单晶高温合金熔模铸造陶瓷型壳研究进展

王树森[1]，白炜琛[2]，刘铮玥[2]，储昭贶[2]，张朝威[2]，孟　杰[2]，周亦胄[2]
（1. 海装沈阳局驻鞍山代表室，辽宁鞍山 114001；2. 中国科学院金属研究所，辽宁沈阳 110016）

摘要：陶瓷型壳作为熔模精密铸造技术的关键辅材，广泛应用于航空发动机与燃气轮机涡轮叶片等热端部件的制造，尤其对单晶高温合金叶片工程化制备具有重要支撑作用。本文从耐火材料、粘结剂、矿化剂等组分的选择优化，以及基于成孔剂的型壳微观结构调控策略方面，系统综述了近年来关于陶瓷型壳高温性能的研究进展。结果表明，高熔点耐火材料、有机粘结剂及纤维状成孔剂在提升型壳高温性能方面展现出良好前景；陶瓷料浆的稳定性、型壳物相与孔隙结构分布规律等对其服役性能的影响机制仍有待深入探索；未来需持续推动具有更高承温能力的陶瓷型壳的研发与应用。

关键词：陶瓷型壳；耐火材料；单晶高温合金；硅溶胶；矿化剂；成孔剂；纤维增强
中图分类号：TB332；TQ174　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）10-1065-07
DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0136

Research Progress of Ceramic Shell Mold for the Investment Casting of Single-Crystal Superalloy

WANG Shu-sen[1], BAI Wei-chen[2], LIU Zheng-yue[2], CHU Zhao-kuang[2],
ZHANG Chao-wei[2], MENG Jie[2], ZHOU Yi-zhou[2]
(1. Military Representative Bureau of Naval in Shenyang, Anshan 114001, Liaoning, China;
2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China)

Abstract: As a key auxiliary material in investment casting, the ceramic shell molds are widely used in the manufacturing of hot-section components such as turbine blades for aircraft engines and gas turbines, and particularly critical in supporting the engineering-scale production of single-crystal superalloy blades. This paper systematically reviews the recent research progress on the high temperature properties of the ceramic shell molds in terms of the component selection and optimization of refractory materials, binders, and mineralizers, as well as the microstructure regulation strategies of shell molds based on pore-forming agents. The results show that the refractory materials with high melting point, organic binders, and fibrous pore-forming agents have good application prospects in improving the high-temperature performance of ceramic shell molds. Research on the underlying mechanisms of slurry stability, phase composition of the shell mold and pore structure distribution on the service performance remain to be fully elucidated. Future research should continue to promote the development and application of ceramic shell molds with higher-temperature load-bearing capacity.

Key words: ceramic shell mold; refractory material; single-crystal superalloy; silica sol; mineralizer agent; pore-forming agent; fibre reinforcement

单晶高温合金叶片作为航空发动机和燃气轮机的关键热端部件，具有高强度和良好的高温稳定性等优点，能够承受极端高温及复杂应力等严苛服役工况[1]。目前，单晶高温合金叶片主要采用定向凝固工艺形成单晶组织结构，其制备方法通常为熔模铸造。熔模铸造的优势在于可成形复杂构件，且铸件尺寸精度高、表面光洁、所需后处理较少[2-3]。在铸造过程中，陶瓷型壳的高温力学性能、热物理性能及界面化学稳定性是决定单晶叶片表面完整性、尺寸精度和单晶完整性等的关键因素。因此，深入开展单晶叶片铸造用陶瓷型壳的相关性能研究，对提升我国单晶叶片工程化制备水平、保障高端装备自主研制具有重要意义。

陶瓷型壳的结构完整性和功能性关系到单晶叶片的质量与合格率，若不满足铸造要求，则会诱发杂

基金项目：新材料重大专项（No. 2025ZD0618901）。
收稿日期：2026–04–24 收到初稿，2026–06–19 收到修订稿。
作者简介：王树森（1982–），男，工程师，硕士，主要从事舰船材料研究工作。E-mail：446757808@qq.com
通信作者：白炜琛，男，助理研究员，博士。E-mail：wcbai15s@imr.ac.cn；
储昭贶，男，高级工程师，博士。E-mail：zkchu@imr.ac.cn
引用格式：王树森，白炜琛，刘铮玥，等 . 单晶高温合金熔模铸造陶瓷型壳研究进展 [J]. 铸造，2026，75（10）：1065–1071.
Wang Shusen，Bai Weichen，Liu Zhengyue，et al. Research progress of ceramic shell mold for the investment casting of single-crystal superalloy [J]. Foundry，2026，75（10）：1065–1071.

