热压注双层壁陶瓷型芯用 SiC 增强水溶蜡型芯性能和水溶解行为

李乔磊[1]，张婷婷[1]，李　鑫[2]，梁静静[1]，周亦胄[1]，李金国[1]

（1. 中国科学院金属研究所，辽宁沈阳 110016；
2. 中国航发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）

摘要：水溶性石蜡是热压注工艺制备新一代双层壁陶瓷型芯不可或缺的关键过渡材料，其力学性能、热稳定性及溶解效率是影响其工程化应用的关键问题。本研究以不同含量的SiC颗粒作为增强相制备水溶蜡型芯试样，系统研究了SiC含量对水溶蜡型芯力学性能、热稳定性及溶解行为的影响，并进一步考察了pH值和温度对水溶蜡型芯材料溶解行为的影响机制。结果表明，当SiC含量为0.9wt.%时，水溶蜡型芯的综合性能最优，其室温抗弯强度为13.5 MPa，较未强化型芯提高了12.5%；热变形率降至12%，较未强化型芯降幅达56.4%，显著改善了水溶蜡型芯的尺寸稳定性。然而，在pH=2的酸性溶液中，0.9wt.% SiC强化的水溶蜡型芯试样的溶解时间延长至17.5 min，较未强化型芯增加了34.6%；在强酸性（pH=1）环境下溶解时间缩短至16 min；当温度从15 ℃升至35 ℃时，溶解时间由15.8 min锐减至6.9 min，降幅达56.3%，表明升高温度和降低pH值可有效加速SiC强化水溶蜡型芯的溶出，可在保证型芯材料强度的同时实现高效脱除。

关键词：水溶蜡；陶瓷型芯；抗弯强度；溶解性；熔模铸造

中图分类号：TG221；TG249.5　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）10-1105-08

DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0141

Properties and Water-Dissolution Behaviors of SiC-Reinforced Water-Soluble Wax Cores for Hot-Injection-Molded Double-Wall Ceramic Cores

LI Qiao-lei[1], ZHANG Ting-ting[1], LI Xin[2], LIANG Jing-jing[1], ZHOU Yi-zhou[1], LI Jin-guo[1]

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, Liaoning, China; 2. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: Water-soluble paraffin wax is a critical transitional material for fabricating next-generation double-wall ceramic cores using the hot-pressing injection process, and its mechanical properties, thermal stability, and dissolution behavior are key factors governing its engineering applicability. In this study, the water-soluble wax core specimens were prepared with varying SiC particle contents as the reinforcing phase, and the effects of SiC contents on the mechanical properties, thermal stability, and dissolution behavior of the water-soluble wax cores were systematically investigated. In addition, mechanisms underlying the effects of pH and temperature on the dissolution behaviors of the optimized water-soluble wax core materials were examined. The results show that the water-soluble wax core containing 0.9wt.% SiC exhibits the best overall performance, with a room-temperature flexural strength of 13.5 MPa, 12.5% higher than that of the unreinforced core; and its thermal deformation ratio is decreased to 12%, representing a 56.4% reduction compared with that of the unreinforced core, and indicating significantly improved dimensional stability of the water-soluble wax core. However, in an acidic solution with pH=2, the dissolution time of the 0.9wt.% SiC-reinforced water-soluble wax core specimen increases to 17.5 min, 34.6% longer than that of the unreinforced core; under strongly acidic conditions (pH=1), the dissolution time is decreased to 16 min; as the solution temperature increases from 15 °C to 35 °C, the dissolution time is sharply decreased from 15.8 min to 6.9 min, corresponding to a reduction of 56.3%, indicating that increasing temperature and decreasing pH can effectively accelerate the dissolution of SiC-reinforced water-soluble wax cores, enabling efficient core removal while maintaining adequate mechanical strength.

Key words: water-soluble wax; ceramic core; flexural strength; solubility; investment casting

基金项目：国家部委基础科研计划项目（JCKY2024213B002）；国家自然科学基金（52402094）。

收稿日期：2026–06–25 收到初稿，2026–07–01 收到修订稿。

作者简介：李乔磊（1993–），男，助理研究员，主要研究方向为熔模精密铸造和陶瓷增材制造。E-mail: qlli@imr.ac.cn

引用格式：李乔磊，张婷婷，李鑫，等 . 热压注双层壁陶瓷型芯用 SiC 增强水溶蜡型芯性能和水溶解行为 [J]. 铸造，2026，75（10）：1105–1112.

Li Qiaolei，Zhang Tingting，Li Xin，et al. Properties and water-dissolution behaviors of SiC-reinforced water-soluble wax cores for hot-injection-molded double-wall ceramic cores [J]. Foundry，2026，75（10）：1105–1112.

