

团体标准  
《熔模精密铸造硅基陶瓷型芯设计规范》  
编制说明书

2023 年 9 月

# 《熔模精密铸造硅基陶瓷型芯设计规范》编制说明

## 一、工作简况

### 1、任务来源

2023年7月6日，中国国际科技促进会标准化工作委员会发布“关于开展《熔模精密铸造硅基陶瓷型芯设计规范》团体标准立项通知”（【2023】中科促标字第605号），项目计划编号为CI2023234。

### 2、制定背景

氧化硅基陶瓷型芯是用以形成熔模铸造铸件的复杂内腔结构的消耗性特种陶瓷产品，其中以航空发动机和燃气轮机（简称“两机”）涡轮叶片用陶瓷型芯的技术难度最大。涡轮叶片采用以镍基和钴基为主的耐高温合金，在定向炉铸造过程中，不仅要求陶瓷型芯在1500℃以上的浇铸温度下耐受不少于3h，更要求在高温条件下陶瓷型芯不与铸造合金发生反应，这对陶瓷型芯这种特种陶瓷的耐高温强度提出很高的要求。陶瓷型芯制备技术作为航空发动机制造关键技术之一，其技术内容和标准信息严格受国外限制，国外如PCC、普惠等经过长期技术积淀，形成了企业标准且并未公开。

近年来，伴随我国航空发动机技术的快速发展，许多定向晶叶片、单晶叶片逐渐批量定型，而传统等轴晶叶片用陶瓷型芯无法应用于定向晶及单晶叶片生产，新型高性能陶瓷型芯也在快速发展，关于陶瓷型芯的设计、陶瓷型芯模具设计和制造、陶瓷型芯修复方法等都有了长足发展，但目前还无对应标准。本单位长期从事高性能硅基陶瓷型芯研制，与中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司、中国航发贵阳航发精密铸造有限公司等陶瓷型芯主要应用主机厂合作，与国内625研究所、606研究所等多家涡轮叶片设计单位合作，与江苏智疆航空科技有限公司等多家陶瓷型芯专业化生产厂合作，倾力于研发用于定向晶叶片和单晶叶片的高性能陶瓷型芯，部分技术和产品已经应用于国内WS10、WS15、WS20等关键发动机生产中。然而，目前关于高性能陶瓷型芯的生产和检验标准不一致，各专业生产厂和产品使用主机厂对陶瓷型芯工艺、性能等认识差距较大，很多单位甚至没有厂内企业标准。因此，突破国外技术封，解决我国航空发动机高端装备卡脖子问题，保障我国先进航空发动机研制，亟需建立适用于定向晶叶片、单晶叶片生产的高性能陶瓷型芯团体标准，约定行业技术和检验规范，切实保障我国高性能叶片和陶瓷型芯的顺利设计、研发、投产。

### 3、起草人及分工

本标准起草单位有：西安交通大学、中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司、北京嘉泰信德科技有限公司、中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司、深圳市万泽航空科技有限责任公司、中国航发南方工业有限公司、咸阳勃力模具制造有限公司、中科院沈阳金属研究所、中国航发湖南动力机械研究所、西安智疆航空科技发展有限公司、江苏智疆航空科技发展有限公司、东莞市力泉机械有限公司、江苏海格新材料有限公司。

本标准主要起草人有：张航、郭馨、郭铨义、张鸿、朱宏斌、张红利、郭新力、刘孝福、魏剑辉、董斌儒、王雷、郝新、李金国、蒋康河、陈文彬、崔锴、钮计芹、曹丽丽、秦胜伟、李有良、钮宇婷。

