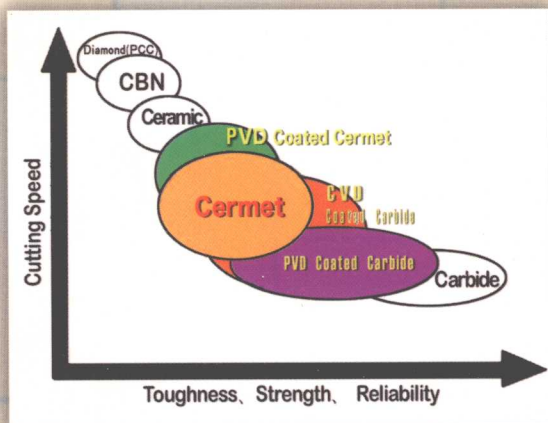


# 金属陶瓷的制备与应用

刘开琪 徐强 张会军 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

内容简介

本书介绍了金属陶瓷的制备与应用。全书共分五章。第一章介绍金属陶瓷的概述；第二章介绍金属陶瓷的制备；第三章介绍金属陶瓷的显微组织；第四章介绍金属陶瓷的力学性能；第五章介绍金属陶瓷的应用。

# 金属陶瓷的制备与应用

刘开琪 徐 强

张会军 编著



ISBN 7-111-02522-2 定价：18.00元

153369

153369

153369

北京 冶金工业出版社 153369

冶金工业出版社

北京 冶金工业出版社 153369

冶金工业出版社

## 内 容 简 介

本书内容共分12章,系统地介绍了金属陶瓷复合材料的设计,金属和陶瓷粉体的特性,金属陶瓷的成型,金属陶瓷材料的烧结,金属陶瓷复合材料的显微结构与性能,氧化物基金属陶瓷,碳化物基金属陶瓷,(碳)氮化物基金属陶瓷,硼化物基金属陶瓷,含石墨基金属陶瓷,其他金属陶瓷应用等。

### 图书在版编目(CIP)数据

金属陶瓷的制备与应用/刘开琪等编著. —北京:冶金工业出版社,2008.3

ISBN 978-7-5024-4486-0

I. 金… II. 刘… III. ①金属陶瓷—制备 ②金属陶瓷—应用 IV. TQ174.75

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第023566号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 章秀珍 王楠 美术编辑 张媛媛 版式设计 张青

责任校对 刘倩 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4486-0

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2008年3月第1版,2008年3月第1次印刷

850mm×1168mm 1/32;13.75印张;366千字;424页;1-3000册

42.00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

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

## 前 言

金属陶瓷复合材料由于兼有金属和陶瓷的某些优点，如金属的韧性和陶瓷的硬度、耐高温等，受到科研工作者的广泛关注，是材料领域研究的重点之一。近些年来，金属陶瓷的研究成果很多，新品种不断出现，理论体系也日趋成熟。传统金属陶瓷复合材料随着纳米技术的应用以及材料设计水平的提高其性能也得到提高。

为了展现近些年来金属陶瓷复合材料科研与生产所取得的进步，增加材料学同仁之间的交流，作者在结合科研工作中所关注问题的基础上编著了此书。

金属陶瓷复合材料的种类很多，本书主要是从狭义角度，即金属与陶瓷的块状体复合角度编写的。

本书作者结合自己的研究成果，参考了国内外公开发表的相关文献，尤其是相关的专著，重点介绍了金属陶瓷复合材料的复合原理、材料的成型、烧结等制备工艺，以及不同种类金属陶瓷的应用情况。

本书主要由钢铁研究总院刘开琪、张会军和北京理工大学徐强编写。其中第1章、第7~12章由刘开琪编写，第2章、第6章由徐强编写，第3章、第5章由张会军编写，第4章由杨金龙、刘开琪和张会军编写。

本书在编著过程中，得到宋慎泰、潘伟、洪彦若、樊震坤、殷书建、杨波给予的指导与帮助，刘永锋、唐光盛、李芳、杨燕参与了部分稿件的整理，在此表示感谢。编著过程中参考了大量国内外文献资料，在此向文献作者表示感谢。文后列出的参考文献如有遗漏请及时与编者联系，并敬请谅解。

