

陶瓷金属复合材料

(第 四 版)

李荣久 摇主编

北 摇 京

冶 金 工 业 出 版 社

圆 园 园 源

内摇容摇简摇介

本书共分 5 篇 10 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。

摇图书在版编目 (CIP) 数据

摇陶瓷金属复合材料 李荣久主编 16开 1北京：

冶金工业出版社，(010) 64256500

搖陽星苑園樂院冠園

摇 I 圆陶… II 圆李… III 圆陶瓷复合材料 金属复合材料

IV 圓珠月燕藻

中国版本图书馆 CIP 数据核字 () 第 号

出版人摇曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷獭号, 邮编 100009)

责任编辑摇郭庚辰 (手机 13910202252) 摇美术编辑摇李摇心

责任校对摇刘摇倩摇李文彦摇责任印制摇牛晓波

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

1985年 8月第 1版, 1985年 8月第 1版, 1985年 8月第 1次印刷

陈鹤亭 伊园 圆象 张；远 猿 千字；源 原 页

逐題單元

冶金工业出版社发行部电话：(010) 64257068 传真：(010) 64257067

冶金书店地址：北京东四西大街 源号 (源号) 摇电话：(源号) 远号

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

第 四 版 前 言

摇摇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 1983 年第 1 次印刷出版以来，受到广大同仁、读者的欢迎。1994 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 1 章、第 2 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 3 章～第 4 章；孙旭东（博士生导师、教授）编写了第 5 章第 1 节；修稚萌（硕士、副教授）编写了第 6 章、第 7 章～第 8 章、第 9 章；何凤鸣（副教授）编写了第 10 章、第 11 章～第 12 章；霍地（博士、副教授）编写了第 13 章、第 14 章、第 15 章；重庆仪表材料研究所焦德辉（高级工程师）编写了第 16 章；北京钢铁研究总院韩欢庆（硕士、高级工程师）

编写了第 员章、第 猿章第 圆节；肖振声（教授级高级工程师）编写了第 员章部分章节；张宁（沈阳大学副教授，东北大学在读博士生）编写了第 员章 ~ 第 猿章、第 缘章第 圆节、第 员章。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

圆 年 月

第 1 版前言

摇摇半个世纪以来，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，断裂韧性远达不到金属水平，而陶瓷/金属复合材料可以轻易地达到金属水平，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. 丁格尔波夫和辛. 克兰道尔主编的《金属陶瓷》（1979）和前苏联 B. 基斯莱主编的《金属陶瓷》（1983），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

