



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

先进材料 连接技术及应用

李亚江 等著



化学工业出版社

非外借



“中国制造2025”
出版工程

“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

先进材料 连接技术及应用

李亚江 等著

先进材料连接技术的应用产生了明显的经济效益和社会效益,是值得大力推广的。本书针对近年来受到人们关注的先进材料,如高技术陶瓷、金属间化合物、复合材料、功能材料等,对其连接原理、焊接性特点、技术要点及应用等做了系统的阐述,给出一些典型工程结构连接的应用示例,可以指导新产品研发。本书内容反映出近年来先进材料连接技术的发展,特别是一些高新技术的发展,对推动先进材料的焊接应用有重要的意义。本书供从事与材料开发和焊接技术相关事业的工程技术人员使用,也可供高等院校师生、科研院(所)和企业单位的科研人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进材料连接技术及应用/李亚江等著. —北京:化学工业出版社, 2018. 6

(“中国制造 2025”出版工程)

ISBN 978-7-122-32014-8

I. ①先… II. ①李… III. ①工程材料-焊接工艺
IV. ①TG457

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 079931 号

责任编辑:曾越 张兴辉
责任校对:宋夏

文字编辑:陈喆
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张22 $\frac{3}{4}$ 字数431千字 2018年10月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:98.00 元

版权所有 违者必究

科学是永无止境的，它是一个永恒之谜。

——爱因斯坦



“中国制造2025”
出版工程

《“中国制造 2025”出版工程》

编委会

主任

孙优贤（院士）

副主任（按姓氏笔画排序）

王天然（院士） 杨华勇（院士） 吴澄（院士）

陈纯（院士） 陈杰（院士） 郑南宁（院士）

桂卫华（院士） 钱锋（院士） 管晓宏（院士）

委员（按姓氏笔画排序）

马正先	王大珩	王天然	王荣明	王耀南	田彦涛
巩水利	乔非	任春年	伊廷锋	刘敏	刘延俊
刘会聪	刘利军	孙长银	孙优贤	杜宇雷	李莉
李慧	李少远	李亚江	李嘉宁	杨卫民	杨华勇
吴飞	吴澄	吴伟国	宋浩	张平	张晶
张从鹏	张玉茹	张永德	张进生	陈为	陈刚
陈纯	陈杰	陈万米	陈长军	陈华钧	陈兵旗
陈茂爱	陈继文	陈增强	罗映	罗学科	郑南宁
房立金	赵春晖	胡昌华	胡福文	姜金刚	费燕琼
桂卫华	柴毅	钱锋	徐继宁	郭彤颖	曹巨江
康锐	焦志伟	曾宪武	谢颖	谢胜利	蔡登
管晓宏	魏青松				

序

制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。近十年来，我国制造业持续快速发展，综合实力不断增强，国际地位得到大幅提升，已成为世界制造业规模最大的国家。但我国仍处于工业化进程中，大而不强的问题突出，与先进国家相比还有较大差距。为解决制造业大而不强、自主创新能力弱、关键核心技术与高端装备对外依存度高等制约我国发展的问题，国务院于2015年5月8日发布了“中国制造2025”国家规划。随后，工信部发布了“中国制造2025”规划，提出了我国制造业“三步走”的强国发展战略及2025年的奋斗目标、指导方针和战略路线，制定了九大战略任务、十大重点发展领域。2016年8月19日，工信部、发展改革委、科技部、财政部四部委联合发布了“中国制造2025”制造业创新中心、工业强基、绿色制造、智能制造和高端装备创新五大工程实施指南。

为了响应党中央、国务院做出的建设制造强国的重大战略部署，各地政府、企业、科研部门都在进行积极的探索和部署。加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展，推动我国制造模式从“中国制造”向“中国智造”转变，加快实现我国制造业由大变强，正成为我们新的历史使命。当前，信息革命进程持续快速演进，物联网、云计算、大数据、人工智能等技术广泛渗透于经济社会各个领域，信息经济繁荣程度成为国家实力的重要标志。增材制造（3D打印）、机器人与智能制造、控制和信息化技术、人工智能等领域技术不断取得重大突破，推动传统工业体系分化变革，并将重塑制造业国际分工格局。制造技术与互联网等信息技术融合发展，成为新一轮科技革命和产业变革的重大趋势和主要特征。在这种中国制造业大发展、大变革背景之下，化学工业出版社主动顺应技术和产业发展趋势，组织出版《“中国制造2025”出版工程》丛书可谓勇于引领、恰逢其时。