随着航空发动机推重比和涡轮前温度的持续提高，涡轮叶片冷却效率面临更为严苛的提升需求[1-2]。新一代高冷效发动机空心涡轮叶片普遍采用双层壁、三层壁乃至多层壁的复杂层冷结构，这些精细的内部冷却流道能够在有限的空间内实现高效的对流-冲击复合冷却，从而大幅提高叶片的承温能力和使用寿命[3-4]。然而，这种复杂-异型结构的内部冷却流道同样给精密铸造工艺带来了巨大的挑战[5-6]。

叶片内部这种复杂、异型、悬空等结构特征的三维冷却流道，需依靠精密铸造过程中的陶瓷型芯来成形[7]。目前，热压注陶瓷型芯制备工艺是应用最为成熟和广泛的技术[8]。该工艺将陶瓷粉料与石蜡基粘结剂混合后注入模具，冷却脱模得到型芯素坯，再经脱脂、烧结获得型芯产品[7]。然而，当空心涡轮叶片内部冷却结构进一步演变为双层壁或多层壁时，型芯内部会形成封闭或半封闭的“内层空腔”，导致传统的刚性金属模具在压注完成后无法抽芯脱模，从而使内层结构无法直接成形[9]。为突破这一瓶颈，一种可行的策略是采用“可溶芯辅助成形”方法：即首先利用水溶性材料单独制备内层结构的“牺牲型芯”，将其置于主模具中，随后以常规热压注料填充外围型芯主体，待素坯冷却固化后，通过特定溶剂将内层水溶芯溶解去除，从而获得完整且具有复杂内腔结构的陶瓷型芯素坯[10]。在这一技术方案中，水溶性型芯的材料性能极大影响着陶瓷型芯的内腔成形精度、表面质量以及成品率。理想的水溶性型芯应同时具备良好的力学强度、高尺寸稳定性以及快速、可控的水溶溃散性[11]。

石蜡基水溶蜡是当前制备可溶型芯的主要候选材料[11]。它通过在石蜡中引入水溶性组分实现水溶解特性。然而，传统水溶蜡普遍存在力学强度偏低、受热易变形或软化、线膨胀系数偏大等问题，在承受陶瓷热压注料的加热和冲击时容易发生软化、翘曲甚至断裂，进而导致内腔尺寸偏差或型芯报废[12]。水溶性型芯通过添加陶瓷粉末或纤维来提高力学性能和尺寸稳定性，已得到广泛研究和工程应用[13]，如Zhou等[14]通过添加石墨提高了水溶性型芯的弯曲强度和韧性，同时降低了线性收缩和溶解速率，Jiang等[11]通过添加云母粉提高了水溶性型芯的性能，抗压屈服强度达到1 MPa，最高抗压强度可达到4 MPa，弯曲强度高达6.65 MPa。在上述工作的基础上，碳化硅（SiC）颗粒作为增强相兼具高硬度、高弹性模量以及优异的热稳定性[15]，不仅能显著提升水溶蜡复合材料的抗弯强度和抗热变形能力，还能有效降低热膨胀量[16]，从而保证型芯在热压注过程中的尺寸精度。因此，SiC颗粒增强水溶蜡型芯展现出了独特的应用潜力。

目前国内外关于SiC颗粒增强水溶蜡复合材料增强-增韧的研究鲜有报道，工程应用过程中SiC颗粒对水溶蜡力学性能、热稳定性及溶解行为的影响规律和机制缺乏参考。本课题以水溶蜡为基体，通过添加不同质量分数（0、0.6wt.%、0.9wt.%、1.2wt.%）的SiC陶瓷粉体制备水溶蜡型芯试样，系统研究了SiC含量对型芯抗弯强度、热变形率、断口形貌及溶解性的影响规律，优化了SiC添加量。在此基础上，进一步考察pH值和温度对最优水溶蜡材料溶解性的调控作用，以期为高性能、易脱除水溶蜡型芯的制备及应用奠定理论基础。

1 试验与测试

1.1 试验材料及制备

本试验使用的水溶蜡料成分为：60wt.%的聚乙二醇（PEG400、PEG200）、丙三醇，25wt.%的聚乙烯醇，10wt.%的尿素、碳酸氢钠、硬脂酸和微晶蜡，5wt.%的功能填料（包括<0.5wt.%的碳纤维）。先加热至110 ℃融化聚乙二醇和丙三醇后加入尿素、碳酸氢钠、硬脂酸和微晶蜡进行预混，再加入聚乙烯醇和聚乙二醇混炼后脱泡。然后添加不同含量的（0、0.6wt.%、0.9wt.%、1.2wt.%）SiC颗粒，试验样品成分编号见表1。加热至85 ℃，采用C型注射压蜡机压制水溶性石蜡型芯试样。型芯溶解性试验选用柠檬酸（$C_6H_8O_7 \cdot H_2O$）溶液，配制浓度为0.1 mol/L的柠檬酸储备液，采用pH计（精度±0.01）实时监测，通过向柠檬酸溶液中滴加少量1 mol/L NaOH溶液或1 mol/L HCl溶液进行微调，分别获得pH=1、2、3、4的柠檬酸缓冲溶液，并对溶解后的反应产物进行分析和讨论。

表1 成分及编号
Tab. 1 Compositions and designations

编号	牌号	软化温度/℃	针入度/0.1 mm（5 s/25 ℃/450 g）	SiC添加量/wt.%
S1	W48	71.5	6.0	0
S2	W48	71.5	6.0	0.6
S3	W48	71.5	6.0	0.9
S4	W48	71.5	6.0	1.2