金属陶瓷种类繁多，由于编者水平有限，书中出现不当之处敬请读者批评指正。

刘开琪

2008年1月于北京

刘开琪

刘开琪

刘开琪

刘开琪

# 目 录

1.4.1	金属陶瓷的未开涂层	314
1.4.2	金属陶瓷的未开涂层	314
1.4.3	金属陶瓷的未开涂层	314
1.4.4	金属陶瓷的未开涂层	314
1.5	金属陶瓷的未开涂层	315
1.6	金属陶瓷的未开涂层	315
1.7	金属陶瓷的未开涂层	315
1.8	金属陶瓷的未开涂层	315
1.9	金属陶瓷的未开涂层	315
1.10	金属陶瓷的未开涂层	315
1.11	金属陶瓷的未开涂层	315
1.12	金属陶瓷的未开涂层	315
1.13	金属陶瓷的未开涂层	315
1.14	金属陶瓷的未开涂层	315
1.15	金属陶瓷的未开涂层	315
1.16	金属陶瓷的未开涂层	315
1.17	金属陶瓷的未开涂层	315
1.18	金属陶瓷的未开涂层	315
1.19	金属陶瓷的未开涂层	315
1.20	金属陶瓷的未开涂层	315
1.21	金属陶瓷的未开涂层	315
1.22	金属陶瓷的未开涂层	315
1.23	金属陶瓷的未开涂层	315
1.24	金属陶瓷的未开涂层	315
1.25	金属陶瓷的未开涂层	315
1.26	金属陶瓷的未开涂层	315
1.27	金属陶瓷的未开涂层	315
1.28	金属陶瓷的未开涂层	315
1.29	金属陶瓷的未开涂层	315
1.30	金属陶瓷的未开涂层	315
1.31	金属陶瓷的未开涂层	315
1.32	金属陶瓷的未开涂层	315
1.33	金属陶瓷的未开涂层	315
1.34	金属陶瓷的未开涂层	315
1.35	金属陶瓷的未开涂层	315
1.36	金属陶瓷的未开涂层	315
1.37	金属陶瓷的未开涂层	315
1.38	金属陶瓷的未开涂层	315
1.39	金属陶瓷的未开涂层	315
1.40	金属陶瓷的未开涂层	315
1.41	金属陶瓷的未开涂层	315
1.42	金属陶瓷的未开涂层	315
1.43	金属陶瓷的未开涂层	315
1.44	金属陶瓷的未开涂层	315
1.45	金属陶瓷的未开涂层	315
1.46	金属陶瓷的未开涂层	315
1.47	金属陶瓷的未开涂层	315
1.48	金属陶瓷的未开涂层	315
1.49	金属陶瓷的未开涂层	315
1.50	金属陶瓷的未开涂层	315
1.51	金属陶瓷的未开涂层	315
1.52	金属陶瓷的未开涂层	315
1.53	金属陶瓷的未开涂层	315
1.54	金属陶瓷的未开涂层	315
1.55	金属陶瓷的未开涂层	315
1.56	金属陶瓷的未开涂层	315
1.57	金属陶瓷的未开涂层	315
1.58	金属陶瓷的未开涂层	315
1.59	金属陶瓷的未开涂层	315
1.60	金属陶瓷的未开涂层	315
1.61	金属陶瓷的未开涂层	315
1.62	金属陶瓷的未开涂层	315
1.63	金属陶瓷的未开涂层	315
1.64	金属陶瓷的未开涂层	315
1.65	金属陶瓷的未开涂层	315
1.66	金属陶瓷的未开涂层	315
1.67	金属陶瓷的未开涂层	315
1.68	金属陶瓷的未开涂层	315
1.69	金属陶瓷的未开涂层	315
1.70	金属陶瓷的未开涂层	315
1.71	金属陶瓷的未开涂层	315
1.72	金属陶瓷的未开涂层	315
1.73	金属陶瓷的未开涂层	315
1.74	金属陶瓷的未开涂层	315
1.75	金属陶瓷的未开涂层	315
1.76	金属陶瓷的未开涂层	315
1.77	金属陶瓷的未开涂层	315
1.78	金属陶瓷的未开涂层	315
1.79	金属陶瓷的未开涂层	315
1.80	金属陶瓷的未开涂层	315
1.81	金属陶瓷的未开涂层	315
1.82	金属陶瓷的未开涂层	315
1.83	金属陶瓷的未开涂层	315
1.84	金属陶瓷的未开涂层	315
1.85	金属陶瓷的未开涂层	315
1.86	金属陶瓷的未开涂层	315
1.87	金属陶瓷的未开涂层	315
1.88	金属陶瓷的未开涂层	315
1.89	金属陶瓷的未开涂层	315
1.90	金属陶瓷的未开涂层	315
1.91	金属陶瓷的未开涂层	315
1.92	金属陶瓷的未开涂层	315
1.93	金属陶瓷的未开涂层	315
1.94	金属陶瓷的未开涂层	315
1.95	金属陶瓷的未开涂层	315
1.96	金属陶瓷的未开涂层	315
1.97	金属陶瓷的未开涂层	315
1.98	金属陶瓷的未开涂层	315
1.99	金属陶瓷的未开涂层	315
2.00	金属陶瓷的未开涂层	315