人员标准编制：张航

标准格式修订：郭馨、郭铨义

参与标准内容修订：张鸿、朱宏斌、张红利、郭新力、刘孝福、魏剑辉、王雷、郝新、李金国、蒋康河、崔锴、钮计芹、曹丽丽、秦胜伟、李有良、钮宇婷

### 4、编制过程说明

#### 4.1 起草阶段

##### 4.1.1 成立标准制定工作组

该团标工作组于2023年6月12日成立，主要单位包括熔模精密铸造及硅基陶瓷型芯研究单位西安交通大学；熔模精密铸造陶瓷型芯结构设计和使用单位中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司、中航工业南方航空工业（集团）有限公司、深圳市万泽航空科技有限责任公司等单位；熔模精密铸造陶瓷型芯研发和制造单位北京嘉泰信德科技有限公司（投资机构）、江苏智疆航空科技发展有限公司等；熔模精密铸造陶瓷型芯模具设计和制造单位咸阳勃力模具制造有限公司等单位；熔模精密铸造陶瓷型芯原材料供应商如江苏海格新材料有限公司等单位。

##### 4.1.2 确定工作计划

第一阶段：2023年4月-6月，团标工作组组建阶段；

第二阶段：2023年7月-8月，团标内容撰写、整理、征求意见阶段；

第三阶段：2023年9月-10月，团标内容审查、发布阶段；

##### 4.1.4 形成标准草案及征求意见稿

2023年8月，工作组起草完成标准草案与编制说明，经进一步调整与规范，形成标准征求意见稿。

#### 4.2 征求意见阶段

9月底，标准由中国国际科促会标准化工作委员会在全国团体标准信息平台，面向社会进行公开征求意见。同时由标准编制工作组组织向相关机构、单位进行定向征求意见。

#### 4.3 审查阶段

#### 4.4 报批阶段

## 二、标准编制原则、主要内容及其确定依据，修订标准时，还包括修订前后技术内容的对比

### 1、标准的编写原则

本标准制定主要基于对硅基陶瓷型芯的设计单位、生产单位、使用单位等长期的设计理论、制造理论和应用经验进行归纳和整理，具有行业实用性特点。部分内容，比如双层壁陶瓷型芯模具设计要求、陶瓷型芯修复设计相关要求等内容属于行业最前沿技术的初步约定，符合行业先进性特点。

### 2、提出本标准的依据

标准技术内容的依据主要包括文献资料查阅、实验研究成果、理论分析、经验总结。以下文献资料，对本标准的编制起到了重要的参考作用：

- [1] Qiaolei L I , Yue G U , Xuehua Y U ,et al.Effect of Sintering Temperature on Surface Morphology and Roughness of 3D-printed Silicon Ceramic Cores[J].Journal of Inorganic Materials, 2022, 37(3):325-332. DOI:10.15541/jim20210654.
- [2] Zhang H , Lu Z , Ji Z ,et al.Basis for the alkaline removal process design of the alumina-based ceramic core[J].Nippon Seramikkusu Kyokai Gakujutsu Ronbunshi/Journal of the Ceramic Society of Japan, 2017, 125(8):616-622. DOI:10.2109/jcersj2.17057.
- [3] Xu Z , Zhong J , Su X ,et al.Experimental study on mechanical properties of silica-based ceramic core for directional solidification of single crystal superalloy[J].Ceramics International, 2017, 44(1):394-401. DOI:10.1016/j.ceramint.2017.09.189.
- [4] 康海峰,李飞,赵彦杰,等.镍基合金空心叶片浇铸用硅基陶瓷型芯的制备及性能[J].航空材料学报, 2013. DOI:CNKI:SUN:HKCB.0.2013-04-003.