注：针入度是指在规定的载荷（450 g）、时间（5 s）和温度（25 ℃）条件下，标准针垂直刺入试样表面的深度，以Dmm（即0.1 mm）为单位。针入度值越大，表明材料越软；反之则越硬。

1.2 性能表征

水溶蜡溶解性测试采用失重法。称量2 g水溶蜡试样，浸入250 mL柠檬酸水溶液（25 ℃）中，以100 r/min轻微搅拌，记录样品完全溶解所需时间。

水溶蜡热变形率测试采用双支点法，每组设置不少于四根平行样条。室温下测量试样中部离支架底部的高度为h_1，随炉升至60 ℃，试样在测试温度下保温30 min后随炉冷却。炉温降至室温，取出试样支架，测量试样最低点离支架底部的高度h_2，精确至0.5 mm。热变形率（ε）根据以下公式计算：

$$\varepsilon = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \times 100\% \quad (1)$$

利用三点弯曲方法测定样品的室温抗弯强度，水溶蜡样品的抗弯强度根据以下公式计算：

$$R = \frac{3PL}{2ab^2} \quad (2)$$

式中：R为水溶蜡样品的抗弯强度，P为样品断裂时所承受的载荷，L为三点弯曲设备两个支点之间的距离，a为样品的宽度，b为样品的厚度。

采用场发射扫描电子显微镜（Inspect F50，美国赛默飞世尔科技公司）对水溶蜡样品微观结构进行表征。

2 结果与讨论

2.1 SiC 含量对水溶蜡型芯微观组织和性能的影响

图1显示了不同SiC含量的水溶蜡型芯样品在三点弯曲测试时的应力-应变曲线。从曲线的峰值应力变化可以看出，0.9wt.% SiC型芯试样的峰值应力最高，约为23 MPa，显著高于其他三组试样。相比之下，无SiC试样的峰值应力最低，约为14.5 MPa；0.6wt.% SiC和1.2wt.%SiC试样的峰值应力分别约为16.5 MPa和17.5 MPa。随着SiC含量从0增加至0.9wt.%，材料的峰值应力呈明显上升趋势，表明适量引入SiC能够有效提升基体的承载能力。这一增强效果主要归因于SiC对基体的强化作用，适量SiC与蜡基体形成良好界面结合，颗粒起“物理钉扎”作用，限制基体分子链在外力作用下的滑移与变形，从而提升整体承载能力[17]。然而，当SiC含量进一步增加至1.2wt.%时，峰值应力反而下降，低于0.9wt.% SiC试样，但仍高于0组和0.6wt.%组。这是由于SiC含量过高时，颗粒团聚倾向增大，反而引入应力集中和界面缺陷，导致承载能力下降。综上所述，由于SiC物理钉扎强化作用，0.9wt.%SiC样品的峰值应力最高，具有最佳的强化效果，而进一步增加SiC的含量可能导致颗粒团聚、界面结合弱化或应力集中等，从而减弱了SiC颗粒对水溶蜡型芯的增强效果。

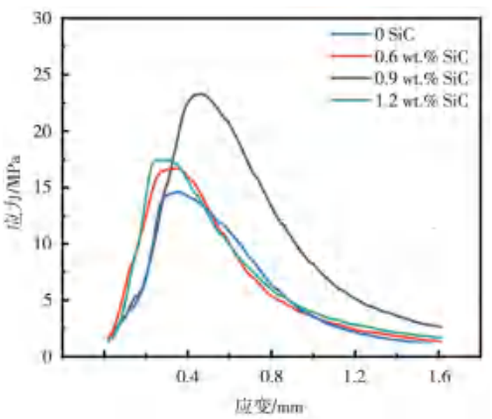


图1 不同SiC含量水溶蜡型芯的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of the water-soluble wax cores with different SiC contents

图2显示了不同成分水溶蜡型芯室温抗弯强度。如图所示，未添加SiC的S1水溶蜡型芯的抗弯强度约为12 MPa，此时水溶蜡型芯基体中PEG、甘油和丙三醇等熔融后包覆住尿素、碳酸氢钠等填料颗粒，冷却凝固后形成连续相，为坯体提供强度，但PEG、甘油和丙三醇强度有限。当SiC含量增加至0.6%（S2）时，抗弯强度提升至约13 MPa，增幅约为8.3%，当SiC含量进一步增加至0.9%（S3）时，抗弯强度达到峰值，约为13.5 MPa，较S1提升了12.5%。然而，当SiC含量继续增加至1.2%（S4）时，抗弯强度出现下降，降至约12.8 MPa，虽仍略高于S1，但已明显低于S2和S3水平。这是由于添加的SiC与填料（碳酸氢钠、碳酸钠等）形成颗粒骨架，提高了型芯的刚度、抗弯强度。SiC作为刚性陶瓷颗粒，均匀分布于水溶蜡型芯基体

