

HANGKONGHANGTIANYONG XIANJIN CAILIAO

# 航空航天用先进材料

李红英 汪冰峰 等编著

李 周 郑子樵 主 审



化学工业出版社

HANGKONGHANGTIANYONG XIANJIN CAILIAO

# 航空航天用先进材料

李红英 汪冰峰 等编著

李 周 郑子樵 主 审



化学工业出版社

· 北 京 ·

《航空航天用先进材料》注重先进性与实用性，详细介绍了航空航天用的高性能铝合金、钛合金、高温合金和复合材料的设计、制造与性能，并对材料的成形、构件制造、性能表征和失效分析做了简要介绍。

本书适宜从事航空航天的专业技术人员参考，也可作为航空航天和材料相关专业的本科教材。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

航空航天用先进材料/李红英等编著. —北京: 化学工业出版社, 2019.1  
ISBN 978-7-122-33241-7

I. ①航… II. ①李… III. ①航空材料②航天材料  
IV. ①V25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 248355 号

---

责任编辑: 邢 涛  
责任校对: 王素芹

文字编辑: 陈 雨  
装帧设计: 韩 飞

---

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: 大厂聚鑫印刷有限责任公司  
787mm×1092mm 1/16 印张 21 字数 518 千字 2019 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888

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: 118.00 元

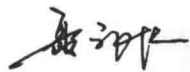
版权所有 违者必究

航空航天已经成为 21 世纪最活跃和最具影响的领域, 航空航天活动的发展水平标志着人类进步和科学技术发展的程度, 航空航天产业的发达程度代表一个国家经济发展和国防建设的现代化水平。近年来, 中国在航空航天领域取得了卓越成就, 设计制造的歼 20、运 20、空警-500、轰-6k、ARJ21 已经在天空翱翔, C919、AG600 水陆两用飞机均已试飞成功。中国北斗卫星导航系统正式服务全球, 嫦娥四号成功在月球背面着陆并展开了地质探测, 2 名航天员驻留“天宫二号”30 天并开展了系列试验, 天舟一号货运飞船对天宫二号进行了推进剂在轨补加, 计划在 2020 年建成 60t 的空间站, 2022 年完成测试并投入正常运营, 届时将成为唯一在轨的空间站。

材料是人类生活及科学技术赖以发展的物质基础, 是国防建设和国民经济发展的先导, 随着航空航天领域科学技术水平的发展, 飞行器的服役环境越来越恶劣, 对材料的要求也越来越苛刻。一代材料, 一代装备, 高性能材料是航空航天工程实现高可靠性、长寿命和低成本的保障, 先进材料的出现促进了新型飞机、运载火箭、导弹、卫星、载人航天器的研制成功和投入使用, 而航空航天高技术领域的需求也推动了先进材料及材料科学技术的发展。

随着社会发展和科学技术的进步, 用人单位对人才的需求已经从单一技术人才转变为复合型人才, 要求具有较高的综合解决实际问题的能力, 能适应不同领域、胜任不同岗位。该书紧扣航空航天发展对材料的需求, 对材料的组成与性能表征、铝合金、钛合金、高温合金、复合材料及其材料成形技术和飞行器构件制造方法进行了系统阐述。该书实现了先进性、实用性相结合, 兼顾了航空航天和材料科学与工程两个领域的科研人员、工程技术人员、研究生和本科生的需求, 既可作为两个专业的选用教材, 也可作为非材料专业大学通识教育基础课程的参考教材。

中国工程院院士



2019 年 2 月

航空航天是 21 世纪最具影响的领域；航空航天活动的发展标志着人类进步的程度，广泛影响政治、经济、军事、科学技术、社会生活等各个方面。航空航天产业凝聚了大量科学研究和工程技术的最新成果，拥有优秀人才及先进装备和软件，其发达程度体现了一个国家的科学技术和国防建设的现代化水平。人类文明和社会进步与材料的发展密切相关，石器时代、青铜器时代、铁器时代等早期人类历史均打下了材料发展的烙印，当今，材料是国民经济建设和科学技术发展的先导。航空航天飞行器要在超高温、超低温、高真空、高应力、强腐蚀等极端条件下工作，除了靠优化结构设计外，更依赖于材料所具有的优异特性和功能，材料在航空航天领域有着极其重要的地位和作用。高性能材料是航空航天工程实现高可靠性、长寿命和低成本的保障，先进材料的出现促进了新型飞机、运载火箭、导弹、卫星、载人航天器的研制成功和投入使用。

本书共分 5 章，紧扣航空航天发展对材料的需求，系统对材料的组成与性能表征及失效分析、材料成形技术和飞行器构件制造方法进行了阐述。第 1 章为航空航天材料概述，主要对材料的分类、组成、性能表征、失效分析及航空航天应用进行了介绍。第 2 章为航空航天用铝及铝合金材料，概述了铝及铝合金的性质和特点、分类及牌号和状态、发展历程及航空航天应用，重点介绍了 2 系铝合金、7 系铝合金和铝锂合金，系统介绍了航空航天用铝合金的熔炼铸造、材料成形及热处理、零件及构件成形。第 3 章为航空航天用钛及钛合金材料，概述了钛的性质、钛的合金化、钛合金的分类及航空航天应用，系统介绍了钛及钛合金的制备及组织特征、不同组织的钛合金、不同性能的钛合金。第 4 章为航空航天用高温合金，概述了高温合金的分类及牌号、合金元素及析出相、国内外发展及航空航天应用，系统介绍了铸造高温合金、变形高温合金、粉末高温合金、新型高熵高温合金。第 5 章为航空航天用复合材料，概述了复合材料的分类、优势、不足及航空航天应用，系统介绍了聚合物基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料、碳/碳复合材料。

