

# 陶瓷-金属复合材料

TAOCI-JINSHU FUHE CAILIAO (第2版)

李荣久 主编

冶金工业出版社



# 陶瓷-金属复合材料

(第2版)

李荣久 主编

北京

冶金工业出版社

2004

## 内 容 简 介

本书共分5篇27章。第一篇粉末原料的性能及制备方法,包括金属氧化物、难熔化合物、纳米粉末的性能及其制备。第二篇陶瓷-金属复合原理及材料的制取工艺,包括陶瓷-金属复合原理;陶瓷-金属复合材料的成形技术、烧结技术、热压技术、热等静压技术、定向结晶技术、自蔓延高温合成技术。第三篇陶瓷-金属复合材料及其应用,涉及氧化物、碳化物、氮化物、硼化物、硅化物、金刚石与金属的复合材料。第四篇陶瓷(金属)纤维及其复合材料,包括陶瓷纤维的性质及制备、纤维增强复合材料及应用、晶须及其性质、晶须增强复合材料。第五篇陶瓷-金属复合材料的研究和设计方法。

### 图书在版编目(CIP)数据

陶瓷-金属复合材料/李荣久主编.—2版.—北京:  
冶金工业出版社,2004.3  
ISBN 7-5024-3440-2

I.陶… II.李… III.陶瓷复合材料:金属复合材料  
IV.TB333

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第115043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 郭庚辰(手机13693126653) 美术编辑 李

责任校对 刘倩 李文彦 责任印制 牛晓波

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

1995年12月第1版,2004年3月第2版,2004年3月第3次印刷

787mm×1092mm 1/16;27.5印张;663千字;424页

69.00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)

## 第 2 版前言

现代科学技术的进步永远离不开材料科学的发展，因此新材料科学技术越来越受到人们的重视。《陶瓷-金属复合材料》一书自 1995 年第 1 次印刷出版以来，受到广大同仁、读者的欢迎。2002 年编者对原著进行了个别文字的修改后，冶金工业出版社发行了重印本，很快就脱销了。此间编者接到许多同仁及读者来信来电，要求增加现代技术的内容，使其尽可能全面反映复合材料学科的相关内容，为此我们重新编写了这本书，希望它能满足读者的要求。

复合材料无疑将成为材料科学未来发展的方向，如何运用最新的科学技术复合出性能优异的新材料是材料科技工作者肩负的历史重任。编者认为新型复合材料发展的主要问题是：

(1) 观念的改变。科技工作者必须转变传统观念，打破学科界限，吸人所长，补己所短，冲破学科界限，不断学习，掌握新学科领域的知识。

(2) 敏锐的洞察，把握科学技术的最新发展，尽快地把新技术应用到新材料的研究开发上来，比如纳米技术、自蔓延高温合成技术等。

(3) 新技术装备的研制开发是新型复合材料研究开发的重要手段，应予以高度重视。

为了方便广大同仁研究、开发新型复合材料，使广大读者更多了解复合材料、选择和应用复合材料，本书在修订中增加了纳米材料性能、制备和应用部分，并且在原有颗粒复合材料的基础上增加了纤维复合材料，在本书最后还列入了一些常用的附表以便于读者查阅。

本书由东北大学材料与冶金工程学院李荣久教授主编。李荣久（教授）编写了第 5 章、第 13 章，并做了全书文字、量纲的总校工作；茹红强（博士、教授）编写了第 25 章~第 27 章；孙旭东（博士生导师、教授）编写了第 5 章第 8 节；修稚萌（硕士、副教授）编写了第 4 章、第 6 章~第 10 章、第 19 章；何凤鸣（副教授）编写了第 15 章、第 20 章~第 25 章；霍地（博士、副教授）编写了第 12 章、第 16 章、第 17 章；重庆仪表材料研究所焦德辉（高级工程师）编写了第 18 章；北京钢铁研究总院韩欢庆（硕士、高级工程师）

编写了第11章、第3章第2节；肖振声（教授级高级工程师）编写了第13章部分章节；张宁（沈阳大学副教授，东北大学在读博士生）编写了第1章~第3章、第5章第2节、第14章。东北大学赵效德副教授为本书提供了许多重要资料并提出了宝贵建议。