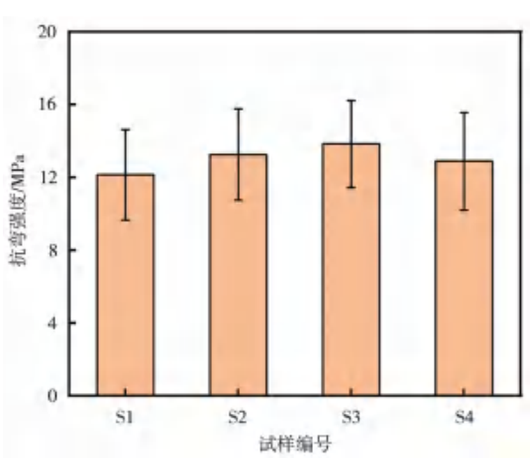
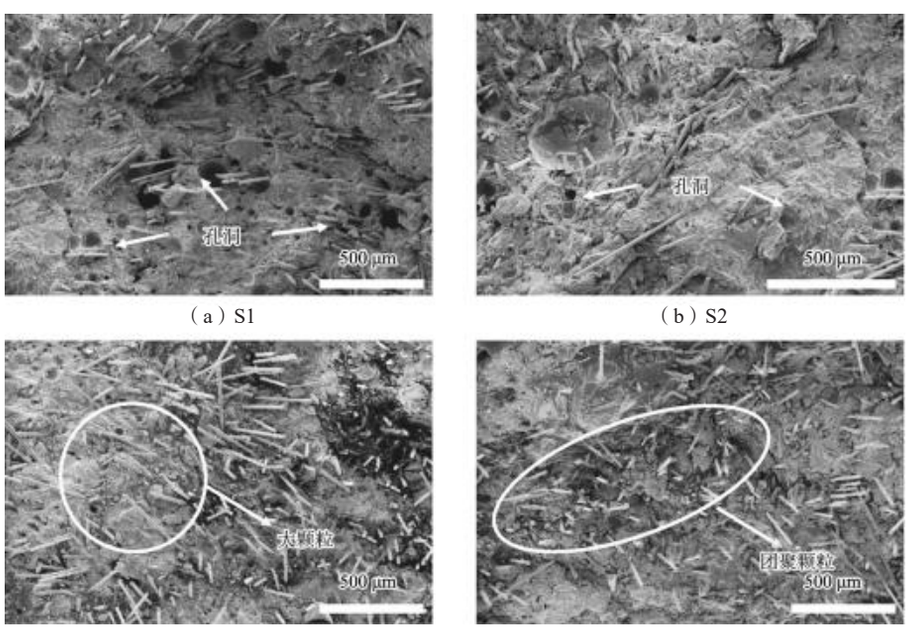


图2 不同成分水溶蜡型芯室温抗弯强度

Fig. 2 Room-temperature flexural strengths of the water-soluble wax cores with different formulations

中，能够有效钉扎基体内部的微裂纹扩展。同时，SiC颗粒可填充基体固化过程中产生的孔隙，降低缺陷密度，从而提高致密性与强度[18]。当SiC过量（1.2%）时，颗粒团聚倾向加剧，导致应力集中，反而使力学性能下降。

图3显示了不同SiC含量水溶蜡型芯的断口形貌。如图3（a）所示，未添加SiC的S1试样的基体蜡料断口呈现典型的脆性断裂特征，且存在大量孔洞，表明纯基体材料的断裂韧性较差，但添加的碳化硅起到了较好的增韧增强作用。当SiC含量为0.6%时，如图3（b）所示，SiC颗粒分散于基体中，对石蜡基体有一定的填充和强化效果，断口更致密，但增强有限。随着SiC含量增加至0.9%，如图3（c）所示，SiC颗粒有效填补石蜡基体的孔隙，形成增强网络结构，增加了基体的致密度。该网络作为增强骨架，能够有效传递和分散外部载荷，抑制裂纹的萌生与扩展，从而显著提高材料的抗弯强度，这与图2中抗弯强度的变化规律相一致，同时也印证了图1中峰值应力随SiC含量变化的趋势。SiC的加入有两种核心增韧机制：其一是桥接与拔出效应，SiC颗粒在裂纹尖端承受载荷并横跨裂纹面形成桥接，有效消耗裂纹扩展所需能量并延迟裂纹扩展；其二是SiC颗粒引入的残余应力增韧，SiC填充在石蜡网络结构中，给石蜡基体内部引入了残余应力，有助于抑制裂纹扩展[19]。然而，当SiC含量进一步提高至1.2%时，如图3（d）所示，断口表面出现明显的颗粒团聚现象，过多的SiC颗粒在局部区域堆积，形成缺陷，导致应力集中，从而削弱了材料的力学性能。综上所述，适量的SiC（0.9%）添加能够显著提高水溶蜡型芯的力学性能，形成均匀的SiC增强网络，从而有效改善材料的抗裂纹扩展能力。而过高含量的SiC则会因颗粒团聚而破坏石蜡基体网络结构，导致性能下降，这将是SiC增强水溶蜡材料进一步优化的重要突破点。



（a）S1　（b）S2

（c）S3　（d）S4

图3　不同SiC含量的水溶蜡型芯断口形貌

Fig. 3 Facture morphologies of the water-soluble wax cores with different SiC contents

