

特种耐火材料

实用技术手册

胡宝玉 徐延庆 张宏达 编著



冶金工业出版社

特种耐火材料实用技术手册

胡宝玉 徐延庆 张宏达 编著

北京
冶金工业出版社
2004

图书在版编目 (CIP) 数据

特种耐火材料实用技术手册/胡宝玉等编著. —北京:
冶金工业出版社, 2004. 6

ISBN 7-5024-3522-0

I. 特… II. 胡… III. 耐火材料—技术手册
IV. TQ175 - 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 038810 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 章秀珍 美术编辑 李 心

责任校对 侯 瑛 李文彦 责任印制 李玉山

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2004 年 6 月第 1 版, 2004 年 6 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 27 印张; 734 千字; 416 页; 1-3000 册

70.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

特种耐火材料是以提纯高纯原料或以合成高纯原料为基础，以传统生产工艺和特殊生产工艺相结合的方法加工而成的耐火材料制品。

特种耐火材料制品具有良好的高温特性或特殊的功能，以及具有可以精密装配的结构，所以在科研、军工和各工业部门的高新技术领域中已得到了广泛的应用。

特种耐火材料制品又是一种高效、节能的耐火材料。它的耐高温、耐侵蚀、抗冲刷等性能，可使炉衬的使用寿命大大提高，从而收到节能降耗的效果。

根据实践经验，并参考了有关技术资料，我们编写了《特种耐火材料实用技术手册》一书，比较全面、系统地介绍了特种耐火材料的性质与分类；特种耐火材料生产工艺；氧化铝特种耐火材料；氧化铬、氧化铍特种耐火材料；氧化镁、氧化钙特种耐火材料；氧化锆特种耐火材料；复合特种耐火材料；其他氧化物特种耐火材料；非氧化物特种耐火材料等。

本书在编写中引用了一些资料，但由于原料有差别，加之试验方法不同，试验条件有变化，因此试验结果可能会产生一些变化。

本书在编写过程中得到了洛阳耐火材料研究院高级耐火材料厂的关心、支持和帮助；胡坚同志帮助收集、整理了资料；上海宝钢耐火材料专家田守信对全书进行了审定、修改，在此一并表示衷心感谢。由于水平所限，书中有不妥之处请读者批评指正。

作 者
2004年3月

目 录

第一章 特种耐火材料的性质与分类	(1)
第一节 基本概念	(1)
一、特种耐火材料	(1)
二、特种耐火材料分类	(1)
三、特种耐火材料的特点	(1)
四、特种耐火材料的产品	(2)
第二节 特种耐火材料的性能	(2)
一、特种耐火材料的物理性能	(2)
二、特种耐火材料性能与温度之间的关系	(7)
三、各种氧化物材料之间的反应温度	(10)
第三节 特种耐火材料的应用	(12)
一、氧化物特种耐火材料的应用	(12)
二、难熔化合物特种耐火材料的应用	(13)
第二章 特种耐火材料的生产工艺	(16)
第一节 原料	(16)
一、特种耐火原料的分类	(16)
二、原料的分级	(16)
三、特种耐火材料原料的加热处理	(16)
四、原料的破粉碎加工	(16)
五、原料的筛分	(23)
第二节 混料及成型	(27)
一、混配料	(27)
二、特种耐火材料制品的成型	(33)
第三节 干燥	(45)
一、干燥的目的	(45)
二、影响干燥效果的因素	(45)
三、干燥过程	(45)
四、主要干燥设备	(45)
第四节 烧成	(48)
一、烧成的目的	(48)
二、烧成过程	(49)

三、影响烧结过程的因素	(49)
四、热工窑炉	(49)
第五节 烧成温度的测温仪表	(57)
一、高温检测与控制	(57)
二、测温锥	(58)
第六节 制品的冷加工	(58)
一、特种耐火材料制品的硬度	(58)
二、研磨材料的硬度	(59)
三、不同粒度金刚石研磨加工件的光洁度	(59)
四、各种冷加工设备	(60)
第三章 氧化物特种耐火材料	(62)
第一节 原料	(62)
一、工业氧化铝	(62)
二、烧结氧化铝 (α -氧化铝)	(64)
三、烧结刚玉	(66)
四、电熔刚玉 (电熔白刚玉)	(68)
第二节 氧化铝制品	(76)
一、泥浆浇注制品	(76)
二、热压注制品	(84)
三、透明氧化铝陶瓷	(89)
四、挤压制品	(89)
五、机压制品	(90)
六、刚玉质透气砖	(107)
七、电熔浇铸刚玉砖	(110)
第三节 氧化铝轻质耐火材料	(116)
一、氧化铝空心球及其制品	(116)
二、用烧失法制造的氧化铝轻质砖	(120)
三、用泡沫法制造氧化铝轻质砖	(127)
第四节 氧化铝纤维及其制品	(132)
一、耐火纤维的分类及使用温度	(132)
二、高温耐火纤维的种类与性能	(133)
三、氧化铝纤维	(133)
四、氧化铝晶须	(135)
五、氧化铝纤维制品	(136)
六、氧化铝纤维及混合纤维的性能	(137)
第五节 氧化铝 (刚玉) 质不定形耐火材料	(138)
一、氧化铝质不定形耐火材料的结合剂	(139)
二、氧化铝 (刚玉) 质不定形耐火材料	(147)

