

曹晓明 武建军 温鸣 编著

# 先进结构材料



**Chemical Industry Press**



化学工业出版社  
材料科学与工程出版中心

# 先进结构材料

曹晓明 武建军 温鸣 编著



化学工业出版社  
材料科学与工程出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

**图书在版编目(CIP)数据**

先进结构材料/曹晓明,武建军,温鸣编著. —北京:化学工业出版社,2005.4  
ISBN 7-5025-6776-3

I. 先… II. ①曹…②武…③温… III. 工程材料  
IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 020926 号

---

**先进结构材料**

曹晓明 武建军 温 鸣 编著

责任编辑:邢 涛

文字编辑:冯国庆

责任校对:陈 静

封面设计:潘 峰

\*

化学工业出版社 出版发行  
材料科学与工程出版中心  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)  
发行电话:(010)64982530  
<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 15½ 字数 290 千字

2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6776-3/TB·126

定 价: 35.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

# 前 言

先进结构材料涉及工程结构的主要用材并广泛用于国民经济的各个领域。《先进结构材料》一书基于对主要传统结构材料全面系统的介绍，将结构材料的最新发展和最新成果融入进去。此书对正确选择传统的工程结构材料以完成常规的工程建设项目以及如何采用先进的结构材料满足现代高难工程项目对结构材料提出的某些特殊要求具有一定的指导意义。此外，本书亦可作为材料学科学生的课外参考书，还可作为工程技术人员了解掌握结构材料的教科书。

本书共由5章组成，分别介绍金属材料、陶瓷材料、高分子材料、复合材料等。本书由武建军教授、温鸣教授编写，由曹晓明教授定稿。感谢研究生李士杰、李立芝、庞建超、张丽敏在本书编写过程中所做的工作。

由于编写匆忙，书中难免存在这样那样的缺点和不足，请读者给予批评指正，谢谢！

编著者

2005年1月

# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 固体材料中的结合键 .....	1
1.1.1 离子键 .....	2
1.1.2 共价键 .....	2
1.1.3 金属键 .....	2
1.1.4 分子键和氢键 .....	3
1.2 结构材料的分类 .....	3
1.2.1 金属材料 .....	3
1.2.2 陶瓷材料 .....	4
1.2.3 高分子材料 .....	4
1.2.4 复合材料 .....	4
1.3 发展中的材料 .....	4
<b>第 2 章 金属材料</b> .....	7
2.1 不锈钢 .....	7
2.1.1 不锈钢中合金元素的作用 .....	7
2.1.2 常用马氏体不锈钢 .....	9
2.1.3 铁素体不锈钢 .....	10
2.1.4 奥氏体不锈钢 .....	12
2.1.5 奥氏体-铁素体双相不锈钢 .....	14
2.2 微合金非调质钢 .....	16
2.2.1 微合金非调质钢的分类和特点 .....	16
2.2.2 微合金非调质钢合金化原理 .....	18
2.2.3 590~785MPa 级微合金非调质钢 .....	21
2.2.4 高强度高韧性微合金非调质钢 .....	25
2.2.5 冷作强化微合金非调质钢 .....	29
2.2.6 微合金非调质钢的应用 .....	32
2.3 轻金属 .....	33
2.3.1 轻金属的概念 .....	33