《“中国制造2025”出版工程》丛书是紧紧围绕国务院发布的实施制造强国战略的第一个十年的行动纲领——“中国制造2025”的一套高水平、原创性强的学术专著。丛书立足智能制造及装备、控制及信息技术两大领域，涵盖了物联网、大数

据、3D 打印、机器人、智能装备、工业网络安全、知识自动化、人工智能等一系列的核心技术。丛书的选题策划紧密结合“中国制造 2025”规划及 11 个配套实施指南、行动计划或专项规划，每个分册针对各个领域的一些核心技术组织内容，集中体现了国内制造业领域的技术发展成果，旨在加强先进技术的研发、推广和应用，为“中国制造 2025”行动纲领的落地生根提供了有针对性的方向引导和系统性的技术参考。

这套书集中体现以下几大特点：

首先，丛书内容都力求原创，以网络化、智能化技术为核心，汇集了许多前沿科技，反映了国内外最新的一些技术成果，尤其国内的相关原创性科技成果得到了体现。这些图书中，包含了获得国家与省部级诸多科技奖励的许多新技术，图书的出版对新技术的推广应用很有帮助！这些内容不仅为技术人员解决实际问题，也为研究提供新方向、拓展新思路。

其次，丛书各分册在介绍相应专业领域的新技术、新理论和新方法的同时，优先介绍有应用前景的新技术及其推广应用的范例，以促进优秀科研成果向产业的转化。

丛书由我国控制工程专家孙优贤院士牵头并担任编委会主任，吴澄、王天然、郑南宁等多位院士参与策划组织工作，众多长江学者、杰青、优青等中青年学者参与具体的编写工作，具有较高的学术水平与编写质量。

相信本套丛书的出版对推动“中国制造 2025”国家重要战略规划的实施具有积极的意义，可以有效促进我国智能制造技术的研发和创新，推动装备制造业的技术转型和升级，提高产品的设计能力和技术水平，从而多角度地提升中国制造业的核心竞争力。

中国工程院院士

潘圣麟

前言

历史上每一种新材料的出现，都伴随着新的连接工艺的出现并推动了科学技术的发展。先进材料的研究开发是多学科相互渗透的结果，连接技术对其推广应用起着至关重要的作用，并在电子、能源、汽车、航空航天、核工业等部门中得到了应用。

先进材料的开发是发展高新技术的重要物质基础，先进材料的连接在工程结构中是经常遇到的，而且在实践中出现的问题较多，有时甚至阻碍了整个工程的进展。特别是许多先进材料的连接，采用常规的焊接方法难以完成，先进焊接技术的优越性日益突现。

为配合“中国制造 2025”国家制造强国战略，适应先进材料的发展，本书从理论与实践相结合的角度，针对近年来受到人们关注的先进材料（如高技术陶瓷、金属间化合物、复合材料、功能材料等）的连接问题，对其连接原理、焊接性特点、技术要点及应用等做了系统的阐述，力求突出科学性、先进性和新颖性等特色。本书内容反映出近年来先进材料连接技术的发展，特别是一些高新技术的发展，对推动先进材料的焊接应用有重要的意义。书中给出一些先进材料结构连接的应用示例，可以指导新产品研发。

本书供从事与材料开发和焊接技术相关的工程技术人员使用，也可供高等院校师生、科研院（所）和企事业单位的科研人员参考。

参加本书撰写的其他人员还有：王娟、马海军、夏春智、陈茂爱、刘鹏、沈孝芹、黄万群、吴娜、李嘉宁、刘如伟、马群双、刘坤、蒋庆磊、魏守征。

由于笔者水平所限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

著 者

目录

1 第1章 概述

- 1.1 先进材料的分类和性能特点 / 1
 - 1.1.1 先进材料的分类 / 1
 - 1.1.2 先进材料的性能特点 / 2
- 1.2 先进材料的应用及发展前景 / 7
 - 1.2.1 先进陶瓷 / 7
 - 1.2.2 金属间化合物 / 8
 - 1.2.3 叠层材料 / 9
 - 1.2.4 复合材料 / 10
 - 1.2.5 功能材料 / 11
- 参考文献 / 12

