

先进焊接制造技术丛书

# 先进难焊 材料的连接

李亚江 等编著

XIANJIN NANHAN  
CAILIAO DE LIANJIE



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

先进焊接制造技术丛书

# 先进难焊材料的连接

李亚江 等编著



机械工业出版社

本书针对工程中先进难连接材料的连接性和连接工艺特点等做了系统阐述。书中先进材料是指除常规钢铁材料和有色金属之外已开发或正在开发的具有特殊性能和用途的材料,如高技术陶瓷、金属间化合物、高温合金和复合材料等。这些材料在工程结构中经常遇到的,而且连接中出现问题较多,特别是这些材料的连接与高新技术发展密切相关。书中分析了先进材料的焊接性特点,给出了一些典型工程结构连接的应用实例,可以指导新产品研发。本书内容涉及的是科研和生产中常遇到的连接难题,力求突出新颖性、实用性和先进性等特色。

本书可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、科研和企事业单位的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

先进难焊材料的连接/李亚江等编著. —北京:机械工业出版社, 2011.8

(先进焊接制造技术丛书)

ISBN 978-7-111-35465-9

I. ①先… II. ①李… III. ①焊接工艺 IV. ①TG44

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第153366号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:何月秋 责任编辑:何月秋 崔滋恩

版式设计:霍永明 责任校对:申春香

封面设计:马精明 责任印制:杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2011年10月第1版第1次印刷

169mm×239mm·22.25印张·457千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-35465-9

定价:53.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑:(010) 88379732

社服务中心:(010)88361066

网络服务

销售一部:(010)68326294

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

先进材料是指除常规钢铁材料和有色金属之外的具有特殊性能的工程材料，如高技术陶瓷、金属间化合物、复合材料等。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，并使其在电子、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（如高技术陶瓷、金属间化合物、高温合金和复合材料等）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显，高能束焊、扩散焊和搅拌摩擦焊等先进技术成为关注的热点。先进材料连接技术的应用产生了明显的经济和社会效益，是值得大力推广的先进连接技术。

为了适应先进材料的发展，本书从理论与实践相结合的角度，以培养读者的研发能力为出发点，对近年来受到人们关注的先进材料的连接问题，特别是对高技术陶瓷、金属间化合物、复合材料等先进材料连接的基本原理、焊接性特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。

本书可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，还可作为高等院校材料成形及控制工程、材料加工工程专业（焊接方向）师生的教学参考书。

参加本书撰写的其他人员还有：王娟、马海军、刘鹏、蒋庆磊、夏春智、陈茂爱、刘如伟、张永兰、吴娜、沈孝芹、黄万群、张蕾、李嘉宁、郑德双、许有肖、魏守征等。

向关心本书出版的焊接界同行及所援引文献的作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平所限，书中错误或不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 概述 .....              | 1  |
| 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 .....      | 8  |
| 1.2.1 先进陶瓷 .....            | 8  |
| 1.2.2 金属间化合物 .....          | 9  |
| 1.2.3 高温合金 .....            | 9  |
| 1.2.4 钛及钛合金 .....           | 10 |
| 1.2.5 复合材料 .....            | 13 |
| 1.2.6 超导材料 .....            | 14 |
| 第 2 章 先进材料连接方法 .....        | 15 |
| 2.1 先进材料连接方法的特点 .....       | 15 |
| 2.1.1 先进材料连接方法的分类 .....     | 15 |
| 2.1.2 高能束流焊 .....           | 18 |
| 2.1.3 固相连接方法 .....          | 23 |
| 2.1.4 熔-钎焊方法 .....          | 25 |
| 2.2 几种适用的先进连接方法 .....       | 29 |
| 2.2.1 电子束焊 .....            | 29 |
| 2.2.2 激光焊及激光+电弧复合焊接技术 ..... | 36 |
| 2.2.3 扩散连接 .....            | 43 |
| 第 3 章 先进陶瓷材料的连接 .....       | 53 |
| 3.1 陶瓷材料的性能特点 .....         | 53 |
| 3.1.1 结构陶瓷的性能特点 .....       | 54 |
| 3.1.2 几种常用的结构陶瓷 .....       | 54 |
| 3.2 陶瓷连接的要求和存在的问题 .....     | 61 |
| 3.2.1 陶瓷与金属连接的基本要求 .....    | 61 |
| 3.2.2 陶瓷与金属连接存在的问题 .....    | 62 |
| 3.2.3 陶瓷与金属的连接方法 .....      | 63 |
| 3.3 陶瓷材料的焊接性分析 .....        | 68 |
| 3.3.1 焊接应力和裂纹 .....         | 68 |
| 3.3.2 界面反应及形成过程 .....       | 70 |
| 3.3.3 扩散界面的结合强度 .....       | 77 |