2.3.2	铝及铝合金	34
2.3.3	镁及镁合金	45
2.3.4	钛及钛合金	49
2.4	耐热钢和新型高温合金	53
2.4.1	耐热钢	53
2.4.2	高温合金	61
2.4.3	耐锌蚀材料	73
2.5	纳米材料和非晶体材料	76
2.5.1	非晶体材料	76
2.5.2	纳米材料	80
	主要参考文献	86
<b>第3章</b>	<b>结构陶瓷</b>	88
3.1	氧化物陶瓷	89
3.1.1	氧化铝陶瓷	89
3.1.2	莫来石陶瓷	92
3.1.3	氧化锆陶瓷	94
3.1.4	氧化铍陶瓷	97
3.2	氮化物陶瓷	98
3.2.1	简介	98
3.2.2	氮化铝陶瓷	102
3.2.3	氮化硼陶瓷	104
3.3	碳化物陶瓷	107
3.3.1	碳化硅陶瓷	107
3.3.2	碳化硼陶瓷	110
3.3.3	碳化钛陶瓷	112
3.4	金属陶瓷	114
3.4.1	金属陶瓷的制造方法	115
3.4.2	氧化物基金属陶瓷	115
3.4.3	碳化物基金属陶瓷	117
	主要参考文献	119
<b>第4章</b>	<b>高分子材料</b>	120
4.1	高分子材料的分类和命名	120
4.1.1	基本概念	120

4.1.2	分类 .....	121
4.1.3	命名 .....	123
4.2	高分子材料的基本性能特点 .....	124
4.2.1	力学性能 .....	124
4.2.2	高分子材料的物理性能 .....	128
4.2.3	高分子材料的化学性能 .....	135
4.3	常用塑料 .....	138
4.3.1	类型及特性 .....	139
4.3.2	塑料的组分及其作用 .....	140
4.3.3	塑料的成型加工方法 .....	143
4.3.4	塑料的主要性能指标 .....	147
4.3.5	热塑性塑料 .....	149
4.3.6	热固性塑料 .....	159
4.3.7	工程塑料 .....	163
4.4	橡胶 .....	175
4.4.1	性能与结构 .....	175
4.4.2	原料及加工工艺 .....	179
4.4.3	天然橡胶 .....	182
4.4.4	合成橡胶 .....	184
4.4.5	热塑性弹性体 .....	192
4.4.6	微孔高分子材料 .....	194
	主要参考文献 .....	195
<b>第 5 章</b>	<b>复合材料及其进展 .....</b>	<b>196</b>
5.1	概论 .....	196
5.1.1	复合材料的历史 .....	196
5.1.2	复合材料的定义 .....	196
5.1.3	复合材料的分类 .....	197
5.1.4	复合材料增强体 .....	197
5.1.5	复合材料的界面 .....	198
5.2	聚合物基复合材料的新进展 .....	198
5.2.1	聚合物基体 .....	199
5.2.2	增强体 .....	200
5.2.3	聚合物基复合材料的界面 .....	203
5.2.4	聚合物基复合材料的制备 .....	204

5.3	金属基复合材料 .....	205
5.3.1	金属基复合材料的分类 .....	205
5.3.2	纤维增强金属基复合材料 .....	206
5.3.3	短纤维和颗粒增强复合材料 .....	209
5.3.4	原位自生金属基复合材料 .....	212
5.3.5	金属基复合材料界面 .....	212
5.3.6	金属基复合材料的制造 .....	214
5.4	陶瓷基复合材料 .....	218
5.4.1	陶瓷的增韧 .....	218
5.4.2	纤维增韧陶瓷 .....	220
5.4.3	陶瓷基复合材料的应用前景 .....	225
5.5	碳纤维增强碳基复合材料 .....	225
5.5.1	碳纤维 .....	225
5.5.2	碳/碳复合材料的性能特点 .....	226
5.5.3	碳/碳复合材料的制备 .....	226
5.5.4	碳/碳复合材料的抗氧化 .....	227
5.5.5	碳/碳复合材料的应用 .....	228
5.6	混杂增强复合材料 .....	229
5.6.1	混杂纤维复合材料的基本特点 .....	229
5.6.2	纤维增强铝合金层板 .....	231
5.6.3	混杂纤维复合材料的应用 .....	234
	主要参考文献 .....	236



# 第 1 章 概 论

材料是人类用来制作各种产品的物质，是人类生活和生产的物质基础。从日常生活用具到高、精、尖的产品，从简单的手工工具到复杂的航天器、机器人，都是由不同种类、不同性能的材料加工成的零件组合装配而成。材料的利用情况标志着人类社会文明的发展水平，所以历史学家根据制造生产工具的材料将人类历史划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代等。