晶、再结晶、疏松和粘砂等多种铸造缺陷[4]。为满足制壳及合金浇注等工序的要求，保证单晶合金铸件的冶金质量，陶瓷型壳需要具有良好的界面稳定性、抗弯强度及透气性能等[2，5]。具体而言，在高于1 500 ℃的浇注温度下，优异的界面稳定性可避免型壳与液态合金发生界面反应，防止粘砂缺陷；足够的抗弯强度可保证脱蜡、烧结和浇注等过程中型壳自身结构完整；足够的透气性能够确保合金浇注过程中型壳内腔的气体能够被充分排出[6]，避免铸件发生浇不足或表面气孔缺陷。

陶瓷型壳的透气性、力学性能与型壳组成成分和结构密切相关。陶瓷型壳具有多层、多相、多孔特征，在结构上，通常包括面层、过渡层、多层背层料浆及撒砂材料（图1）；在成分上，通常包括耐火粉料、粘结剂及润湿剂、消泡剂、矿化剂等助剂[6]。陶瓷型壳内部的孔隙结构是型壳透气性的关键。型壳制备流程包括料浆涂制、撒砂、干燥、烧结等多个环节。在料浆涂制和撒砂环节，料浆在撒砂材料表面润湿不充分，型壳内部会形成一定孔隙；干燥过程中，纳米硅溶胶颗粒脱除自由水并聚集为凝胶，型壳的孔隙率增加；烧结过程中，从室温升至900~1 000 ℃时，耐火粉料物相变化较少，而硅凝胶转变为无定型的二氧化硅，体积收缩；硅溶胶中的有机成分及添加的成孔剂燃烧后进一步产生孔洞。型壳的高温力学性能则与耐火材料和粘结剂的承温能力密切相关。因此，研究人员主要通过型壳成分及微孔结构调控来提高型壳透气性能及高温力学性能[2-3，5]。

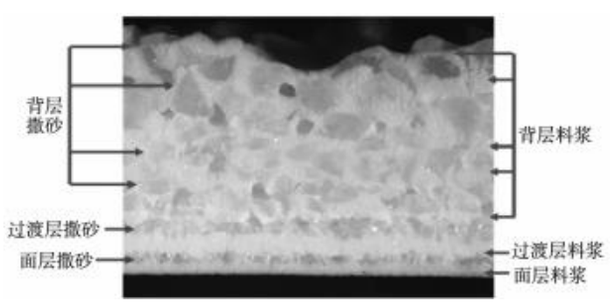


图1 陶瓷型壳截面形貌

Fig. 1 Cross-section morphology of the ceramic shell mold

随着新一代航空发动机及燃气轮机的研发，高温合金的服役和浇注温度不断提高，叶片气冷结构日益复杂，尺寸精度要求也随之提升。为满足单晶合金叶片浇注过程对型壳耐高温性能和尺寸精度控制的要求，传统陶瓷型壳高温下的力学性能、透气性、线膨胀系数等有待进一步提高。本文结合近年来陶瓷型壳制备工艺、成分及结构等的相关研究，对陶瓷型壳性能研究进展进行了综述。

1 型壳成分对性能的影响

熔模铸造的应用极为广泛，现已形成多种陶瓷型壳体系[7]。单晶高温合金浇注温度较高，因此陶瓷型壳中，高熔点的氧化铝、电熔莫来石、电熔石英及锆英粉等是主流耐火材料[8-9]。粘结剂通常包括水玻璃、硅酸乙酯及水性硅溶胶。其中水玻璃熔点低，不适于高温合金浇注[10]；硅酸乙酯制备的型壳性能较好，力学性能优异。20世纪60年代以来，出于环保要求，水性硅溶胶逐渐替代硅酸乙酯，成为应用最为广泛的型壳用粘结剂[11-13]。目前，国内外均形成了稳定的高温合金铸造用陶瓷型壳体系，面向更高浇注温度和尺寸精度要求的单晶叶片制备需求，研究人员从型壳耐火材料、硅溶胶等原材料及烧结工艺等角度出发，开展了一系列新型型壳体系研究。

1.1 耐火材料

耐火材料作为陶瓷型壳的骨架，其粒度、形状及杂质含量等均会对型壳性能产生影响。以常用的氧化铝基陶瓷型壳为例，Li等[14]对比发现，鞭状氧化铝粉相比球状氧化铝粉配置的料浆密度更大，型壳致密度更高，表面粗糙度更低。Venkat等[15]、Tamta等[16]发现，在型壳中添加纳米氧化铝可促进莫来石相的生成，进而使型壳的抗弯强度和抗蠕变性能显著提高。刘松良等[17]通过优化锆英石粉粒度、级配及制壳工艺等，有效改善了浇注后型壳的清理效果，而型壳中Na_2O、K_2O等杂质作为低熔点相，在高温下会导致型壳抗蠕变性能降低。Wei等[18]研究指出，型壳高温条件下的蠕变行为受界面滑动和固相扩散的共同控制。粘性流动、晶界滑动和蠕变的相对贡献在很大程度上取决于相组成、瞬态液相含量、孔结构和界面结合[19]。

对于氧化铝基陶瓷型壳，其性能调控的关键之一是莫来石相含量，与之相关的Al_2O_3-SiO_2二元相图见图2[20]。Liu等[21]、Huo等[22]发现，高温下SiO_2与Al_2O_3反应生成莫来石相，同时伴随体积膨胀，补偿了玻璃相烧结收缩。莫来石相具有高熔点、低热膨胀系数和优异抗蠕变性，能够在陶瓷内部构建三维网络骨架，显著提升其高温强度与尺寸稳定性。Solanki[23]研究了不同比例氧化铝与电熔莫来石混合粉体作为耐火材料时对型壳的影响，发现通过调节氧化铝含量可以改变型壳的烧结程度，进而调控型壳的力学性能。与莫来石型壳相比，氧化铝基型壳的优势在于导热性能较好，有利于合金的快速凝固[24]。Li等[25]利用$AlF_3 \cdot H_2O$在型壳中原位生成了纤维状电熔莫来石，有效改善了型壳的透气性和溃散强度。