- [5] Wang B Q , Yu J B , Ren Z M ,et al.Fabrication and Properties of Porous Alumina-based Ceramic Core[J].Journal of Inorganic Materials, 2012, 27(3):239-244. DOI:10.3724/SP.J.1077.2012.00239.
- [6] Yong-Cheng L , Zhi-Yi L , Min G ,et al.Effect of sintering temperature on properties of silica based ceramic core[J].Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2011, 16(4):591-596. DOI:10.1016/j.jtbi.2007.09.009.
- [7] 龙永成,刘志义,郭敏,等. 烧结温度对硅基陶瓷型芯性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2011, 16(4):6. DOI:10.3969/j.issn.1673-0224.2011.04.020.
- [8] Qin Y , Pan W .Effect Of Silica Sol On The Properties Of Alumina-based Ceramic Core Composites[J].Materials Science and Engineering, 2009.
- [9] Qin Y , Pan W .Effect of silica sol on the properties of alumina-based ceramic core composites[J].Materials Science & Engineering A, 2009, 508(1-2):71-75. DOI:10.1016/j.msea.2008.12.016.
- [10] Kruglov E P , Kochetova G K .Improvement of a technological process for ceramic core removal out of internal cavities of aircraft GTE turbine blade castings[J].Russian Aeronautics, 2007, 50(2):227-229. DOI:10.3103/s1068799807020201.
- [11] 薛明曹腊梅. 单晶空心叶片用AC-2陶瓷型芯的组织 and 性能研究[J]. 材料工程, 2002, 000(004):33-34,37.
- [12] 赵红亮,楼琅洪,胡壮麒. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>纳米复合陶瓷型芯材料的制备与性能[J]. 材料研究学报, 2002, 16(6):5. DOI:10.3321/j.issn:1005-3093.2002.06.019.
- [13] Sato,M,Kobayashi,et al.Final report of the key technology development program for a next-generation high-temperature. [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1997, 119(3):617-617.
- [14] Wang L Y , Hon M H .The Effect of Cristobalite Seed on the Crystallization of Fused Silica Based Ceramic Core - A Kinetic Study[J].Ceramics International, 1995, 21(3):187-193. DOI:10.1016/0272-8842(95)90909-3.
- [15] 曹腊梅. 国外定向和单晶空心叶片用型芯的工艺特点[J]. 材料工程,

1995(5):3. DOI:JournalArticle/5aee0098c095d710d410ce50.

[16] 王景周. 定向凝固气冷叶片用陶瓷型芯高温特性研究[J]. 中国科学院金属研究所, 1989. DOI:http://210.72.142.130/handle/321006/17417.

### 3、制定本标准的基础

西安交通大学长期开展包括熔模精密铸造及硅基陶瓷型芯相关研究, 在氧化硅陶瓷型芯研制、氧化铝陶瓷型芯研制、增材制造陶瓷型芯研制、陶瓷型芯脱芯技术研究、定向凝固陶瓷型芯应用等多方面开展了深入研究, 发表论文30多篇, 授权专利20多项。目前, 建立有陶瓷型芯浆料制备系统、陶瓷型芯烧结平台、陶瓷型芯性能分析系统、陶瓷型芯组织和成分分析设备、陶瓷型芯定向凝固浇铸系统、陶瓷型芯脱芯系统、陶瓷型芯激光修复系统等多台套研发平台, 为硅基陶瓷型芯相关标准制定提供了软硬件基础。

标准共同起草单位中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司、中国航发南方工业有限公司、深圳市万泽航空科技有限责任公司在陶瓷型芯结构设计、陶瓷型芯使用方面具有长期的研究和生成经验, 也将是本标准未来主要适用单位。标准共同起草单位西安智疆航空科技发展有限公司、江苏智疆航空科技发展有限公司等长期从事硅基陶瓷型芯的生产, 负责了我国多型军用发动机叶片陶瓷型芯生产任务, 同时在陶瓷型芯设计和检验方面也积累了丰富的经验。标准共同起草单位咸阳勃力模具制造有限公司为陶瓷型芯模具设计的行业龙头单位, 该单位为我国多型高性能单晶叶片、双层壁气冷叶片、大型航空结构件制备提供了陶瓷型芯模具设计和制造工作, 主要合作单位包括中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司等多家国内叶片主要生产厂。标准共同起草单位江苏海格新材料有限公司在陶瓷型芯高纯氧化硅原材料领域具有长期的工作经验和批量化生成能力, 最先进氧化硅粉体达到5N级高纯度, 是国内陶瓷型芯原材料主要供应商。