现代社会的进步，在很大程度上也依赖于新材料的发现与发展。从近代科技史人们知道，新材料的使用对社会经济和科技的发展起着重要的推动作用。钢铁材料孕育了产业革命；半导体材料促进了现代信息技术的建立和发展；复合材料及新型超合金材料为空间技术的发展奠定了物质基础；光导纤维的出现又为现代数字信息技术及网络技术带来了无限美好前景。材料、能源和信息已经成为现代文明的三大支柱，而材料则是其中的物质基础。进入 21 世纪以来，信息、新材料、生物技术被视为 21 世纪新技术的主要标志。材料科学水平已经成为衡量一个国家科学技术、国民经济水平及综合国力的重要标志。许多国家都把新材料的研究开发放在了优先发展的地位。

材料的性能包括使用性能和工艺性能两方面。使用性能是材料在使用条件下表现出的性能，如力学性能、物理性能和化学性能等；工艺性能则是指材料在加工过程中反映出的性能，如切削加工性能、铸造性能、压力加工性能、焊接性能、热处理性能等。根据材料所要求的使用性能，可以将固体材料分为结构材料与功能材料两大类。结构材料主要用于制作工程结构和零件，以强度、韧性、塑性等力学性能作为主要的使用性能。而那些主要要求电、光、声、磁、热等功能和效应的材料则属于功能材料。

## 1.1 固体材料中的结合键

组成物质的粒子，如原子、离子或分子之间的相互作用力称为结合键。整体材料的性质主要是由结合键的性质决定的，因此有必要简单了解一下结合键的分类和特性。由电子运动使原子产生聚集的结合力为化学键，它是固体中的主要结合键。化学键包括离子键、共价键和金属键等三种。此外，还有分子键，它属于物理键，为聚集过程中不发生电子运动的结合力。

### 1.1.1 离子键

当电负性相差较大的元素原子结合成键时，一种原子失去最外层价电子变成正离子，而另一种原子获得电子变成负离子。正离子和负离子由静电引力相互吸引；同时当它们十分接近时核外电子之间将发生排斥，当两者距离适当时引力和斥力相等即形成稳定的离子键。离子键要求正负离子相间排列，而且要使异性离子之间的引力最大，同性离子之间的斥力最小。一个离子周围异号离子的数目不受电价数的限制，只受空间因素的限制，即离子键没有饱和性。另外，离子的电荷分布呈球形对称，从各个方向都可以吸引电荷相反的离子，因而离子键没有方向性。

氯化钠是典型的离子化合物晶体，Na 原子失去一个电子变为带正电荷的  $\text{Na}^+$ ，Cl 原子获得一个电子变为带负电荷的  $\text{Cl}^-$ 。这两种离子依靠静电引力相互吸引，直至引力被斥力所平衡形成离子化合物。一个  $\text{Na}^+$  周围有 6 个  $\text{Cl}^-$ ，而一个  $\text{Cl}^-$  周围也有 6 个  $\text{Na}^+$  与之结合。

### 1.1.2 共价键

电负性相近的原子之间形成分子或晶体时，以共用价电子的方式使两者同时形成稳定的电子满壳层实现结合。共用的价电子主要在这两个相邻原子核之间运动，形成一个负电荷比较集中的区域，因而对带正电荷的原子核产生吸引力，将它们结合起来。这种由共用价电子对产生的结合键叫共价键。

$\text{O}_2$ 、 $\text{Cl}_2$  等单质分子和  $\text{HCl}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_3$  等化合物是靠共价键来结合的。金刚石是最具有代表性的共价晶体。金刚石由碳原子组成，每个碳原子贡献出 4 个价电子与周围的 4 个碳原子共有，形成 4 个共价键，构成正四面体。一个碳原子在中心，与它共价的另外 4 个碳原子在 4 个顶角上。硅、锗、锡等元素也可构成共价晶体。属于共价晶体的还有  $\text{SiC}$ 、 $\text{BN}$  等化合物。共价晶体中的粒子为中性原子，所以也叫原子晶体。