|                                                       |            |
|-------------------------------------------------------|------------|
| 3.4 陶瓷与金属的钎焊连接 .....                                  | 81         |
| 3.4.1 陶瓷与金属钎焊连接的特点 .....                              | 81         |
| 3.4.2 陶瓷与金属的表面金属化法钎焊 .....                            | 82         |
| 3.4.3 陶瓷与金属的活性金属化法钎焊 .....                            | 87         |
| 3.4.4 陶瓷与金属钎焊的实例 .....                                | 89         |
| 3.5 陶瓷与金属的扩散连接 .....                                  | 91         |
| 3.5.1 陶瓷与金属扩散连接的特点 .....                              | 91         |
| 3.5.2 扩散连接的工艺参数 .....                                 | 93         |
| 3.5.3 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合陶瓷/金属扩散界面特征 .....     | 101        |
| 3.5.4 $\text{SiC}/\text{Ti}/\text{SiC}$ 陶瓷的扩散连接 ..... | 109        |
| 3.6 陶瓷与金属的电子束焊 .....                                  | 111        |
| 3.6.1 陶瓷与金属电子束焊的特点 .....                              | 111        |
| 3.6.2 陶瓷与金属电子束焊的工艺过程 .....                            | 112        |
| 3.6.3 陶瓷与金属电子束焊应用实例 .....                             | 112        |
| <b>第4章 金属间化合物的连接 .....</b>                            | <b>114</b> |
| 4.1 金属间化合物的发展及特性 .....                                | 114        |
| 4.1.1 金属间化合物的发展 .....                                 | 114        |
| 4.1.2 金属间化合物的基本特点 .....                               | 115        |
| 4.1.3 三种有发展前景的金属间化合物 .....                            | 116        |
| 4.2 Ni-Al 金属间化合物的焊接 .....                             | 126        |
| 4.2.1 NiAl 合金的扩散连接 .....                              | 126        |
| 4.2.2 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 金属间化合物的熔焊 .....          | 128        |
| 4.2.3 $\text{Ni}_3\text{Al}$ 与碳素钢或不锈钢的焊接 .....        | 131        |
| 4.3 Ti-Al 金属间化合物的焊接 .....                             | 134        |
| 4.3.1 TiAl 合金的电子束焊 .....                              | 134        |
| 4.3.2 TiAl 和 $\text{Ti}_3\text{Al}$ 合金的扩散连接 .....     | 136        |
| 4.3.3 TiAl 异种材料的扩散连接 .....                            | 139        |
| 4.4 Fe-Al 金属间化合物的焊接 .....                             | 143        |
| 4.4.1 $\text{Fe}_3\text{Al}$ 金属间化合物的电子束焊 .....        | 143        |
| 4.4.2 $\text{Fe}_3\text{Al}$ 的填丝 TIG 焊 .....          | 144        |
| 4.4.3 $\text{Fe}_3\text{Al}$ 堆焊及焊条电弧焊 .....           | 150        |
| 4.4.4 $\text{Fe}_3\text{Al}$ 金属间化合物的扩散连接 .....        | 152        |
| 4.4.5 $\text{Fe}_3\text{Al}$ 的其他连接方法 .....            | 160        |
| <b>第5章 钛及钛合金的连接 .....</b>                             | <b>162</b> |
| 5.1 钛及钛合金的分类和性能 .....                                 | 162        |
| 5.1.1 钛及钛合金的分类 .....                                  | 162        |
| 5.1.2 钛及钛合金的化学成分及性能 .....                             | 164        |
| 5.2 钛及钛合金的焊接性分析 .....                                 | 170        |
| 5.2.1 焊接接头区脆化 .....                                   | 170        |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 5.2.2 焊缝熔化、凝固和裂纹倾向 .....          | 174        |
| 5.2.3 焊缝中的气孔 .....                | 175        |
| 5.2.4 焊接接头的组织性能 .....             | 177        |
| 5.3 钛及钛合金的焊接工艺特点 .....            | 178        |
| 5.3.1 钛及钛合金的气体保护焊 .....           | 179        |