三、氧化铝火泥	(158)
四、刚玉质火泥和涂料	(160)
第四章 氧化铬、氧化铍特种耐火材料	(162)
第一节 氧化铬原料	(163)
一、铬铁矿	(163)
二、氧化铬	(164)
三、电熔氧化铬	(165)
四、烧结氧化铬	(165)
第二节 氧化铬砖的生产工艺	(166)
一、机压法高铬砖	(166)
二、等静压法致密高铬砖	(167)
三、高铬砖的抗煤渣的侵蚀	(170)
第三节 熔铸铬砖的生产工艺	(171)
一、熔铸铬铝砖	(171)
二、熔铸铬钙砖	(172)
第四节 含铬制品的生产工艺	(172)
一、以高纯原料制造铬刚玉砖	(172)
二、以合成铝铬料制造铝铬刚玉砖	(173)
三、铝钛铬砖	(174)
四、铝锆铬砖	(174)
第五节 铬质不定形耐火材料	(175)
一、铬刚玉质浇注料	(175)
二、高铬质耐火泥	(176)
第六节 氧化铍特种耐火材料	(177)
一、氧化铍及其原料	(178)
二、氧化铍制品	(178)
三、氧化铍制品的性能	(182)
第五章 氧化镁、氧化钙特种耐火材料	(185)
第一节 氧化镁特种耐火材料	(185)
一、概述	(185)
二、氧化镁原料	(189)
三、氧化镁制品	(194)
四、镁质不定形耐火材料	(202)
五、氧化镁轻质砖	(203)
第二节 氧化钙特种耐火材料	(205)
一、氧化钙原料	(206)
二、氧化钙制品	(210)

第六章 氧化锆特种耐火材料	(217)
第一节 氧化锆原料	(218)
一、锆英石	(218)
二、斜锆石	(219)
三、高纯氧化锆原料	(220)
四、高纯氧化锆的制取	(220)
五、氧化锆的晶型转化	(221)
六、氧化铝的稳定	(222)
第二节 氧化锆制品	(228)
一、氧化锆泥浆浇注制品	(228)
二、用泥浆浇注法制造氧化钇稳定氧化锆固体电解质 (定氧仪用氧化锆管)	(231)
三、等静压法制造氧化锆研磨介质球	(232)
四、热压注法制造氧化锆发热元件	(232)
五、机压捣打氧化锆制品	(236)
六、以氧化镁稳定氧化锆为原料制造挤压模具	(237)
七、高热稳定性氧化锆大砖	(238)
八、磁流体发电用氧化锆电极	(238)
九、干压成型氧化钇稳定氧化锆制品	(239)
十、热压法成型氧化锆制品	(240)
十一、熔铸氧化锆砖	(241)
第三节 轻质氧化锆制品	(242)
一、氧化锆空心球制品及空心球砖	(242)
二、氧化锆轻质砖	(244)
第四节 氧化锆纤维及制品	(244)
一、氧化锆纤维	(245)
二、氧化锆制品	(246)
第五节 氧化锆浇注料	(248)
一、结合剂	(248)
二、浇注料的配制与性能	(249)
第六节 氧化锆火泥	(252)
一、原料	(252)
二、锆质火泥	(252)
第七节 锆英石制品	(253)
一、锆英石耐火材料	(253)
二、锆英石制品及标准	(253)
第七章 复合特种耐火材料	(269)
第一节 莫来石特种耐火材料	(272)
一、莫来石材料的性质	(272)