## 第一篇 金属陶瓷的制备

1	绪论	1
1.1	1.1 金属陶瓷的定义	1
1.2	1.2 金属陶瓷的种类	1
1.3	1.3 金属陶瓷的特性	2
1.4	1.4 金属陶瓷的发展趋势	3
2	2 金属陶瓷复合材料的设计	5
2.1	2.1 金属陶瓷的设计原则	5
2.2	2.2 金属陶瓷的润湿性	6
2.2.1	2.2.1 金属陶瓷的润湿性机理	6
2.2.2	2.2.2 润湿性的测量方法	8
2.2.3	2.2.3 金属陶瓷润湿性的改善方法	13
2.3	2.3 金属陶瓷复合材料化学相容性原则	16
2.3.1	2.3.1 概述	16
2.3.2	2.3.2 热力学条件	17
2.3.3	2.3.3 动力学条件	20
2.4	2.4 金属陶瓷复合材料物理相容性原则	23
2.4.1	2.4.1 概述	23

· IV · 目 录

2.4.2	弹性模量	24
2.4.3	线膨胀系数	24
3	金属和陶瓷粉体的特性	26
3.1	粉末特性及其研究方法	26
3.1.1	化学成分及其研究方法	26
3.1.2	物理性能及其研究方法	28
3.1.3	工艺性能及其研究方法	36
3.1.4	纳米粉末的特性	38
3.2	陶瓷粉体的特性	39
3.2.1	常用氧化物粉末的特性	39
3.2.2	常用氮化物粉末的特性	43
3.2.3	常用硼化物的特性	45
3.2.4	常用碳化物的粉末特性	46
3.2.5	硅化物粉末的特性	47
3.2.6	陶瓷粉末的制备方法	48
3.3	金属粉体的特性	52
3.3.1	部分金属粉体的特性	52
3.3.2	金属粉体的制备	53
4	金属陶瓷材料的成型工艺	61
4.1	模压成型	61
4.1.1	工艺流程	61
4.1.2	模压方式	61
4.1.3	影响因素	62
4.1.4	特点	63
4.2	热压铸成型	63
4.2.1	工艺流程	63
4.2.2	蜡浆制备	63
4.2.3	压铸工艺参数	63

4.2.4	排蜡温度制度	64
4.2.5	蜡浆的特点	64
4.3	胶态成型	65
4.3.1	注射成型	69
4.3.2	压滤成型	73
4.3.3	离心注浆	75
4.3.4	凝胶注模成型	76
4.3.5	温度诱导絮凝成型	83
4.3.6	胶态振动注模成型	83
4.3.7	直接凝固注模成型工艺	84
4.3.8	其他胶态成型工艺	87
4.3.9	胶态成型工艺共同面临的关键技术	88
4.4	多孔陶瓷浸渍法	90
4.5	其他成型工艺	95
5	金属陶瓷材料的烧结	97
5.1	热压烧结	98
5.1.1	热压烧结的加热方式及模具材料	98
5.1.2	热压烧结的致密化过程	98
5.1.3	热压烧结的特点	99
5.2	气氛保护常压烧结	100
5.2.1	气氛的种类	100
5.2.2	气氛对烧结过程的影响	101
5.2.3	气氛烧结举例	102
5.3	金属陶瓷的反应烧结	108
5.3.1	反应烧结工艺过程及影响因素	108
5.3.2	金属陶瓷的反应烧结	110
5.3.3	反应烧结的特点	116
5.4	自蔓延烧结 (SHS)	116
5.4.1	自蔓延高温合成燃烧类型	118