两个相邻原子一般只能共用一对电子。故一个原子的共价键数最多只能等于 8 与原子最外层的电子数之差，所以共价键具有明显的饱和性。另外，在共价晶体中，原子总是以一定的角度相邻接，各键之间有确定的方位，因此共价键有强烈的方向性。

离子键和共价键的结合力都很大，因此离子晶体和共价晶体都具有硬度高、强度大、弹性模量高、热膨胀系数小的特点。此外，由于电子的运动都局限在两个原子之间，所以离子晶体和共价晶体都是良好的绝缘体。由于外层电子比较牢固地被束缚，可见光的能量一般不足以使其激发，因而不吸收可见光，所以典型的离子晶体是无色透明的。

### 1.1.3 金属键

金属元素的原子在满壳层外往往只有一个或几个价电子。满壳层电子在原子

核和价电子之间起屏蔽作用，原子核对外面轨道上的价电子的吸引力不大，所以金属原子很容易失去价电子而成为正离子。凝聚态金属中存在大量为全体原子所共有的自由电子，它们在正离子之间自由运动，形成所谓的电子气，而正离子则沉浸在电子气中。正离子和电子气之间产生强烈的静电吸引力，使全部离子结合起来，这种结合力就叫做金属键。

在金属晶体中价电子弥漫在整个体积内起到正离子胶黏剂的作用，所有的金属离子皆处于相同的环境之中，全部离子（或原子）均可被看成是具有一定体积的圆球，所以金属键无饱和性和方向性。

#### 1.1.4 分子键和氢键

在一定条件下，分子或惰性气体原子也能结合成固体。事实上，由于电子云的密度是不均匀的，正、负电荷中心并不总是重合的，从而使分子一端带负电，另一端带正电，形成偶极。分子与分子之间依靠偶极与偶极之间能相互作用（范德瓦尔斯力）结合在一起。

此外，当氢原子与某一原子形成共价键时，由于共用电子向这个原子强烈偏移，使氢原子几乎变成一个半径很小的带正电荷的核，因而这个氢原子还可以与另一个和电子亲和能较大、半径较小的原子（如 F、O、N 等）相结合，形成附加的键，这种结合力即为氢键。所以氢键是一种较强的、有方向性的范德瓦尔斯力。氢键属于特殊类型的物理键，比一般范德瓦尔斯力强得多，但比离子键、共价键等弱得多。由于范德瓦尔斯力很弱，所以以分子键或氢键相结合的材料熔点很低，硬度也很低。

当然，大多数固体材料中并不总是以某种基本类型键来结合，而往往是几种键的组合。

## 1.2 结构材料的分类

根据材料的本性或其结合键的性质，结构材料可以分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料等四大类。

### 1.2.1 金属材料

金属材料是最重要的工程材料，包括纯金属和以纯金属为基的合金。简单金属原子之间的结合键完全为金属键；过渡族金属原子的结合键以金属键为主，但是也有共价键成分。由于金属键没有方向性，原子之间也没有选择性，所以在受外力作用而发生相对移动时金属键不会破坏。以金属为主体的工程金属材料不仅具有较高的弹性模量、硬度和强度，而且具有很好的塑性、韧性、导电和导热性能。

工业上把金属材料分为黑色金属和有色金属两大部分。铁和以铁为基的合

金，如钢、铸铁和铁合金属于黑色金属；黑色金属以外的所有金属及其合金称为有色金属。

黑色金属的价格便宜，且工艺性能比较优越，是最重要的工程金属材料。铁基材料的产量占整个结构材料和工具材料的90%以上。有色金属包括轻金属、易熔金属、难熔金属、贵金属、铀金属、稀土金属和碱土金属等，它们是重要的特殊用途材料。