二、烧结法合成莫来石	(272)
三、电熔法合成莫来石	(275)
四、合成莫来石制品	(276)
第二节 尖晶石特种耐火材料	(280)
一、尖晶石原料的合成	(280)
二、合成尖晶石制品	(283)
三、尖晶石制品的理化性能	(283)
四、尖晶石耐火材料的应用	(286)
第三节 含碳复合特种耐火材料	(286)
一、铝碳质特种耐火材料	(286)
二、铝镁炭制品	(288)
三、铝锆炭制品	(288)
四、铝碳-锆碳浸入式水口砖	(289)
五、镁炭及镁钙炭砖	(289)
第四节 铬酸钡发热元件	(291)
一、发热元件的特点	(291)
二、发热元件的生产	(291)
三、发热元件的理化性能	(292)
四、发热元件的应用	(293)
五、发热元件规格及组装电炉的类型	(296)
第八章 其他氧化物特种耐火材料	(298)
第一节 二氧化硅特种耐火材料	(298)
一、熔融石英用原料	(298)
二、熔融二氧化硅(熔融石英)	(302)
三、熔融石英制品	(303)
第二节 氧化钛特种耐火材料	(311)
一、氧化钛原料	(311)
二、氧化钛的制取与提纯	(312)
三、二氧化钛原料的理化性能	(312)
四、金红石(TiO_2)陶瓷	(314)
五、钛酸铝特种耐火材料	(315)
六、钛酸钙陶瓷	(318)
七、钛酸镁陶瓷	(319)
八、钛渣砖	(319)
九、钛渣不定形耐火材料	(320)
十、含氧化钛纤维材料	(320)
第三节 氧化铈特种耐火材料	(321)
一、氧化铈及其原料	(321)
二、氧化铈陶瓷	(322)

第四节 氧化钇特种耐火材料	(324)
一、氧化钇及其原料	(324)
二、致密透明氧化钇制品	(326)
三、钇质混凝土	(326)
第五节 氧化锡特种耐火材料	(327)
一、二氧化锡及其原料	(327)
二、二氧化锡制品	(328)
三、锡酸钙耐火材料	(328)
第九章 非氧化物特种耐火材料	(329)
第一节 碳化硅及其耐火材料	(330)
一、碳化硅的合成	(330)
二、碳化硅制品	(334)
三、各种碳化硅制品的性能	(364)
四、碳化硅制品的应用	(367)
第二节 碳化硼特种耐火材料	(367)
一、原料合成	(368)
二、 B_4C 制品	(368)
三、 B_4C 制品的应用	(368)
第三节 氮化硅特种耐火材料	(369)
一、氮化硅原料的合成	(369)
二、氮化硅制品	(369)
三、氮化硅制品的应用	(371)
第四节 氮化硼特种耐火材料	(371)
一、氮化硼原料的合成	(372)
二、氮化硼制品	(373)
三、氮化硼陶瓷制品的性能	(378)
四、氮化硼制品的应用	(379)
第五节 氮化铝特种耐火材料	(379)
一、氮化铝的合成	(380)
二、氮化铝制品	(380)
三、氮化铝制品的性能	(381)
四、氮化铝制品应用	(383)
第六节 氮化钛特种耐火材料	(383)
一、氮化钛的合成	(383)
二、TiN 陶瓷制品	(384)
第七节 氮化锆特种耐火材料	(384)
一、氮化锆生产	(384)
二、氮化锆应用	(384)

第八节 氧氮化物特种耐火材料	(385)
一、氧氮化铝	(385)
二、氧氮化硅 (Si_2ON_2)	(386)
三、Si-Al-O-N 系特种耐火材料	(386)
第九节 硼化锆特种耐火材料	(389)
一、硼化锆的合成	(389)
二、硼化锆制品	(390)
三、 ZrB_2 耐火材料制品的应用	(391)
第十节 硅化钼特种耐火材料	(391)
一、二硅化钼的合成	(391)
二、二硅化钼制品	(391)
三、二硅化钼发热元件的性能	(392)
四、二硅化钼发热元件的应用	(393)
五、二硅化钼复合发热元件	(395)
第十一节 碳质特种耐火材料	(396)
一、碳质耐火材料	(396)
二、石墨制品	(405)
三、炭素(石墨)制品的应用	(407)
四、炭素(石墨)发热体	(407)
五、碳和石墨纤维制品	(409)
六、黏土石墨坩埚	(413)
参考文献	(416)

第一章 特种耐火材料的性质与分类

第一节 基本概念

由于科学技术的发展,在宇航、核能、冶金、电子、化工、建材、交通等行业对耐火材料不断提出新的课题,使用条件要求愈来愈苛刻和特殊,普通耐火材料已满足不了新的要求,只有具有耐高温、抗腐蚀、高温化学和热稳定性好的特种耐火材料才能承担这样的重任和满足使用条件的要求。

特种耐火材料包括的内容非常广泛,主要有高熔点氧化物、高熔点非氧化物及由此衍生的复合化合物、金属陶瓷、高温涂层、高温纤维及其增强材料。其中高熔点非氧化物通常称难熔化合物,它又包括碳化物、氮化物、硼化物、硅化物及硫化物等。

