



“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学技术著作丛书

陶瓷型芯的制备与使用

赵效忠 著



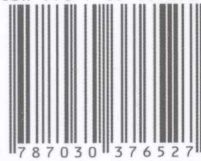
科学出版社

(TF-0091. 0101)

陶瓷型芯的制备与使用

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-037652-7



9 787030 376527 >

科学出版社 工程技术分社
联系电话: 010-64017506
E-mail: niuyufeng@mail.sciencep.com
销售分类建议: 材料

定价: 98.00 元

.. 013052443

TG249.9
05

“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学技术著作丛书

陶瓷型芯的制备与使用

赵效忠 著



TG249.9
05

科学出版社

北京



北航

C1656188

内 容 简 介

本书比较系统地介绍陶瓷型芯从原料选择、成型、烧结到加工、强化的整个制备过程,比较全面地介绍不同种类陶瓷型芯的制备工艺、性能特点及应用情况,比较详细地介绍陶瓷型芯从定位到脱除的整个使用过程,并给出了具体制备与使用的实例。

本书既可作为高等院校无机非金属材料 and 材料加工等相关专业师生的参考书,也可作为从事陶瓷型芯的研制与使用的科研人员和工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

陶瓷型芯的制备与使用/赵效忠著. —北京:科学出版社,2013. 6
(材料科学技术著作丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-037652-7

I. ①陶… II. ①赵… III. ①陶瓷型铸造-研究 IV. ①TG249. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 116195 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:宣 慧
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

骏志印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 6 月第一次印刷 印张:25 1/4

字数:484 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《材料科学技术著作丛书》编委会

顾问 师昌绪 严东生 李恒德 柯俊
颜鸣皋 肖纪美

名誉主编 师昌绪

主编 黄伯云

编委 (按姓氏笔画排序)

千勇	才鸿年	王占国	卢柯
白春礼	朱道本	江东亮	李元元
李光宪	张泽	陈立泉	欧阳世翕
范守善	罗宏杰	周玉	周廉
施尔畏	徐坚	高瑞平	屠海令
韩雅芳	黎懋明	戴国强	魏炳波

序 一

陶瓷型芯是一类性能特殊的结构陶瓷制品，其性能优劣及工程可靠性高低直接影响空心精铸件的合格率、铸造成本和产品质量。作为先进铸造技术内容之一的陶瓷型芯制备技术，对宇航工业、能源工业及铸造工业等有重要的影响。

《陶瓷型芯的制备与使用》一书，比较全面地介绍了陶瓷型芯的性能特点、制备工艺和使用要点，比较客观地反映了该领域国内、外最新的研究成果及发展动向。其特点是：①以应用基础研究和相关专题研究的成果为基础而具有科学性；②以相关专利资料提供的技术思路和方法为依托而具有实用性；③作为将新材料、新工艺、新方法综合应用于陶瓷型芯的制备与使用的工艺复合过程而具有新颖性；④作为无机非金属材料与金属材料的学科交叉和技术集成的新领域而具有专业特色的鲜明性。

希望能在有效控制陶瓷型芯的制备过程而提高陶瓷型芯的工程可靠性，科学评价陶瓷型芯的使用性能而提高陶瓷型芯的使用合理性等方面补充更多的内容。

该书的出版将有利于推动陶瓷型芯的应用研究与实际使用，有利于陶瓷型芯产业的形成和发展，为我国国民经济的发展及国防建设作出贡献。

胡如麒

序 二

航空发动机是飞机的动力源，位于发动机高温、高速和高载荷关键部位的涡轮叶片和导向叶片，因温度交变频繁，受力状态复杂，使用环境恶劣，工作可靠性要求高，稳定工作寿命要求长而被誉为“皇冠上的明珠”。陶瓷型芯虽然不是发动机上的零部件，仅借助其形成叶片的内腔，但其制备技术却一直是高效冷却定向柱晶叶片和单晶叶片精密铸造的“瓶颈”。

我国对陶瓷型芯的研制始于 20 世纪 70 年代中期，已研制成功的有硅基、铝基、锆基等多种陶瓷型芯，满足了新型航空发动机研制与制造的需要。近年来，陶瓷型芯的研制又取得了新的进展，为我国高效冷却叶片的铸造迈上新台阶创造了条件。