13 第2章 先进陶瓷材料的焊接

- 2.1 陶瓷材料的性能特点及连接问题 / 13
 - 2.1.1 结构陶瓷的性能特点 / 14
 - 2.1.2 陶瓷与金属连接的基本要求 / 22
 - 2.1.3 陶瓷与金属连接存在的问题 / 22
 - 2.1.4 陶瓷与金属的连接方法 / 24
- 2.2 陶瓷材料的焊接性分析 / 28
 - 2.2.1 焊接应力和裂纹 / 28
 - 2.2.2 界面反应及界面形成过程 / 33
 - 2.2.3 扩散界面的结合强度 / 40
- 2.3 陶瓷与金属的钎焊连接 / 45
 - 2.3.1 陶瓷与金属钎焊连接的特点 / 45
 - 2.3.2 陶瓷与金属的表面金属化法钎焊 / 46
 - 2.3.3 陶瓷与金属的活性金属化法钎焊 / 50
 - 2.3.4 陶瓷与金属钎焊的示例 / 53
- 2.4 陶瓷与金属的扩散连接 / 56
 - 2.4.1 陶瓷与金属扩散连接的特点 / 56

- 2.4.2 扩散连接的工艺参数 / 57
- 2.4.3 Al_2O_3 复合陶瓷/金属扩散界面特征 / 66
- 2.4.4 $\text{SiC}/\text{Ti}/\text{SiC}$ 陶瓷的扩散连接 / 73
- 2.5 陶瓷与金属的电子束焊接 / 75
 - 2.5.1 陶瓷与金属电子束焊的特点 / 75
 - 2.5.2 陶瓷与金属电子束焊的工艺流程 / 76
 - 2.5.3 陶瓷与金属电子束焊示例 / 77
- 参考文献 / 78

第3章 复合陶瓷与钢的扩散连接

- 3.1 复合陶瓷与钢的扩散连接工艺 / 80
 - 3.1.1 Al_2O_3 -TiC 复合陶瓷的基本性能 / 80
 - 3.1.2 复合陶瓷与钢扩散连接的工艺特点 / 81
 - 3.1.3 扩散接头试样制备及测试方法 / 84
- 3.2 Al_2O_3 -TiC 复合陶瓷与 Q235 钢的扩散连接 / 86
 - 3.2.1 Al_2O_3 -TiC/Q235 钢扩散连接的界面特征和显微硬度 / 87
 - 3.2.2 Al_2O_3 -TiC/Q235 钢扩散连接界面的剪切强度 / 89
 - 3.2.3 Al_2O_3 -TiC/Q235 钢扩散连接的显微组织 / 91
 - 3.2.4 界面过渡区析出相分析 / 94
 - 3.2.5 工艺参数对 Al_2O_3 -TiC/Q235 钢扩散界面组织的影响 / 96
- 3.3 Al_2O_3 -TiC 复合陶瓷与 18-8 奥氏体钢的扩散连接 / 99
 - 3.3.1 Al_2O_3 -TiC/18-8 钢扩散连接的界面特征和显微硬度 / 99
 - 3.3.2 Al_2O_3 -TiC/18-8 钢扩散连接界面的剪切强度 / 101
 - 3.3.3 Al_2O_3 -TiC/18-8 钢扩散连接的显微组织 / 103
 - 3.3.4 界面过渡区析出相分析 / 106
 - 3.3.5 工艺参数对 Al_2O_3 -TiC/18-8 钢扩散界面组织的影响 / 108
- 3.4 Al_2O_3 -TiC 复合陶瓷与 W18Cr4V 高速钢的扩散连接 / 110
 - 3.4.1 扩散工艺特点及试样制备 / 110
 - 3.4.2 Al_2O_3 -TiC/W18Cr4V 钢扩散连接的界面特征 / 112
 - 3.4.3 Al_2O_3 -TiC/W18Cr4V 扩散连接界面的剪切强度 / 113
 - 3.4.4 工艺参数对界面过渡区组织的影响 / 114
 - 3.4.5 Al_2O_3 -TiC/W18Cr4V 扩散界面裂纹扩展及断裂特征 / 116
- 参考文献 / 124