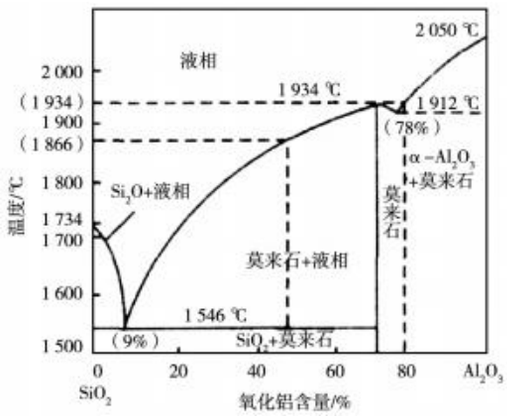


图2 Al_2O_3-SiO_2二元相图

Fig. 2 Phase diagram of Al_2O_3-SiO_2 binary system

为提高陶瓷型壳的承温能力，需要引入熔点更高的耐火材料。CaO基陶瓷型壳具有熔点高、高温Gibbs自由能低、价格低廉等优点，是一种理想的高温合金熔模铸造用材料，但其易水化，制备和保存较为困难，因此，从20世纪70 年代初石灰质耐火制品的工业化试验逐渐停滞[26]。近年来，研究人员通过材料设计和烧结工艺优化，在提高氧化钙陶瓷的烧结致密度方面取得一定进展，并且通过添加ZrO_2等形成少量抗水化增强相，有效提高了氧化钙陶瓷制品的抗水化性，进而实现了将其应用于高温合金精密铸造。CaO与MgO和Al_2O_3合成制备的CMA材料，可以避免CaO水化问题，同时兼具好的界面稳定性和合金液净化作用，已被应用于高温合金纯净化冶炼的坩埚材料制备，其在制备陶瓷型壳方面亦具有应用前景[27]。

氧化钇同样具有熔点高、高温Gibbs自由能低等优点，已广泛应用于钛合金铸造用陶瓷型壳的制备。对于高温合金，受限于氧化钇和钇溶胶的高昂价格，尚未得到广泛应用。研究表明，单独使用氧化钇或利用氧化钇作为添加剂制备的型壳均具有良好的界面稳定性[28-29]。但目前鲜有氧化钇型壳在高温合金浇注温度条件下的力学性能和抗热冲击性能的相关报道。

SiC熔点约为2 700 ℃，远高于氧化铝等传统耐火材料，有望改善陶瓷型壳性能。Khoiruddin等[30]研究发现，添加SiC可以提高型壳的致密性和抗弯强度。Wang等[31]得到了相似的试验结果，但型壳的透气性有所降低。Zhang等[32]利用硅树脂在陶瓷型壳烧结过程中原位生成SiC纳米线，使型壳烧结前后的抗弯强度均得到提高。相比作为添加剂改善型壳性能，单独使用SiC作为耐火材料的相关研究目前较少。Wisniewski等[33-34]利用SiC粉末和聚乙烯醇等配置料浆并成功制备了陶瓷型壳，该型壳可用于熔模铸造，但面层粗糙度和抗弯强度相较氧化铝基型壳仍有待提高。

1.2 粘结剂

硅溶胶在熔模铸造中的应用可追溯至20世纪60年代，其对陶瓷型壳性能的影响规律已有较为充分的研究。通过调节硅溶胶的浓度[35]、颗粒尺寸[36]、pH值、温度、离子浓度等，可控制凝胶化行为、干燥时间和型壳强度[37]。添加聚合物能够缩短型壳干燥时间，同时提高抗弯强度，降低高温条件下型壳的自重变形及浇注后的溃散强度，但会增加面层粗糙度[38-39]。在硅溶胶中添加金属离子如Ti^{4+}、Al^{3+}等，有助于优化凝结后的三维空间结构，提高热稳定性和润湿性。Guan等[40]提出选用MOF（有机金属框架）材料作为硅溶胶的改性剂，其结合了铝离子和有机聚合物的改性机制，可改善硅溶胶的热稳定性和固化强度，避免硅溶胶干燥开裂，有利于提高型壳的力学性能。

然而，硅溶胶生成的无定型氧化硅熔点相对较低，且高温下氧化硅的Gibbs自由能较高，容易与高温合金中的Hf、Al、Cr等发生界面反应。因此，其他水性粘结剂如有机铝溶胶粘结剂、锆溶胶和钇铝粘结剂等，成为陶瓷型壳的研究热点[41-42]。铝溶胶形成的主晶相Al_2O_3熔点较SiO_2更高，耐高温性能更好。针对铝溶胶的水解问题，肖克等[43]通过在铝溶胶中添加Cr^{3+}，起到了一定抑制水解的效果。冯小欢等[18]分别在型壳面层和背层中使用钇溶胶和锆溶胶作为粘结剂制备得到陶瓷型壳，并用于镍基高温合金的铸造，结果显示型壳的抗弯强度能够满足铸造需求。Freitag等[44-45]利用$CaZrO_3$粉和有机胶粘剂实现了$CaZrO_3$型壳的制造，有效抑制了铸造过程中的界面反应。