作者在分析和总结国内外陶瓷型芯的应用研究与生产实践的基础上，结合自身的工作经验，比较系统地介绍了陶瓷型芯的制备工艺与使用要点，内容新颖、具体、实用，是国内第一本有关陶瓷型芯的专著。该书可以作为从事陶瓷型芯研制与使用的工程技术人员和高等院校相关专业师生的参考资料。

相信该书的出版将为航空发动机和燃气轮机热端部件的发展提供技术支持，有力地推动飞机、坦克、舰艇、车辆的发动机系统和电站、泵站等动力系统的更新换代，对国民经济的发展和国防力量的增强发挥重要作用。

王司栋

前 言

随着航空发动机和工业燃气轮机性能的不断提高,对作为浇注高效冷却单晶叶片转接件的陶瓷型芯提出了更为苛刻的使用要求,这既对陶瓷型芯的性能提出了新的挑战,也为陶瓷型芯技术的发展提供了新的机遇。

我国对陶瓷型芯的研制,始于20世纪70年代中期。经有关科研院所、高等院校和工厂的共同努力,自80年代以来,已研制成功XD-1氧化硅基陶瓷型芯和AC-1、AC-2氧化铝基陶瓷型芯等多种陶瓷型芯,满足了研制新型航空发动机和其他相关领域的需要。进入21世纪以来,一方面,研制陶瓷型芯的单位不断增多,研究队伍不断壮大;另一方面,生产陶瓷型芯的企业逐年增多,装备水平显著提高。随着对陶瓷型芯研究的不断深入和陶瓷型芯生产技术的不断进步,陶瓷型芯的性能日益改善,产量不断提高,品种逐年增多,应用面迅速扩大。

由于陶瓷型芯的制备与使用在国际上属于严格保密的一项核心技术,至今尚未见到有关的专著出版,相关的研究内容和研究成果,多分散于国内外的学术期刊和专利资料中。作者在总结国内外最新科学研究成果的基础上,结合自己的工作经验,探索性地撰写了本书,旨在及时地反映我国陶瓷型芯研制的进展,以便更好地了解国内外陶瓷型芯研制的动向及更快地推进我国陶瓷型芯产业的发展。

本书共14章,其中第1~4章介绍陶瓷型芯的组成、结构与性能,陶瓷型芯材料的化学性能以及陶瓷型芯的成型与烧结;第5~10章分别介绍各类陶瓷型芯的制备工艺、特性及应用,着重阐述硅基陶瓷型芯制备与使用的技术理论基础;第11~14章介绍陶瓷型芯的加工、强化、定位及脱除。其中第5章由哈尔滨师范大学曲智坤编写。

作者在主持“陶瓷型芯新材料及制备工艺研究”项目期间,原辽宁省硅酸盐研究所许壮志、钱伟、程涛、黄大勇等承担了大量工作;在撰写书稿过程中,中国科学院金属研究所金涛、王志辉、林泉洪、娄建新等提供了不少帮助,特别是中国工程院胡壮麒院士给予了全力的支持与具体的指导,对书稿进行多次精心的修改与校审,并与中国工程院王国栋院士在百忙中分别为本书作序,特致以衷心的感谢。同时,对书中所引用文献资料的中外作者致以衷心的感谢。