图4显示了不同SiC含量的水溶蜡型芯热变形率的测试结果。如图所示，未添加SiC的S1水溶蜡型芯样品的热变形率最大，约为27.5%，未强化的水溶蜡型芯样品在型芯注射成形过程中会出现明显的变形。这主要归因于水溶蜡型芯样品中有机粘结剂组分在加热时易发生软化、分解或熔融，导致基体结构失去刚性支撑，产生显著的热蠕变和塑性变形。当SiC含量增加至0.6%（S2）时，热变形率急剧下降至约16.5%，降幅高达40%。这一显著改善是由于SiC具有优异的高温稳定性和极高的弹性模量，作为硬质骨架分散于基体中，能够有效抑制基体在高温下的软化流动，并且SiC颗粒与基体之间形成的物理嵌合作用，增强了复合材料的强度，阻碍了加热过程中的软化和变形。当SiC含量进一步增加至0.9%（S3）时，热变形率继续降低至约12%，较S1降幅达到56.4%。此时SiC颗粒在基体中形成了较为完善的增强网络结构，载荷和热应力能够通过增强相有效分散，基体的抗热变形能力进一步提高。然而，当SiC含量继续增加至1.2%（S4）时，热变形率出现反常回升，增至约15%，虽仍优于S1和S2样品，但已明显高于S3。这一现象是由于SiC颗粒在基体

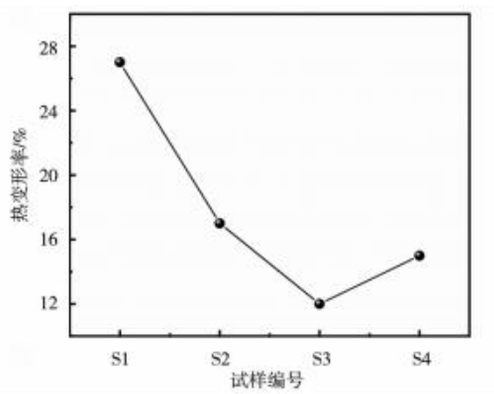
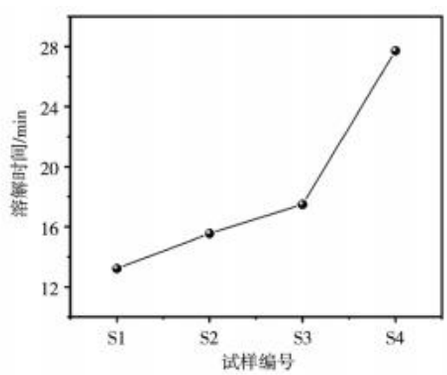


图4 不同SiC含量的水溶蜡型芯热变形率测试结果

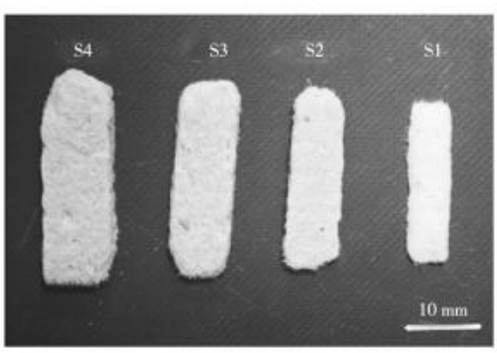
Fig. 4 Test results of thermal deformation rates of the water-soluble wax cores with different SiC contents

中分散均匀性下降，局部团聚的SiC导致增强网络出现缺陷，加热时团聚体与基体界面处易产生应力集中，成为形变和裂纹源。

图5显示了不同SiC含量的水溶蜡型芯样品在pH=2溶液中的溶解性和溶解5 min时的样品实物图。如图5（a）所示，S1样品溶解时间最短，约为13 min，此时水溶蜡型芯样品具有良好的亲水性和孔隙连通性，酸溶液能快速渗透并溶蚀材料，表现出最优的水溶性。当SiC含量增加至0.6wt.%（S2）和0.9wt.%（S3）时，溶解时间分别延长至约15.5 min和17.5 min，较S1分别增加了19.2%和34.6%。这一阶段的溶解时间增幅相对平缓，说明在SiC含量较低时，SiC颗粒均匀分散于水溶性石蜡型芯中，物理填充了基体的孔隙，同时SiC本



（a）不同SiC含量的水溶蜡型芯样品完全溶解需要的时间



（b）水溶蜡型芯样品溶解5 min时样品实物图

图5 不同SiC含量水溶蜡型芯溶解性（pH=2）

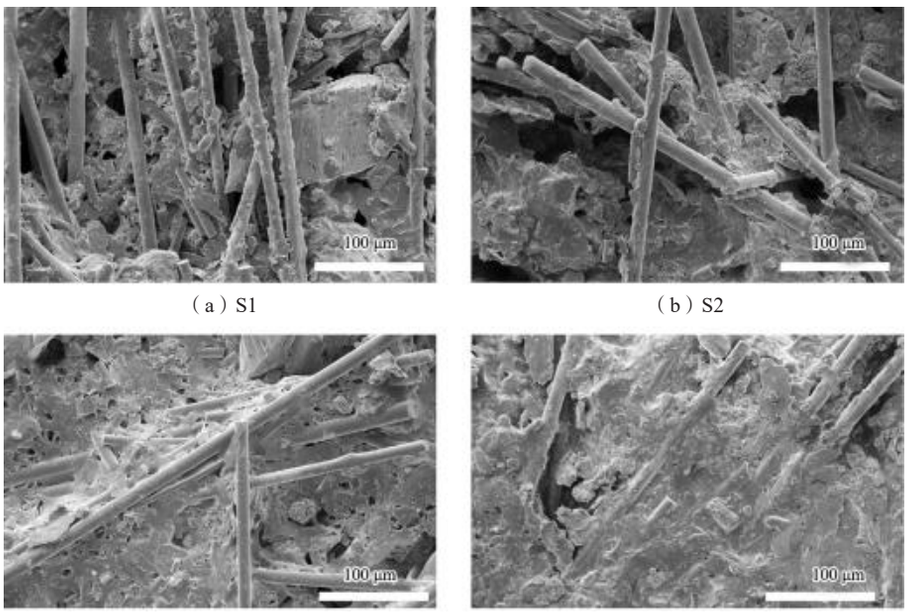
Fig. 5 Solubilities of the water-soluble wax cores with different SiC contents (pH=2)