第4章 镍铝及钛铝金属间化合物的连接

- 4.1 金属间化合物的发展及特性 / 125

- 4.1.1 结构用金属间化合物的发展 / 125
- 4.1.2 金属间化合物的基本特性 / 126
- 4.1.3 三种有发展前景的金属间化合物 / 127
- 4.1.4 Ni-Al、Ti-Al 系金属间化合物的超塑性 / 135
- 4.2 Ni-Al 金属间化合物的焊接 / 137
 - 4.2.1 NiAl 合金的扩散连接 / 137
 - 4.2.2 Ni₃Al 合金的熔焊 / 141
 - 4.2.3 Ni₃Al 与碳钢（或不锈钢）的扩散焊 / 143
 - 4.2.4 Ni₃Al 基 IC10 合金的扩散连接和真空钎焊 / 147
- 4.3 Ti-Al 金属间化合物的焊接 / 150
 - 4.3.1 Ti-Al 金属间化合物的焊接特点 / 151
 - 4.3.2 Ti-Al 金属间化合物的电弧焊 / 154
 - 4.3.3 Ti-Al 金属间化合物的电子束焊 / 155
 - 4.3.4 TiAl 和 Ti₃Al 合金的扩散焊 / 159
 - 4.3.5 TiAl 异种材料的扩散焊 / 162
- 参考文献 / 166

第 5 章 铁铝金属间化合物的连接

- 5.1 铁铝金属间化合物及焊接性 / 168
 - 5.1.1 铁铝金属间化合物的特点 / 168
 - 5.1.2 铁铝金属间化合物的焊接性特点 / 172
 - 5.1.3 Fe₃Al 焊接接头区的裂纹问题 / 173
- 5.2 Fe₃Al 与钢（Q235、18-8 钢）的填丝钨极氩弧焊 / 174
 - 5.2.1 Fe₃Al 与钢的钨极氩弧焊工艺特点 / 174
 - 5.2.2 Fe₃Al/钢填丝 GTAW 接头区的组织特征 / 177
 - 5.2.3 Fe₃Al/钢填丝 GTAW 接头区的显微硬度 / 186
 - 5.2.4 Fe₃Al/钢 GTAW 接头的剪切强度及断口形态 / 189
- 5.3 Fe₃Al 与钢（Q235、18-8 钢）的真空扩散连接 / 195
 - 5.3.1 Fe₃Al/钢真空扩散连接的工艺特点 / 196
 - 5.3.2 Fe₃Al/钢扩散焊界面的剪切强度 / 198
 - 5.3.3 Fe₃Al/钢扩散焊界面的显微组织特征 / 201
 - 5.3.4 Fe₃Al/钢扩散焊接头的显微硬度 / 206
 - 5.3.5 界面附近的元素扩散及过渡区宽度 / 209
 - 5.3.6 工艺参数对扩散焊界面特征的影响 / 213
- 5.4 Fe₃Al 金属间化合物的其他焊接方法 / 218
 - 5.4.1 Fe₃Al 金属间化合物的电子束焊 / 218
 - 5.4.2 Fe₃Al 的焊条电弧焊 / 219