鉴于陶瓷型芯种类多、发展快、跨学科、涉及知识面宽,加之作者水平有限,在内容取舍和文字编排中,疏漏、不当乃至错误之处在所难免,诚望专家和读者指正。

作 者

2011年12月

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 概论	1
1.1 陶瓷型芯的分类及发展	1
1.1.1 陶瓷型芯的分类	2
1.1.2 陶瓷型芯的应用	4
1.1.3 陶瓷型芯的发展趋势	4
1.2 陶瓷型芯的性能	7
1.2.1 陶瓷型芯的性能及质量要求	7
1.2.2 陶瓷型芯的力学性能	10
1.2.3 陶瓷型芯的化学性能	12
1.2.4 陶瓷型芯的热学性能	14
1.2.5 陶瓷型芯的工艺性能及结构性能	16
1.3 陶瓷型芯的组成	18
1.3.1 陶瓷型芯的化学组成	18
1.3.2 陶瓷型芯的矿物组成	19
1.4 陶瓷型芯的显微结构	21
1.4.1 晶相及晶界	22
1.4.2 气孔及微裂纹	23
1.4.3 氧化硅-硅酸锆陶瓷型芯的显微结构	24
1.5 陶瓷型芯的工艺、结构与性能的关系	25
1.5.1 陶瓷型芯外形结构设计及制备工艺与陶瓷型芯工程可靠性的关系	26
1.5.2 材料选择、粉料粒度及烧结程度与陶瓷型芯结构、性能的关系	26
参考文献	29
第 2 章 陶瓷型芯材料的化学性能	31
2.1 陶瓷型芯材料与高温合金及钛合金的界面冶金化学行为	31
2.1.1 陶瓷型芯材料与超合金的界面冶金化学行为	32
2.1.2 陶瓷型芯材料与定向共晶合金的界面冶金化学行为	39
2.1.3 陶瓷型芯材料与钛合金的界面冶金化学行为	47

2.2 陶瓷型芯材料的溶解性	51
2.2.1 陶瓷型芯材料在水、弱酸水溶液及铵盐水溶液中的溶解	51
2.2.2 陶瓷型芯材料在苛性碱溶液及碱熔体中的溶解	51
2.2.3 陶瓷型芯材料在氟化物中的溶解	54
参考文献	56
第3章 陶瓷型芯的成型	58
3.1 黏合剂	58
3.1.1 硅酸乙酯水解液	59
3.1.2 硅溶胶	59
3.1.3 聚乙烯醇	62
3.1.4 石蜡、微晶蜡及注射成型用其他材料	62
3.1.5 硅树脂及其他传递模成型用黏合剂	65
3.1.6 聚乙烯及其他挤塑成型用黏合剂	66
3.2 陶瓷型芯的自由流动成型	67
3.2.1 灌浆成型	67
3.2.2 注浆成型	69
3.2.3 凝胶注模成型	72
3.2.4 流延成型	74
3.3 陶瓷型芯的加压流动成型	77
3.3.1 注射成型塑化剂的组成及常用材料	78
3.3.2 注射成型对黏合剂的要求	79
3.3.3 注射成型工艺要点	79
3.3.4 蜡坯矫形	82
3.3.5 注射成型的特点及缺陷分析	85
3.3.6 水基注射成型	86
3.3.7 注射冷冻成型	87
3.3.8 传递模成型	89
3.3.9 陶瓷型芯的修补与黏结	91
3.4 陶瓷型芯的挤塑成型、干压成型和等静压成型	93
3.4.1 挤塑成型	93
3.4.2 干压成型	94
3.4.3 等静压成型	95
3.5 陶瓷型芯的无模成型	97
3.5.1 固体无模成型	97
3.5.2 整体型芯铸型的制备	99

3.6 陶瓷型芯的有模-无模成型	101
3.6.1 一体式陶瓷型芯的有模-无模成型	101
3.6.2 借助型芯模具插件的一体式陶瓷型芯的成型	102
3.6.3 一次性薄壁型芯模及一体式陶瓷型芯的制备	103
3.6.4 整体型芯铸型成形模及整体型芯铸型的制备	104
参考文献	105
第4章 陶瓷型芯的烧结	108
4.1 陶瓷型芯的烧结机理及烧结方法	108
4.1.1 陶瓷型芯的烧结机理	108
4.1.2 陶瓷型芯的烧结方法	109
4.2 陶瓷型芯的烧结工艺	111
4.2.1 分步烧结与一步烧结	111
4.2.2 填料	112
4.2.3 陶瓷型芯的装烧	113
4.2.4 陶瓷型芯的脱蜡	115
4.2.5 陶瓷型芯的烧结制度	117
4.2.6 影响烧结的因素	120
4.2.7 烧结变形的防止	122
4.3 陶瓷型芯的近零收缩烧结	123
4.3.1 添加收缩阻滞材料	124
4.3.2 添加收缩补偿材料	125
4.3.3 采用芯核预制工艺	126
4.4 陶瓷型芯的烧结窑炉	127
4.4.1 电阻发热元件	127
4.4.2 钟罩窑与梭式窑	129
参考文献	130
第5章 硅基陶瓷型芯	132
5.1 石英与方石英	134
5.1.1 石英的结构	134
5.1.2 石英的多晶转变	135
5.1.3 方石英	136
5.2 石英玻璃	139
5.2.1 石英玻璃的结构	140
5.2.2 石英玻璃的结构缺陷	141
5.2.3 氧化物对石英玻璃结构的影响	143