1.3 矿化剂

矿化剂作为添加剂在Al_2O_3、石英基陶瓷材料性能优化方面已有初步应用，起到降低烧结温度、生成高温稳定相、抑制晶粒长大、调控晶型转变和补偿烧结收缩等作用[5-6]。对于陶瓷型壳，添加矿化剂可以降低耐火材料与硅溶胶间的烧结温度，促进型壳烧结，提高型壳组分的化学稳定性，抑制型壳吸水潮解或高温条件下与合金的界面反应[43，46]。

Wu等[47-48]和刘孝福等[49]先在Al_2O_3基陶瓷型壳中添加Y_2O_3、MgO矿化剂，高温下Y_2O_3与Al_2O_3反应生成具有高熔点、高抗蠕变性和优异高温稳定性的钇铝石榴石相（$3Al_2O_3 \cdot 5Y_2O_3$），提升了陶瓷材料的抗热冲击能力；MgO与Al_2O_3反应生成镁铝尖晶石并伴随体积膨胀，Mg^{2+}在Al_2O_3晶界处偏聚，可降低晶界迁移效率，防止晶粒异常长大，提升陶瓷模具微观结构均匀性和完整性。李彪等[50]在氧化铝基陶瓷中添加质量分数10%的$ZrSiO_4$矿化剂，1 420 ℃下$ZrSiO_4$的分解产物SiO_2与

Al_2O_3反应生成莫来石相，莫来石相与$ZrSiO_4$的另一种分解产物ZrO_2均为高温强化相，能够提升高温强度[51]。Liang等[52]在石英陶瓷材料中添加Al_2O_3矿化剂，促进了高温下石英向磷石英的晶型转变，且抑制了晶界迁移、细化了晶粒，提升了陶瓷材料的抗弯强度。Wang等[53]通过掺杂La_2O_3+ZrO_2促进氧化钇的烧结，氧化钇晶粒尺寸有所增大，陶瓷的致密度增强。Rakoczy等[54]研究发现，在型壳中分别添加Al、Cu、Fe、Ni等金属粉末能同时提高型壳的高温强度和热导率。

利用矿化剂还可以调控型壳中的相变，进而调控型壳尺寸，改善型壳的脱除性能等。例如，在型壳中添加电熔石英，浇注后降温时石英从玻璃态转变为方石英态，该体积变化会产生微裂纹，有利于改善型壳的溃散性能[55]。Kutbay等[56]研制了一种由铝酸三钙、石英、含硫酸盐化合物和少量控制剂（添加剂）组成的熔模粉末，能够在凝固过程中发生体积膨胀，以适应合金的体积收缩。关于矿化剂对界面反应的影响，Chen等[57]发现在Al_2O_3基陶瓷型壳中添加高岭土可促进陶瓷型壳的莫来石化，降低玻璃相含量，减轻铸件表面粘砂。

2 型壳微结构调控

陶瓷型壳的物相及结构，如大尺寸孔洞、低熔点相（尤其是玻璃相）夹杂物、微孔及晶界均会对型壳的高温强度、抗变形能力等造成影响[58]。在工艺上，型壳制备时硅溶胶的干燥、撒砂等过程不可避免地会引入孔洞，适量孔洞有利于提高型壳的透气性，进而避免浇注过程中铸件表面产生气孔甚至浇不足。然而，过高的型壳孔隙率会降低型壳高温强度和抗高温蠕变性能，不利于铸件的结构完整和尺寸精度。型壳内表面的微孔还会增大表面的粗糙度，影响合金在型壳表面的润湿性。因此，行业内针对型壳的微观孔隙结构优化开展了长期的研究工作。