本书注重先进性与实用性相结合，力求通俗易懂，并兼顾航空航天和材料科学与工程两个领域的技术人员的需求，既可作为型号设计、材料研发等技术人员参考书，也可作为航空航天类专业和材料类专业的教材。

本书第 1~3 章由李红英编写；第 4 章由汪冰峰编写，赵辉协助编写；第 5 章第 1~3 节由赵守鑫编写，第 4 节由李红英编写，第 5 节由靳东编写，第 6 节由刘蛟蛟编写。全书由李周和郑子樵教授主审。本书得到了中南大学、中国铝业集团公司、轻质高强结构材料国家级重点实验室、有色金属先进结构材料与制造协同创新中心的支持。中国铝

业集团公司的王国军首席工程师参与了第2章的技术审校工作并提出了许多宝贵意见，中南大学的岳建岭参与了第1章和第2章的校核工作，王岩、刘会群参与了第3章的校核工作，岳建岭、陈卓、王国军参与了第5章的校核工作，研究生韩茂盛、尹浩、蒋浩帆、鲁晓超、苏雄杰、高兆和参与了部分章节的资料收集工作，赵辉承担了全书的绘图工作，在此一并表示衷心感谢。

由于航空航天材料日新月异，加之编著者水平所限，难免有不妥之处，恳请专家和读者批评指正。

最后，对本书编写过程中所参考和引用文献资料的作者致以诚挚的谢意。

李红英

2018年10月于长沙

## 第 1 章 航空航天材料概述

1

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 1.1 材料的分类 .....          | 1  |
| 1.1.1 根据属性分类 .....       | 1  |
| 1.1.2 根据结构分类 .....       | 2  |
| 1.1.3 根据应用分类 .....       | 2  |
| 1.2 材料的组成 .....          | 3  |
| 1.2.1 金属材料的组成 .....      | 3  |
| 1.2.2 无机材料的组成 .....      | 4  |
| 1.2.3 聚合物材料的组成 .....     | 4  |
| 1.3 材料的性能 .....          | 5  |
| 1.3.1 热学性能 .....         | 5  |
| 1.3.2 力学性能 .....         | 7  |
| 1.3.3 耐久性能 .....         | 15 |
| 1.4 航空航天材料的应用 .....      | 24 |
| 1.4.1 航空航天材料的服役环境 .....  | 24 |
| 1.4.2 航空航天材料的失效分析 .....  | 25 |
| 1.4.3 航空航天材料的选择及应用 ..... | 41 |
| 参考文献 .....               | 45 |

## 第 2 章 航空航天用铝及铝合金材料

46

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 2.1 航空航天铝合金概述 .....       | 46 |
| 2.1.1 性质和特点 .....         | 46 |
| 2.1.2 分类及牌号 .....         | 47 |
| 2.1.3 状态及表示 .....         | 49 |
| 2.1.4 铝合金的发展历程 .....      | 51 |
| 2.2 主要合金及其航空航天应用 .....    | 52 |
| 2.2.1 合金元素及微合金化 .....     | 53 |
| 2.2.2 Al-Cu 合金及典型应用 ..... | 56 |
| 2.2.3 Al-Zn 合金及典型应用 ..... | 62 |
| 2.2.4 Al-Li 合金及典型应用 ..... | 68 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 2.3 铝合金锭坯的熔炼铸造及退火 ..... | 78  |
| 2.3.1 熔炼及精炼 .....       | 78  |
| 2.3.2 锭坯的铸造 .....       | 89  |
| 2.3.3 坯料热处理 .....       | 101 |
| 2.4 航空航天铝合金的成形及退火 ..... | 103 |
| 2.4.1 型材的挤压 .....       | 103 |
| 2.4.2 厚板的热轧 .....       | 106 |
| 2.4.3 厚板的预拉伸 .....      | 108 |
| 2.4.4 薄板的冷轧 .....       | 108 |
| 2.4.5 回复再结晶退火 .....     | 109 |
| 2.5 航空航天铝合金的强化热处理 ..... | 112 |
| 2.5.1 固溶及残留相 .....      | 113 |
| 2.5.2 淬火及脱溶 .....       | 114 |
| 2.5.3 时效及沉淀 .....       | 120 |
| 2.6 铝合金零件及构件成形 .....    | 126 |
| 2.6.1 精密铸造 .....        | 126 |
| 2.6.2 粉末冶金 .....        | 130 |
| 2.6.3 喷射沉积 .....        | 131 |
| 2.6.4 锻压成形 .....        | 132 |
| 2.6.5 时效成形 .....        | 135 |
| 2.6.6 超塑性成形 .....       | 137 |
| 2.6.7 喷丸成形 .....        | 137 |
| 参考文献 .....              | 139 |