5.2.4	石英玻璃中的低共熔相	145
5.2.5	石英玻璃的黏度	146
5.2.6	石英玻璃的高温软化	149
5.2.7	石英玻璃的化学稳定性	150
5.3	石英玻璃的析晶	152
5.3.1	石英玻璃的析晶机理	152
5.3.2	影响石英玻璃析晶的因素	154
5.4	石英玻璃粉的烧结	163
5.4.1	石英玻璃粉的烧结过程及其不均匀烧结	163
5.4.2	影响石英玻璃粉烧结的因素	166
5.5	DS 型芯	171
5.5.1	原材料及坯料组成	172
5.5.2	DS 型芯的制备与使用工艺要点	173
5.5.3	影响 DS 型芯性能的因素	174
5.6	氧化硅-硅酸锆陶瓷型芯	179
5.6.1	锆英砂含量对陶瓷型芯性能的影响	179
5.6.2	陶瓷粉料组成对型芯高温性能的影响	185
5.6.3	烧结工艺对陶瓷型芯相组成及性能的影响	188
5.7	氧化硅-氧化铝陶瓷型芯	192
5.7.1	氧化硅-氧化铝陶瓷型芯的组成及性能	193
5.7.2	氧化铝对陶瓷型芯性能的影响	193
	参考文献	196
第 6 章	铝基陶瓷型芯	199
6.1	氧化铝原料	200
6.1.1	氧化铝的结构	200
6.1.2	工业氧化铝	201
6.1.3	刚玉	202
6.2	高温烧结铝基陶瓷型芯	205
6.2.1	β -氧化铝陶瓷型芯	205
6.2.2	氧化镁-氧化铝陶瓷型芯	207
6.2.3	氧化钇掺杂氧化铝陶瓷型芯	209
6.2.4	钇铝石榴石-氧化铝陶瓷型芯	211
6.2.5	氧化镧-氧化铝陶瓷型芯	213
6.2.6	铝氧化结合氧化铝陶瓷型芯	214
6.3	中温烧结铝基陶瓷型芯	215

6.3.1 氧化铝-氧化硅陶瓷型芯	215
6.3.2 AC-1 及 AC-2 氧化铝基陶瓷型芯	220
6.3.3 氧化铝-纳米氧化硅陶瓷型芯	220
6.4 气相还原烧结氧化铝陶瓷型芯	223
6.4.1 气相还原烧结氧化铝陶瓷型芯的制备工艺	224
6.4.2 气相还原烧结氧化铝陶瓷型芯的特性	228
参考文献	228
第 7 章 锆基、稀土基陶瓷型芯	230
7.1 氧化锆陶瓷型芯	230
7.1.1 氧化锆	230
7.1.2 氧化锆陶瓷型芯的制备及其特性	232
7.2 稀土金属氧化物陶瓷型芯	234
7.2.1 氧化钇	234
7.2.2 稀土金属氧化物陶瓷型芯的制备及其特性	235
7.3 单斜稀土铝酸盐陶瓷型芯	237
7.3.1 单斜稀土铝酸盐陶瓷型芯的制备	237
7.3.2 单斜稀土铝酸盐陶瓷型芯的特性	239
7.4 氧化钪-氧化钇陶瓷型芯	239
7.4.1 型芯坯料的化学组成和粒度组成	239
7.4.2 型芯坯体的相组成及对性能的影响	240
7.4.3 氧化钪-氧化钇陶瓷型芯的特性	241
参考文献	241
第 8 章 镁基、钙基及其他陶瓷型芯	242
8.1 氧化镁陶瓷型芯	242
8.1.1 氧化镁的性能	242
8.1.2 镁质陶瓷型芯原料	244
8.1.3 氧化镁陶瓷型芯的制备	244
8.1.4 氧化镁陶瓷型芯的特性	246
8.2 氧化钙及其他钙基陶瓷型芯	247
8.2.1 氧化钙的性能及其制备	247
8.2.2 氧化钙陶瓷型芯的制备工艺及其特性	248
8.2.3 磷酸钙陶瓷型芯	249
8.2.4 三元氧化钙基陶瓷型芯	249
8.3 氧化锌陶瓷型芯	250
8.3.1 氧化锌陶瓷型芯的制备工艺	250