| 5.3.2 钛及钛合金的等离子弧焊 .....           | 190        |
| 5.3.3 钛及钛合金的电子束焊 .....            | 191        |
| 5.3.4 钛及钛合金的其他焊接方法 .....          | 193        |
| 5.4 钛合金的激光熔覆 .....                | 199        |
| 5.4.1 钛合金激光熔覆的特点 .....            | 199        |
| 5.4.2 钛合金激光熔覆层 .....              | 201        |
| 5.4.3 钛合金激光熔覆工艺及参数 .....          | 208        |
| 5.4.4 钛合金激光熔覆的应用 .....            | 212        |
| 5.5 钛及钛合金焊接实例 .....               | 216        |
| 5.5.1 TC4 钛合金气瓶的 TIG 焊 .....      | 216        |
| 5.5.2 乙烯工程中钛管的焊接 .....            | 216        |
| 5.5.3 凝汽器与蒸发器纯钛部件的 TIG 焊 .....    | 218        |
| 5.5.4 发动机钛合金组件的电子束焊 .....         | 219        |
| <b>第 6 章 高温合金的连接 .....</b>        | <b>221</b> |
| 6.1 高温合金的分类及性能 .....              | 221        |
| 6.1.1 高温合金的分类及强化方式 .....          | 221        |
| 6.1.2 高温合金的性能特点及应用 .....          | 226        |
| 6.2 高温合金的焊接性分析 .....              | 230        |
| 6.2.1 高温合金的裂纹敏感性 .....            | 230        |
| 6.2.2 高温合金焊接的气孔倾向 .....           | 234        |
| 6.2.3 接头组织的不均匀性和力学性能 .....        | 235        |
| 6.3 高温合金的焊接工艺特点 .....             | 238        |
| 6.3.1 焊接前后的处理 .....               | 238        |
| 6.3.2 惰性气体保护焊 (TIG 焊、MIG 焊) ..... | 240        |
| 6.3.3 等离子弧焊 .....                 | 245        |
| 6.3.4 电子束焊和激光焊 .....              | 246        |
| 6.3.5 钎焊和扩散连接 .....               | 249        |
| 6.4 先进高温合金的焊接性特点 .....            | 259        |
| 6.4.1 定向凝固和单晶高温合金的焊接特点 .....      | 259        |
| 6.4.2 氧化物弥散强化高温合金的焊接特点 .....      | 261        |
| <b>第 7 章 复合材料的连接 .....</b>        | <b>265</b> |
| 7.1 复合材料的分类、特点及性能 .....           | 265        |
| 7.1.1 复合材料的分类及特点 .....            | 265        |
| 7.1.2 复合材料的增强体 .....              | 269        |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 7.1.3 金属基复合材料的性能特点 .....         | 273        |
| 7.2 复合材料的焊接性分析 .....             | 279        |
| 7.2.1 金属基复合材料的焊接性分析 .....        | 279        |
| 7.2.2 树脂基复合材料的连接性分析 .....        | 283        |
| 7.2.3 C/C 复合材料的连接性分析 .....       | 285        |
| 7.2.4 陶瓷基复合材料的连接性分析 .....        | 290        |
| 7.3 连续纤维增强金属基复合材料的焊接 .....       | 292        |
| 7.3.1 连续纤维增强 MMC 焊接中的问题 .....    | 292        |
| 7.3.2 连续纤维增强 MMC 材料接头设计 .....    | 293        |
| 7.3.3 纤维增强 MMC 的焊接工艺特点 .....     | 294        |
| 7.4 非连续增强金属基复合材料的焊接 .....        | 301        |
| 7.4.1 非连续增强 MMC 焊接中的问题 .....     | 302        |
| 7.4.2 非连续增强 MMC 的焊接工艺特点 .....    | 303        |
| <b>第 8 章 功能材料的连接 .....</b>       | <b>311</b> |
| 8.1 功能材料 .....                   | 311        |
| 8.1.1 功能材料的重要性 .....             | 311        |
| 8.1.2 我国功能材料的发展现状和差距 .....       | 312        |
| 8.2 超导材料的连接 .....                | 313        |
| 8.2.1 超导材料的性能特点及应用 .....         | 313        |
| 8.2.2 超导材料的连接方法 .....            | 314        |
| 8.2.3 超导材料连接的工艺特点 .....          | 318        |
| 8.2.4 氧化物陶瓷超导材料的连接 .....         | 319        |
| 8.3 形状记忆合金的连接 .....              | 326        |
| 8.3.1 形状记忆合金的特点 .....            | 326        |
| 8.3.2 形状记忆合金的应用 .....            | 329        |
| 8.3.3 形状记忆合金的焊接进展 .....          | 333        |
| 8.3.4 TiNi 形状记忆合金的电阻钎焊 .....     | 340        |
| 8.3.5 TiNi 合金与不锈钢的过渡液相扩散连接 ..... | 343        |
| 参考文献 .....                       | 347        |