一、特种耐火材料

特种耐火材料的概念是在传统陶瓷、精密陶瓷和普通耐火材料以及功能性耐火材料的基础上发展起来的,是一组熔点在 1800°C 以上的高纯氧化物、非氧化物和炭素等单一材料或各种复合材料为原料的,采用传统生产工艺或特殊生产工艺生产的、其制品具有特殊性能和特种用途的新型耐火材料,又称为特种耐火材料。

二、特种耐火材料分类

特种耐火材料虽然成本较高,但由于具有很多优异性能,是很多工业部门不可缺少、不能替代的产品。特别是在很多新技术、新领域中,在很多关键的部位替代其他产品,可以大幅度地提高使用寿命,明显地增加了经济效益。特种耐火材料的分类方法很多,有的以生产工艺分类,有的以产品应用分类,但比较主要的分类方法还是以原料和制品性状不同来分类,大致可以分成五方面:

- (1) 高熔点氧化物材料及其复合材料;
- (2) 难熔化合物材料(碳化物、氮化物、硼化物、硅化物等)及其复合材料;
- (3) 高熔点氧化物与难熔金属的复合材料(金属陶瓷);
- (4) 高温不定形材料及无机物涂层;
- (5) 高温纤维及其增强材料。

三、特种耐火材料的特点

(一) 高纯原料

- (1) 采用人工提纯的各种原料;
- (2) 采用电熔、烧结、反应合成的各种原料;
- (3) 采用复合材料做原料;
- (4) 采用纤维增强的复合材料做原料。

(二) 引入特种生产工艺

- (1) 采用微粉或超微粉技术;
- (2) 采用喷雾造粒技术;
- (3) 采用特殊成型工艺技术(等静压成型、热压成型、注射成型、流延成型、熔铸成型)

等);

(4) 采用高温纤维或纤维增强技术和不定形材料。

(三) 特种烧成

- (1) 采用超高温烧成 (1800℃ 以上);
- (2) 采用在真空条件下或保护气氛条件下烧成;
- (3) 采用高能燃料烧成;
- (4) 采用微机自动化控制烧成。

四、特种耐火材料的产品

- (1) 炼钢及连铸用特种耐火材料;
- (2) 超高温窑炉用炉衬材料;
- (3) 超高温隔热用特种耐火材料;
- (4) 陶瓷和透明陶瓷特种耐火材料;
- (5) 高温高压绝缘材料;
- (6) 高温发热体材料;
- (7) 固体电解质材料;
- (8) 高温纤维特种耐火材料。

第二节 特种耐火材料的性能

一、特种耐火材料的物理性能

(1) 各种氧化物和非氧化物材料的熔点见表 1-1。

表 1-1 几种化合物的熔点

化学元素 及原子序数	氧化物		碳化物		氮化物		硼化物		硅化物	
	分子式	熔点/℃	分子式	熔点/℃	分子式	熔点/℃	分子式	熔点/℃	分子式	熔点/℃
Be 4	BeO	2570	Be ₂ C	2100	Be ₃ N ₂	2200				
Mg 12	MgO	2800	—	—	—	—				
Al 13	Al ₂ O ₃	2045	Al ₄ C ₃	2200	AlN	2235 ^①				
Si 14	SiO ₂	1713	SiC	2200 分解, 2700 升华	SiN	2200				
Ca 20	CaO	2590	CaC ₂	2300	—	—				
Ti 22	TiO ₂	1640	TiC	3157	Ti ₂ N ₂	2930	TiB ₂	2600	Ti ₃ Si ₃	2120
V 23	VO ₂	1640	VC	2810	VN	2050				
	V ₂ O ₃	1970	—	—	—	—				
Cr 24	Cr ₂ O ₃	2280	Cr ₃ C ₂	1890	—	—	CrB	1038		
Mn 25	MnO	1650	—	—	—	—				
Fe 26	Fe ₂ O ₃	1565	FeC	1837	—	—				
Zn 30	ZnO	1975	—	—	—	—				
Sr 38	SrO	2460	—	—	—	—				
Y 39	Y ₂ O ₃	2417	—	—	—	—				
Zr 40	ZrO ₂	2700	ZrC	3492	ZrN	2952	ZrB ₂	3190	Zr ₃ Si ₃	2250
Mo 42	—	—	MoC	2692	—	—	MoB	2180	MoSi ₂	2030
Ba 56	BaO	1920	—	—	—	—				
La 57	La ₂ O ₃	2315	—	—	—	—				
Ce 58	CeO ₂	1950	—	—	—	—	CeB ₆	>2100		
Hf 72	HfO ₂	2812	HfC	4160	HfN	3310	HfB ₂	3250		
W 74	WO ₂	1500 ~ 1600	W ₂ C	2730 ^①	—	—	WB ₆	2920	WSi ₂	2150
Th 90	ThO ₂	3050	—	—	—	—	ThB ₄	>2500		
U 92	UO ₂	2500	U ₂ C ₃	2100	—	—				