由于复合材料发展迅速，领域十分广泛，本书只能涉及陶瓷-金属复合材料领域中之一角，加之编者水平所限，不妥之处请批评指正。

编者

2003年9月

## 第 1 版前言

半个世纪以来，材料科学工作者都在致力于某类单一材料（如金属及合金、陶瓷材料（新型工程陶瓷材料）和高分子材料等）的研究与攻关，超级合金、热机（陶瓷）材料及工程塑料就是典型的代表。人们力求使其性能达到理论值水平，虽然取得某些进展，但与理论值还有较大差距。值得庆幸的是许多科技工作者开始把注意力集中在复合材料的研究、开发上，有人曾预言 21 世纪将是复合材料的世纪。陶瓷-金属复合材料便是复合材料的典型代表之一。比如，热机用工程陶瓷材料按目前的研究水平，断裂韧性  $K_{IC}$  达到  $10\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  是有很大难度的，而陶瓷-金属复合材料可以轻易地达到  $13\sim 15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ，而且重现性好。陶瓷-金属复合材料已经在许多领域得到广泛应用，并显示了优异的性能。

近年来，已有许多关于“陶瓷-金属复合材料”方面的文献报道，其中，美国 J.R. 丁格尔波夫和 W.B. 克兰道尔主编的《金属陶瓷》（1960）和前苏联 R.S. 基斯基莱主编的《金属陶瓷》（1985），是陶瓷-金属复合材料方面的重要专著。

人们习惯上把金属与陶瓷的复合材料称为“金属陶瓷”。按现代材料的分类，它应属于复合材料；而按材料组成而言，多数应用材料，陶瓷相含量大于 50%。因此编者把书名定为“陶瓷-金属复合材料”。

我们对陶瓷-金属复合材料已经进行了大量的研究工作，并取得了很多成果，但至今尚没有一部陶瓷-金属复合材料方面的专著。为了使我国陶瓷-金属复合材料方面的开发不仅有理论作指导，而且能够充分借鉴国外的研究及应用成果，促进我国陶瓷-金属复合材料尽快形成一门产业，推动我国科学技术及新材料工业的发展，编写一部陶瓷-金属复合材料方面的专著是十分必要的。

本书的编写主要参阅了迄今为止发表的重要文献和专著。为了更好地为科技工作者的研究开发提供方便，书中把制造陶瓷-金属复合材料所用的主要粉末原料的性能及基本制取工艺作为独立的一篇予以介绍，书中最后一篇简要明了地介绍了陶瓷-金属复合材料的研究和设计方法。因此，本书不仅可以作为材料科学专业的学生、研究生的教材，也可以作为材料科技工作者在陶瓷-金属复合材料的制造、评价和使用过程中有价值的参考书。

编者希望通过阅读本书，使有关科技工作者不仅掌握和了解陶瓷-金属复合材料的优异性能，而且对其制造的原理、工艺和应用有一个较系统的了解，

能激发读者对陶瓷-金属复合材料研究与开发的兴趣，为推动我国新型复合材料的发展尽一点微薄之力。

本书编写过程中，东北大学李规华教授、魏海荣教授、严兰英副教授等为本书提出了许多宝贵意见；东北大学薛宏伟、李红雨对本书文字修改、某些技术细节的审定方面做了大量工作。这本书的完成是与他们的辛勤劳动分不开的，在此谨表谢意。

由于编者水平所限，本书一定有许多不足之处，甚至错误，请不吝指正。

**编 者**

1995年5月

# 目 录

绪 论	1
-----	---

## 第一篇 粉末原料的性能及制备方法

1 金属的基本性能及其粉末的制备	3
1.1 金属钨的性能及其粉末的制备	3
1.2 金属钼的性能及其粉末的制备	6
1.3 金属钽和铌的性能及其粉末的制备	9
1.4 金属钛的性能及其粉末的制备	11
1.5 金属锆的性能及其粉末的制备	13
1.6 金属铜的性能及其粉末的制备	15
1.7 金属铁、镍、钴的性能及其粉末的制备	16
1.8 金属铬的性能及其粉末的制备	19
2 金属氧化物的性能及其粉末的制备	20
2.1 高纯耐火氧化物的性质	20
2.2 陶瓷-金属复合材料常用耐火氧化物的性能	32
3 难熔化合物的性能及其粉末的制备	39
3.1 碳化物的性能及其粉末的制备	39
3.2 硼化物的性能及其粉末的制备	47
3.3 硅化物的性能及其粉末的制备	54
3.4 氮化物的性能及其粉末的制备	58
3.5 难熔硫化物	61
4 纳米粉末的性能与制备	62
4.1 纳米粉末的性能	62
4.2 纳米粉末的制备方法	67
4.3 典型纳米陶瓷粉末的制备	80
4.4 典型纳米金属粉末的制备	85
4.5 纳米复合粉末的制备	88
参考文献	91