# 第 1 章 概 述

先进材料是指具有比传统钢铁材料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要的一类工程材料，如高技术陶瓷、金属间化合物、复合材料等。先进材料的焊接是经常遇到的，而且在实践中出现问题较多，焊接难度很大，有时甚至阻碍了整个工程（或焊接结构）的进展。先进材料的主要特点是强度和硬度高、塑韧性差，焊接中极易产生裂纹，焊接难度大，并且日益受到工程界人士的重视。先进材料的焊接对推动科技进步、促进社会发展有着重要的作用。

## 1.1 先进材料的分类和性能特点

现代科学技术的发展，对焊接接头的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技术已难以满足高新技术发展的要求，各种特殊材料的焊接技术近年来不断涌现。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材料，如陶瓷、金属间化合物和复合材料等。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

先进材料具有比传统材料更为优异的性能。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两大类。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、抗辐照等性能要求的材料。功能材料主要是利用材料具有的电、磁、声、光、热等效应，以实现某种功能的材料，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中作用重大。例如，超纯硅、砷化镓的研制成功，导致了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  $100^{\circ}\text{C}$ ，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等。

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，而特种结构材料的发展是其中重要的组成部分。

高硬度材料，指具有高耐磨性等优异性能和特殊用途的材料，这类材料的一个突出特点是硬度和强度高，但塑性和韧性差，焊接难度很大。高硬度材料涉及面很广，并且处于不断的开发和应用之中。

工程中经常涉及的先进材料主要包括：先进陶瓷、金属间化合物、高温合金和复合材料等。这些材料的一个共同特点是强度和硬度高，塑性和韧性差，焊接中极易产生裂纹，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。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。

本书将针对先进难焊材料（如先进陶瓷、金属间化合物、复合材料等）的焊接性特点、焊接材料和工艺要点等做简明阐述，突出新颖性、先进性和实用性等特色，为推进先进材料焊接技术的发展及应用服务。

### 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，首先，先进陶瓷、金属间化合物、复合材料等，是通过一些高技术手段获得的，以极端条件（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先进的自动控制技术的发展和應用密切相关，对材料的质量控制要求非常严格。因此，先进材料具有高强度、耐高温、耐腐蚀、抗氧化等一系列优点。

#### 1. 先进陶瓷材料

先进陶瓷材料又称高性能陶瓷、新型陶瓷或高技术陶瓷，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、成型和高温烧结等人工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，其组成已由原来的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  等发展到了  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{SiC}$  和  $\text{ZrO}_2$  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中的热压烧结、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中发挥着重要的作用。

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、耐高温和抗热振性等,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,陶瓷材料的热膨胀系数比较低,一般为  $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ; 熔点(或升华、分解温度)比金属材料高很多,有些陶瓷在  $2000 \sim 3000^\circ\text{C}$  的高温下工作还可保持室温时的强度,而大多数金属在  $1000^\circ\text{C}$  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以下三个方面:

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、梯度功能复合材料以及纳米-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) 陶瓷材料的加工技术,如剪裁、形状设计和连接(焊接)等。

## 2. 金属间化合物

(1) 历史发展 金属间化合物的研究始于 20 世纪 30 年代,直到 20 世纪 80 年代中期才有所突破。由于看到了金属间化合物成为实用工程材料的前景,因此在世界范围内掀起了一股研究金属间化合物的热潮。人们在不同层次上对其开展研究工作,先后突破了  $\text{Ti}_3\text{Al}$ 、 $\text{Fe}_3\text{Al}$ 、 $\text{TiAl}$ 、 $\text{NiAl}$  等金属间化合物的脆性问题,使这些材料向工程实用方面跨出了关键性的一步。

金属间化合物目前主要集中于  $\text{Ni-Al}$ 、 $\text{Ti-Al}$  和  $\text{Fe-Al}$  三大合金系。 $\text{Ni-Al}$  和  $\text{Ti-Al}$  系金属间化合物价格高,主要用于航空航天等领域。与  $\text{Ni-Al}$  和  $\text{Ti-Al}$  系金属间化合物相比, $\text{Fe-Al}$  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。

钢铁材料加热后会逐渐变红、变软(直至熔化成钢液)。高温是大多数金属的大敌,金属在高温下会失去原有的强度,变得“不堪一击”。金属间化合物却不存在这样的问题。在  $700^\circ\text{C}$  以上的高温下,大多数金属间化合物会更硬,强度甚至会升高。可以说,只有在高温下方能显示出金属间化合物的英雄本色。

金属间化合物具有的这种特殊的性能,与其内部原子结构有关。所谓金属间化合物,是指金属和金属之间,类金属和金属原子之间以共价键形式结合生成的化合物,其原子排列具有高度有序化的规律。当它以微小颗粒形式存在于合金的组织中时,将会使合金的整体强度得到提高,特别是在一定温度范围内,合金的强度随温

度升高而增强，这就使金属间化合物在高温结构应用方面具有极大的潜在优势。

但是，伴随着金属间化合物的高温强度而来的是其较大的室温脆性。20 世纪 30 年代，当金属间化合物刚被发现时，它们的室温延性几乎为零，也就是说，一折就会断。因此，许多人预言，金属间化合物作为一种大块材料是没有使用价值的。