5.4.3 Fe_3Al 氩弧堆焊工艺及特点 / 221

参考文献 / 222

224 第6章 叠层材料的焊接

6.1 叠层材料的特点及焊接性 / 224

6.1.1 叠层材料的特点 / 224

6.1.2 叠层材料的焊接性分析 / 228

6.1.3 叠层材料的焊接研究现状 / 232

6.2 叠层材料的填丝钨极氩弧焊 / 235

6.2.1 叠层材料填丝 GTAW 的工艺特点 / 235

6.2.2 叠层材料焊接区的熔合状态 / 237

6.2.3 叠层材料与 18-8 钢焊接区的组织性能 / 244

6.3 叠层材料的扩散钎焊 / 247

6.3.1 叠层材料扩散钎焊的工艺特点 / 247

6.3.2 叠层材料与 18-8 钢扩散钎焊的界面状态 / 252

6.3.3 叠层材料/18-8 钢扩散钎焊接头的显微硬度 / 258

6.3.4 叠层材料/18-8 钢扩散钎焊接头的剪切强度 / 262

参考文献 / 264

266 第7章 先进复合材料的焊接

7.1 复合材料的分类、特点及性能 / 266

7.1.1 复合材料的分类及特点 / 266

7.1.2 复合材料的增强体 / 271

7.1.3 金属基复合材料的性能特点 / 274

7.2 复合材料的连接性分析 / 280

7.2.1 金属基复合材料的连接性分析 / 280

7.2.2 树脂基复合材料的连接性分析 / 285

7.2.3 C/C 复合材料的连接性分析 / 288

7.2.4 陶瓷基复合材料的连接性分析 / 292

7.3 连续纤维增强金属基复合材料的焊接 / 295

7.3.1 连续纤维增强 MMC 焊接中的问题 / 295

7.3.2 连续纤维增强 MMC 接头设计 / 296

7.3.3 纤维增强 MMC 的焊接工艺特点 / 297

7.4 非连续增强金属基复合材料的焊接 / 306

7.4.1 非连续增强 MMC 焊接中的问题 / 306

7.4.2 非连续增强 MMC 的焊接工艺特点 / 307

第 8 章 功能材料的连接

8.1 超导材料与金属的连接 / 316

8.1.1 超导材料的性能特点及应用 / 316

8.1.2 超导材料的连接方法 / 318

8.1.3 超导材料的连接工艺特点 / 321

8.1.4 氧化物陶瓷超导材料的焊接 / 322

8.2 形状记忆合金与金属的连接 / 331

8.2.1 形状记忆合金的特点及应用 / 331

8.2.2 形状记忆合金的焊接进展 / 338

8.2.3 TiNi 形状记忆合金的电阻钎焊 / 345

8.2.4 TiNi 合金与不锈钢的过渡液相扩散焊 / 349

参考文献 / 352

概述

先进材料是指具有比传统钢铁和有色金属材料更加优异的性能，能够满足高新技术发展需求的一类工程材料，如高技术陶瓷、金属间化合物、叠层材料、复合材料等。先进材料的焊接是经常遇到的，而且出现问题较多，有时甚至阻碍了整个研发和工程（或焊接结构）的进展。先进材料的主要特点是高性能、高硬度、焊接难度大。

1.1 先进材料的分类和性能特点

现代科学技术的发展，对焊接接头质量及结构性能的要求越来越高，钢铁材料和常规有色金属材料的焊接已难以满足高新技术发展的要求，各种先进及特殊材料的焊接近年来不断涌现。先进材料受到人们的关注，极大地推动了科学技术进步和社会发展，并在电子、能源、汽车、航空航天、核工业等部门中得到了应用。

1.1.1 先进材料的分类

先进材料是指除普通钢铁材料和有色金属之外已经开发或正在开发的具有特殊性能和用途的工程材料，如高技术陶瓷、金属间化合物、复合材料等。先进材料具有比传统材料更为优异的性能，与高新技术的发展密切相关。先进材料技术是按照人的意志，通过物理化学、材料设计、材料加工、试验评价等一系列研发过程，创造出能满足各种需要的新型材料的技术。先进材料按材料的属性划分，有先进金属材料、无机非金属材料（如陶瓷材料等）、有机高分子材料、先进复合材料四大类。

按材料的使用性能划分，有结构材料和功能材料。结构材料主要是利用材料的力学和理化性能，以满足高强度、高刚度、高硬度、耐高温、耐磨、耐蚀、抗辐照等性能要求；功能材料主要是利用材料具有的电、磁、声、光、热等效应，以实现某种功能，如超导材料、磁性材料、光敏材料、热敏材料、隐身材料和制造原子弹、氢弹的核材料等。先进材料在国防建设上作用重大。例如，超纯硅、砷化镓的成功研制促进大规模和超大规模集成电路的诞生，使计算机运算速度从

每秒几十万次提高到每秒百亿次以上；航空发动机材料的工作温度每提高 100°C ，推力可增大24%；隐身材料能吸收电磁波或降低武器装备的红外辐射，使敌方探测系统难以发现。