## 第二篇 陶瓷-金属复合原理及材料的制取工艺

<b>5 陶瓷-金属复合原理</b> .....	95
5.1 陶瓷-金属复合材料组成的选择原则 .....	95
5.2 相间热力学相容性 .....	99
5.3 相间热力学共存性 .....	104
5.4 非金属元素在黏结金属中的溶解 .....	107
5.5 固态物质的表面能 .....	109
5.6 表面张力和液相对固相的润湿 .....	113
5.7 相界面的结合强度 .....	116
5.8 陶瓷-金属复合材料的增韧机理 .....	118
<b>6 陶瓷-金属复合材料粉末料的成形技术</b> .....	121
6.1 钢模内的压制成形 .....	121
6.2 粉浆浇注成形 .....	123
6.3 热压铸成形 .....	125
6.4 挤压成形 .....	127
6.5 等静压成形 .....	129
<b>7 陶瓷-金属复合材料的烧结技术</b> .....	132
7.1 烧结热力学 .....	132
7.2 烧结动力学 .....	133
7.3 烧结活化能 .....	136
<b>8 陶瓷-金属复合材料的热压技术</b> .....	138
8.1 热压过程的基本规律 .....	138
8.2 热压的微观机理 .....	139
8.3 烧结速率-压力曲线分析 .....	141
8.4 陶瓷-金属复合材料的热压 .....	143
8.5 热压设备和装置 .....	145
<b>9 陶瓷-金属复合材料的热等静压技术</b> .....	149
9.1 热等静压过程的基本规律 .....	149
9.2 气体静压力下的润湿 .....	151
9.3 热等静压设备 .....	152
<b>10 陶瓷-金属复合材料的定向结晶技术</b> .....	155
10.1 共晶陶瓷-金属复合材料的可能成分 .....	155

10.2 结晶的规律性·····	157
<b>11 陶瓷-金属复合材料的自蔓延高温合成技术</b> ·····	<b>161</b>
11.1 简介·····	161
11.2 自蔓延高温合成技术的形成过程与发展现状·····	162
11.3 自蔓延高温合成技术的基本特征与理论·····	163
11.4 自蔓延高温合成技术的应用·····	167
11.5 自蔓延高温合成陶瓷-金属复合材料·····	172
<b>12 陶瓷的金属化与封接</b> ·····	<b>174</b>
12.1 陶瓷表面金属化——被银法·····	174
12.2 烧结金属粉末法·····	176
12.3 活性金属法·····	184
12.4 氧化物焊料封接方法·····	187
12.5 非氧化物系陶瓷的封接·····	190
参考文献·····	202

### 第三篇 陶瓷-金属复合材料及其应用

<b>13 氧化物-金属复合材料</b> ·····	<b>206</b>
13.1 氧化铝-金属间的相互作用·····	206
13.2 锆、铬、钇、钽的氧化物-金属间的相互作用·····	211
13.3 氧化物-金属间的润湿·····	212
13.4 氧化物-金属键的形成·····	216
13.5 氧化物-金属均匀粉末混合物的制备·····	220
13.6 氧化物-金属粉末混合物毛坯的压制成形·····	221
13.7 氧化物基陶瓷-金属复合材料的烧结·····	224
13.8 氧化物基陶瓷-金属复合材料的性能·····	227
13.9 氧化物基陶瓷-金属复合材料的应用·····	231
<b>14 碳化物-金属复合材料</b> ·····	<b>234</b>
14.1 相的相互作用及液态金属对碳化物的润湿·····	235
14.2 相间结合·····	240
14.3 碳化钨基陶瓷-金属复合材料·····	241
14.4 碳化钛和碳化铬基陶瓷-金属复合材料·····	244
14.5 碳化物基陶瓷-金属复合材料的应用·····	245
<b>15 氮化物-金属复合材料</b> ·····	<b>247</b>
15.1 相平衡·····	247