### 第3章 航空航天用钛及钛合金材料

141

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 3.1 概述 .....                       | 141 |
| 3.1.1 钛的性质 .....                   | 141 |
| 3.1.2 钛的合金化 .....                  | 143 |
| 3.1.3 钛合金的分类 .....                 | 146 |
| 3.1.4 飞机用钛合金 .....                 | 148 |
| 3.1.5 航天用钛合金 .....                 | 153 |
| 3.2 钛合金的制备 .....                   | 153 |
| 3.2.1 生产流程 .....                   | 154 |
| 3.2.2 熔炼铸造 .....                   | 155 |
| 3.2.3 钛材成形 .....                   | 158 |
| 3.2.4 钛材热处理 .....                  | 174 |
| 3.3 不同组织的钛合金 .....                 | 184 |
| 3.3.1 钛合金的典型组织 .....               | 184 |
| 3.3.2 $\alpha$ 型钛合金的特点 .....       | 185 |
| 3.3.3 $\alpha+\beta$ 型钛合金的特点 ..... | 186 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 3.3.4 $\beta$ 型钛合金的特点 ..... | 188 |
| 3.4 不同性能的钛合金 .....          | 189 |
| 3.4.1 高温钛合金 .....           | 189 |
| 3.4.2 低温钛合金 .....           | 195 |
| 3.4.3 低强度钛合金 .....          | 196 |
| 3.4.4 中强度钛合金 .....          | 197 |
| 3.4.5 高强度钛合金 .....          | 199 |
| 3.4.6 损伤容限型钛合金 .....        | 201 |
| 参考文献 .....                  | 203 |

**第4章 航空航天用高温合金**

**205**

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 4.1 概述 .....               | 205 |
| 4.1.1 分类与牌号表示法 .....       | 205 |
| 4.1.2 合金元素及析出相 .....       | 206 |
| 4.1.3 高温合金在航空发动机中的应用 ..... | 216 |
| 4.1.4 高温合金在火箭发动机中的应用 ..... | 219 |
| 4.1.5 高温合金国内外发展概况 .....    | 220 |
| 4.2 铸造高温合金 .....           | 221 |
| 4.2.1 等轴晶铸造高温合金 .....      | 222 |
| 4.2.2 定向凝固柱状晶高温合金 .....    | 223 |
| 4.2.3 单晶高温合金 .....         | 225 |
| 4.3 变形高温合金 .....           | 227 |
| 4.3.1 铁基变形高温合金 .....       | 227 |
| 4.3.2 镍基变形高温合金 .....       | 229 |
| 4.3.3 钴基变形高温合金 .....       | 232 |
| 4.4 粉末高温合金 .....           | 233 |
| 4.4.1 普通粉末高温合金 .....       | 233 |
| 4.4.2 氧化物弥散强化高温合金 .....    | 237 |
| 4.5 新型高熵高温合金 .....         | 238 |
| 4.5.1 高熵合金简介 .....         | 238 |
| 4.5.2 高熵合金的制备方法 .....      | 239 |
| 4.5.3 高熵合金力学性能 .....       | 242 |
| 参考文献 .....                 | 246 |

**第5章 航空航天用复合材料**

**248**

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 5.1 概述 .....             | 248 |
| 5.1.1 复合材料的分类及命名 .....   | 248 |
| 5.1.2 复合材料的优势及问题 .....   | 249 |
| 5.1.3 复合材料在航空领域的应用 ..... | 251 |
| 5.1.4 复合材料在航天领域的应用 ..... | 253 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 5.2 复合材料的组成 .....             | 254 |
| 5.2.1 基体 .....                | 255 |
| 5.2.2 增强体 .....               | 258 |
| 5.2.3 界面 .....                | 263 |
| 5.3 聚合物基复合材料 .....            | 265 |
| 5.3.1 聚合物基复合材料的特点 .....       | 265 |
| 5.3.2 聚合物基复合材料的制备 .....       | 266 |
| 5.3.3 主要聚合物基复合材料 .....        | 274 |
| 5.4 金属基复合材料 .....             | 277 |
| 5.4.1 金属基复合材料的概述 .....        | 278 |
| 5.4.2 金属基复合材料的制备 .....        | 282 |
| 5.4.3 主要金属基复合材料 .....         | 298 |
| 5.5 陶瓷基复合材料 .....             | 311 |
| 5.5.1 陶瓷基复合材料的基体和增强体 .....    | 311 |
| 5.5.2 陶瓷基复合材料的增韧机理 .....      | 313 |
| 5.5.3 陶瓷基复合材料的制备技术 .....      | 315 |
| 5.6 碳/碳复合材料 .....             | 319 |
| 5.6.1 碳/碳复合材料的特点 .....        | 319 |
| 5.6.2 碳/碳复合材料的制备 .....        | 321 |
| 5.6.3 碳/碳复合材料在航空航天领域的应用 ..... | 323 |
| 参考文献 .....                    | 324 |