### 1.2.2 陶瓷材料

陶瓷是金属元素（或亚金属如硅等）的化合物，可以认为是各种无机非金属材料的统称。金属原子与异种原子化合时形成很强的离子键，同时也存在一定成分的共价键，但仍以离子键为主。例如MgO晶体中，离子键占84%，共价键占16%。当然也有一些特殊陶瓷以共价键为主。陶瓷的硬度很高，化学稳定性好，可以制造各种耐蚀、耐热用具，在一些特殊的情况下也可用作结构材料。但是由于离子键、共价键对周围原子（或离子）有选择性或方向性，在受外力作用而发生相对移动时结合键就会破坏，所以一般陶瓷材料脆性都很大。

陶瓷材料属于无机非金属材料，包括无机玻璃（硅酸盐玻璃）、玻璃陶瓷（或称微晶玻璃）和陶瓷等三类。作为结构和工具材料，工程上应用最广的是陶瓷。按照成分和用途，工业陶瓷材料可分为普通陶瓷、特种陶瓷和金属陶瓷等。

### 1.2.3 高分子材料

高分子材料又称聚合物材料，主要组分是有机高分子化合物。高分子化合物每个分子中可含有几千、几万甚至几十万个原子，相对分子质量在5000以上。大分子内的原子之间由很强的共价键结合，而大分子与大分子之间的结合力为范德瓦尔斯力和氢键。由于大分子链很长，大分子之间的接触面比较大，特别当分子链缠结在一起时，大分子之间可以产生较大的结合力，所以高分子材料具有较高的强度、良好的塑性、较强的耐腐蚀性能、很好的绝缘性以及较低的密度等优良性能，在工程上是发展最快的一类新型结构材料。按其用途和使用状态又分为橡胶、塑料、合成纤维和胶黏剂等四大类型。

### 1.2.4 复合材料

复合材料是由两种或两种以上不同性质或不同组织结构材料组合在一起而构成的。如果选择适合的组分材料及复合工艺，可以得到在强度、刚度和耐蚀性等方面比单纯的金属、陶瓷和聚合物都优越的材料，复合材料具有广阔的发展前景。复合材料通常分为树脂基复合材料、金属基复合材料和陶瓷基复合材料三大类。

## 1.3 发展中的材料

为开发新的工程材料，材料学家们先是设计出新的材料结构，再开发出新的

制造方法，使材料的种类呈几何级数增长。据粗略统计，目前有 45000 种金属合金，15000 种聚合物，还有近千种陶瓷、木材、复合材料和纺织品。例如一辆小轿车所用材料的更新情况，以 1986 年梅塞德斯-奔驰轿车为例，使用了 67% 的钢铁、12% 的聚合物、4% 的铝合金和 12% 的纺织品。而一辆 1996 年的同牌号汽车，钢铁下降到 62%，聚合物增加到 18%，铝合金增加到 6%。不仅是汽车行业，其他行业中使用聚合物的比例也在增高。在日常生活中更不必说，每个人都能感受到身边的塑料制品是越来越多了。图 1-1 是材料成熟曲线，它是根据了解到的发展规划绘制的。可以看出聚合物、陶瓷、复合材料的应用将大幅度增加。复合材料是一种或多种材料的结合体。玻璃钢与混凝土是两个最熟知的例子。当然今天的复合材料不会那样简单，而是集高强度、低质量于一身的工程化材料。