①分解温度。

在元素中，以碳元素的熔点最高，约为3650℃，依次为钨（W）3415℃，铼（Re）3180℃，钽（Ta）2980℃，锇（Os）2727℃，钼（Mo）2620℃，铪（Hf）2207℃，铌（Nb）2468℃，钷（Th）1845℃，钛（Ti）1672℃，锆（Zr）1855℃，其他大多数元素的熔点都在1800℃以下。这些金属元素都无法在氧化气氛下使用。

在化合物中，熔点最高的是碳化物，依次是氮化物和氧化物。在氧化物中，熔点最低的是酸性氧化物，如二氧化硅（SiO₂），二氧化钛（TiO₂）。其次是中性氧化物，如三氧化二铝（Al₂O₃），三氧化二铬（Cr₂O₃）。熔点最高的是碱性氧化物，如氧化铍（BeO）、氧化镁（MgO）、氧化钙（CaO）、氧化锶（SrO）。在元素周期表中第5、6、7周期某些元素的氧化物、碳化物、氮化物和硼化物，如氧化物：二氧化锆（ZrO₂）7000℃，二氧化钍（ThO₂）3050℃，二氧化铪（HfO₂）2812℃，氧化镁（MgO）2800℃；碳化物：碳化铪（HfC）4160℃，碳化锆（ZrC）3500℃，碳化钒（VC）2810℃，碳化钨（W₂C）2857℃，碳化钛（TiC）3150℃；氮化物：氮化铪（HfN）3310℃，氮化锆（ZrN）3000℃，二氮化二钛（Ti₂N₂）2930℃；硼化物：二硼化铪（HfB₂）3250℃，二硼化锆（ZrB₂）3190℃，六硼化钨（WB₆）2920℃，这些化合物也都是高熔点化合物。

很多元素及化合物，虽然熔点很高，但要作为特种耐火材料的原料使用，还受到一定的限制，如有的原料在加热时产生分解，有的原料有很大的毒性或放射性，有的原料的价格十分昂贵，所以在应用时应给予充分考虑。

(2) 各种氧化物的熔点、真密度及在地球上的储量见表1-2。

表 1-2 各种氧化物的性能及储量

序号	材料	化学式	相对分子质量	熔点/℃	真密度 /g·cm ⁻³	储量/%	备注
1	氧化铝	Al ₂ O ₃	101.92	2045	3.97	7	
2	氧化钡	BaO	153.37	1917	5.72	0.08	水化, 有毒
3	氧化铍	BeO	25.02	2550	3.03	0.47	有毒
4	氧化钙	CaO	56.08	2590	3.4	3.47	水化
5	氧化铈	CeO ₂	172.13	1950	7.13		还原
6	氧化铬	Cr ₂ O ₃	152.02	2265	5.21	0.062	还原
7	氧化钴	CoO	74.94	1935	6.46	0.001	还原
8	氧化镓	Ga ₂ O ₃	187.44	1900	5.88	10 ⁻⁹	还原
9	氧化钷	Gd ₂ O ₃	361.80	2330	7.64		
10	氧化铪	HfO ₂	210.60	2777	9.68	0.002	价贵
11	氧化镧	La ₂ O ₃	325.84	2305	6.51		价贵, 水化
12	氧化镁	MgO	40.32	2800	3.58	2.24	
13	氧化锰	MnO	70.93	1780	5.40	0.10	氧化
14	氧化镍	NiO	74.69	1990	6.67	0.02	还原
15	氧化铌	Nb ₂ O ₅	265.81	1460	4.47	0.002	氧化
16	氧化硅	SiO ₂	60.06	1723	2.32	25.80	
17	氧化锶	SrO	103.63	2460	3.98~4.61	0.02	水化
18	氧化锡	SnO ₂	150.70	>1625	6.95	10 ⁻⁵	还原
19	氧化钽	Ta ₂ O ₅	441.76	1800	8.02	0.001	价贵
20	氧化钍	ThO ₂	264.12	3050	9.86	0.002	放射性
21	氧化钛	TiO ₂	79.90	1840	4.27	0.46	挥发
22	氧化铀	UO ₂	270.07	2500	10.96	8×10 ⁻⁵	还原
23	氧化钒	V ₂ O ₃	149.90	1977	4.87	0.038	
24	氧化钇	Y ₂ O ₃	225.84	2410	4.84		价贵, 氧化
25	氧化锌	ZnO	81.38	1975	5.61		挥发
26	氧化锆	ZrO ₂	123.22	2715	5.56	0.017	