# 第1章 航空航天材料概述

材料是所有工程和产品的物质基础,已经实现批量生产并大量应用的材料称为传统材料或基础材料,新出现或正在发展中并具有传统材料所不具备的优异性能、特殊功能及应用前景的材料称为新材料或先进材料。一代材料,一代装备,高性能材料是航空航天工程实现高可靠性、长寿命和低成本的保障,先进材料的出现促进了新型飞机、运载火箭、导弹、卫星、载人航天器的研制成功和投入使用。

## 1.1 材料的分类

### 1.1.1 根据属性分类

根据属性,材料可分金属材料、无机非金属材料、有机非金属材料、复合材料。

金属包括黑色金属和有色金属,铁、铬、锰为黑色金属,其他金属均为有色金属,通常分为轻金属、重金属、贵金属、稀有金属。单一组元的金属为纯金属,1种金属元素与其他元素形成的具有金属特性的物质称为合金。

传统无机非金属材料包括以硅酸盐为主要成分的材料及生产工艺相近的非硅酸盐材料,又称为硅酸盐材料或陶瓷材料。先进无机非金属材料是由氧化物、碳化物、氮化物、硼化物、硫化物、硅化物及各种非金属化合物经先进工艺制成的新型材料。

有机非金属材料包括塑料、橡胶、纤维、涂料、木材、纸张、皮革等,分子量通常在10000以上的,又称为高分子材料。以煤、石油、天然气等为起始原料制得分子量在500以下的低分子化合物,再经聚合反应制成的合成高分子材料称为聚合物或高聚物材料。根据其主链结构,聚合物可分为碳链聚合物、杂链聚合物、元素有机聚合物;根据其大分子链的几何结构,聚合物可分为线型聚合物和体型聚合物;根据其热行为,聚合物可分为热塑性聚合物和热固性聚合物。

复合材料是由2种或2种以上化学性质不同的材料组合成性能优势互补的材料。航空航天领域应用的复合材料,可采用金属、聚合物、陶瓷、碳等连续相材料作为基体,相应称为金属基复合材料、聚合物基复合材料、陶瓷基复合材料、碳/碳复合材料等,可采用颗粒、晶须、纤维、织物、片材等作为增强体,相应称为颗粒增强复合材料、纤维增强复合材料、

层状复合材料等。

### 1.1.2 根据结构分类

根据质点（原子、离子或分子）的聚集状态，固态物质可分为晶体、非晶体和准晶。晶体具有长程有序的结构特征，原子（离子或分子）在三维空间有规则地周期性重复排列，按结合键类型分为金属晶体（铝，钛等）、共价晶体（金刚石，二氧化硅等）、离子晶体（氯化钠，氯化铯等）、分子晶体（干冰，雪花等）、混合型晶体（石墨等）。非晶体中的原子（离子或分子）混乱排列。准晶是介于晶体和非晶体之间的结构，具有与晶体相似的长程有序原子排列，但是，不具备晶体的平移对称性。

在熔点以上温度，物质表现为完全无序和流动的液体状态，随着外场变化可转变为有序的晶态或无序的非晶态。金属及其合金、大多数无机非金属材料、少数聚合物材料属于低分子材料，容易结晶为晶体，但是，当冷却速率快到足以抑制结晶时，过冷液态金属的原子排列方式保留至固态，可得到非晶态金属和合金（金属玻璃）。玻璃等少数无机材料、大多数聚合物（橡胶、热固性塑料及分子结构比较复杂材料）为部分晶态或完全非晶态。在多元强、弱化学键共存的体系中，存在一种特殊的物质状态，材料体系表现为“部分晶态-部分无序”和“部分晶态-部分液体”的半晶状态，某些亚晶格保持着明显晶态和有序性，其他亚晶格在外场诱导下表现出无序或融化现象。由于制备条件不同，相同或相近化学组成的物质可以形成晶态材料也可以形成非晶态材料，以  $\text{SiO}_2$  熔体为例，缓慢冷却时生成石英晶体，急冷时形成石英玻璃，在  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  溶液中加酸经 24h 静置陈化可制备石英凝胶，经热水洗涤和低温烘干后得到多孔性硅胶。

在凝固点附近的熔体黏度和冷却条件是影响结晶度的主要因素，通过控制成型过程中熔体的冷凝速率可以调节结晶速率和结晶度，进而调控材料的性能。结晶度较高时，材料的熔点和玻璃化温度、密度、弹性模量、强度较高；结晶度较低时，材料的柔软性、透明性和耐折性较好。新型非晶态材料具有许多优异特性，可作为光通信材料、激光材料、新型太阳能电池材料、高效磁性材料、输电和输能材料。准晶材料具有较低的密度和熔点、异常低的热导率和电导率、负的温度系数、低的表面能和摩擦系数、高的弹性模量和抗压强度，具有良好的抗磁性、抗氧化性和表面不粘性，室温脆性大，但有较好的高温塑性，可用于制备航空发动机内壁的涂层、热障膜、选择吸收太阳光膜、储氢材料、复合材料等。