身具有疏水性，在一定程度上阻碍了酸溶液在基体中的渗透和扩散，但对整体溶蚀过程的影响不大。当SiC含量进一步提高至1.2wt.%（S4）时，溶解时间急剧增加至约28 min，较S3样品增幅高达60%，较S1样品增幅更是达到115.4%，型芯的水溶性显著下降。图5（b）显示了不同SiC含量的水溶蜡型芯样品溶解5 min时的样品实物图，也呈现了与图5（a）一致的趋势。这是由于高含量SiC颗粒在基体中形成更为致密的物理阻挡层，显著阻碍了酸溶液渗透路径。当SiC颗粒含量过高时，它的团聚效应增强，导致基体局部致密化，孔隙连通性大幅下降。

图6显示了不同SiC含量的水溶蜡型芯样品溶解后的表面形貌。由图可知，未添加SiC的S1试样，如图6（a）所示，表面呈现出严重的石蜡基体溶解孔洞，大量纤维从基体中裸露或脱粘，基体形成明显的连通孔洞与疏松结构。添加0.6% SiC后，如图6（b）所示，试样表面的石蜡基体残留量明显增加，纤维裸露或脱粘现象减弱，纤维表面粘连，此时SiC颗粒在基体中形成非连续的三维网络结构，对溶解介质的渗透起到一定阻碍作用，基体溶解程度较S1降低。当SiC含量增至0.9%时，如图6（c）所示，样品表面更为致密，纤维大部分仍被基体包裹，少量纤维暴露，SiC周围的石蜡网络结构细密，溶解性降低。进一步增加SiC含量至1.2%, 如图6（d）所示，试样表面纤维几乎完全被基体包裹，极少出现纤维拔出现象，纤维表面附着大量石蜡，材料溶解程度最低，表面最为致密平整，此时SiC颗粒在基体中形成了致密且连续的三维网络结构，该网络阻挡了溶解介质的侵入，显著降低了水溶型芯的溶解性。

2.2 pH 值和温度对 SiC 增强石蜡型芯水溶解行为的影响

图7显示了0.9wt.%SiC含量水溶蜡型芯在不同pH值条件下的溶解性能。试验结果表明，该型芯材料的溶解时间随pH值的升高呈显著递增趋势。在强酸性环境（pH=1）下，型芯材料表现出最优的溶解性能，溶解时间约为16 min，当pH值升高至2时，溶解时间略有增加（约17.5 min）。然而，当pH值进一步升高至3时，



（a）S1　（b）S2

（c）S3　（d）S4

图6　不同SiC含量的水溶蜡型芯样品的水溶解表面形貌

Fig. 6 Surface morphologies of the water-soluble wax core samples with different SiC contents after water dissolution

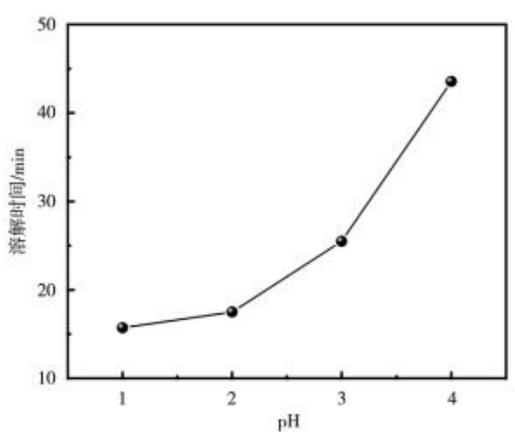


图7　0.9wt.% SiC含量水溶蜡型芯样品在不同pH值中的溶解性

Fig. 7 Solubilities of the water-soluble wax cores with 0.9wt.% SiC content at different pH

溶解时间显著延长至约25.5 min，较pH=2条件下增加了约45.7%。在pH=4的弱酸性条件下，型芯材料的溶解时间急剧增加至约43.5 min，达到pH=1条件下的近2.7倍。上述pH值对溶解行为的显著影响，其深层机理可从酸催化水解反应角度加以阐释。水溶蜡型芯的溶解过程包含物理溶解与化学水解两个协同过程，在酸性条件下以酸催化水解为主导。首先，在物理溶解层面，水溶蜡基体中的PEG（聚乙二醇）、甘油等水溶性组分具有亲水性，水分子可通过毛细管作用渗入型芯内部的微孔和孔隙网络，将可溶性组分逐步溶出。更为关键的是酸催化化学水解反应：在强酸性环境中，H^+首先与聚乙二醇分子链中醚键（C—O—C）上的氧原子结合，形成盐中间体（质子化醚）：

