈泽民. 离子交换法制备硅溶胶的研究[J]. 无机盐工业，1989, 1(3): 28-30.

[9] 纪萍，张进，徐伟平. 以天然硅灰石制备稳定硅溶胶[J]. 辽宁化工，2000, 29(3): 141-142, 145.

[10] 王珍，季晓玲，翟丽莉，等. 硅溶胶熔模铸造型壳的微观结构分析[J]. 有机硅材料，2010，24(3): 180-183.

[11] ZHAO M Z, LIU G, ZHANG C, et al. State-of-the-Art of colloidal silica-based soil liquefaction mitigation: An emerging technique for ground improvement[J]. Applied Sciences, 2019, 10(1):15-46.

[12] WONG C, PEDROTTI M, MOUNTASSIR G E, et al. A study on the mechanical interaction between soil and colloidal silica gel for ground improvement[J]. Engineering Geology, 2018, 243: 84-100.

[13] SÖGAARD C, FUNEHAG J, ABBAS Z. Silica sol as grouting material: A physio-chemical analysis[J]. Nano Convergence, 2018, 5(1): 1-15.

[14] PERSOFF P, MORIDIS G J, APPS J A, et al. Evaluation tests for colloidal silica for use in grouting applications[J]. Geotechnical Testing Journal, 1998, 21(3): 264-269.

[15] RASOULI R, HAYASHI K, ZEN K. Controlled permeation grouting method for mitigation of liquefaction [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(11): 04016052.

[16] WIŚNIEWSKI P. Polymer binders of ceramic nanoparticles for precision casting of nickel-based superalloys [J]. Nanomaterials, 2021, 11(7):1714.

[17] GALLAGHER P M, MITCHELL J K. Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(9-12): 1017-1026.

[18] GALLAGHER P M, PAMUK A, ABDOUN T. Stabilization of liquefiable soils using colloidal silica grout[J]. Journal of Materials in Civil Engineering 2007, 19(1): 33-40.

[19] LINDEN M V D, CONCHÚIR B O, SPIGONE E, et al. Microscopic origin of the hofmeister effect in gelation kinetics of colloidal silica[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2015, 6(15): 2881-2887.

[20] TROMPETTE J L, MEIRELES M. Ion-specific effect on the gelation kinetics of concentrated colloidal silica suspensions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2003, 263(2): 522-527.

[21] 范渊卿. 大粒径、高浓度硅溶胶的合成及其结构性能[D]. 武汉：武汉理工大学，2010.

[22] PHAM K N, FULLSTON D, SAGOE-CRENTSIL K. Surface charge modification of nano-sized silica colloid[J]. Australian Journal of Chemistry, 2007, 60(9)：662-666.

[23] KOSMULSKI M. Surface charge and zeta potential of silica in mixtures of organic solvents and water[J]. Surfactant Science Series, 2000, 1(90): 343-368.

[24] BERGNA H E, Roberts W O. Colloidal silica: Fundamentals and Applications[M]. USA: Boca Raton, 2005.

[25] 乔婉，聂建华，邱文冬，等. 硅溶胶固含量对 Al_2O_3-SiC 浇注料性能的影响[J]. 耐火材料，2014, 48(1): 39-42.

[26] 姚建省，刘晓光，唐定中. 矿化剂加入量及硅溶胶浓度对陶瓷型壳性能的影响[C]// 第十五届全国高技术陶瓷学术年会摘要集. 沈阳：中国硅酸盐学会，2008. 22-25.

[27] MADIAI C. Effects of colloidal silica grouting on geotechnical properties of liquefiable soils: a review[J]. Geotechnics, 2021, 1(2): 460-491.

[28] 王兴业，王同恩. 硅溶胶建筑涂料的研制及应用[J]. 材料工程，1994(4): 21-23

[29] KANYO J E, SCHAFFÖNER S, UWANYUZE R S, et al. An overview of ceramic molds for investment casting of nickel superalloys[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(15): 4955-4973.

[30] 肖克. 硅溶胶 SiO_2 粒径对精铸壳型涂料的影响[J]. 材料工程，2002 (6): 32-33.

[31] 沈昀，郑功，冯辰铭. 熔模精密铸造技术研究进展[J]. 精密成形工程，2019, 11(1): 54-62.

[32] 章浩龙，赵雅琴. 熔模精铸用硅溶胶的粘度性能[J]. 特种铸造及有色合金，2002(4): 52-53.

[33] 康海峰，李飞，赵彦杰，等. 高温合金空心叶片精密铸造用陶瓷型芯与型壳的研究现状[J]. 材料工程，2013(8): 85-91.

[34] 曾洪，张松泉，伍林，等. 熔模精密铸造用陶瓷型壳研究进展[J].

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

东方汽轮机,2019(3): 39-41, 46.

[35] KARAMI A. Study on modification of colloidal silica surface with magnesium ions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2009, 331(2): 379-383.

[36] JONES S, YUAN C, BLACKBURN S. Fundamental study on microstructure and physical properties of fluidised bed and rainfall sanding ceramic shells[J]. Materials science and technology, 2007, 23(6): 706-714.

[37] YUAN C, COMPTON D, CHENG X, et al. The influence of polymer content and sintering temperature on yttria face-coat moulds for TiAl casting[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2012, 32(16): 4041-4049.

[38] 李毓飞,杨先发,吴仁智. 新型节能精密铸造粘接剂——ZF-801型快干硅溶胶[J]. 特种铸造及有色合金,2008, 29(1): 53-54.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net