### 1.1.3 根据应用分类

根据应用目的，材料可分为结构材料和功能材料。结构材料主要用于制造构造整体、实现运动和传递动力的结构件，如飞机机身、发动机构件等，要具有抵抗外场作用而保持自身形状结构不变的能力，一般以力学性能指标来评价，有时会提出光泽、热导率、抗辐照、抗腐蚀、抗氧化等物理性能或化学性能要求，可根据性能指标细分为高强材料、高韧材料、高温材料、耐磨材料、耐蚀材料等。功能材料主要利用其对外部环境的敏感反应来实现信息处理和功能转换，具有电学、磁学、光学、声学、化学、透波、吸波、隐身、屏蔽、阻尼、隔热、形状记忆、信息记录等功能，一般以声、光、电、磁、热等物理性能指标来评价，有时也会提出一定的力学性能要求。功能复合材料、梯度功能材料、智能功能材料是航空航天领域应用的新型功能材料。具有多元功能体（或增强体）的功能复合材料可以产生多种功能，

还可能由于复合效应而产生新的功能。梯度功能材料集各种组分（性质不同的金属、陶瓷、聚合物等）于一体，其组分、微观结构和性能可随构件位置呈连续变化，以适应不同部位的服役要求，如航天飞行器往返大气层时，不同部位服役温度相差很大，采用梯度功能材料。智能材料（又称机敏材料）能够灵敏地对电、光、热、应力、应变、化学、核辐射等的刺激做出恰当响应，可在航空航天恶劣环境下进行自我诊断、自动阻止或修复损伤和功能退化，从而防止灾难性事故发生，如将细小的光纤嵌入高性能复合材料中，制成机翼用智能材料，光纤能像神经那样感受机翼承受的压力，光纤断裂时，光传输中断，发出事故警告。

根据应用领域，材料可分为航空航天材料、信息材料、能源材料、生物医用材料、汽车材料、建筑材料、包装材料等。航空航天材料包括先进金属材料（铝合金，钛合金，高温合金等）、新型陶瓷材料、新型高分子材料、新型复合材料等，按照功能分为烧蚀耐热材料、隔热材料、阻尼材料、透明材料、密封材料、吸波材料、透波材料等。航空航天材料的发展趋势是高性能化、多功能化、复合化、精细化、智能化等。

## 1.2 材料的组成

组成材料最基本的、独立的物质称为组元，组元可以是金属元素、非金属元素、稳定化合物。材料可由纯金属、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  晶体等单一组元组成，也可由多种组元组成。化学成分相同、晶体结构相同、聚集状态和性质均相同的均匀连续组成部分称为相，不同相之间由界面分隔开，固态纯金属、聚乙烯等为单相，合金、普通陶瓷、共聚物等为多相。

### 1.2.1 金属材料的组成

金属材料包括纯金属和合金，合金是由 2 种或 2 种以上的金属或非金属，经过熔炼、烧结或其他方法组合而成并具有金属特性的物质。大多数情况下，金属材料的组元就是元素，合金中既不分解也不发生化学反应的稳定化合物也可视为组元，组元间会产生复杂的物理、化学作用。组元种类相同，但含量（成分）不同的合金构成一个合金系，根据组元数目分别称为二元系、三元系、 $n$  元系合金。

在一定外界条件下，一定成分的合金可以由若干不同的相组成，根据合金相的多少分为单相合金、两相合金、多相合金。根据晶体结构，可以将合金相分为固溶体和化合物两类，以含量较多的金属组元作溶剂，加入含量较少的溶质原子，通过溶解形成与溶剂晶体结构相同的固相为固溶体，组元相互作用形成晶格类型不同于任一组元的新相为化合物。元素间形成固溶体还是化合物，主要取决于原子尺寸、晶格类型、电子结构、电子浓度（价电子数与原子数之比）、电负性（从其他原子夺取电子变成负离子的能力）等因素。溶质原子（元素）溶入固溶体的数量称为固溶体浓度，可在一定范围内变化，溶质可以任意比例溶入的固溶体称为无限固溶体，反之称为有限固溶体。溶质原子在固溶体中的最大含量称为极限溶解度或固溶度，元素间的电负性差值增加，有利于增大固溶度。溶质原子含量超过其极限溶解度时，就会形成其他相，原子间电负性相差越大，越易形成较稳定的化合物。金属和非金属间形成的化合物为普通化合物，主要通过离子键结合或含有一定比例的共价键，具有典型的非金属性质。拥有相当程度的金属键及金属特性的化合物为金属间化合物，大多数金属间化合



物由不同的金属或金属与亚金属组成。图 1-1 为 Mg-Si 二元合金相图， $Mg_2Si$  为金属间化合物，在相图中呈现 1 根垂直线，如果形成了以化合物为溶剂的固溶体，相图中会出现一定成分范围的单相区，也称中间相。

## 1.2.2 无机材料的组成

硅酸盐、二氧化硅是重要的无机非金属原料，广泛用于玻璃、陶瓷、光导纤维、耐火材料、冶金材料及熔剂。新型无机材料的化学组成不局限于硅酸盐，还包括氧化物、碳与碳化物、氮化物、硼化物、氟化物、硅化物、硫系化合物（包括硫化物、硒化物及碲化物）和钛酸盐、铝酸盐、磷酸盐等含氧酸盐。