(3) 主要复合氧化物的熔点、真密度, 见表 1-3。

表 1-3 各种复合氧化物的熔点和真密度

序号	材料	化学式	熔点/℃	真密度/g · cm ⁻³
1	磷酸铝	Al ₂ O ₃ · P ₂ O ₅	约 2000	
2	莫来石	3Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂	1830	3.16
3	钛酸铝	Al ₂ O ₃ · TiO ₂	1855	
4	钛酸铝	Al ₂ O ₃ · 2TiO ₂	1895	
5	铝酸钡	BaO · Al ₂ O ₃	2000	3.99
6	铝酸钡	BaO · 6Al ₂ O ₃	1860	3.64
7	铝硅酸钡	BaO · Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂	>1700	3.45
8	硅酸二钡	2BaO · SiO ₂	>1755	5.20
9	锆酸铍	BeO · ZrO ₂	2700	6.26
10	金绿宝石	BeO · Al ₂ O ₃	1870	3.76
11	硅铍石	2BeO · SiO ₂	>1750	2.99
12	钛酸铍	BeO · TiO ₂	1810	
13	锆酸铍	BeO · 2ZrO ₂	2535	
14	铝酸钙	3CaO · 5Al ₂ O ₃	1720	
15	铝酸一钙	CaO · Al ₂ O ₃	1955	
16	硅酸三钙	3CaO · SiO ₂	1900	2.91
17	硅酸二钙	2CaO · SiO ₂	2120	3.28
18	铬酸钙	CaO · Cr ₂ O ₃	2160	3.22
19	高铬酸钙	CaO · Cr ₂ O ₇	2170	4.80
20	钙钛矿	CaO · TiO ₂	1980	4.10
21	钛酸钙	2CaO · TiO ₂	1800	
22	钛酸钙	3CaO · TiO ₂	2135	
23	锆酸钙	CaO · ZrO ₂	2345	4.78
24	铪酸钙	CaO · HfO ₂	2470	5.73
25	磷酸钙	3CaO · P ₂ O ₅	1730	3.14
26	磷酸四钙	4CaO · P ₂ O ₅	1700	
27		5CaO · SiO ₂ · P ₂ O ₅	1760	3.01
28	铬铁矿	FeO · Cr ₂ O ₃	1770	5.09
29	镁铝尖晶石	MgO · Al ₂ O ₃	2135	3.58
30	镁铬尖晶石	MgO · Cr ₂ O ₃	2000	4.39
31	镁铁矿	MgO · Fe ₂ O ₃	1780	4.48
32		MgO · La ₂ O ₃	2030	
33	橄榄石	2MgO · SiO ₂	1885	3.22
34	钛酸镁	2MgO · TiO ₂	1835	3.52
35	锆酸镁	MgO · ZrO ₂	2150	
36		MgO · ZrO ₂ · SiO ₂	1793	
37		NiO · Al ₂ O ₃	2020	4.45
38	钾霞石	K ₂ O · Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂	1800	
39	铝酸锶	SrO · Al ₂ O ₃	2020	
40		3SrO · P ₂ O ₅	1767	4.53
41	锆酸锶	SrO · ZrO ₂	>2800	5.48
42	锆酸钍	ThO ₂ · ZrO ₂	>2800	
43	锌尖晶石	ZnO · Al ₂ O ₃	1950	4.58
44		ZnO · ZrO ₂ · SiO ₂	2078	
45	锆英石	ZrO ₂ · SiO ₂	2420	4.60

(4) 各种高熔点氧化物陶瓷的性质 (一) 见表 1-4, 高熔点氧化物陶瓷的性质 (二) 见表 1-5。

表 1-4 高熔点氧化物陶瓷的性质 (一)