8.3.2 氧化锌陶瓷型芯的特性	252
8.4 硅酸锆陶瓷型芯	252
8.4.1 锆砂	252
8.4.2 硅酸锆陶瓷型芯的制备	254
8.5 氮化硅陶瓷型芯	257
8.5.1 氮化硅的性能及其合成	257
8.5.2 氮化硅陶瓷型芯的制备及其特性	258
8.6 氮化铝陶瓷型芯	259
8.6.1 氮化铝的性能及其合成	259
8.6.2 氮化铝陶瓷型芯的制备及其特性	260
8.7 氮化钛陶瓷型芯	262
8.7.1 氮化钛的性能及其合成	262
8.7.2 氮化钛陶瓷型芯的制备及其特性	263
参考文献	264
第9章 盐基陶瓷型芯	266
9.1 盐芯	266
9.1.1 烧结盐芯	267
9.1.2 树脂结合盐芯	268
9.1.3 焦糖结合盐芯	269
9.1.4 熔注成型盐芯	269
9.1.5 盐芯的特性	270
9.2 盐基陶瓷型芯	271
9.2.1 盐基刚玉陶瓷型芯	271
9.2.2 盐基非氧化物陶瓷型芯	272
9.2.3 低熔点盐基陶瓷型芯	273
9.3 无机盐结合陶瓷型芯	276
9.3.1 无机盐结合刚玉陶瓷型芯	276
9.3.2 无机盐结合硅酸锆陶瓷型芯	278
9.3.3 无机盐结合硅酸钙陶瓷型芯	279
9.3.4 磷酸氢钠结合氧化铝-硅酸锆陶瓷型芯	280
参考文献	281
第10章 复合陶瓷型芯	283
10.1 增强式陶瓷型芯	283
10.1.1 芯骨插入式增强陶瓷型芯	283
10.1.2 芯骨包入式增强陶瓷型芯	286

10.2 包覆式陶瓷型芯	288
10.2.1 涂层式硅基陶瓷型芯	288
10.2.2 氧化钇面层陶瓷型芯	291
10.3 装配式陶瓷型芯	293
10.3.1 组装式薄壁陶瓷型芯	293
10.3.2 插接式陶瓷型芯	294
10.3.3 两步成型陶瓷型芯	297
10.4 陶瓷-耐熔金属型芯	300
10.4.1 陶瓷-耐熔金属型芯的制备及其使用	300
10.4.2 陶瓷-耐熔金属型芯的改进	302
10.4.3 陶瓷-耐熔金属型芯的特点	303
参考文献	303
第11章 陶瓷型芯的加工	305
11.1 陶瓷型芯的超声波加工	306
11.1.1 超声波加工的原理及特点	306
11.1.2 陶瓷型芯的超声波加工	307
11.1.3 陶瓷型芯超声波加工的优点	308
11.2 陶瓷型芯的激光加工	310
11.2.1 激光加工的分类及其特点	310
11.2.2 陶瓷型芯激光加工的分类	311
11.2.3 激光加工陶瓷型芯	312
11.3 陶瓷型芯的表面加工	315
11.3.1 糙面对换热效果的影响	316
11.3.2 型芯糙面加工的方法	318
11.3.3 型芯表面镀金属膜	320
参考文献	321
第12章 陶瓷型芯的强化	322
12.1 陶瓷型芯的高温强化	322
12.1.1 硅基陶瓷型芯的高温强化	322
12.1.2 铝基陶瓷型芯的高温强化	324
12.2 陶瓷型芯的低温强化	327
12.2.1 热固性树脂强化	327
12.2.2 脂肪族化合物强化	329
12.2.3 水溶性有机聚合物强化	330
参考文献	333