陶瓷一般由结晶相、玻璃相、气相（气孔）交织而成，微观组织由各种形状（颗粒状、针状、片状、纤维状）的晶粒、晶界、气孔、包裹体组成。陶瓷可以只含 1 种结晶相，也可以含有多种结晶相，通常以主晶相来命名陶瓷，如以刚玉（ $\alpha-Al_2O_3$ ）为主晶相的称为刚玉陶瓷。玻璃相为非晶态低熔物，对陶瓷的机械强度、耐热性和绝缘性能不利，固相烧结的瓷料中几乎不含玻璃相，有液相参与烧结的陶瓷中存在较多玻璃相，其主要作用是把分散的结晶相黏结在一起、抑制晶体长大、阻止多晶转变、填充气孔空隙、促使坯体致密化、降低烧成温度。陶瓷坯料存在很多气孔，烧结后通常还有 5%~10%（体积分数）的残留气孔率，气孔的含量、形状、分布会影响陶瓷材料的性能，透明陶瓷要严格控制气孔率，要求密度小、绝热性能好的陶瓷，应含有尽可能多的、大小一致的、分布均匀的气孔。

玻璃的结构及性质与其化学组成密切相关，可以通过成分和微观组织结构设计来满足不同性能要求。以  $SiO_2$  为主要成分的玻璃统称为硅酸盐玻璃，但是纯  $SiO_2$  的熔点高达 1730℃，用熔融法制作困难，在  $SiO_2$  中加入  $Na_2O$ 、 $CaO$  等网络修饰体（调整剂）可降低熔点。添加  $Al_2O_3$ 、 $B_2O_3$  可制作耐热玻璃，添加  $AgI$ 、 $Ag_2O$  可以使  $P_2O_5$ 、 $MgO$  系玻璃在室温有高的电导率，而且其非晶态要比结晶态导电性能好。

玻璃陶瓷由玻璃相基体和大量均匀弥散分布的微小晶体（通常小于  $1\mu m$ ）组成，又称微晶玻璃，其结构致密，基本无气孔，为了促进微晶的成核和适度长大，通常在配料中加入一些成核剂。

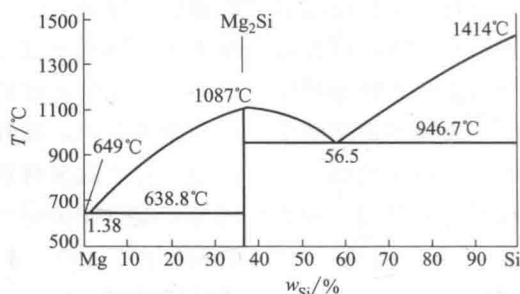


图 1-1 Mg-Si 二元合金相图

## 1.2.3 聚合物材料的组成

聚合物是以有机高分子化合物为主要组分材料，其高分子化合物是由结构相同、组成相同的低分子化合物聚合而成的分子量很高的化合物。如果不是由简单结构单元（单体）重复连接而成，分子量很高的化合物也不能称为聚合物。如果聚合物的重复单元数量不大，增减几个单元会对其物理性质产生较大影响，这类聚合物为低聚物；如果重复单元数量很大，增减几个单元并不影响其物理性质，这类聚合物为高聚物。聚合物通常指的是高聚物。

单体通过聚合反应转变成大分子的结构单元，聚合反应主要有缩聚反应和加聚反应。缩聚反应由一种或几种单体相互混合而连接成聚合物，同时析出（缩去）水、氨、醇、卤化氢



等低分子物质,生成物称为缩聚物,其成分与单体不同。大多数聚合物是利用加聚反应合成的,由一种或几种单体相互加成而形成聚合物,生成物称为加聚物( $X-A-A-A-\cdots-A-A-A-Y$ ,简写为 $X-[A]_nY$ 或者 $[-A-]_n$ ),与单体具有相同的成分,没有副产物生成。聚乙烯就是由很多乙烯分子加聚反应合成的。图 1-2 为聚乙烯及其单体和链节,1 个乙烯分子  $CH_2=CH_2$  就是组成聚乙烯的单体,如图 1-2 (a) 所示;单体的碳原子以不饱和的双键共价结合,还与 2 个 H 原子结合构成稳定的 8 电子层;结构单元 $-CH_2-CH_2-$ 为链节,如图 1-2 (b) 所示,在碳原子的两端有自由基;由于价电子不满足,链节趋于与其他链节结合,形成图 1-2 (c) 所示的聚乙烯大分子链,结构式为 $[-CH_2-CH_2-]_n$ ,其中  $n$  为聚合度。