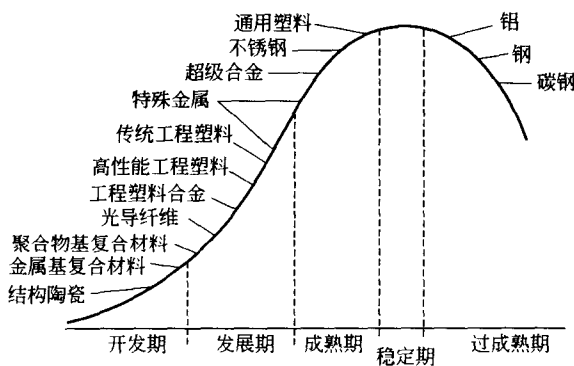


图 1-1 材料成熟曲线

为了进一步看清高精尖材料的发展脉络，不妨对飞机结构材料的发展作一简短的回顾。因为很少有像飞机那样的制品对材料的性质、质量及工作温度有那样严格的要求。世界上第一架金属飞机是德国 Hans Reissner 公司于 1912 年设计制造并试飞成功的，它的机翼材料是纯铝。到 20 世纪 30 年代初期，出现了铝合金的机身和机翼，如波音 757 的材料就是 80% 的铝合金、12% 钢铁和 3% 的复合材料。以铝为主的材料结构延续了很长时间，由于铝的强度只能维持到 195℃，到超音速时代就不得不改变了。目前惟一的超音速客机协和式和 SR71 式侦察机的机身都采用了钛合金。麦道公司于 20 世纪 70 年代设计的 Harrier 式飞机率先将铝合金全部换成了碳纤维与环氧树脂的复合材料。由于大量采用复合材料，Voyager 式飞机一次加油就能够绕地球飞行一周。目前已经出现了除发动机以外全部采用复合材料制造的飞机。

喷气发动机的材料主要是 Ni-Cr-Co 超级合金。用此合金制造的发动机能在较高温度下工作，由此带来了较高的飞行速度和较低的油耗。工作温度越高，飞行效率也越高，所以进一步提高工作温度就成了工程师们不断追逐的目标。目前

合金的工作温度上限已达 1040℃，开发的潜力已经不大，陶瓷保护层尚未研究成功。陶瓷的工作温度最高可达 2760℃，如果把发动机中最热的部分换上陶瓷或陶瓷基复合材料，当然就能解决问题，所以材料学家把眼睛都盯在陶瓷身上。

汽车工程师们也加入了陶瓷材料的开发，因为汽车内燃机也同样面临提高工作温度的问题。为了使内燃机的金属材料不致过热，在运行中必须用水不断冷却，因此有 1/3 的能量消耗在冷却过程中。如果能用陶瓷制造内燃机的缸体，就能一举取消冷却系统，节省大量的能量。目前惟一的障碍是陶瓷的脆性。制造韧性陶瓷成了人们不断努力的目标。

不仅是飞机和汽车，连自行车的材料也在日新月异地发展。美国最新开发出来的 Trek 山地车，车架是用 60% 的碳纤维加 40% 环氧树脂的复合材料，轴承是浸渍聚四氟乙烯的复合材料，制造商称这是世界上最坚固、最轻便的自行车。

由此可见，随着国民经济及国防事业的发展，对材料的品种、性能提出了越来越高的要求，所使用的材料也是逐步发展的。本书的第 2~5 章分别介绍金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料等四大类材料的发展状况。

# 第2章 金属材料

## 2.1 不锈钢

不锈钢一般系不锈钢和耐酸钢的总称。不锈钢指耐大气、蒸汽和水等弱介质腐蚀的钢，而耐酸钢则指耐酸、碱、盐等化学侵蚀性介质腐蚀的钢。不锈钢与耐酸钢在合金化程度上有较大差异。

按钢的成分特点，不锈钢可以分为铬不锈钢、铬镍不锈钢、铬镍钼不锈钢或者超低碳不锈钢、高碳不锈钢、高纯不锈钢等。按性能特点和用途，可以分为耐硝酸（硝酸级）不锈钢、耐硫酸不锈钢、耐点蚀不锈钢、耐应力腐蚀不锈钢、高强度不锈钢等。按功能特点，分为低温不锈钢、无磁不锈钢、易切削不锈钢、超塑性不锈钢等。目前常用的分类方法是按钢的显微组织特点来分类，把不锈钢分为马氏体钢、铁素体钢、奥氏体钢、双相钢和沉淀硬化型钢等五大类。