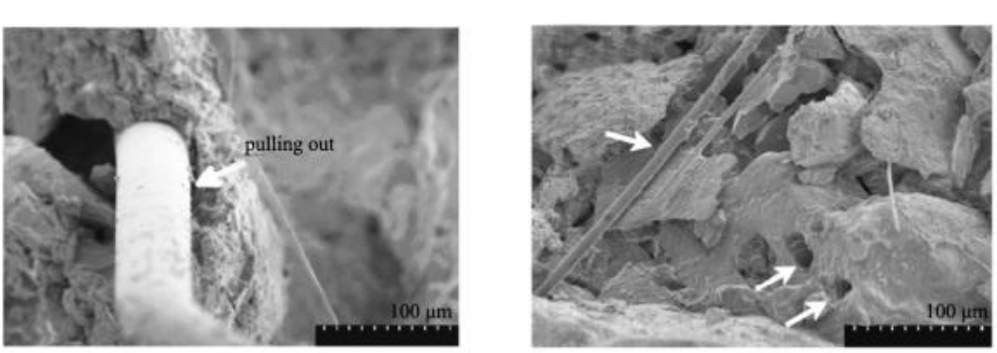
2.1 成孔剂

提高型壳透气性的常见方法是在型壳浆料中添加不耐高温的填料作为成孔剂，如石墨、碳酸铵等无机材料，或聚乙烯醇[59]、聚乙二醇[60]等有机材料，它们在型壳烧结过程中发生分解或氧化，生成气体并在型壳中留下孔隙，从而提高型壳的透气性[3，61]。Pattnaik[62]使用适宜尺寸的锯末作为成孔剂，其均匀分散在型壳的多孔结构内部，提高了型壳的湿坯强度、透气性以及溃散性。添加PE粉也能增加型壳孔隙率，提高透气性，但会造成抗弯强度降低、面层粗糙度增大[63]。Lin等[64]使用硅树脂作为粘合剂增强了型壳的抗弯强度；同时，型壳烧结过程中硅树脂热解产生孔隙，提高了型壳的透气性。有机聚合物则可以改变硅溶胶和型壳料浆的流变性能，改善型壳在转角位置料浆偏薄的问题，从而避免该位置因应力集中而开裂。但总体而言，传统成孔剂的加入对型壳的高温抗弯强度和抗变形能力存在不利影响[16，65]。通过添加二维石墨烯材料或一维纤维材料，优化成孔剂的几何形状，进而改善型壳中耐火材料及微观孔隙的分布结构，能够在裂纹扩展过程基于应力释放机制提高型壳的抗弯强度[66-68]。

2.2 纤维增强陶瓷型壳

纤维增强复合材料已有较长的应用历史，其通常具有弹性模量高、强度大、抗变形能力好等优点。在陶瓷型壳料浆中添加纤维材料，同样能够有效增强型壳的力学性能。研究表明，采用无机纤维材料，如钢纤维、玻璃纤维等，可基于拉拔效应显著提高型壳的抗弯强度和抗蠕变性能（图3[69]），但不利于型壳的溃散性[70]。短切碳纤维的添加有助于减少型壳升温过程的线收缩率和自重变形量[71]。

采用有机纤维材料作为添加剂，如尼龙纤维、聚丙烯纤维、针状焦等，能够同步提高型壳烧结前的



（a）烧结前　　（b）烧结后

图3　添加混合纤维陶瓷型壳烧结前后的断面SEM形貌

Fig. 3 Fracture SEM morphologies of the ceramic shell mold with hybrid fibre before and after sintering

湿坯强度和烧结后的透气性。有机纤维材料形成的纤维状孔隙还能够释放型壳内应力并抑制裂纹扩展，从而改善型壳的高温强度[72-73]。但纤维的长度不是越长越好，随着纤维长度的增加，型壳的抗弯强度先增大后减小，型壳的透气率则先增大后减小再增大[74]。此外，陈义斯等[75]提出将有机纤维混杂在撒砂材料中，同样可以起到改善型壳透气性能的作用，但有机纤维通常密度较低，在淋砂过程中容易与撒砂材料分离，还会形成粉尘危害制壳工人的身体健康，因此需要通过手工撒砂等方式对撒砂工艺进行改进。

然而，有机纤维在陶瓷料浆中存在分散难题，这严重影响了其对型壳性能的改善作用[76-77]。长纤维对型壳抗弯强度的改善作用较好，但在料浆搅拌过程中容易缠绕在搅拌杆上，影响料浆质量。由于纤维在型壳中的分布方向难以控制，当裂纹沿着纤维燃烧后形成的孔洞方向扩展时，反而会加速裂纹扩展，不利于型壳的抗弯强度[3]。

针对以上问题，芦刚等[74]利用亲水性较好的羟丙基甲基纤维素作为分散剂，结合超声方法有效提高了短切尼龙纤维在硅溶胶中的分散性。Feng等[78]研究发现，利用超声搅拌分散纤维后能够有效提高型壳的抗弯强度、高温自重变形和热导率。Liu等[79]通过碱煮处理蕉麻纤维继而用磷酸二氢铝溶液进行表面改性，显著提高了型壳的抗热震性能。目前，部分厂家已能够提供纤维增强型壳的服务方案，但尚未见高温合金熔模铸造的相关应用报道。

3 结束语

随着航空发动机和燃气轮机的技术革新，单晶高温合金涡轮叶片的高温服役性能要求不断提高，这对陶瓷型壳提出了更高的要求。近年型壳领域的研究主要聚焦于通过成分和结构调整，以改善型壳高温强度、抗蠕变性能及透气性等，相关研究进展包括以下方面：

（1）通过改变型壳成分、烧结工艺及所用矿化剂种类，可以有效调控型壳中的莫来石相含量和结构，进而针对性地优化型壳的抗弯强度、线膨胀系数等。

（2）利用CaO、Y_2O_3、SiC等高熔点耐火材料及铝溶胶、钇溶胶等高熔点粘结剂，能够改善型壳的高温强度，从而进一步提升型壳的耐高温性能。

（3）型壳的透气性与力学性能的优化通常相互制约，提高型壳孔隙率可以改善透气性，但不利于型壳的力学性能。利用有机纤维作为成孔填料制备陶瓷型壳，能够同步优化透气性与抗弯强度，展现出良好的应用潜力。

为进一步推进高熔点耐火材料、粘结剂以及纤维成孔剂在陶瓷型壳及单晶叶片精密铸造行业中的应用，改善陶瓷型壳的高温应用性能，未来需要开展以下方面的深入探索：系统研究新型耐火材料及粘结剂对型壳物相变化的影响规律，揭示其对型壳高温性能的作用机制，为型壳制备工艺优化提供指导；围绕型壳微观孔隙拓扑结构对高温透气性和力学性能的影响机制，实现纤维等成孔剂尺寸结构的精细调控，并结合表面改性方法提高成孔剂在型壳中的分散稳定性和定向排列控制，实现型壳内部结构的按需构建。通过上述关键科学问题的突破，推动具有更高承温能力的陶瓷型壳研发与生产应用。

参考文献：

[1] 孙晓峰，金涛，周亦胄，等. 镍基单晶高温合金研究进展 [J]. 中国材料进展，2012，31（12）：1–11.