第 13 章 陶瓷型芯的定位及熔模铸造	335
13.1 陶瓷型芯的定位	335
13.1.1 陶瓷型芯的定位端及其连接方式	336
13.1.2 芯撑的种类及其特性	336
13.2 金属芯撑定位的方式	339
13.2.1 接触-嵌入式芯撑定位	339
13.2.2 二端嵌入式芯撑定位	341
13.2.3 二端接触式芯撑定位	342
13.3 陶瓷型芯的预处理及熔模的压制与组合	344
13.3.1 陶瓷型芯的预处理	344
13.3.2 熔模压制	345
13.3.3 模组合成	349
13.4 铸型制备及浇注	351
13.4.1 铸型制备	351
13.4.2 浇注	353
13.4.3 与使用陶瓷型芯有关的铸件缺陷	355
参考文献	355
第 14 章 陶瓷型芯的脱除及残芯检测	357
14.1 陶瓷型芯的脱除方法	357
14.1.1 化学脱芯	358
14.1.2 物理-化学脱芯	360
14.2 影响脱芯速率的因素	362
14.2.1 型芯结构对脱芯速率的影响	363
14.2.2 工艺参数对脱芯速率的影响	364
14.3 强化脱芯及铸件腐蚀的防止	366
14.3.1 型芯坯体结构的优化	366
14.3.2 脱芯工艺条件的优化	370
14.3.3 铸件腐蚀的防止	373
14.4 残芯检测	375
14.4.1 中子照相法	376
14.4.2 X 射线照相法	376
14.4.3 红外热图像法	378
参考文献	382

第1章 概 论

近净形熔模精密铸造是生产高精度、低粗糙度、复杂形状铸件的有效方法,特别适合铸造昂贵金属和难加工金属,作为生产航空发动机高温合金叶片和复杂结构件的一种主要方法,已成为先进制造技术的重要内容之一。

熔模铸造的内腔大多是与外形一道通过挂涂料、撒型砂等方法形成的。当铸件内腔过于窄小或形状比较复杂,或内腔无法干燥硬化时,必须借助预先制备的陶瓷型芯来形成铸件内腔。在精铸空心叶片时,陶瓷型芯在很大程度上决定了叶片的尺寸精度、合格率和铸造成本。因此,陶瓷型芯制备技术一直是空心叶片铸造的“瓶颈”,不断改进陶瓷型芯的制备工艺和使用方法,对于国防能力的增强和国民经济的发展具有重要意义。

1.1 陶瓷型芯的分类及发展

作为熔模铸造中制备中空铸件转接件的陶瓷型芯,其作用是形成空心铸件的腔形状,并与型壳或外形模共同保证铸件壁厚的尺寸精度,见图 1-1。根据陶瓷型芯的特性及用途,暂将其定义为在严格控制组成和烧结的条件下制备的,有适当的强度和密度,能严格控制铸件内腔几何形状和尺寸精度,能形成优良铸件内腔表面,外观类似细瓷的一类特殊结构陶瓷制品^[1]。

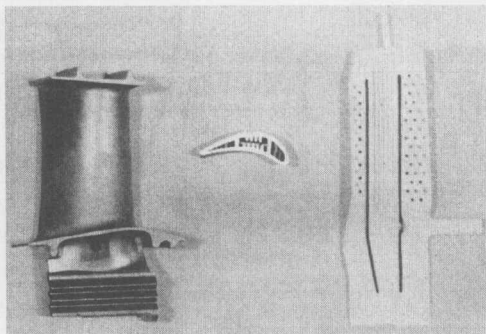


图 1-1 空心叶片及陶瓷型芯

陶瓷型芯大量应用的时间相对较短,其命名尚处于自由状态。从目前的状况看,大多以陶瓷型芯基体材料的化学成分命名。例如,以石英玻璃粉为基体材料的