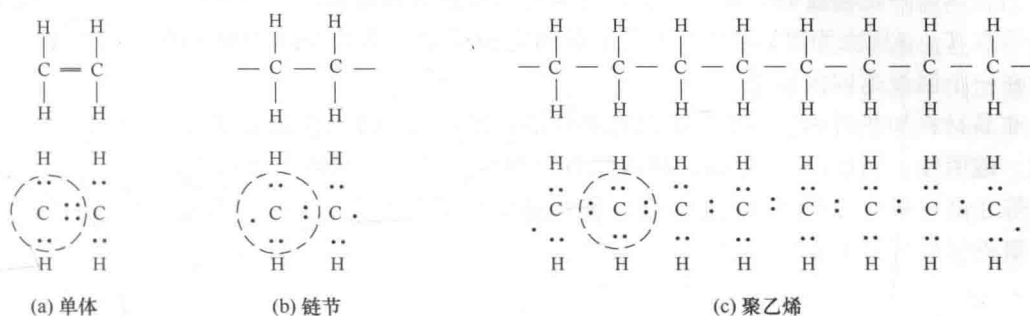


图 1-2 聚乙烯及其单体和链节

单体是稳定的,并不能自动发生聚合反应,通常加入引发剂破坏双键,以形成不稳定的链节。以引发剂  $H_2O_2$  为例,过氧化氢可分解为 2 个 OH 基团,破坏碳碳双键,其中 1 个 OH 基团附在乙烯链节上,加聚反应开始发生,如果反应放出的能量大于破坏双键需要的能量,加聚过程可以自发进行下去,一个个链节连接在引发后的乙烯碳键的自由基端,当单体的供应耗竭或链的活性端遇到 OH 基团时,或 2 个生长链相遇并连接时,反应终止。

大多数聚合物材料还需加入其他辅助组分,起到改善制品性能或加工性能的作用。塑料要加入增塑剂、稳定剂、填料、增强剂、颜料、润滑剂、增韧剂等,橡胶要加入硫化剂、促进剂、防老剂、补强剂、填料、软化剂等,涂料要加颜料、催干剂、增塑剂、润湿剂、悬浮剂、稳定剂等。

## 1.3 材料的性能

材料的性能是一种参量,用于表征材料在给定外界条件(温度、载荷、电场、磁场、化学介质等)下的行为,通过测试和表征材料在不同条件下的行为便可得到不同的性能指标。材料的性能可分为简单性能和复杂性能,简单性能包括力学性能、化学性能,复杂性能包括复合性能、工艺性能和服役性能。对于航空航天结构材料,其热学性能、力学性能和耐久性性能比较重要。

### 1.3.1 热学性能

航空航天材料通常在极端温度环境下服役,航天器中储存液氮、液氧的容器必须承受很



低的温度, 航天飞行器重返大气层时要承受很高的温度, 而发动机涡轮叶片的温度也非常高。材料在不同温度会表现出不同的热物理性能, 称为热学性能, 包括熔点、软化点、热容、导热性、热膨胀系数、抗热震性等。

### 1.3.1.1 熔点和软化点

晶体材料的各种热学性能的物理本质均与其质点热振动相关, 而质点热振动的剧烈程度与温度有关。在低温时, 参与低频振动的质点较多, 随着温度升高, 参与高频振动的质点逐渐增多, 当温度高于一个特征温度 (德拜温度  $\Theta_D$ ) 时, 几乎所有质点都以最大频率  $\omega_m$  振动。当加热至一定温度时, 原子的振幅达到使晶格破坏的数值, 固态转变为液态, 相应温度称为熔点  $T_m$  (反之为凝固点)。纯金属有固定的熔点, 而合金的晶体组织有较多的缺陷, 常常在一个温度范围内熔化。

非晶材料加热时表现出不同的状态和性能, 温度低于玻璃化温度  $T_g$  时, 材料具有刚性、脆性、透明性; 温度高于  $T_g$  时, 材料具有可塑性、黏性、弹性。玻璃、橡胶、塑料、耐火材料等非晶材料在加热时会逐渐软化, 使性能发生急剧变化的温度称为软化点  $T_f$ , 非晶材料的服役温度应低于软化点。

### 1.3.1.2 热容

在没有相变和化学反应的条件下, 物质温度升高 (或降低) 1K 所吸收 (或放出) 的热量称为该物质的热容, 通常以大写的英文字母  $C$  表示。热容与物质系统的质量成正比, 单位质量物质的热容称为比热容 (质量热容), 通常以小写的英文字母  $c$  表示。不同材料的比热容不同, 不同物态的同种材料的比热容也不同, 水的比热容最大, 材料的含水率越大, 比热容越大。热容与温度有关, 工程上通常用单位质量的材料从温度  $T_1$  升高到  $T_2$  所吸收的热量的平均值表示其比热容, 称为平均比热容。若温度变化时物质的压力不变, 相应热容和比热容为定压热容  $C_p$ 、定压比热容  $c_p$ , 若温度变化时物质的体积不变, 相应热容和比热容为定容热容  $C_V$ 、定容比热容  $c_V$ , 通常  $C_p > C_V$ ,  $c_p > c_V$ 。由于温度变化总会导致体积变化,  $C_p$ 、 $c_p$  可通过实测获得,  $C_V$ 、 $c_V$  则通过计算获得。

### 1.3.1.3 导热性

导热性可用热导率  $\lambda$  表示, 在单位温度梯度下, 单位时间内通过单位面积和单位厚度均质材料传导的热量为  $\lambda$ 。导热性好的材料有利于散热, 可用于制造航空发动机燃气轮机叶片等高温环境下服役的部件; 导热性差的材料有利于保温或绝热, 可用于制造航天飞行器挡热板、低温燃料储箱等。