先进材料的开发与应用是现代科学技术发展的重要组成部分。随着航空航天、新能源、电力等工业的发展，人们对材料的性能提出了越来越高的要求。开发在特殊条件下使用的先进材料是科学技术发展的趋势之一，而先进结构材料的发展是其中重要的组成部分。

先进材料涉及面很广，并且处于不断的开发和应用中。工程中经常涉及的先进材料主要包括：高技术陶瓷、金属间化合物、叠层材料、复合材料、功能材料等。这些材料的一个突出特点是硬度和强度高、塑性和韧性差，焊接难度很大，采用常规的熔焊方法很难对这类材料进行焊接。

先进材料的发展及应用与高新技术的发展密切相关，而且有独特的和难以替代的作用。例如先进陶瓷材料、金属间化合物和难熔材料的开发与应用，为开发能源、开发太空和海洋、探索航空航天等领域提供了重要的物质基础。先进材料是高新技术发展必要的物质基础，常成为新技术革命的先导。

1.1.2 先进材料的性能特点

从先进材料的合成和制造工艺来看，先进陶瓷、金属间化合物、叠层材料、复合材料等，常将一些高技术手段获得的极端条件（如超高压、超高温、超高速冷却速度等）作为必要的制备方法；其次，先进陶瓷、金属间化合物和复合材料等的研发与计算机技术和自动控制技术的发展和运用密切相关，对材料的质量控制要求非常严格。先进材料是正在发展的、具有高强度、耐高温、耐腐蚀、抗氧化等优异性能和特殊用途的材料。

（1）先进陶瓷材料

又称高技术陶瓷、新型陶瓷或高性能陶瓷，是以精制的高纯、超细人工合成的无机化合物为原料，采用精密控制的制备工艺获得的具有优异性能的新一代陶瓷。

陶瓷是指以各种金属的氧化物、氮化物、碳化物、硅化物为原料，经适当配料、成形和高温烧结等合成的无机非金属材料。先进陶瓷在组成、性能、制造工艺及应用等方面都与传统的陶瓷截然不同，组成已由原来的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 等发展到了 Si_3N_4 、 SiC 和 ZrO_2 等。采用先进的物理、化学方法能够制备出超细粉末。烧结方法也由普通的大气烧结发展到控制气氛的热压烧结、真空烧结和微波烧结等先进的烧结方法。先进陶瓷具有特定的精细组织结构和性能，在现代工程和高新技术发展中起着重要的作用。

广义的先进陶瓷包括人工单晶、非晶态（玻璃）陶瓷及其复合材料、半导体、耐火材料等，属于无机非金属材料。陶瓷材料一般分为功能陶瓷和结构陶瓷两大类，生物陶瓷可以归入功能陶瓷（也可以单独列出）。与焊接技术相关的主要是结构陶瓷。

先进陶瓷具有优异的物理和力学性能，如高强度、高硬度、耐磨、耐腐蚀、耐高温和抗热震性等，而且在电、磁、热、光、声等方面具有独特的功能。

与金属材料相比，陶瓷材料的线胀系数比较低，一般在 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 的范围内；熔点（或升华、分解温度）高很多，有些陶瓷可在 $2000 \sim 3000^\circ\text{C}$ 的高温下工作且保持室温时的强度，而大多数金属在 1000°C 以上就基本上丧失了强度性能。因此，陶瓷作为高温结构材料用于航空发动机、切削刀具和耐高温部件等，具有广阔的前景。

先进陶瓷的发展趋势有三个方面。

① 由单相、高纯材料向多相复合陶瓷方向发展，包括纤维（或晶须）补强的陶瓷基复合材料、异相颗粒弥散强化复相陶瓷、两种或两种以上主晶相组合的自补强材料、梯度功能陶瓷材料以及纳米-微米陶瓷复合材料等。

② 从微米级尺度（从粉体到显微结构）向纳米级方向（1至数百纳米）发展，即向介于原子或分子与常规的微米结构之间的过渡性结构区发展，将出现与以往的微米级陶瓷材料不同的化学和物理性质，如超塑性和电、磁性质的变化等。