[2] 曾洪，张松泉，伍林，等. 熔模精密铸造用陶瓷型壳研究进展 [J]. 东方汽轮机，2019（3）：39–41.

[3] Kanyo J E，Schaffoner 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.

[4] 贾玉亮，白小龙，戴勇，等. 镍基高温合金定向凝固型壳诱发缺陷及控制 [C]// 中国材料大会2025论文汇编，2025：157–173.

[5] 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.

[6] 李茜茹，李小刚. 型壳材料对高温合金与钛合金精密铸造影响的文献综述 [J]. 冶金与材料，2025，45（4）：154–156.

[7] 宋秀丽，魏修亭，赵而团，等. 粉煤灰在熔模铸造背层涂料中的应用研究 [J]. 热加工工艺，2022，51（5）：65–67.

[8] Kaila V N，Dave I B. The influence of coating sand materials on shell mold properties of Investment casting process [C]// International Conference on Advanced Materials Behavior and Characterization（ICAMBC）. Materials Today：Proceedings，2021：800–804.

[9] Song Q Z，Zha X D，Ou M Q，et al. High-temperature flexural strength of aluminosilicate ceramic shells for the investment casting of nickel-based superalloy [J]. International Journal of Metalcasting，2024，18（2）：962–974.

[10] 赵恒义. 熔模铸造型壳抗弯弹性模量的研究 [J]. 铸造技术，2004（6）：443–444.

[11] 武超. 快干型硅溶胶在精密铸造领域中的应用 [C]// 第十五届中国铸造协会年会论文集，2019：375–378.

[12] 杨银岐，李海树. 熔模铸造水玻璃型壳改为硅溶胶型壳的成本分析 [J]. 特种铸造及有色合金，2021，41（4）：527–528.

[13] 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.

[14] Li Z H，Guan D W，Zhang Y Z，et al. Research on the influence of raw material microstructures and properties on the quality of the face-coat in ceramic shell [J]. International Journal of Metalcasting，2026，20（1）：347–361.

[15] Venkat Y，Choudary K R，Chatterjee D，et al. Development of mullite-alumina ceramic shells for precision investment casting of single-crystal high-pressure turbine blades [J]. Ceramics International，2022，48（19）：28199–28206.

[16] Tamta K，Karunakar D B. Enhancing mechanical properties and permeability of ceramic shell in investment casting process [J]. Materials and Manufacturing Processes，2019，34（6）：612–623.

[17] 刘松良. 熔模铸造硅溶胶型壳清理问题分析 [J]. 铸造工程，2023，47（1）：54–58.

[18] Wei Y M，Lu Z G，G X. Influence of alkaline oxide on the deformation of ceramic shell mould at high temperatures during investment casting [J]. Ceramics International，2018，44（17）：21197–21204.

[19] Jing L，Wang W H，Wu Y L，et al. A review of high-temperature deformation mechanisms and control strategies of investment casting ceramic shells [J]. Journal of the European Ceramic Society，2026，46（11）：118315.

[20] 谭宏斌. 莫来石物理性能研究进展 [J]. 山东陶瓷，2008（4）：24–27.

[21] Liu X F，Guo X L，Shui G Y，et al. Properties of alumina-based ceramic cores [J]. China Foundry，2021，18（6）：593–598.

[22] Huo M D，Li Q L，Liu J Q，et al. In-situ synthesis of high-performance Al_2O_3-based ceramic cores reinforced with core-shell structures [J]. Ceramics International，2022，48（22）：33693–33703.

[23] Solanki R. Formulation of zircon-free slurries and the development of ceramic shell moulds for investment casting [D]. United Kingdom：University of Birmingham，2018.

[24] 李海松，张琼元，伍林，等. 型壳材料对高温合金叶片组织和性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金，2021，41（1）：103–107.

[25] Li Z H，Zhao Y J，Chen X Y，et al. Effect of $AlF_3 \cdot 3H_2O$ addition on microstructure and properties of ceramic shell for investment casting [J]. Journal of Materials Engineering，2024，52（12）：188–195.

[26] 杨强，鲁中良，王富，等. 整体式氧化钙基陶瓷铸型在涡轮叶片精铸中的应用前景 [J]. 航空制造技术，2022，65（17）：49–57.

[27] 刘云松. CaO-MgO-Al_2O_3材料可控制备及与高温合金界面作用机制 [D]. 北京：北京科技大学，2024.