### 4、实验内容

主要实验内容包括(1)陶瓷型芯室温和高温力学性能检测, 主要在西安交通大学开展;(2)陶瓷型芯与金属反应性实验, 主要在中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司、中国航发南方工业有限公司、深圳市万泽航空科技有限责任公司等单位开展;(3)陶瓷型芯外表面缺陷修补相关实验, 主要在西安交通大学开展;(4)陶瓷型芯模具设计相关实验, 主要在咸阳勃力模具制造有限公司开展。

### 5、实际应用效果

陶瓷型芯相关标准及其初始企业标准在各单位应用良好, 预计将向陶瓷型芯行业推广。

## 三、试验验证的分析、综述报告, 技术经济论证, 预期的经济效益、社会效

## 益和生态效益

### 1、主要试验或验证的分析

- 1) 陶瓷型芯最薄壁厚度尺寸及精度设计指标（最小壁厚 $\geq 0.4\text{mm}$ ，尺寸精度不高于 $\pm 0.04\text{mm}$ ），主要基于陶瓷型芯原始粉料最大粒径为 $130\ \mu\text{m}$ ，单层壁厚至少填充3层最大粒径粉料，最小壁厚大于等于 $0.4\text{mm}$ ，尺寸精度要求为行业通识要求。
- 2) 陶瓷型芯最薄壁长度不大于 $15\text{mm}$ ，主要考虑陶瓷型芯最薄壁长度为沿浆料流进方向可填充的长度或深度。
- 3) 陶瓷型芯最小圆柱不小于 $0.8\text{mm}$ ，成形精度不高于 $\pm 0.06\text{mm}$ ，主要考虑浇铸强度，陶瓷成形填充能力、烧结后强度等多因素。
- 4) 高刚玉（99.9%）成形陶瓷棒最小尺寸不小于 $\phi 0.5\text{mm}$ ，采用高纯氧化硅（99.99%）成形石英棒最小尺寸不小于 $0.8\text{mm}$ ，主要考虑陶瓷型芯成形能力、预埋件强度、脱芯能力等因素影响。
- 5) 陶瓷型芯最小圆柱直径（ $\phi$ ）不小于 $0.3\text{mm}$ ，成形精度不高于 $\pm 0.05\text{mm}$ ，主要考虑金属成形填充能力等因素影响。
- 6) 陶瓷型芯条形通孔每 $45\text{mm}$ 设置加强筋，加强筋厚度不小于 $1\text{mm}$ ，加强筋宽度不小于 $3\text{mm}$ ，加强筋成形精度不做要求，主要考虑加强筋强度和修芯方便性设计。
- 7) 芯头一端与型壳烧结固定（锁死端），另一端在平行型芯长度（ $L_1$ ）方向预留自由伸缩长度，自由移动距离大于 $\pm L_1 \times 2\%$ ，主要氧化铝型壳膨胀系数大于氧化硅型芯膨胀系数 2 个数量级，氧化铝型壳从室温到 $1500^\circ\text{C}$ 膨胀量约为 $2\%$ 。
- 8) 陶瓷型芯缺陷去除区几何结构设计，宽度 $w \leq 0.5\text{mm}$ ，底部角 $\theta \leq 60^\circ$ ，主要因为宽度小有利于填补料填入，而角度小有利于与陶瓷型芯基体结合界面面积增加。
- 9) 陶瓷型芯表面孔隙和凹陷缺陷的去除区结构设计，直径 $\phi \geq \phi_c$ ， $\phi_c$ 为裂纹覆盖范围表面最大长度，底部角 $\theta \leq 60^\circ$ ，主要因为去除区要覆盖缺陷位置并且角度小有利于与陶瓷型芯基体结合界面面积增加。
- 10) 单晶陶瓷型芯同炉次试样条室温强化后，室温强度需大于 $35\text{MPa}$ ，室温强度确保压蜡（一般 $6-10\text{MPa}$ ）强度下型芯不至于被压断。
- 11) 单晶陶瓷型芯高温强度不小于 $10\text{MPa}$ ，不大于 $22\text{MPa}$ ，一定高温强度能抵挡常规型壳条件下的金属冲击力，同时强度不能过大，避免再结晶。
- 12) 定向晶陶瓷型芯高温强度不小于 $15\text{MPa}$ ，高温强度不大于 $25\text{MPa}$ ，一定高温强度能抵挡常规型壳条件下的金属冲击力，同时强度不能过大，避免再结晶。