PEG-H^+配合物形成如下：

$$R—O—R+H^+ \rightarrow R—O^+(H)—R \quad (3)$$

随后，水分子作为亲核试剂进攻质子化醚键的碳原子，引发C—O键断裂，PEG大分子链降解为分子量较低的聚乙二醇低聚物和乙二醇单体。

酸催化水解反应：

$$R—O^+(H)—R+H_2O \rightarrow R—OH+HO—R+H^+$$

在酸性条件下，总反应可表示为：

$$-(CH_2CH_2O)\sim n\sim -+nH_2O \longrightarrow nHO—CH_2—CH_2—OH \quad (4)$$

即聚乙二醇在酸性条件下水解为乙二醇（$C_2H_6O_2$）。乙二醇具有极高的水溶性，可迅速从型芯表面向溶液中扩散。H^+在反应中起到催化剂作用，反应前后H^+不消耗，因此低pH（高H^+浓度）可显著加速水解反应速率。这一催化效应降低了水解反应的活化能，使得水溶性高分子主链中的可水解基团发生断裂，大分子降解为分子量较低的可溶性小分子，从型芯表面向溶液主体扩散[20]，加速石蜡型芯材料的溶解脱除过程。此外，型芯中填料的化学溶解也起到协同作用：尿素（$CO(NH_2)_2$）和碳酸氢钠（$NaHCO_3$）等水溶性填料在酸性条件下发生溶解或分解：

$$NaHCO_3+H^+ \rightarrow Na^+ + CO_2\uparrow + H_2O \quad (5)$$

产生的CO_2气体有助于破坏型芯内部结构，进一步加速溶解过程。随着pH值升高，溶液中H^+浓度降低，这种催化作用随之减弱，水解反应速率显著下降，导致型芯中水溶性组分难以有效断裂和溶出，因此溶解时间明显延长[21]。

图8显示了含0.9wt.%SiC的水溶性型芯样品在pH=1的酸性溶液中、不同温度条件下的溶解性变化规律。由图可知，水溶性型芯样品的溶解性随温度升高呈现先降低后趋于平稳的变化趋势。在15 ℃时，水溶性型芯样品的溶解时间约为15.8 min，此时溶解速率较慢。当温度升高至25 ℃时，溶解时间降至约11.2 min，降幅达29.1%，表明温度升高对水溶性型芯样品的溶解过程具有显著的促进作用。继续升温至35 ℃时，溶解时间进一步降低至约6.9 min，但降幅（38.4%）相较于前一阶段有所减缓。当温度从35 ℃继续升高至45 ℃时，溶解时间仅略微下降至6.7 min，基本保持稳定。在较低温度区间（15~35 ℃），溶解反应的本征动力学占据主导地位，H^+活度及水溶性组分的水解反应速率随温度升高而加速，型芯表面不断被侵蚀并暴露出新的反应界面，溶解速率较快。同时，温度升高还能促进型芯基体对水分子的吸附能力，进一步提高溶解速率[22]。然而，当温度超过35 ℃后，型芯外层的可溶性组分在短时间内大量溶出，溶液中的溶解产物浓度迅速升高，溶质在固液界面附近的扩散路径显著延长，溶解过程逐渐转变为由溶质产物在微孔通道内的扩散速率控制。这一现象与Bakan等[23]在进行氧化铝粉末的水溶性粘结剂注射成形及其溶剂脱脂动力学研究的结果类似。

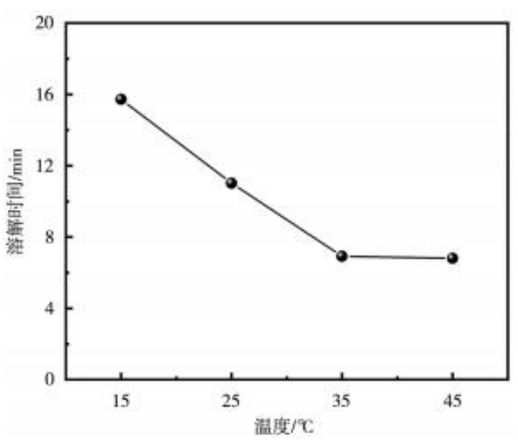


图8 0.9wt.% SiC增强水溶蜡型芯在不同温度酸性溶液（pH=1）的溶解性测试结果

Fig. 8 Solubility test results of the 0.9wt.% SiC-reinforced water-soluble wax cores in acidic solutions (pH =1) at different temperatures

3 结论

（1）当SiC含量为0.9wt.%时，水溶蜡型芯综合性能最优，室温抗弯强度为13.5 MPa，热变形率降至12%。SiC颗粒的“物理钉扎”作用、桥接与拔出效应等起到显著的强化效果。

（2）SiC的引入减弱了水溶蜡型芯在酸溶液中的水溶解特性，SiC作为疏水性刚性颗粒，物理填充基体孔隙并形成不连续的三维网络结构，阻碍了酸溶液的渗透与扩散路径。

（3）pH值和温度对水溶蜡型芯的水溶解行为具有显著调控作用：pH值越低溶解越快，温度在15~35 ℃可加速溶解，超过35 ℃后溶解速率趋于稳定。通过降低pH值和适当升温（≤35 ℃）可有效调控脱芯速度。

（4）综合力学性能与水溶特性优选出0.9wt.% SiC增强水溶蜡材料，宜采用酸性溶解液（pH=1~2）、溶解温度约35 ℃，实现该水溶蜡型芯的有效脱除。

参考文献：

[1] 王利平. 涡轮叶片冷却结构传热性能的数值研究 [D]. 南京：南京航空航天大学，2012.