[28] Sviridova I，Holling H，Küll A，et al. Production of near-net-shape ceramic investment casting shells for titanium alloys using lithography-based ceramic manufacturing [J/OL]. International Journal of Metalcasting，2026-01-25. https：//doi.org/10.1007/s40962-025-01859-2.

[29] Kou B H，Zhou W T，Lin Y J，et al. Wettability and interfacial reaction of ZrO_2 and Y_2O_3 doped Al_2O_3-based ceramic shells in K417G superalloy investment casting [J]. Ceramics International，2025，51（23）：40087–40097.

[30] Khoiruddin S，Saputro I E，Huang C F，et al. Study on the mechanical，thermal，and physical properties of SiC-powder-reinforced shell for investment casting process：the influence of powder mesh size and content [J]. Advanced Engineering Materials，2025，27（21）：2500966.

[31] Wang Y C，Kao C Y，Chen C M，et al. Effects of Al_2O_3 and SiC micro-scale powder addition on mechanical，thermal and physical properties of reinforced shell for investment casting [J]. Ceramics International，2025，51（6）：7217–7228.

[32] Zhang H，Zhang Y F，Liu L，et al. Effect of sintering temperature and silicone resin content on in-situ formed SiC nanowire reinforced ceramic shells [J]. Journal of Alloys and Compounds，2024，991：174476.

[33] Wisniewski P. Evaluating silicon carbide-based slurries and molds for the manufacture of aircraft turbine components by the investment casting [J]. Crystals，2020，10（6）：433.

[34] Wisniewski P，Malek M，Mizera J，et al. Effect of adding water-based binders on the technological properties of ceramic slurries based on silicon carbide [J]. Materiali in Tehnologije，2017，51（2）：225–227.

[35] 常化强，杨莹，乔海滨，等. 硅溶胶中SiO_2含量对钛合金精铸型壳的影响 [J]. 铸造，2025，74（6）：776–780.

[36] 常化强，乔海滨，杨光，等. 硅溶胶硅粒径对钛合金精铸涂料和型壳性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金，2025，45（12）：1917–1920.

[37] 李倩，刘智鹏，赵巍，等. 精密铸造陶瓷型壳用硅溶胶研究进展 [J]. 铸造技术，2022，43（11）：989–995.

[38] Venkat Y，Choudary K R，Das D K，et al. Ceramic shell moulds for investment casting of low-pressure turbine rotor blisk [J]. Ceramics International，2021，47（4）：5663–5670.

[39] Venkat Y，Choudary K R S，Das D K，et al. Alumina-zircon filler based ceramic shell moulds for directionally solidified cast shrouded low pressure turbine blades [J]. Ceramics International，2021，47（19）：27395–27405.

[40] Guan N N，Bai W C，Zhang C W，et al. Dual-function Al-Fum modified silica sols for excellent structure：synergistic regulation in structure，flow properties and dehydration behavior [J]. Materials Science and Engineering B，2026，328：119289.

[41] Varfolomeev M S，Moiseev V S，Shcherbakova G I. Highly thermostable ceramic molds for shaped castings of titanium alloys [J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals，2017，58（1）：61–66.

[42] Dubrovin V K，Kulakov B A，Karpinskii A V，et al. New technological solutions in the manufacture of thermochemically resistant ceramic molds for casting titanium alloys [J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals，2022，63（6）：641–648.

[43] 肖克，刘澜涛，卢亚平，等. 铝质黏结剂型壳材料与制备工艺研究 [J]. 铸造技术，2024，45（7）：705–709.

[44] Freitag L，Schafföner S，Lippert N，et al. Silica-free investment casting molds based on calcium zirconate [J]. Ceramics International，2017，43（9）：6807–6814.

[45] Freitag L，Schmidt G，Hubalkova J，et al. Functionally graded calcium zirconate molds with alginate-based spray coating for titanium investment casting [J]. Journal of the European Ceramic Society，2022，42（2）：682–692.

[46] Kou B H，Zhou W T，Peng Y H，et al. Effect of active metal oxide dopants on wettability and interfacial reaction between

K417G superalloy and Al_2O_3-based ceramic shell [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2026，36（1）：244–258.

[47] Wu H H，Li D C，Chen X J，et al. Rapid casting of turbine blades with abnormal film cooling holes using integral ceramic casting molds [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2010，50（1–4）：13–19.

[48] Wu H H，Fang Z F. Development of an indirect solid freeform fabrication process based on stereolithography and gelcasting for ceramic casting molds：advanced materials research [J]. Advanced Materials Research，2011（189–193）：2581–2585.

[49] 刘孝福，娄延春，于波，等. 氧化钇矿化剂对氧化铝基陶瓷型芯性能的影响 [J]. 铸造，2016，65（11）：1051–1055.

[50] 李彪，娄延春，于波，等. 添加锆英粉矿化剂的氧化铝基陶瓷型芯试验研究 [J]. 铸造，2020，69（8）：853–860.

[51] 陈天赐，李乔磊，张辉，等. 矿化剂对陶瓷型芯性能的影响 [J]. 铸造，2022，71（10）：1262–1270.

[52] Liang L. Study on preparation of quartz ceramics toughened with mineralizer [J]. Integrated Ferroelectrics，2020，207：197–207.