- 13) 等轴晶陶瓷型芯室温强度需大于40MPa，该数值为经验值，等轴晶铸件一般结构较大，压蜡过程冲击较强。
- 14) 单晶及定向晶陶瓷型芯收缩率设计主要考虑生成单位材料体系稳定及行业经验。
- 15) 等轴晶陶瓷型芯收缩率设计应符合以下要求主要考虑行业经验。
- 16) 陶瓷型芯模具浇注系统设计主要基于行业经验和注料压力两方面。
- 17) 陶瓷型芯模具开模方向及分型的设计主要基于陶瓷型芯产品结构特点和取模要求。
- 18) 陶瓷型芯模具冷却系统设计为企业设计标准的拓展。
- 19) 模具材料选择为行业经验。
- 20) 模具加工方式设计由材料和机械加工经验获得。

## 2、预期的经济效果

标准的发布将推动硅基陶瓷型芯的制造单位、模具生产单位、陶瓷型芯使用单位、原材料供应单位等大幅提高产品的一致性和合格率。尤其对模具、产品的验收、让步等有了统一标准。其中，对陶瓷型芯制造单位，预期将提高产品合格率20%以上，按市场流通产品产值算，可实现增收1亿人民币以上。对陶瓷型芯设计和使用单位，预计提高铸件产品合格率30%以上，可实现增收15亿人民币以上。对模具生产单位，降低了因标准不一致的重复性开模和修模，预计节省工作量15%以上，节省经济损失超2000万元，等等。

## 3、真实性验证

无。

## 四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况，或者与测试的国外样品、样机的有关数据对比情况

硅基陶瓷型芯无国际标准，因主要产品保障军方航空发动机制造，因此目前无公布的国内外样品数据。

## 五、以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因

无。

## 六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系

- 1、按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规

则》要求进行编写。

2、 参照相关法律、法规和规定，在编制过程中着重考虑了科学性、适用性和可操作性。

3、 遵守和符合相关法律法规和强制性标准要求。本标准没有规范性引用文件。

## 七、重大分歧意见的处理经过和依据

暂无。

## 八、涉及专利的有关说明

(1) 一种孔隙分布与气氛可控的陶瓷型芯制备方法 (ZL202210509467.3) : 该专利涉及单晶陶瓷型芯制造工艺，直接决定产品的力学性能。

(2) 一种航空发动机多孔层板发散冷却涡轮叶片陶瓷型芯一次成型的方法的使用 (ZL 201410530280.7) : 该专利涉及双层壁陶瓷型芯模具设计方法。

(3) 一种陶瓷型芯的矫形与检测一体化方法与装置 (ZL202210689876.6) : 该专利涉及定向晶陶瓷型芯矫形方法，直接影响产品的精度和性能。

(4) 一种航空发动机叶片用硅基陶瓷型芯的制备方法 (ZL202111419332.X) : 该专利涉及等轴晶陶瓷型芯制备方法，直接影响产品的性能。

## 九、实施标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议

### 等措施建议

标准贯宣，后期采用首先在相应网络平台公开介绍；其次，在学术论文、会议报告、专利申请等学术性途径进行宣传；再次，在部分使用单位，如中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司、中航工业南方航空工业（集团）有限公司、深圳市万泽航空科技有限责任公司等单位招标/采购时要求执行相应标准进行行业影响拓展。

## 十、其他应当说明的事项

无。