2008年 12月

目 录

绪论..... 员

第一篇 粉末原料的性能及制备方法

金属的基本性能及其粉末的制备 猿

 金属钨的性能及其粉末的制备 猿

 金属钼的性能及其粉末的制备 远

 金属钽和铌的性能及其粉末的制备 怨

 金属钛的性能及其粉末的制备 员

 金属锆的性能及其粉末的制备 猿

 金属铜的性能及其粉末的制备 缘

 金属铁、镍、钴的性能及其粉末的制备 远

 金属铬的性能及其粉末的制备 怨

金属氧化物的性能及其粉末的制备 圆

 高纯耐火氧化物的性质 圆

 陶瓷金属复合材料常用耐火氧化物的性能 猿

难熔化合物的性能及其粉末的制备 猿

 碳化物的性能及其粉末的制备 猿

 硼化物的性能及其粉末的制备 苑

 硅化物的性能及其粉末的制备 缘

 氮化物的性能及其粉末的制备 缘

 难熔硫化物 远

纳米粉末的性能与制备 圆

 纳米粉末的性能 圆

 纳米粉末的制备方法 苑

 典型纳米陶瓷粉末的制备 愿

 典型纳米金属粉末的制备 愿

 纳米复合粉末的制备 愿

参考文献 怨

第二篇摇陶瓷璫属复合原理及材料的制取工艺

缘摇陶瓷璫属复合原理	怨缘
摇缘员摇陶瓷璫属复合材料组成的选择原则	怨缘
摇缘圆摇相间热力学相容性	怨怨
摇缘猿摇相间热力学共存性	员源
摇缘源摇非金属元素在黏结金属中的溶解	员苑
摇缘缘摇固态物质的表面能	员怨
摇缘远摇表面张力和液相对固相的润湿	员猿
摇缘苑摇相界面的结合强度	员远
摇缘愿摇陶瓷璫属复合材料的增韧机理	员愿
远摇陶瓷璫属复合材料粉末料的成形技术	员员
摇远员摇钢模内的压制成形	员员
摇远圆摇粉浆浇注成形	员猿
摇远猿摇热压铸成形	员缘
摇远源摇挤压成形	员苑
摇远缘摇等静压成形	员怨
苑摇陶瓷璫属复合材料的烧结技术	员圆
摇苑员摇烧结热力学	员圆
摇苑圆摇烧结动力学	员猿
摇苑猿摇烧结活化能	员远
愿摇陶瓷璫属复合材料的热压技术	员愿
摇愿员摇热压过程的基本规律	员愿
摇愿圆摇热压的微观机理	员怨
摇愿猿摇烧结速率璫力曲线分析	员员
摇愿源摇陶瓷璫属复合材料的热压	员猿
摇愿缘摇热压设备和装置	员缘
怨摇陶瓷璫属复合材料的热等静压技术	员怨
摇怨员摇热等静压过程的基本规律	员怨
摇怨圆摇气体静压力下的润湿	员员
摇怨猿摇热等静压设备	员圆
员摇陶瓷璫属复合材料的定向结晶技术	员缘
摇员员摇共晶陶瓷璫属复合材料的可能成分	员缘

陶瓷结晶的规律性	苑
陶瓷金属复合材料的自蔓延高温合成技术	苑
陶瓷简介	苑
陶瓷自蔓延高温合成技术的形成过程与发展现状	苑
陶瓷自蔓延高温合成技术的基本特征与理论	苑
陶瓷自蔓延高温合成技术的应用	苑
陶瓷自蔓延高温合成陶瓷金属复合材料	苑
陶瓷的金属化与封接	苑
陶瓷表面金属化——被银法	苑
陶瓷烧结金属粉末法	苑
陶瓷活性金属法	苑
陶瓷氧化物焊料封接方法	苑
陶瓷非氧化物系陶瓷的封接	苑
参考文献	苑

第三篇 陶瓷金属复合材料及其应用

陶瓷金属复合材料	苑
陶瓷氧化铝金属间的相互作用	苑
陶瓷锆、铬、钇、钽的氧化物金属间的相互作用	苑
陶瓷氧化物金属间的润湿	苑
陶瓷氧化物金属键的形成	苑
陶瓷氧化物金属均匀粉末混合物的制备	苑
陶瓷氧化物金属粉末混合物毛坯的压制成形	苑
陶瓷氧化物基陶瓷金属复合材料的烧结	苑
陶瓷氧化物基陶瓷金属复合材料的性能	苑
陶瓷氧化物基陶瓷金属复合材料的应用	苑
陶瓷碳化物金属复合材料	苑
陶瓷相的相互作用及液态金属对碳化物的润湿	苑
陶瓷相间结合	苑
陶瓷碳化钨基陶瓷金属复合材料	苑
陶瓷碳化钛和碳化铬基陶瓷金属复合材料	苑
陶瓷碳化物基陶瓷金属复合材料的应用	苑
陶瓷氮化物金属复合材料	苑
陶瓷相平衡	苑