20 世纪 80 年代中期，美国科学家们在克服金属间化合物室温脆性的研究上取得了突破性进展。他们往金属间化合物中加入少量的硼，可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的目光，他们对金属间化合物展开了深入的研究，使之开始以一种崭新的面貌在新材料领域登台亮相。

除了作为高温结构材料外，金属间化合物的其他功能也被相继开发，例如，稀土化合物永磁材料、储氢材料、超磁致伸缩材料、功能敏感材料等相继问世。金属间化合物的应用极大地促进了高新技术的进步与发展，促进了结构与元器件的微小化、轻量化、集成化与智能化，从而导致了新一代元器件的不断出现。

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，如密度小、熔点高、高温性能好的钛铝金属间化合物等就具有极为诱人的应用前景。

(2) 特点 金属间化合物是指金属与金属或类金属之间形成的化合物相，属共价键结合，具有长程有序的超点阵晶体结构，原子结合力强，高温下弹性模量高，抗氧化性好，因此形成了一系列新型结构材料，如应用前景很好的钛、镍、铁的铝化物材料等。

金属间化合物不遵循传统的化合价规律，具有金属的特性，晶体结构与组成它的两个金属组元的结构不同，两个组元的原子各占据一定的点阵位置，呈有序排列。典型的长程有序结构主要形成面心立方、体心立方和密排六方三种主要晶体结构，如  $\text{Ni}_3\text{Al}$  为面心立方有序超点阵结构， $\text{Ti}_3\text{Al}$  为密排六方有序超点阵结构， $\text{Fe}_3\text{Al}$  为体心立方有序超点阵结构。许多金属间化合物可以在一定范围内保持结构的稳定性，在相图上表现为有序固溶体。

决定金属间化合物相结构的主要因素有电负性、尺寸因素和电子浓度。金属间化合物的晶体结构虽然较复杂或有序，但从原子结合上看仍具有金属特性，有金属光泽、导电性及导热性良好等。然而其电子云分布并非完全均匀，存在一定的方向性，具有某种程度的共价键特征，从而导致其熔点升高及原子间键出现方向性。

金属间化合物可以分为结构用金属间化合物和功能用金属间化合物两类。前者是作为承力结构使用的材料，具有良好的室温和高温力学性能，如高温有序金属间化合物  $\text{Ni}_3\text{Al}$ 、 $\text{NiAl}$ 、 $\text{Fe}_3\text{Al}$ 、 $\text{FeAl}$ 、 $\text{Ti}_3\text{Al}$ 、 $\text{TiAl}$  等。后者具有某种特殊的物理或化学性能，如磁性材料  $\text{YCo}_5$ 、形状记忆合金  $\text{NiTi}$ 、超导材料  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 、贮氢材料  $\text{Mg}_2\text{Ni}$  等。

金属间化合物的脆性问题基本解决以后，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。可喜的是有众多的研究者在这些方面开展了工作,并已取得长足的进展。与焊接相关的主要是结构用金属间化合物,最具应用前景的是 Ni-Al、Ti-Al、Fe-Al 系金属间化合物,如  $\text{Ni}_3\text{Al}$ 、 $\text{NiAl}$ 、 $\text{Ti}_3\text{Al}$ 、 $\text{TiAl}$ 、 $\text{Fe}_3\text{Al}$  和  $\text{FeAl}$  等。

与无序合金相比,金属间化合物的长程有序超点阵结构保持了很强的金属键结合,具有许多特殊的物理、化学性能,如电学性能、磁学性能和高温力学性能等。含 Al、Si 的金属间化合物还具有很高的抗氧化和耐腐蚀的能力。由轻金属(如 Ti、Al)组成的金属间化合物密度小,比强度高,适合于航空航天工业的应用要求。

### 3. 高温合金

高温合金(又称为热强合金、耐热合金)是指在  $600 \sim 1200^\circ\text{C}$  高温下能承受一定应力并具有抗氧化或耐腐蚀能力的合金,可分为铁基高温合金、镍基高温合金和钴基高温合金。

从 20 世纪 30 年代后期起,英、德、美等国开始研究高温合金。第二次世界大战期间,为了满足新型航空发动机的需要,高温合金的研究和使用进入了蓬勃发展时期。40 年代初,英国首先在  $80\text{Ni}-20\text{Cr}$  合金中加入少量的铝和钛,研制成第一种具有较高的高温强度的镍基合金。同一时期,美国用钴基合金制作了发动机叶片。此外,美国还研制出了 Inconel 镍基合金,用以制作喷气发动机的燃烧室。