③ 陶瓷材料的加工，如剪裁、形状设计和连接（焊接）等。

（2）金属间化合物

金属间化合物简称 IMC（Intermetallics Compounds），是指由两种或者更多种金属组元按比例组成的、具有不同于其组成元素的长程有序晶体结构和金属特性（有金属光泽、导电性和导热性）的化合物。特点是各元素间既有化学计量的组分，而其成分又可以在一定范围内变化从而形成以化合物为基体的固溶体。

金属间化合物的金属元素之间通过共价键和金属键共存的混合键结合，性能介于陶瓷和金属之间（也被誉为半陶瓷材料）：塑性和韧性低于一般金属而高于陶瓷材料；高温性能高于一般金属而低于陶瓷材料。两种金属以整数比（或在接近整数比的一定范围内）形成化合物时，其结构与构成它的两金属的结构不同，从而形成长程有序的超点阵结构。

金属间化合物分为结构用和功能用两类，前者是作为承载结构使用，具有良好的室温和高温力学性能，后者具有某种特殊的物理或化学性能，作为功能材料使用。

金属在高温下会失去原有的强度。金属间化合物却不存在这样的问题，可以说在高温下方显出金属间化合物的“英雄本色”。在一定温度范围内，金属间化合物的强度随温度升高而增强，这就使这类材料在高温结构应用方面具有潜在的

优势。但是,伴随着金属间化合物的高温强度性能的,是其较大的室温脆性。20 世纪 30 年代金属间化合物刚被发现时,它们的室温延性几乎为零。因此,有人预言,金属间化合物在结构上没有实用价值。

20 世纪 80 年代中期,美国科学家们在金属间化合物室温脆性研究上取得了突破性进展,使它的室温伸长率大幅度提高,甚至与纯铝的延性相当。这一重要发现及其所蕴含的发展前景,吸引了各国材料科学家对金属间化合物的关注,在世界范围内掀起一股研究热潮,在不同层次上开展研发工作,先后突破了 Ti_3Al 、 Ni_3Al 、 TiAl 、 NiAl 等金属间化合物的脆性问题,使这些材料向工程实用跨出了关键性的一步。

金属间化合物的脆性问题基本解决后,要使这些合金成为实用的工程材料,还需解决一系列问题,如进一步提高强度和高温强度、改善加工性能(特别是压延性、焊接性)和保证组织稳定性等。

以金属间化合物为基体的合金或材料是一种全新的材料。常规的金属材料都是以相图中端际固溶体为基体,而金属间化合物则以相图中间部分的有序金属间化合物为基体。许多金属间化合物具有反常的强度与温度之间的关系特性,这些金属间化合物的屈服强度随着温度的提高而升高,在达到峰值后又随着温度的提高而下降。

金属间化合物具有独特的物理化学特性,如独特的电学性能、磁学性能、光学性能、声学性能、化学稳定性、热稳定性和高温强度等。此外,金属间化合物还具有良好的抗氧化性、耐腐蚀性能、超导性、半导体性能及其他功能特性等。正是由于金属间化合物具有这些突出特性,因此这是一类极具发展潜力的高温结构材料。

金属间化合物的种类繁多,包括所有金属与金属之间的化合物,而且不遵循传统的化合价规律。目前用于工程结构的金属间化合物集中于 Ni-Al 、 Ti-Al 和 Fe-Al 三大合金系。 Ni-Al 系金属间化合物是研究较早的一类材料,研究比较深入,取得了许多成果,也有很多实际应用。 Ti-Al 系金属间化合物由于密度小、性能好,是潜在的航空航天材料,极具发展前景,国外已开始用于军事领域。 Ni-Al 和 Ti-Al 系金属间化合物性能优异但价格高,主要用于航空航天等高科技领域。 Fe-Al 系金属间化合物除具有高强度、耐腐蚀等优点外,还具有成本低和密度小等优势,具有广阔的应用前景。

金属间化合物这一“高温材料”最大的用武之地是在航空航天领域,由轻金属(如 Ti 、 Al)组成的金属间化合物密度小、熔点高、高温性能好等,具有极诱人的应用前景。

(3) 叠层材料

叠层材料(也称叠层复合材料)是将两种或两种以上具有不同物理、化学性