[2] Du W，Zhou Y，Luo L，et al. Effect of compartmentalization design of the internal coolant cavities in chord-wise on flow and heat transfer characteristics of double-wall rotor blades [J]. Applied Thermal Engineering，2025，281：128656.

[3] 周源昊，杜巍，罗磊，等. 双层壁涡轮冷却叶片高效冷却结构的设计方法 [J]. 推进技术，2026，47（2）：130-140.

[4] Zheng N，Hu L，Zhou H，et al. Numerical study on the thermofluid performance of a biomimetic double-wall cooling design for turbine blade protection [J]. Applied Thermal Engineering，2026，288：129505.

[5] 赵效忠，程涛，李建华，等. 增材制造技术在单晶涡轮叶片成形中的应用现状 [J]. 铸造，2023，72（10）：1235-1243.

[6] Chauhan A S，Anirudh B，Satyanarayana A，et al. FEA optimization of injection parameters in ceramic core development for investment casting of a gas turbine blade [J]. Materials Today：Proceedings，2020，26：2190-2199.

[7] Gromada M，Świeca A，Kostecki M，et al. Ceramic cores for turbine blades via injection moulding [J]. Journal of Materials Processing Technology，2015，220：107-112.

[8] Rougier L，Bechelany M，Jaquet V，et al. Foundry mold for the formation of turbine blade ceramic cores：US202017596167A [P]. 2024-08-27.

[9] 张朋，李鑫，季惠明，等. 多层壁陶瓷型芯内腔熔芯的制备及性能研究 [J]. 重庆大学学报，2021，44（10）：46-54.

[10] 王程成，贺德龙，鞠梦婷，等. 注射成型水溶性陶瓷型芯技术 [J]. 航空材料学报，2015，35（4）：83-95.

[11] Jiang W，Dong J，Lou L，et al. Preparation and properties of a novel water soluble core material [J]. Journal of Materials Science & Technology，2010，26（3）：270-275.

[12] 谭培松. 水溶蜡型芯在精密铸造中的应用 [J]. 特种铸造及有色合金，2019，39（1）：57-59.

[13] 张贺，刘永娜，王春钢. 水溶蜡型芯的脱除工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金，2025，45（2）：317-320.

[14] Zhou T T，Niu S X，Li X，et al. The contribution of graphite

powder to water-soluble cores in investment casting [J]. Journal of Physics：Conference Series，2025，2956：012049.

[15] Gao C，Chen J，Huang C，et al. Pressureless solid-state sintering of SiC ceramics prepared by material extrusion 3D printing [J]. Ceramics International，2025，51（21）：32660–32670.

[16] Kumar M S，Yang C H，Pulikkalparambil H，et al. Improving thermal stability and dynamic mechanical properties of eco-friendly bamboo fiber-reinforced epoxy composites with sic particle integration [J]. Fibers and Polymers，2025，26（7）：3109–3121.

[17] Ji S，Zhang S，Wang Z，et al. High-impact performance and thermal properties of polyimine nanocomposites reinforced by silicon carbide nano-whiskers [J]. Materials，2023，16（13）：4587.

[18] Wu D，Lu F，Zhao D，et al. Effect of doping SiC particles on cracks and pores of Al_2O_3-ZrO_2 eutectic ceramics fabricated by directed laser deposition [J]. Journal of Materials Science，2019，54：9321–9330.

[19] Ren M，You X，Luo H，et al. Enhanced mechanical performance and residual stress analysis of SiC_f/SiC joints via reaction bonding with interconnected SiC nanowires network [J]. Ceramics International，2025，51（19）：29292–29302.

[20] Hori K，Ikenaga Y，Arata K，et al. Theoretical study on the reaction mechanism for the hydrolysis of esters and amides under acidic conditions [J]. Tetrahedron，2007，63（5）：1264–1269.

[21] Hocker S，Rhudy A K，Ginsburg G，et al. Polyamide hydrolysis accelerated by small weak organic acids [J]. Polymer，2014，55（20）：5057–5064.

[22] Ning X，Zuo K，Li Y，et al. Study on the effect and mechanism of mold temperature and ceramic particle alumina on the strength and water solubility of NaCl-Na_2CO_3 and NaCl-Na_2SO_4 composite cores [J]. International Journal of Metalcasting，2024，19：1884–1902.

[23] Bakan H I. Injection moulding of alumina with partially water soluble binder system and solvent debinding kinetics [J]. Materials Science and Technology，2007，23（7）：787–791.

（编辑：刘冬梅，ldm@foundryworld.com）