物 质	化学式	组成/%	价格 比较值	熔点/℃	氧化气 氛中最高使用 温度/℃	热 性 质								
						比热	热导率/W·(m·K) ⁻¹				线膨胀系数/℃ ⁻¹			
							100℃	500℃	1000℃	1500℃	20~500℃	20~1000℃	20~1500℃	
氧化铝	Al ₂ O ₃	100Al ₂ O ₃	5	2050	1950	0.185	30.24 (26.0)	10.93 (9.4)	6.16 (5.3)	5.82 (5.0)	7.6×10 ⁻⁶	8.6×10 ⁻⁶	9.6×10 ⁻⁶	
氧化铍	BeO	100BeO	1000	2550	2400	0.243	219.8 (189.0)	65.48 (56.3)	20.35 (17.5)	15.70 (13.5)	7.7×10 ⁻⁶	9.1×10 ⁻⁶	10.2×10 ⁻⁶	
氧化钙	CaO	100CaO	1	2600	2400	0.183	15.24 (13.1)	8.02 (6.9)	7.79 (6.7)	—	11.2×10 ⁻⁶	13.0×10 ⁻⁶	14.7×10 ⁻⁶	
氧化镁	MgO	100MgO	5	2800	2400	0.224	36.05 (31.0)	13.96 (12.0)	6.98 (6.0)	6.28 (5.4)	12.8×10 ⁻⁶	14.2×10 ⁻⁶	16.0×10 ⁻⁶	
石英玻璃	SiO ₂	100SiO ₂	1	—	1200	0.176	0.93 (0.8)	1.63 (1.4)	2.09 (1.8)	—	—	0.54×10 ⁻⁶	—	
氧化钍	ThO ₂	100ThO ₂	700	3300	2700	0.056	10.23 (8.8)	5.12 (4.4)	3.02 (2.6)	2.44 (2.1)	8.4×10 ⁻⁶	9.4×10 ⁻⁶	9.8×10 ⁻⁶	
氧化钛	TiO ₂	100TiO ₂	18	1840	—	0.165	6.51 (5.6)	3.84 (3.3)	3.26 (2.8)	—	7.3×10 ⁻⁶	8.0×10 ⁻⁶	9.1×10 ⁻⁶	
氧化铀	UO ₂	100UO ₂	300	2878	—	0.056	9.77 (8.4)	5.12 (4.4)	3.37 (2.9)	—	9.3×10 ⁻⁶	—	—	
氧化锆	ZrO ₂	93ZrO ₂ 5CaO 2HfO ₂	90	2677	2500	0.108	1.98 (1.7)	2.09 (1.8)	2.33 (2.0)	2.56 (2.2)	—	—	9.4×10 ⁻⁶	
莫来石	3Al ₂ O ₃ · 2SiO ₂	72Al ₂ O ₃ 28SiO ₂	2	1830(分 解熔融)	1850	0.151	6.16 (5.3)	4.42 (3.8)	3.95 (3.4)	—	4.0×10 ⁻⁶	4.5×10 ⁻⁶	5.3×10 ⁻⁶	
尖晶石	MgO· Al ₂ O ₃	71.8Al ₂ O ₃ 28.2MgO	3	2135	1900	0.192	15.00 (12.9)	9.07 (7.8)	5.82 (5.0)	—	7.2×10 ⁻⁶	8.2×10 ⁻⁶	9.0×10 ⁻⁶	
镁橄榄石	2MgO· SiO ₂	57.3MgO 42.7SiO ₂	5	1885	1750	0.201	5.35 (4.6)	3.14 (2.7)	2.44 (2.1)	—	8.3×10 ⁻⁶	9.5×10 ⁻⁶	11.0×10 ⁻⁶	
锆英石	ZrO ₂ · SiO ₂	67.1ZrO ₂ 32.9SiO ₂	20	2420(分 解熔融)	1870	0.128	5.82 (5.0)	4.30 (3.7)	4.07 (3.5)	—	3.0×10 ⁻⁶	4.0×10 ⁻⁶	4.2×10 ⁻⁶	

表 1-5 高熔点氧化物陶瓷的性质 (二)

物 质	机 械 性 质													
	真比重	莫氏 硬度	抗压强度/GPa				抗张强度/MPa				弹性模数/TPa			
			20℃	500℃	1000℃	1300℃	20℃	500℃	1000℃	1300℃	20℃	500℃	1000℃	1300℃
氧化铝	3.97	9	3.0	1.8	0.75	0.35	270	260	250	220	0.38	0.36	0.33	0.25
氧化铍	3.01	9	0.8	0.5	0.25	0.18	100	78	48	4	0.32	0.31	0.23	—
氧化钙	3.32	4.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
氧化镁	3.58	6	—	—	—	—	98	105	81	42	0.21	0.21	0.15	0.03
石英玻璃	2.20	6~7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
氧化钍	9.69	6.5	1.5	0.85	0.36	0.07	—	—	—	—	0.15	0.24	0.12	0.07
氧化钛	4.24	5.5 ~6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
氧化铀	10.90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
氧化锆	5.9	6.5	2.1	1.6	1.2	0.6	140	120	104	71	0.19	0.14	0.13	0.09
莫来石	3.16	6~7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
尖晶石	3.58	8	1.9	1.4	0.9	0.4	134	96	70	8	0.24	0.24	0.21	0.24
镁橄榄石	3.22	6~7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
锆英石	4.60	7.5	—	—	—	—	—	—	63	21	—	—	—	—