[53] Wang Y，Guo X P. Improvement on sintering property of the face coat of yttria mould shells for investment casting [J]. Ceramics International，2019，45（5）：5297–5305.

[54] Rakoczy Ł，Grudzień-Rakoczy M，Cygan R. The influence of shell mold composition on the as-cast macro-and micro-structure of thin-walled IN713C superalloy castings [J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2019，28（7）：3974–3985.

[55] Bertão I，Oliveira F，Puga H，et al. Influence of quartz and cristobalite on the mechanical behaviour of ceramic shell materials for investment casting [J/OL]. International Journal of Metalcasting，2026-01-25. https：//link.springer.com/article/10.1007/s40962-026-01877-8.

[56] Kutbay I，Güler K A，Cigdem M. The development of an expansive type special cement bonded investment powder for castings of non ferrous metals and alloys [J]. International Journal of Cast Metals Research，2018，31（4）：237–248.

[57] Chen G Y，Cai Z Y，Zhang M，et al. Effect of kaolin/TiO_2 additions and contact temperature on the interaction between DD6 alloys and Al_2O_3 shells [J]. Metals，2024，14（2）：164.

[58] Bakunov V S，Belyakov A V. Role of structural characteristics in high-temperature creep of ceramics [J]. Refractories and Industrial Ceramics，2000，41（9–10）：349–355.

[59] Vuksic M，Zmak I，Curkovic L. Composition optimization of alumina supensions which contain waste alumina powder [C]// Proceedings of the 29th International DAAAM Symposium，2018：1019–1025.

[60] Taktak R，Baklouti S，Bouaziz J. Effect of binders on microstructural and mechanical properties of sintered alumina [J]. Materials Characterization，2011，62（9）：912–916.

[61] Malek M，Kluczynski J，Grzejda R，et al. Thermal and structural behavior of investment casting molds modified with biodegradable walnut shell chips [J]. Materials，2025，18（18）：4289.

[62] Pattnaik S. Influence of sawdust on the properties of the ceramic shell used in investment casting process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2017，93（1-4）：691–707.

[63] 李勇. 微纳米PE粉对熔模精铸型壳微观形貌及性能影响研究 [D]. 南昌：南昌航空大学，2023.

[64] Lin C X，Zhang H，Yu J B，et al. High-strength and quick-drying ceramic shells prepared by silicone resin bonding [J]. Ceramics International，2025，51（17）：23937–23947.

[65] Norouzi S，Farhangi H. The impact of ceramic shell strength on hot tearing during investment casting [C]// AIP Conference Proceedings，2011：662–667.

[66] 白炜琛，邹明科，王亮，等. 一种添加氧化石墨烯的氧化铝基陶瓷型壳背层浆料及其制备方法：CN202310910714.5 [P]. 2026-03-20.

[67] 范秉政. 纤维增强熔模铸造陶瓷型壳研究进展 [C]// 第十九届全国耐火材料青年学术报告会论文集，2024：63–67.

[68] 吕凯. 纤维复合熔模铸造型壳制备技术 [M]. 北京：冶金工业出版社，2021：20-25，61–73.

[69] Lü K，Liu X D，Du Z X，et al. Properties of hybrid fibre reinforced shell for investment casting [J]. Ceramics International，2016，42（14）：15397–15404.

[70] 申思敏. 钢纤维复合硅溶胶精铸型壳的改性研究 [D]. 呼和浩特：内蒙古工业大学，2021.

[71] 张弛，赵玉涛，梁向锋，等. 短切碳纤维对型壳线收缩率与高温自重变形的影响 [J]. 热加工工艺，2017，46（1）：88–90.

[72] Jones S，Yuan C. Advances in shell moulding for investment casting [J]. Journal of Materials Processing Technology，2003，135（2–3）：258–265.

[73] Yuan C，Jones S. Investigation of fibre modified ceramic moulds for investment casting [J]. Journal of the European Ceramic Society，2003，23（3）：399–407.

[74] 芦刚，纪超众，严青松，等. 陶瓷纤维长度对复合精铸型壳抗弯强度与透气性的影响及增强行为 [J]. 复合材料学报，2017，34（4）：637–644.

[75] 陈义斯，芦刚，廖倚，等. 撒砂层尼龙-氧化铝混杂纤维质量比对硅溶胶型壳性能的影响 [J]. 复合材料学报，2023，40（6）：3449–3458.

[76] 魏蓉，严青松，芦刚. 超声作用对短切碳纤维在水溶液中分散性的影响 [J]. 高科技纤维与应用，2014，39（3）：40–45.

[77] 吕凯，刘向东，李艳芬，等. 纤维增强熔模铸造复合型壳的性能及断口形貌 [J]. 北京航空航天大学学报，2014，40（10）：1361–1365.

[78] Feng Z C，Lü K，Lu Y，et al. Influence of ultrasonic agitation on dispersion of fibers in a shell mold for investment casting [J]. China Foundry，2026，23（1）：108–116.

[79] Liu H，Liu C，Feng H，et al. Strength and fracture characteristics of silica sol shell reinforced with abaca fibers impregnated with aluminum dihydrogen phosphate [J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2025，34（15）：15758–15773.

（编辑：王杰，wj@foundryworld.com）