5.4.2	SHS 过程的热力学和动力学条件	121
5.4.3	SHS 制备金属陶瓷	124
5.4.4	SHS 方法的优点	131
6	金属陶瓷复合材料的显微结构与性能	132
6.1	金属陶瓷复合材料显微结构分析方法	132
6.1.1	X 射线衍射分析	132
6.1.2	电镜分析	134
6.1.3	电子探针 X 射线显微分析	139
6.1.4	差热分析	141
6.1.5	热重分析	142
6.1.6	振动光谱	143
6.2	金属陶瓷复合材料物理性能测试方法	151
6.2.1	线膨胀系数	151
6.2.2	热导率	154
6.2.3	内耗	158
6.3	金属-氧化物复合材料的显微结构与性能	163
6.3.1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基金属陶瓷	163
6.3.2	ZrO <sub>2</sub> 基金属陶瓷	169
6.3.3	其他氧化物基金属陶瓷	172
6.4	金属-非氧化物复合材料的显微结构与性能	174
6.4.1	碳化物基金属陶瓷	174
6.4.2	碳氮化物基金属陶瓷	188
6.4.3	硼化物基金属陶瓷	194
	<b>第二篇 金属陶瓷的应用</b>	
7	氧化物基金属陶瓷	224
7.1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基金属陶瓷	225
7.1.1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Cr 金属陶瓷	225
7.1.2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Fe 金属陶瓷	228

7.1.3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Mo 金属陶瓷	229
7.1.4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Al 金属陶瓷	230
7.1.5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -W 金属陶瓷	231
7.1.6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Co 金属陶瓷	232
7.1.7	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -金属陶瓷刀具	234
7.1.8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Si 金属陶瓷	235
7.2	ZrO <sub>2</sub> 基金属陶瓷	235
7.2.1	ZrO <sub>2</sub> -Mo 金属陶瓷	235
7.2.2	ZrO <sub>2</sub> -Ni 金属陶瓷	236
7.2.3	ZrO <sub>2</sub> -W 金属陶瓷	240
7.3	MgO 基金属陶瓷	245
7.3.1	MgO-Mo 金属陶瓷	241
7.4	ZnO 基金属陶瓷	242
7.5	TiO 基金属陶瓷	243
7.6	Cu <sub>2</sub> O 基金属陶瓷	245
7.7	其他氧化物基金属陶瓷	246
8	碳化物基金属陶瓷	248
8.1	WC 基金属陶瓷	248
8.2	TiC 基金属陶瓷	250
8.2.1	TiC-Cu 金属陶瓷	252
8.2.2	TiC-Fe 金属陶瓷	254
8.2.3	TiC-Ni 金属陶瓷	255
8.3	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> 基金属陶瓷	255
8.4	B <sub>4</sub> C 基金属陶瓷	258
8.5	SiC 基金属陶瓷	263
8.5.1	SiC-Cu 金属陶瓷	263
8.5.2	SiC-Al 金属陶瓷	264
8.5.3	SiC-Fe 金属陶瓷	269
8.6	Ti <sub>3</sub> AlC <sub>2</sub> -Cu 金属陶瓷	269