摇员愿摇固相的相互作用	愿苑
摇员愿摇液相的相互作用	愿员
摇员愿摇相界面的连接	愿苑
摇员愿摇氮化物基陶瓷璁属复合材料的制取	愿愿
摇员愿摇氮化物基陶瓷璁属复合材料的应用	愿源
员摇硼化物璁属复合材料	愿愿
摇员愿摇硼化物基陶瓷璁属复合材料的应用前景	愿愿
摇员愿摇硼化物与金属的固相反应	愿怨
摇员愿摇相间的相互作用和液态金属对硼化物的润湿	愿员
摇员愿摇硼化物基陶瓷璁属复合材料的应用	愿苑
员摇碳化硼璁属复合材料	愿员
摇员愿摇碳化硼基陶瓷璁属复合材料的一般性能	愿员
摇员愿摇液态金属对碳化硼的润湿	愿园
摇员愿摇润湿过程热力学	愿源
摇员愿摇碳化硼多孔骨架的制备	愿缘
摇员愿摇铝和铜的合金对碳化硼的润湿	愿远
摇员愿摇碳化硼璁属 (合金) 的相互作用	愿愿
摇员愿摇碳化硼基陶瓷璁属复合材料的强度	愿园
摇员愿摇碳化硼基陶瓷璁属复合材料的应用	愿远
员摇硅化物璁属复合材料	愿苑
摇员愿摇金属璁的相互作用	愿苑
摇员愿摇硅化物的基本性质	愿怨
摇员愿摇硅化物基陶瓷璁属复合材料及其应用	猿猿
员摇金刚石璁属复合材料	猿愿
摇员愿摇金刚石的种类及基本性能	猿愿
摇员愿摇金刚石璁属的相互作用	猿猿
摇员愿摇金刚石工具	猿苑
摇员愿摇金刚石工具的胎体材料	猿园
摇员愿摇金刚石璁属复合材料的制备	猿苑
参考文献	猿愿

第四篇摇陶瓷 (金属) 纤维及其复合材料

愿摇陶瓷纤维材料及性质	猿园
摇愿摇概述	猿园

陶瓷纤维材料	猿
陶瓷纤维的分类	猿
陶瓷纤维的高温性能	猿
陶瓷纤维材料的导热性能	猿
陶瓷纤维的制法	猿
陶瓷金属纤维的性质及制备	猿
玻璃纤维	猿
碳纤维	猿
碳化硅纤维	猿
硼纤维	猿
氧化铝纤维	猿
氮化硅纤维	猿
硅氮碳纤维	猿
不锈钢纤维	猿
纤维增强复合材料及应用	猿
纤维增强复合材料机理	猿
纤维增强陶瓷基复合材料	猿
纤维增强金属基复合材料	猿
纤维增强金属基复合材料的生产方法	猿
碳纤维增强复合材料	猿
碳纤维复合材料	猿
碳纤维铝复合材料	猿
碳纤维氮化硅复合材料	猿
碳纤维石英复合材料	猿
碳化硅纤维增强复合材料	猿
硼纤维增强铝复合材料	猿
氧化铝纤维增强复合材料	猿
碳化硅纤维氮化硅复合材料	猿
钨合金纤维增强的镍基合金	猿
晶须及其性质	猿
晶须, 晶须	猿
钛酸钾晶须 (云母)	猿
磷酸铝晶须 (氧化铝)	猿
石墨晶须 (金刚石)	猿
碳化硅晶须	猿

圆瑶晶须增强复合材料·····	猿怨
摇圆瑶晶须增强金属材料·····	猿怨
摇圆瑶晶须氧化硅陶瓷基复合材料·····	源园
摇圆瑶晶须氧化铝陶瓷基复合材料·····	源园
摇圆瑶晶须氧化铝陶瓷基复合材料·····	源员
参考文献·····	源圆