15.2	固相的相互作用·····	250
15.3	液相的相互作用·····	251
15.4	相界面的连接·····	257
15.5	氮化物基陶瓷-金属复合材料的制取·····	258
15.6	氮化物基陶瓷-金属复合材料的应用·····	264
<b>16</b>	<b>硼化物-金属复合材料·····</b>	<b>268</b>
16.1	硼化物基陶瓷-金属复合材料的应用前景·····	268
16.2	硼化物与金属的固相反应·····	269
16.3	相间的相互作用和液态金属对硼化物的润湿·····	271
16.4	硼化物基陶瓷-金属复合材料的应用·····	277
<b>17</b>	<b>碳化硼-金属复合材料·····</b>	<b>281</b>
17.1	碳化硼基陶瓷-金属复合材料的一般性能·····	281
17.2	液态金属对碳化硼的润湿·····	282
17.3	润湿过程热力学·····	284
17.4	碳化硼多孔骨架的制备·····	285
17.5	铝和铜的合金对碳化硼的润湿·····	286
17.6	碳化硼-金属(合金)的相互作用·····	288
17.7	碳化硼基陶瓷-金属复合材料的强度·····	292
17.8	碳化硼基陶瓷-金属复合材料的应用·····	296
<b>18</b>	<b>硅化物-金属复合材料·····</b>	<b>297</b>
18.1	金属-硅的相互作用·····	297
18.2	硅化物的基本性质·····	299
18.3	硅化物基陶瓷-金属复合材料及其应用·····	313
<b>19</b>	<b>金刚石-金属复合材料·····</b>	<b>318</b>
19.1	金刚石的种类及基本性能·····	318
19.2	金刚石-金属的相互作用·····	323
19.3	金刚石工具·····	327
19.4	金刚石工具的胎体材料·····	330
19.5	金刚石-金属复合材料的制备·····	337
	参考文献·····	338

#### 第四篇 陶瓷(金属)纤维及其复合材料

<b>20</b>	<b>陶瓷纤维材料及性质·····</b>	<b>342</b>
20.1	概述·····	342

20.2	陶瓷纤维材料	342
20.3	陶瓷纤维的分类	344
20.4	陶瓷纤维的高温性能	345
20.5	陶瓷纤维材料的导热性能	346
20.6	陶瓷纤维的制法	348
<b>21</b>	<b>陶瓷金属纤维的性质及制备</b>	<b>349</b>
21.1	玻璃纤维	349
21.2	碳纤维	351
21.3	碳化硅纤维	361
21.4	硼纤维	362
21.5	氧化铝纤维	364
21.6	氮化硅纤维	365
21.7	硅-钛-碳-氧纤维	365
21.8	不锈钢纤维	366
<b>22</b>	<b>纤维增强复合材料及应用</b>	<b>369</b>
22.1	纤维增强复合材料机理	369
22.2	纤维增强陶瓷基复合材料	372
22.3	纤维增强金属基复合材料	373
22.4	纤维增强金属基复合材料的生产方法	378
22.5	碳纤维增强复合材料	380
22.6	碳纤维-碳复合材料	381
22.7	碳纤维-铝复合材料	383
22.8	碳纤维-氮化硅复合材料	385
22.9	碳纤维-石英复合材料	385
22.10	碳化硅纤维增强复合材料	385
22.11	硼纤维增强铝复合材料	387
22.12	氧化铝纤维增强复合材料	388
22.13	碳化硅纤维-碳化硅复合材料	390
22.14	钨合金纤维增强的镍基合金	390
<b>23</b>	<b>晶须及其性质</b>	<b>394</b>
23.1	SiC <sub>w</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4w</sub> 晶须	394
23.2	钛酸钾晶须 (KT <sub>w</sub> )	395
23.3	硼酸铝晶须 (AlB <sub>w</sub> )	396
23.4	石墨晶须 (Gr <sub>w</sub> )	397
23.5	碳化硅晶须	398

24 晶须增强复合材料	399
24.1 晶须增强金属材料	399
24.2 SiC 晶须-氮化硅陶瓷基复合材料	400
24.3 SiC 晶须-氧化铝陶瓷基复合材料	400
24.4 SiC 晶须-氮化铝陶瓷基复合材料	401
参考文献	402