1940 年,用高温合金作涡轮叶片的第一批喷气发动机取代了活塞式发动机,从此航空工业进入了新的历史时期。燃气涡轮旋转叶片流入的气体温度越高,发动机的推力也越大。据统计,从 1940 年到 1975 年的 35 年间,镍基高温合金工作温度由  $700^\circ\text{C}$  提高到了  $1050^\circ\text{C}$  左右。高温镍基合金在航空发动机中的用量日益增加,现在已经用到发动机总质量的 40%,在某些新式军用飞机发动机中已经用到总质量的 50%~60%。为进一步提高合金的高温强度,人们通过在镍基合金中加入 W、Mo、Co 等元素,同时增加 Al、Ti 含量的方法,研制出了一系列牌号的合金。在钴基合金中加入 Ni、W 等元素,研制出了多种高温合金。20 世纪 80 年代以后,高温合金主要用于制造航空发动机、舰艇和工业用燃气轮机的高温部件,还用于制造航天飞行器、火箭发动机、核反应堆、石油化工设备等。

镍基合金是高温合金中应用最广,高温强度最高的一类合金。其主要原因有三:一是镍基合金中可以溶解较多的合金元素,且能保持较好的组织稳定性;二是可以形成共格有序的  $\text{A}_3\text{B}$  型金属间化合物  $\gamma$  [ $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ ] 相作为强化相,使合金得到有效的强化,获得比铁基高温合金和钴基高温合金更高的高温强度;三是含铬的镍基合金具有比铁基高温合金更好的抗氧化和耐燃气腐蚀的能力。

镍基高温合金是以镍为基体(质量分数一般大于 50%),在  $650 \sim 1000^\circ\text{C}$  范围内具有较高的强度和良好的抗氧化、耐燃气腐蚀能力的高温合金。镍基高温合金按强化方式有固溶强化型合金和沉淀强化型合金两种类型。镍基高温合金中含有十多

种元素,其中 Cr 主要起抗氧化和耐蚀作用,其他元素主要起强化作用。根据它们的强化作用方式可分为:固溶强化元素,如 W、Mo、Co、Cr 和 V 等;沉淀强化元素,如 Al、Ti、Nb 和 Ta;晶界强化元素,如 B、Zr、Mg 和 RE 等。

#### 4. 钛及钛合金

钛合金是以钛为基加入其他元素组成的合金。钛及钛合金是 20 世纪 50 年代发展起来的一种重要的轻结构金属,钛合金因具有比强度高、耐蚀性好、耐热性高等特点而被用于各个领域。世界上许多国家都认识到钛合金的重要性,相继对其进行了研究开发,并得到了实际应用。20 世纪 50 年代~60 年代,主要是发展航空发动机用的高温钛合金和飞机机体用的结构钛合金;70 年代,开发出了一批耐蚀钛合金;80 年代以后,耐蚀钛合金和高强钛合金得到了进一步发展。钛合金主要用于制作飞机发动机压气机部件,其次为火箭、导弹和超声速战机的结构件。

钛合金兼有钢、不锈钢和铝材的许多优点,有广阔的应用前景,人们对其发展寄予厚望,称其为正在崛起的“第三金属”。钛作为年轻的材料,它要发展,性价比是竞争的焦点。从钢铁等材料的发展史可以看出,影响材料发展的五个要素是:需求、性能、成本、资源、经济技术环境。一种材料要获得迅速的发展,必须在诸多因素中取得某几项优势。

从 20 世纪 50 年代开始,由于航空航天技术的迫切需要,钛及钛合金得到了迅速的发展。第一个实用的钛合金是 1954 年美国研制成功的 Ti-6Al-4V 合金,由于它的耐热性、强度、塑性、韧性、成形性、焊接性、耐蚀性和生物相容性均较好,而成为钛合金工业中的王牌合金,该合金的使用量已占全部钛合金的 75%~85%。其他许多钛合金都可以看做是 Ti-6Al-4V 合金的改型。现在,钛及钛合金不仅是航空航天工业中不可缺少的结构材料,在造船、化工、冶金、医疗器械等方面也获得了广泛的应用。

#### 5. 复合材料

复合材料是指由两种或两种以上物理和化学性质不同的物质,按一定方式、比例及分布方式组合而成的一种多相固体材料。通过良好的增强相/基体组配及适当的制造工艺,充分发挥各组分的长处,得到的复合材料具有单一材料无法达到的优异综合性能。复合材料保持各组分材料的优点及其相对独立性,但却不是各组分材料性能的简单叠加。

复合材料的发展可以分为两个阶段,即早期复合材料阶段和现代复合材料阶段。“复合材料”(Composite Materials)一词出现于 20 世纪 40 年代,当时出现了玻璃纤维增强不饱和聚酯树脂;60 年代以后,陆续开发出了多种高性能纤维;80 年代以后,各类作为复合材料基体的材料(如树脂基、金属基、陶瓷基、碳/碳基)和增强相的使用和改进,进入了高性能现代复合材料的发展阶段。