金属拥有大量质量很小的自由电子, 可以迅速实现热量的传递, 导热性能较好。晶体缺陷和振动质点是影响热传导的主要因素, 产生缺陷热阻和声子热阻。纯金属的热阻主要为声子热阻, 按照  $T^2$  的规律上升, 其热导率随温度升高而下降; 合金的热阻主要为缺陷热阻, 按照  $T^{-1}$  规律下降, 其热导率随温度升高而增大。由于异类原子的作用, 合金的热导率明显低于纯金属, 对于固溶体来说, 溶质的结构及质量与溶剂相差越大, 固溶后结合力改变越大, 晶格畸变产生的散射作用越大, 对热导率的影响越大。金属热导率  $\lambda$  与电导率  $\sigma$  间遵从 Wiedeman-Franz 定律, 许多金属在室温的  $\lambda/\sigma$  比值几乎相同, 与温度  $T$  成正比, 引入 Lorenz 常数  $L$ , 如式 (1-1) 所示。

$$L = \frac{\lambda}{\sigma T} = \frac{\pi^2}{3} \times \left( \frac{k_B}{e} \right)^2 \quad (1-1)$$

式中,  $k_B$  为玻尔兹曼常数;  $e$  为电子电量。当  $T$  为  $0^\circ\text{C}$  以上较高温度时,  $L$  近似为常数, 因此可以通过测量电导率来评估金属的热导率。

主要依靠质点振动的格波实现传热的非金属材料, 其热导率受结合键及邻近原子的振动、结合的基团及分子间结合力的影响。无机非金属材料主要依靠声子和光子导热, 石英、金刚石等由强力共价键键合的非金属晶体材料也是良好的导热体, 在较低温度下的导热性可以与金属相提并论。但是, 无机非金属材料的热导率还受表观密度、含水率及孔隙率、孔隙尺寸、孔隙特征等的影响。有机材料的热导率通常低于无机材料, 结晶聚合物的热导率稍高一些, 呈现远程无序结构的非晶聚合物的热导率较低, 沿大分子链进行热传递比在分子间进行热传递更为容易, 因此, 非晶聚合物的热导率随分子增大而升高, 加入低分子的增塑剂会使热导率下降。

#### 1.3.1.4 热膨胀系数

材料的体积或长度随温度升高而增大的现象称为热膨胀, 温度  $T$  升高  $1\text{K}$  导致体积和线尺寸的相对变化量, 分别称为体膨胀系数 ( $\beta$ ) 和线膨胀系数 ( $\alpha$ )。通常采用线膨胀系数  $\alpha$  来表征热膨胀, 对于各向同性材料,  $\beta \approx 3\alpha$ ; 对于各向异性材料, 用  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  分别表示 3 个方向的线膨胀系数。固体材料的线膨胀系数随温度而变化, 其变化规律与热容随温度的变化规律相似。在产品选材、加工、装配方面, 热膨胀系数是很重要的材料性能指标。在温度变化较大环境中工作的构件, 要采用线膨胀系数较小的材料; 焊接两种材料, 其热膨胀系数不能相差过大。一般用平均线膨胀系数表示材料的热膨胀特性, 常用材料的平均线膨胀系数可以从相关手册查得。

#### 1.3.1.5 抗热震性

抗热震性是材料承受急剧温度变化 (热冲击) 而不致破坏的能力, 又称为耐急冷急热性。一般无机材料和其他脆性材料, 在环境温度急剧起伏的热冲击下产生热应力, 当内应力超过材料的强度极限时, 容易发生突然的开裂或断裂, 称为热冲击断裂。材料抗热冲击断裂性能指标以其能够抵抗热冲击断裂的最大温差  $\Delta T_{\max}$  表征,  $\Delta T_{\max}$  值越大, 说明材料能承受的温度变化越大。对于一些多孔材料和非均质的金属陶瓷, 会在热冲击循环作用下发生热疲劳, 导致材料表面开裂, 裂纹扩展可能受到微孔、晶界或金属相抑制, 使材料不会发生瞬时的完全断裂, 只是开裂、剥落并不断发展至碎裂或变质, 称为热冲击损伤。

在不同工况和服役环境下, 对材料的抗热震性要求也不同, 火箭喷嘴要求材料能承受温差为  $3000 \sim 4000\text{K}$  的热冲击。

### 1.3.2 力学性能

力学性能表征材料在载荷作用下抵抗变形和破坏的能力, 既是材料自身固有的性质, 也受载荷性质、应力状态、温度、环境介质等外在因素的影响。国际标准化组织规定, 主要采用拉伸试验、硬度试验、韧性试验、疲劳试验测定材料的力学性能指标。当应变速率小于  $10^{-2}\text{s}^{-1}$  时, 可视为静载作用, 在室温静载条件下的力学性质称为常规力学性能, 包括弹性、塑性、刚度、强度、硬度等。冲击载荷、交变载荷、摩擦载荷等为动载, 冲击韧性、断