## 第五篇 陶瓷-金属复合材料的研究和设计方法

25 显微组织结构研究方法	404
25.1 X 射线衍射分析	404
25.2 电镜分析	405
25.3 X 射线显微成分分析	406
25.4 差热分析	407
25.5 热重分析	408
26 陶瓷材料的性能研究方法	409
26.1 密度	409
26.2 弹性模量	409
26.3 泊松比	410
26.4 强度	410
26.5 断裂韧性	411
26.6 热震性	412
27 设计方法	414
27.1 经验性设计	414
27.2 定量性设计	414
27.3 概率性设计	414
参考文献	417
书中符号含义	418
附 录	421
附录 1 化学元素周期表	421
附录 2 常用硬度对照表	422
附录 3 常用标准筛制	423
附录 4 不同露点下气体的含湿量	424

## 绪 论

当今世界正面临着一场新的技术革命。它是以信息科学、材料科学、生物科学为前导的。任何一项新技术发明都与新材料分不开，为此，科学工作者都煞费苦心地寻求新的材料。

人们把现代技术中应用的材料分为4大类：金属材料，无机非金属材料，高分子材料和复合材料。金属材料虽然具有许多优良性能，如强度、延展性、导电性、导热性等，但是在许多情况下，耐高温、耐腐蚀、耐磨损等性能远远满足不了新技术发展的要求。无机非金属材料（陶瓷材料）近二三十年来得到了突飞猛进的发展，出现了许多性能优异的新型陶瓷材料，人们形容它们是“轻如铝，坚如钢”的材料，同时也研究出了形形色色的功能陶瓷材料。这些都在实际应用中发挥了巨大的作用。但是，陶瓷材料也还有一些难题需要解决（如韧性等）。高分子材料在高温领域的应用还受到一定的限制。随之得到迅速发展的，便是集上述各类材料之优点，克服其不足的复合材料。复合材料的研究与开发越来越受到世界各国的重视。陶瓷-金属复合材料便是复合材料的典型代表之一。

陶瓷-金属复合材料是由一种或多种陶瓷相与金属或合金组成的多相复合材料。美国标准试验方法（ASTM）陶瓷-金属复合材料研究委员会给陶瓷-金属复合材料下了如下定义：“一种由金属或合金与同一种或多种陶瓷相组成的非均质的复合材料，其中后者约占材料体积的15%~85%，同时在制备温度下，金属相与陶瓷相间的溶解度是极微弱的。”这个定义把某些“硬质相”、陶瓷相及金属相强化的合金从陶瓷-金属复合材料中去掉了，也把著名的烧结铝（SAP）材料从陶瓷-金属复合材料中排除了。

陶瓷-金属复合材料的非金属组分可以是氧化物，或是无氧的难熔化合物。因此，陶瓷-金属复合材料可分成以下类型：氧化物的（氧化物-金属），碳化物的（碳化物-金属），氮化物的（氮化物-金属），硼化物的（硼化物-金属）和硅化物的（硅化物-金属）。非金属成分使陶瓷-金属复合材料具有所要求的硬度、热强性和耐磨性；金属相把陶瓷-金属复合材料中的固体微粒组合在均一的物料中，目的是使制品能保证必要的强度和可塑性。因此，陶瓷-金属复合材料的性能取决于金属的性能、陶瓷的性能、两者的体积百分数、两者的结合性能及相界面的结合强度。必须指出，如果在相间存在的是单纯的机械结合力，则这种组织的强度极低。这种组织属于多相混合物，而不属于陶瓷-金属复合材料。陶瓷-金属复合材料是多相的并在其相邻相界面上存在化学键的复合物。

陶瓷-金属复合材料的优异性能使其可以在各种不同的技术领域内得到应用。同样的陶瓷-金属复合材料可应用于不同的方面。然而，按其性能和用途，可以把陶瓷-金属复合材料划分为以下的几种主要类型：耐热的，高度耐磨的，高度抗腐蚀性的以及具有特殊电性能的。