8.7 其他碳化物基金属陶瓷	270
9 (碳)氮化物基金属陶瓷	271
9.1 AlN 基金属陶瓷	271
9.1.1 AlN-Mo 金属陶瓷	271
9.1.2 AlN-Ni 金属陶瓷	272
9.1.3 AlN-Al 金属陶瓷	274
9.1.4 AlN-W 金属陶瓷	276
9.1.5 AlN-不锈钢金属陶瓷	277
9.2 TiN 基金属陶瓷	278
9.3 Ti(C,N)基金属陶瓷	280
9.3.1 Ti(C,N)-Ni 金属陶瓷	288
9.3.2 Ti(C,N)-Mo 金属陶瓷	290
9.3.3 Ti(C,N)-Ni-Mo-Co 金属陶瓷	290
9.3.4 Ti(C,N)-Ni-Mo 金属陶瓷	292
9.3.5 Ti(C,N)-WC-Ni 金属陶瓷	293
9.3.6 Ti(C,N)-Mo <sub>2</sub> C-Ni 金属陶瓷	294
9.3.7 Ti(C,N)-WC-Co-Ni 金属陶瓷	295
9.3.8 Ti(C,N)-Ni-Mo-WC 金属陶瓷	296
9.3.9 Ti(C,N)-Ni-WC-Mo <sub>2</sub> C 金属陶瓷	301
9.3.10 Ti(C,N)-(Ni-Co)-Mo <sub>2</sub> C-Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> 金属陶瓷	302
9.4 纳米改性 Ti(C,N)金属陶瓷	306
9.4.1 纳米 TiN 改性 Ti(C,N)基金属陶瓷	307
9.4.2 纳米 Ti(C,N)改性 Ti(C,N)基金属陶瓷	308
9.5 (Ti,W,Ta)(C,N) <sub>p</sub> /Ti(C,N)基金属陶瓷	308
9.6 (W,Ti)(C,N)基金属陶瓷	309
9.7 NbN-Nb 金属陶瓷	310
9.8 SiN 基金属陶瓷	311
9.8.1 SiN-Cr-BN 金属陶瓷	311
9.8.2 SiN-Cr-BN 金属陶瓷复合层的优点	311

10 硼化物基金属陶瓷	313
10.1 $\text{TiB}_2$ 基金属陶瓷	316
10.1.1 $\text{TiB}_2$ -Fe 金属陶瓷	317
10.1.2 $\text{TiB}_2$ -FeMo 金属陶瓷	318
10.1.3 $\text{TiB}_2$ -Ti 金属陶瓷	318
10.1.4 $\text{TiB}_2$ -Cu 金属陶瓷	320
10.1.5 $\text{TiB}_2$ -Ni 金属陶瓷	322
10.1.6 $\text{TiB}_2$ -Al 金属陶瓷	324
10.1.7 $\text{TiB}_2$ - $\text{Ni}_3\text{Al}$ 金属陶瓷	324
10.1.8 $\text{TiB}_2$ -Co 金属陶瓷	326
10.1.9 $\text{TiB}_2$ -Cr 金属陶瓷	326
10.1.10 $\text{TiB}_2$ -(Cu, Ni) 金属陶瓷	327
10.2 $\text{ZrB}_2$ 基金属陶瓷	330
10.3 $\text{Fe}_2\text{B}$ 基金属陶瓷	331
10.4 多元硼化物基金属陶瓷	332
10.4.1 $\text{Mo}_2\text{FeB}_2$ 基金属陶瓷	334
10.4.2 $\text{Mo}_2\text{NiB}_2$ 三元硼化物基金属陶瓷	336
10.5 其他硼化物基金属陶瓷	337
10.5.1 CrB 及 $\text{CrB}_2$ 基金属陶瓷	337
10.5.2 $\text{TiC-TiB}_2$ 基金属陶瓷	338
10.5.3 $\text{M}_3\text{B}_2$ 系复合硼化金属陶瓷	338
10.5.4 $\text{AlMgB}_{14}$ 基金属陶瓷	339
10.5.5 TiB-Ti 金属陶瓷	339
10.5.6 $\text{MoB}_2$ -Ni 金属陶瓷	339
11 含石墨金属陶瓷	340
11.1 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Cu-石墨金属陶瓷复合材料	340
11.2 电接触材料	342
11.2.1 Cp-Cu-Cd 电接触材料	343
11.2.2 石墨-Cu 复合材料	345