续表 1-5

物质	电性质					化学稳定性				
	电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$					还原 气氛	碳	酸性 熔剂	碱性 熔剂	熔融 金属
	100℃	500℃	1000℃	1500℃	2000℃					
氧化铝	2×10^{15}	7×10^{11}	7×10^6	3×10^3	—	良好	较好	良好	良好	良好
氧化铍	—	7×10^8	10^7	8×10^4	2×10^3	极好	极好	良好	较好	良好
氧化钙	—	700℃ 7×10^8		10^3	—	不好	不好	不好	较好	较好
氧化镁	—	—	10^7	5×10^4	7×10^2	不好	良好	良好	不好	—
石英玻璃	8×10^{13}	9×10^7	10^3	—	—	较好	良好	良好	不好	—
氧化钽	—	8×10^7	10^5	10^3	—	良好	较好	不好	良好	极好
氧化钛	—	3×10^7	800℃ 10^4	1200℃ 8×10	—	—	—	—	—	—
氧化铀	20℃ 4×10^4	5×10^2	—	—	—	良好	较好	良好	不好	良好
氧化锆	10^6	2×10^4	10^2	3×10	10	良好	较好	良好	不好	良好
莫来石	—	3×10^5	7×10^3	5×10^2	—	较好	较好	良好	较好	较好
尖晶石	—	3×10^7	2×10^5	6×10^4	—	—	较好	较好	良好	—
镁橄榄石	—	4×10^7	10^5	10^2	—	良好	较好	不好	良好	良好
锆英石	4×10^9	2×10^7	10^5	10^3	—	较好	较好	良好	不好	良好

(5) 某些难熔化合物的性能, 见表 1-6。

表 1-6 某些难熔化合物的性能

化合物	相对分子质量	晶型	熔点/℃	相对密度	热导率/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ (20℃)	线膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ (20~1000℃)	电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$	显微硬度/ $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$	弹性模量/MPa	耐压强度/MPa
HfC	190.50	立方	3887	11.0	6.28	5.6×10^{-6}	45×10^{-6}	2910	35.9×10^3	—
TiC	59.91	立方	3160	4.9	24.28	7.7×10^{-6}	52×10^{-6}	3000	46.0×10^3	1380
TaC	192.89	立方	3877	14.3	22.19	8.3×10^{-6}	42×10^{-6}	1600	29.1×10^3	—
ZrC	103.23	立方	3530	6.9	20.52	6.7×10^{-6}	50×10^{-6}	2930	35.5×10^3	1670
VC	62.95	立方	2810	5.3	24.70	4.2×10^{-6}	65×10^{-6}	2090	43.0×10^3	620
NbC	104.91	立方	3480	7.5	14.24	6.5×10^{-6}	51×10^{-6}	1960	34.5×10^3	—
Cr_3C_2	180.02	斜方	1895	6.6	19.26	11.7×10^{-6}	75×10^{-6}	1350	38.8×10^3	—
Mo_2C	203.89	—	2410	9.2	6.70	7.8×10^{-6}	71×10^{-6}	1500	54.0×10^3	—
WC	195.86	立方	2720	15.5	29.31	3.8×10^{-6}	19×10^{-6}	1780	81.0×10^3	560
SiC (α)	40.08	六方	2600	3.21	8.37	(5~7) $\times 10^{-6}$	50	3340	14.5×10^3	2250
B_4C	55.25	六方	2450	2.52	121.42	4.5×10^{-6}	0.44	3340	14.5×10^3	2250
HfN	192.50	立方	2980	13.84	—	6.9×10^{-6}	33×10^{-6}	1640	—	—
TiN	61.91	立方	3205	5.2	19.26	9.4×10^{-6}	25×10^{-6}	1990	25.6×10^3	1290
TaN	194.96	—	3090	13.8	385.19	3.6×10^{-6}	128×10^{-6}	1060	—	—
ZrN	105.23	立方	2980	6.97	20.52	7.2×10^{-6}	21×10^{-6}	1520	—	1000
VN	64.95	立方	2360	6.04	11.72	8.1×10^{-6}	85×10^{-6}	1520	—	—
NbN	106.91	立方	2300	8.4	3.77	10.1×10^{-6}	78×10^{-6}	1400	—	—
Cr_2N	118.01	立方	1500 (分)	6.1	21.77	9.4×10^{-6}	76×10^{-6}	1570	—	—
Mo_2N	205.98	—	分解	8.0	18.00	4.5×10^{-6}	—	630	—	—
WN	197.86	—	分解	12.1	—	—	—	—	—	—