陶瓷-金属复合材料的研究、制造与应用涉及的学科和有关技术较多，比如化学、物理学、表面物理化学、冶金学、陶瓷材料学、金属学以及其他一些科学技术。

研制陶瓷-金属复合材料的工作始于1923年，当时在德国研制了首批硬质合金——陶瓷-金属复合材料的典型材料，后期又研制出铁-氧化铝的复合物。这些混合物材料被用做火箭发动机的涡轮叶片，而当混合物中铁含量大于30%（质量分数，本书所提到的陶瓷

相为体积分数，陶瓷相以外的含量，没有特殊标明者，均为质量分数）时它能经受住急冷急热而不破裂（从温度 800℃ 投入水中直接冷却）。

在第二次世界大战以后，新型的陶瓷-金属复合材料研制工作又得到了进一步的发展，开发出以碳化钛为基并添加铌、钽的碳化物的用钴和镍做黏结剂的陶瓷-金属复合材料。该陶瓷-金属复合材料中含有 10% ~ 30% 的镍，其强度：在室温情况下为 560 ~ 700MPa，820℃ 为 380MPa，980℃ 为 280MPa，1200℃ 为 88MPa。由 L. 基费尔 (Kiffer) 提出和研制的陶瓷-金属复合材料是以碳化钛为基，添加碳化钽和碳化铌，并用镍-钴-铬做黏结剂，这种陶瓷-金属复合材料被称之为 WZ-合金。这种陶瓷-金属复合材料的抗弯强度是 1000 ~ 1800MPa。以  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  为基并用镍黏结剂研制出的陶瓷-金属复合材料是 W.W. 格理高求 (Grigokiew) 和 W.N. 科利麦考 (Klimeko) 研制的。这种陶瓷-金属复合材料在碱、酸、海水和熔融玻璃中具有很高的耐腐蚀性。

以纯氮化物为基称为“黄金”类型的陶瓷-金属复合材料已在珠宝工业上采用，还应用于医疗器具上。以  $\text{TiN-MgO}$  为基并用镍黏结剂制成的陶瓷-金属复合材料，以及采用钼和钨黏结剂所制成的  $\text{TiN-Al}_2\text{O}_3$  陶瓷-金属复合材料已众所周知。然而最普遍采用的还是以镍、钼为黏结剂制成的氮碳化物陶瓷-金属复合材料  $\text{Ti(CN)-Ni(Mo)}$ 。

以硼化物为基研制出的一些陶瓷-金属复合材料，因具有极活泼的化合物的特性，实际上可以同所有金属发生反应。首先研制的硼化物陶瓷-金属复合材料是以锆和铬的硼化物为基并用镍做黏结剂在 1050℃ 用热压法制取的，它能在低温下应用。

在以氧化物基制成的陶瓷-金属复合材料中，质量最好、最成功的是 1950 年研制成的氧化铝-铬陶瓷-金属复合材料。因其在 1200℃ 的高温下还具有很高的稳定性，所以这种陶瓷-金属复合材料已被应用在火箭技术上（喷嘴垫片，火焰稳定器）、冶金生产上（调整金属流的芯棒，浇注槽沟，热电偶的保护套管）和涡轮机的制造上（不用润滑油就可正常运转的燃气轮机的高温密封装置）。

探索在高温烧结和结晶的情况下，相界面的结合过程具有重要意义，在研制和开发新型陶瓷-金属复合材料方面，尚需加强基础研究工作。在工艺方面，由于使用新技术制造粉末混合料，能保证组分的均匀混合，以及采用冷等静压和热等静压成形方法，技术上的不断进展是完全可能的。编者 1983 年研制成功的氧化铝-钼系列陶瓷-金属复合材料在 1200℃ 的铜熔体、1300℃ 的  $\text{BaCl}_2$  熔盐中可长期使用，并在 1650 ~ 1700℃ 的钢熔体中连续使用也都显示了较好的抗震和耐腐蚀性能。

编者曾用回归设计方法，给出了成分-性能关系的数学模型，为陶瓷-金属复合材料的成分设计摸索出一条新路。

# 第一篇 粉末原料的性能及制备方法

陶瓷-金属复合材料制品的生产工艺流程是从制取原料——粉末开始的。用于陶瓷-金属复合材料生产的粉末主要归结为3大类：第一类为具有高的熔点和低的高温蒸气压的纯金属，如钨、钼、钽、铌、钛等；第二类为金属氧化物，如氧化铝、氧化镁、氧化钇、氧化锆、氧化铍、氧化钙等；第三类为难熔化合物，如碳化物、氮化物、硼化物、硅化物等。制取粉末原料的方法很多，我们可以将其归纳为固相法制备粉末、液相法制备粉末、气相法制备粉末等。因为粉末及其制品的质量在很大程度上取决于制粉的方法，所以粉末的制备也是相当关键的环节。