11.2.3	Ag 基电接触材料	349
11.3	石墨-Ni-BaTiO <sub>3</sub> PTC 材料	352
11.4	炭石墨-Ag 复合材料	352
11.5	炭石墨金属陶瓷塑料	353
<b>12</b>	<b>其他金属陶瓷</b>	<b>354</b>
12.1	氧化物和非氧化物复合金属陶瓷	354
12.2	铝电解电极材料	357
12.2.1	铝电解惰性阳极	358
12.2.2	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 基金属陶瓷的制备及致密化	367
12.2.3	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 基金属陶瓷的力学性能及高温 导电性能	367
12.2.4	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 基金属陶瓷的电解腐蚀研究	369
12.3	固体氧化物燃料电池 (SOFC) 阳极材料	372
12.4	金属陶瓷摩擦材料	379
12.4.1	Cu 基金属陶瓷摩擦材料	383
12.4.2	铁基金属陶瓷摩擦材料	394
12.4.3	Fe <sub>3</sub> Al 基摩擦材料	402
<b>参考文献</b>		<b>404</b>

# 第一篇 金属陶瓷的制备

## 1 绪 论

### 1.1 金属陶瓷的定义

金属陶瓷 (cermet 或 ceramet) 是由陶瓷 (ceramic) 中的词头 Cer 与金属 (metal) 中的词头 met 结合起来构成。金属陶瓷是一种复合材料, 它的定义在不同时期略有不同, 如, 有的定义为由陶瓷和金属组成的一种材料, 或由粉末冶金方法制成的陶瓷与金属的复合材料。《辞海》定义为: 由金属和陶瓷原料制成的材料, 兼有金属和陶瓷的某些优点, 如前者的韧性和抗弯性, 后者的耐高温、高强度和抗氧化性能等。美国 ASTM 专业委员会定义为: 一种由金属或合金与一种或多种陶瓷相组成的非均质的复合材料, 其中后者约占 15% ~ 85% 体积分数, 同时在制备的温度下, 金属和陶瓷相之间的溶解度相当小。

李永久认为, 金属陶瓷按材料组成而言, 陶瓷相含量大于 50%, 他把金属陶瓷称为“陶瓷-金属复合材料”。作者在本书中所介绍的金属陶瓷是从狭义的角度定义的金属陶瓷, 即复合材料中金属和陶瓷相在三维空间上都存在界面的一类材料。

### 1.2 金属陶瓷的种类

我们研究金属陶瓷的目的是为了制取具有良好综合性能的材料。

料，而这些性能是仅用金属或仅用陶瓷所不能得到的。最常用的陶瓷原料有耐高温的氧化物、碳化物、氮化物、硅化物和硼化物等，最常用的金属有铁、镍、铬、钴等。

WC-Co 基金属陶瓷作为研究最早的金属陶瓷，由于具有很高的硬度（HRA80 ~ 92），极高的抗压强度 6000MPa（600kg/mm<sup>2</sup>），已经应用于许多领域。但是由于 W 和 Co 资源短缺，促使了无钨金属陶瓷的研制与开发，迄今已历经三代：第一代是“二战”期间，德国以 Ni 粘结 TiC 生产金属陶瓷；第二代是 20 世纪 60 年代美国福特汽车公司添加 Mo 到 Ni 粘结相中改善 TiC 和其他碳化物的润湿性，从而提高材料的韧性；第三代金属陶瓷则将氮化物引入合金的硬质相。改单一相为复合相，又通过添加 Co 和其他元素改善了粘结相。近年来，金属陶瓷研制的一个新方向是硼化物基金属陶瓷。由于硼化物陶瓷具有很高的硬度、熔点和优良的导电性、耐腐蚀性，从而使硼化物基金属陶瓷成为最有发展前途的金属陶瓷。

### 1.3 金属陶瓷的特性

为了使金属陶瓷同时具有金属和陶瓷的优良特性，首先必须有一个理想的组织结构，要达到理想的组织结构，就得注意以下几个主要原则：

(1) 金属对陶瓷相的润湿性要好。金属与陶瓷颗粒间的润湿能力是衡量金属陶瓷组织结构与性能优劣的主要条件之一，润湿能力愈强，则金属形成连续相的可能性愈大，金属陶瓷的性能愈好。