第五篇摇陶瓷金属复合材料的研究和设计方法

圆瑶显微组织结构研究方法·····	源源
摇圆瑶射线衍射分析·····	源源
摇圆瑶电镜分析·····	源缘
摇圆瑶射线显微成分分析·····	源远
摇圆瑶差热分析·····	源苑
摇圆瑶热重分析·····	源愿
圆瑶陶瓷材料的性能研究方法·····	源怨
摇圆瑶密度·····	源怨
摇圆瑶弹性模量·····	源怨
摇圆瑶泊松比·····	源园
摇圆瑶强度·····	源园
摇圆瑶断裂韧性·····	源员
摇圆瑶热震性·····	源圆
圆瑶设计方法·····	源源
摇圆瑶经验性设计·····	源源
摇圆瑶定量性设计·····	源源
摇圆瑶概率性设计·····	源源
参考文献·····	源苑
书中符号含义·····	源愿
附摇摇录·····	源员
摇附录 员瑶化学元素周期表·····	源员
摇附录 圆瑶常用硬度对照表·····	源圆
摇附录 猿瑶常用标准筛制·····	源猿
摇附录 源瑶不同露点下气体的含湿量·····	源源

绪摇摇论

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源大类：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~~10%~50%~~，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（~~AlN~~）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~~1930~~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~~10%~~（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 1500°C 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 $10\% \sim 15\%$ 的镍，其强度：在室温情况下为 $1000 \sim 1200 \text{ MPa}$ ， 1000°C 时为 400 MPa ， 1200°C 时为 200 MPa 。由 Czerniak （ 1950 ）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，并用镍做黏结剂，这种陶瓷金属复合材料被称之为“ Czerniak 合金”。这种陶瓷金属复合材料的抗弯强度是 $1000 \sim 1200 \text{ MPa}$ ，以 Czerniak 为基并用镍黏结剂研制出的陶瓷金属复合材料是 Czerniak 合金（ 1950 ）和 Czerniak 合金（ 1950 ）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 TiN 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 TiN 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 TiN 。

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 1500°C 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 年研制成的氧化铝陶瓷金属复合材料。因其在 1500°C 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物，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，技术上的不断进步是完全可能的。编者 1950 年研制成功的氧化铝系列陶瓷金属复合材料在 1500°C 的铜熔体、 1500°C 的 FeO 熔盐中可长期使用，并在 1500°C 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。

第一篇摇粉末原料的性能及制备方法

摇摇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 猿大类：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。

摇摇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 源园园~ 怨园园益）时可以广泛地用做结构元件，但是在高温下（员圆园益以上）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 员圆园益以上的金属有多种，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。

摇摇金属钨的性能及其粉末的制备

钨是 员愿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，员愿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^{〔员〕}。

早在 员愿世纪 缘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 员愿世纪末和 圆世纪初开始的。员愿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 员愿~ 员愿年间，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。

摇摇摇摇钨的性质

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 猿猿缘缘益，超过除碳之外的所有元素。金属钨的沸点很高，为 缘猿益；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 猿倍。

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 员

表 员 摇钨的物理、力学性能 原

物理 性质	摇原子序数	摇摇苑
	摇相对原子质量	摇摇愿
	摇密度 转· 糟 ^原	摇摇愿
	摇晶格类型	摇摇月
	摇晶格常数 转	摇摇葬
	摇熔点 转	摇摇猿
	摇沸点 转	摇摇猿
	摇熔化热 转· 早 ^原	摇摇愿
	摇蒸发热 转· 早 ^原	摇摇猿
	摇质量热容 转· 早 ^原 · 运 ^原	摇
	摇摇摇摇愿	摇摇愿
	摇摇摇摇愿	摇摇愿
	摇摇摇摇愿	摇摇愿
	摇导热系数 转· (皂· 泽· 益) ^原	摇
	摇摇摇摇愿	摇摇愿
	摇摇摇摇愿	摇摇愿
	摇摇摇摇愿	摇摇愿
	线（膨）胀系数 (园- 缘益) 转 ^原	摇摇愿
	电阻率 转· 糟	摇
	摇摇摇摇愿	摇摇愿
	摇摇摇摇愿	摇摇愿
	摇摇摇摇愿	摇摇愿
	摇摇摇摇愿	摇摇愿
	摇摇摇摇愿	摇摇愿
	摇摇摇摇愿	摇摇愿
	蒸气压 转	摇
	摇摇摇摇愿	摇摇愿
	摇摇摇摇愿	摇摇愿
	摇摇摇摇愿	摇摇愿
	摇摇摇摇愿	摇摇愿