复合材料制造技术实质上就是用原有的金属材料、无机非金属材料和高分子材料等作为组分,通过一定的工艺方法将增强相与基体复合在一起,制成既保留原有

材料的特性，又能显示出某些新性能的材料。

复合材料一般有两个基本相：一个是连续相（称为基体）；另一个是弥散相（称为增强相）。复合材料的性能取决于各相的性能、比例，而且与两相界面性质和增强相的几何特征有密切的关系。弥散相是以独立的形态分布在连续相中的，弥散相可以是纤维、晶须、颗粒（分别以下标 f、w、p 表示）等弥散分布的填料。

金属基复合材料包括晶须、颗粒和短纤维增强的金属基复合材料等几种。增强相包括单质元素（如石墨、B、Si 等）、氧化物（如  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{ZrO}_2$  等）、碳化物（ $\text{SiC}$ 、 $\text{B}_4\text{C}$ 、 $\text{TiC}$ 、 $\text{VC}$ 、 $\text{ZrC}$  等）、氮化物（ $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、BN、AlN 等）的颗粒、晶须及短纤维。

连续纤维增强金属基复合材料由基体金属及增强纤维组成，这类材料的焊接不但涉及金属基复合材料之间的焊接，还涉及金属与非金属增强相之间的焊接以及增强相之间的焊接。基体通常是一些塑性、韧性好的金属，其焊接性一般较好；而增强相是高强度、高模量、高熔点、低密度和低线胀系数的非金属，其焊接性都很差。

## 6. 超导材料

20 世纪 80 年代超导材料的发现为超导技术翻开了崭新的一页。超导材料是指极低温度下电阻突然下降为 0，处于超导状态的材料。一般金属在极低温度下仍具有电阻，只有超导材料到达某一临界温度（ $T_c$ ）后，电阻骤降为 0，才具有完全导电性的特征。超导材料在工业中的应用，一直是人们关注的焦点和追求的目标。

超导材料的种类有纯金属（如超导临界温度  $T_c$  接近 0K 的 Hg、Pb、In、W 等）、合金、化合物、氧化物陶瓷以及少量的有机物超导材料。目前研究的超导材料主要有以下三种类型：合金超导体、金属间化合物超导体（如  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ ）和氧化物陶瓷超导体（如 Y-Ba-Cu-O、Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O 等）。

1) 合金超导体（如 Nb-Ti、Nb-Ti-Ta、Nb-Zr 等）是目前应用最广泛的具有代表性的超导线材，如在液氮温度（4.2K）下工作的超导材料 Nb-Ti 超导线材等。

2) 金属间化合物超导材料比合金超导材料的临界磁场强度  $H_c$  高，临界转变温度  $T_c$  也高，可用作产生高磁场的超导线。但金属间化合物较脆，其设计和制造需考虑采用特殊的措施，如在液氮温度下工作的高超导特性线材  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  等。

3) 从超导性能看，氧化物陶瓷超导体最好。但阻碍氧化物陶瓷超导材料发展的突出问题是脆性及由此引起的成形加工困难，包括很难焊接。

已有实用性和工业化制造规模的超导材料主要是前两种。其中合金超导材料的力学性能最好，加工性能也较好，在较低的磁感应强度（10T 以下）可得到高的电流密度。

## 1.2 先进材料的应用及发展前景

对于现代材料而言,材料是物质,制造是途径(或手段),应用是目的。在先进材料的应用条件下,必须考虑环境的特殊要求,如高温、低温、腐蚀介质等。结构件均有一定的形状配合和精度要求,因此先进材料还需有良好的可加工性能,如铸造性、冷(或热)成形性、焊接性、切削加工性等。遗憾的是,先进材料由于固有的特殊性能,焊接难度很大,有时甚至会阻碍其发展和应用。

### 1.2.1 先进陶瓷

先进陶瓷原料丰富、产品附加值高,应用领域广阔。但由于陶瓷塑性和韧性差,加工困难,不宜制成大型或形状复杂的构件,因而单独使用受到一定的限制。先进陶瓷是随着现代电器、无线电、航空、原子能、冶金、机械、化学等工业以及计算机、空间技术、新能源开发等尖端科学技术的飞速发展而发展起来的。在实际应用中,常采用连接技术制成陶瓷-金属复合构件,这样既能发挥陶瓷与金属各自的性能优势,又能降低生产成本,具有很好的应用前景。

陶瓷-金属焊接已获得广泛的应用,如用于汽车发动机增压器转子(可以降低尾气排放)、陶瓷/钢摇杆、陶瓷/金属挺柱、火花塞、高压绝缘子、电子元器件(如真空管外壳、整流器外壳)等。