(2) 金属相与陶瓷相应无剧烈的化学反应。金属陶瓷制备时如果界面反应剧烈，形成化合物，就无法利用金属相改善陶瓷抵抗机械冲击和热震的性能。

(3) 金属相与陶瓷相的膨胀系数相差不可过大。金属陶瓷中的金属相和陶瓷相的膨胀系数相差较大时，会造成较大的内应力，降低金属陶瓷的热稳定性。

金属陶瓷既保持有陶瓷的高强度、高硬度、耐磨损、耐高温、抗氧化和化学稳定性等特性，又有较好的金属韧性和可塑性，是一类非常重要的复合材料，其用途极其广泛，几乎涉及到国民经济的各个部门和现代技术的各个领域，对工业的发展和生产率的提高起着重要的推动作用。

#### 1.4 金属陶瓷的发展趋势

金属陶瓷的制备与应用涉及很多领域知识，如陶瓷工艺学、金属学、物理化学以及相关科学技术。21 世纪是高科技世纪，高科技的发展促进了金属陶瓷的发展。目前，金属陶瓷的发展主要集中在以下几个方面：

(1) 新材料的研究与开发。工业技术的快速发展，对金属陶瓷提出了更高的要求，根据不同的使用环境，各国科学技术工作者正在积极从事金属陶瓷新材料的研制开发活动，主要包括三方面：硬质相正在向多样化方向发展，致力于开发新型硬质相和复合硬质相等；作为粘结相的金属或合金的种类不断增多，以资源丰富的金属代替资源短缺的金属（如用 Fe 和 Ni 代替 Co）；相成分范围逐渐拓宽，硬质相和粘结相的含量不断地突破以前研究的范围。

(2) 超细晶粒和纳米级金属陶瓷。近年来，从长期的生产经验和最新的研究发现，在金属陶瓷的成分中，当粘结相不变时，决定其力学性能的关键因素主要是材料中的硬质相的晶粒度。由于超细晶粒和纳米级金属陶瓷比常规金属陶瓷具有更高的强韧性、硬度、耐磨性等综合性能，因此受到了世界各工业大国（美国、瑞士、日本、德国、英国、俄罗斯等）的广泛关注，不少科学工作者正以极大的热情研制和开发这种新型金属陶瓷。

(3) 梯度金属陶瓷的应用开发。由于一些金属陶瓷制品在使用时，不同工作部位往往有着不同的性能要求，若采用现有的耐热金属、陶瓷或金属陶瓷等单一材料都难以满足这种工作条件，而采用陶瓷金属层状结构又会引起界面处的热应力集中，这



就需要开发热应力缓释型金属陶瓷，即梯度金属陶瓷，它是一种由于组织连续变化引起性能缓变的功能复合材料。这种材料可用作航天飞机的热防护材料、核反应堆的内壁材料、汽车发动机的燃烧室材料和梯度刀片材料等。

(4) 金属陶瓷回收再利用问题。近年来，受环境保护和资源利用意识的影响，金属陶瓷回收再利用问题的研究在不断地扩大和深入，但也存在一些问题。例如，因为有些国家利用回收再生料制造的金属陶瓷产品质量低劣，所以采用现代化技术和大规模生产模式实现资源的充分利用和经济效益的统一，已经成为金属陶瓷发展中不可忽略的问题。

(5) 基础研究的发展。限制金属陶瓷更深发展的主要问题在于相关的基础研究相对滞后，许多涉及材料本质的问题没有解决。近年来有关的研究已得到重视，相关理论也有了长足的发展。主要的研究热点有：1) 材料制备工艺过程机制；2) 通过控制工艺获得具有特定结构的材料；3) 材料结构形成机制；4) 制备工艺与性能的相互关系；5) 金属与陶瓷的润湿性问题；6) 界面结构研究等一系列问题。

（5）基础研究的发展。限制金属陶瓷更深发展的主要问题在于相关的基础研究相对滞后，许多涉及材料本质的问题没有解决。近年来有关的研究已得到重视，相关理论也有了长足的发展。主要的研究热点有：1) 材料制备工艺过程机制；2) 通过控制工艺获得具有特定结构的材料；3) 材料结构形成机制；4) 制备工艺与性能的相互关系；5) 金属与陶瓷的润湿性问题；6) 界面结构研究等一系列问题。

随着金属陶瓷技术的发展，其应用领域越来越广泛。在航空航天、汽车工业、机械制造、化工、能源、国防等领域，金属陶瓷材料都发挥着重要的作用。未来，随着科学技术的不断进步，金属陶瓷材料的研究和应用将取得更大的突破。