力学性能	硬度 H_{HV} 洛氏	摇
	摇摇摇摇烧结钨棒	圆摇摇- 猿摇摇
	摇摇摇摇锻造钨棒	猿摇摇- 源摇摇
	抗拉强度 $\sigma_{\text{拉}}$ 洛氏	摇
	摇摇摇摇烧结钨棒	员圆
	摇摇摇摇锻造钨棒	猿圆- 员圆
	摇摇摇摇未退火钨丝	员圆- 源圆
	摇摇摇摇退火钨丝	员圆
	弹性模量 (丝) 洛氏	猿圆- 猿圆

钨在空气中是稳定的, 在 源圆- 缘圆益钨开始显著氧化, 温度再升高, 钨猛烈地氧化成黄色的三氧化钨。

钨在氢中一直到熔化温度都不与氢发生反应。氮与钨只是当温度高于 圆圆益时才发生反应。生成氮化钨 (宰晕或其他成分), 在没有氮化剂存在的条件下, 高于 愿圆益氮化钨即分解。

在炽热温度下, 水蒸气能强烈地将钨氧化, 生成 宰韵和 宰韵。

固体碳和含碳气体 (悦韵、悦匀、悦匀等), 在 愿圆- 员圆益与钨发生反应生成钨的碳化物 宰悦和 宰悦。

常温下, 氟能与钨发生反应。温度升高到 员圆- 猿圆益时, 反应加快并生成易挥发的 宰云。致密金属钨在 愿圆益能与氯发生反应, 生成 宰悦。

硫和硒的蒸气, 还有 匀杂和 匀藻 高于 源圆益时都能和钨发生反应, 生成 宰杂和 宰藻。

常温下, 钨在任意浓度的盐酸、硫酸、硝酸和氢氟酸及王水中都不被腐蚀。加热到 愿圆- 员圆益, 金属钨在氢氟酸中还是稳定的, 与硫酸、盐酸也只发生微弱的反应, 硝酸和王水对它多少有些明显的腐蚀, 在氢氟酸和王水的混合酸中, 钨很快即被溶解。

常温下, 钨与碱溶液不发生反应。如有空气存在, 熔融碱能将钨氧化成钨酸盐, 如有氧化剂 (宰晕韵、宰晕韵、运造韵、孕造韵) 存在时, 该反应进行得非常激烈。

钨粉的制备

粉末冶金工业中所用钨粉是由氢还原三氧化钨制得的。钨的氧化物中比较稳定的有 源种: 黄色氧化钨 (α 相) —— 宰韵; 蓝色氧化钨 (β 相) —— 宰韵; 紫色氧化钨 (γ 相) —— 宰韵, 褐色氧化钨 (δ 相) —— 宰韵。宰韵又有不同的晶型。第一种晶型从室温到 苑圆益是稳定的, 为单斜晶型; 第二种晶型在 苑圆- 员圆益是稳定的, 为斜方晶型; 还有一种晶型在 员圆益以上稳定。

钨有两种同素异晶体: α 宰和 β 宰。 α 宰为体心立方晶格, 点阵常数为 圆缘远皂; β 宰为面心立方晶格, 点阵常数为 圆缘远皂。 β 宰在低于 远圆益时由氢还原三氧化钨而生成, 其特点是化学活性大, 易自燃。 β 宰转变为 α 宰的转变点为 远圆益, 但不发生 α 宰 $\rightarrow$ β 宰的逆转变。

氢还原法生产钨粉的基本原理

氢还原三氧化钨分 源个阶段进行, 按下列反应相应地生成 源种钨的氧化物: 宰韵、宰韵、宰韵、宰韵。

此乃试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com