研究开发高效陶瓷发动机,是世界各国高技术竞争的热点之一。使用陶瓷发动机,可以把发动机的工作温度从 $1000^{\circ}\text{C}$ 提高到 $1300^{\circ}\text{C}$ ,热效率从30%提高到50%,可使发动机的质量减轻20%,燃料节省30%~50%。英国是最早从事结构陶瓷应用开发的国家,英国政府专门拨款数千万英镑,对陶瓷燃气轮机和往复式陶瓷发动机进行研发,已经制造出了活塞式陶瓷发动机。据美国福特汽车公司的专家估计,如果全美国的汽车都采用陶瓷发动机,那么每年至少可节约5亿桶石油。

对于陶瓷发动机,美、日、法、德等国家制订了庞大的研发计划,投入了巨大的人力和资金。美国投资数十亿美元,组织几十家公司从事陶瓷发动机的研究开发,其中通用汽车公司、福特汽车公司、诺尔顿公司等大型企业,相继建立了新型陶瓷发动机专业化研发中心。

日本把结构陶瓷看做是继微电子之后又一个可带来巨大效益的新领域,因此他们在同美国人的竞争中不惜代价,开发新产品的能力甚至超过了美国。日本213kW陶瓷发动机已经形成规模生产,并已装备了上百万辆小汽车。德国对陶瓷内燃机的研发也走在了世界前列,德国奔驰汽车公司研制的“2000年轿车”就是由陶瓷燃气轮机驱动的。

在欧洲共同体的“尤里卡计划”中,法国、德国和瑞典三个国家从20世纪80年代开始联合进行陶瓷燃气轮机的开发,已经研制出功率为147kW的陶瓷涡轮喷

气发动机，其工作温度可达 1600℃，比普通发动机高出 600℃ 以上。

### 1.2.2 金属间化合物

近 20 年来，人们开始重视对金属间化合物的开发应用，这是材料领域一个根本性的转变，也是今后材料发展的重要方向之一。金属间化合物由于它的特殊晶体结构，使其具有其他固溶体材料所没有的性能。特别是固溶体材料通常随着温度的升高而强度降低，但某些金属间化合物的强度在一定范围内反而随着温度的上升而升高，这就是它有可能成为新型高温结构材料的基础。另外，金属间化合物还有一些性能指标是固溶体材料的数倍乃至几十倍。

Ni-Al、Ti-Al 金属间化合物适合用作航空航天材料，具有很好的应用潜力，已受到欧、美等发达国家的普遍重视。一些 Ni-Al 合金已获得应用或试用，如用于柴油机部件、电热元器件、航空航天飞机紧固件等。Ti-Al 合金可替代镍基合金制成航空发动机高压涡轮定子支撑环、高压压气机匣、发动机燃烧室扩张喷管喷嘴等。我国宇航工业正试用这类合金制造发动机热端部件，前景非常广阔。

例如，20 世纪 90 年代美国 GE 发动机公司将 Ti-47Al-2Cr-2Nb 合金低压气机叶片安装在 CF6-80C2 战机上并做了 1000 个模拟飞行周次的考核，结果 TiAl 合金叶片完整无损。其后美国国家航空航天总署（NASA）的“AITP”计划，将 TiAl 合金用作 GE-90 发动机 5 级和 6 级低压气机叶片，目标是取代原来的 Rene77 叶片，以降低质量 80kg。在压气机叶片台架试车取得进展的同时，TiAl 合金作为机匣、涡轮盘、支撑架、导梁等应用也在逐步展开。

Fe<sub>3</sub>Al 金属间化合物由于具有高的抗氧化性和耐磨性，可以在许多场合代替不锈钢、耐热钢或高温合金，用于制造耐蚀件、耐热件和耐磨件，其良好的抗硫化性能，适合于恶劣条件下（如高温腐蚀环境）的应用。例如，可用于火力发电厂结构件、渗碳炉气氛工作的结构件、化工器件、汽车尾气排气管、石化催化裂化装置、加热炉导轨、高温炉算等。此外，由于 Fe<sub>3</sub>Al 金属间化合物具有优异的高温抗氧化性和高的电阻率，有可能开发成新型电热材料。Fe<sub>3</sub>Al 还可以和 WC、TiC、TiB、ZrB 等陶瓷材料制成复合结构，具有更加广阔的应用前景。

### 1.2.3 高温合金

高温合金可在 600 ~ 1200℃ 的氧化和燃气腐蚀条件下，承受复杂应力，能长期可靠地工作。主要用于航空发动机的热端部件，也是航天、能源、运输、化学工业和核工业的重要材料。

高温合金具有优良的抗高温氧化及高温强度（长时间高温使用的蠕变强度），高性能的喷气发动机、大型气体涡轮机、多用途的高温气炉、氦气涡轮机及排气部件等高温工作的部件，多采用高温合金作为结构材料。高温合金还在各类化学工厂及原子反应堆设备中得到了应用。