本篇的内容主要介绍陶瓷-金属复合材料生产中常用粉末原料的性能并对其制备方法作一简单的介绍。

## 1 金属的基本性能及其粉末的制备

金属及其合金在不太高的温度（约400~900℃）时可以广泛地用做结构元件，但是在高温下（1500℃以上）由于受到熔点及蒸气压等因素的限制，则难以满足工程上的要求。单从熔点来看，熔点在1400℃以上的金属有多种，但综合高温下的机械强度，蒸气压和价格等方面的因素，适合于陶瓷-金属复合材料生产用的金属却为数不多，最常用的有钨、钼、钽、铌、钛、铁、钴、镍等。

### 1.1 金属钨的性能及其粉末的制备

钨是1781年瑞典化学家谢莱在用酸分解钨华矿物（重石）时发现的。两年以后，1783年又由另外一种钨矿物即钨锰铁矿制得钨酸，同年还用碳还原三氧化钨，首次制得钨粉<sup>[1]</sup>。

早在19世纪50年代就发现钨作为金属添加剂加入钢中，能提高钢的某些性能，但是钨钢的广泛应用却是19世纪末和20世纪初开始的。1900年在世界博览会上首次展出了添加钨的高速钢，从而促进了金属切削加工技术的发展，大幅度提高了生产率。同年用钨制成电灯泡的钨丝。在1923~1928年间，又研制出硬质合金，它的主要成分是碳化钨，用这种合金制作的工具，生产效率远超过最佳的合金工具钢，从而在现代工业生产中发挥着重要作用。

#### 1.1.1 钨的性质

钨属于元素周期表中的第VI族，致密的金属钨外观与钢相似。钨的熔点约为3395±15℃，超过除碳之外的所有元素。金属钨的沸点很高，为5930℃；在高温下其蒸发速度很慢；线（膨）胀系数很小。钨的电阻率约比铜大3倍。



钨的力学性能在很大程度上与它的压力加工和热处理状态有关。在冷态下，钨不能进行压力加工，锻压、轧制、拉丝均需在热态下进行。钨的物理、力学性能见表 1-1。

表 1-1 钨的物理、力学性能<sup>[1]</sup>

物理 性质	原子序数	74
	相对原子质量	183.92
	密度 /g·cm <sup>-3</sup>	19.3
	晶格类型	B.C.C
	晶格常数/nm	a = 0.31647
	熔点/℃	3395 ± 15
	沸点/℃	5930
	熔化热/J·g <sup>-1</sup>	256.2
	蒸发热/J·g <sup>-1</sup>	496.86
	质量热容/J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	
	291K	130.2
	1273K	153.3
	2373K	201.6
	导热系数/J·(m·s·℃) <sup>-1</sup>	
	20℃	130.2
	827℃	117.6
	1727℃	100.8
	线(膨)胀系数(0~500℃)/℃ <sup>-1</sup>	4.98 × 10 <sup>-6</sup>
	电阻率/Ω·cm	
	20℃	5.5 × 10 <sup>-6</sup>
	300℃	27.4 × 10 <sup>-6</sup>
	1200℃	40.0 × 10 <sup>-6</sup>
	2008℃	66.0 × 10 <sup>-6</sup>
3030℃	103.3 × 10 <sup>-6</sup>	
蒸气压/Pa		
2554℃	1.33 × 10 <sup>-3</sup>	
2767℃	1.33 × 10 <sup>-2</sup>	
3016℃	1.33 × 10 <sup>-1</sup>	
3309℃	1.33	
力学 性能	硬度 HB/MPa	
	烧结钨棒	2000~3000
	锻造钨棒	3500~4000
	抗拉强度 σ <sub>b</sub> /MPa	
	烧结钨棒	130
	锻造钨棒	350~1500
未退火钨丝	1800~4150	
退火钨丝	1100	
弹性模量(丝) E/MPa	350000~380000	