### 2.1.1 不锈钢中合金元素的作用

不锈钢中常加入的元素有 Cr、Ni、Ti、Mo、V、Nb 等。Cr 是决定不锈钢抗腐蚀性能的主要元素，固溶在铁中的 Cr 超过 13% 后，铁的电极电位由  $-0.56\text{V}$  突然升高至  $0.12\text{V}$ ，使以铁为基体的合金腐蚀速度变慢。而且 Cr 在氧化性介质中极易钝化，可生成致密的氧化膜  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ，提高钢的耐蚀性。Ni 在不锈钢中与 Cr 配合能获得单相奥氏体组织或奥氏体-铁素体双相组织，通过热处理可提高钢的强度。Mn、N 可代替或部分代替 Ni 起同样的作用。Cr 在非氧化性酸（如盐酸、稀硫酸）和碱溶液等中的钝化能力差，加入 Mo、Cu 等元素可提高钢在非氧化性酸中的耐蚀能力。Ti、Nb 能优先同碳形成稳定碳化物，使 Cr 保留在基体中，避免晶界贫铬，从而减轻钢的晶界腐蚀倾向。

#### 2.1.1.1 铬对不锈钢性能的影响

铬是不锈钢获得不锈性和耐蚀性的最主要的元素，它使不锈钢在氧化性介质中，表面上迅速生成氧化铬钝化膜。这层膜是非常致密和稳定的，即使被破坏也能迅速修复。随着钢中铬含量的增加，耐大气腐蚀性能提高，引起耐蚀性突变的铬含量约为 12%。不锈钢的抗氧化性随钢中的铬含量提高而提高，含铬不锈钢的抗氧化性能较普通碳钢高出 4~9 倍。在氧化性介质中，随铬含量的提高，钢的耐蚀性增加。在稀硝酸中，钢中的铬含量在 17%~18% 时，能得到满意的耐

蚀性。在还原性介质中，随铬含量的提高，钢的耐蚀性下降。铬在铁素体不锈钢中，对钢的耐点蚀、耐缝隙腐蚀性能有重要的影响。一般来说，随钢中铬含量的增加，铁素体不锈钢耐点蚀、耐缝隙腐蚀性能提高。因此许多高铬铁素体不锈钢常用于耐氯化物的点蚀和缝隙腐蚀而代替价格昂贵的高 Cr-Ni 奥氏体不锈钢。随钢中铬含量的提高，铁素体不锈钢的晶间腐蚀敏感性降低。但是随钢中铬含量的增加，钢的耐应力腐蚀性能下降。此外铬还能提高钢的淬透性。

#### 2.1.1.2 镍对不锈钢性能的影响

在不锈钢中镍可以提高钢的热力学稳定性，因此镍含量较高的奥氏体不锈钢具有更好的不锈性和抗氧化性能，且随着镍含量增加，耐还原性介质的性能进一步得到改善。镍还是提高不锈钢耐许多介质穿晶型应力腐蚀的惟一重要元素。但是随着钢中镍含量的提高，钢的晶间腐蚀敏感性增加。镍对不锈钢耐点蚀及缝隙腐蚀的作用并不显著。镍还提高不锈钢的高温抗氧化性能，这主要与镍改善了铬的氧化膜的成分、结构和性能有关。但是镍降低钢的抗高温硫化性能，这主要是由于钢中晶界处形成低熔点硫化镍所致。

在不锈钢中，镍可以提高钢的淬透性、回火稳定性，降低钢的强度，但是可以改善其塑性和韧性。加入镍还可以显著降低不锈钢的冷加工硬化倾向。提高镍含量有利于奥氏体不锈钢的冷加工成形性能，但是会增大焊接热裂纹倾向。镍还可显著提高铬锰氮（铬锰镍氮）不锈钢的热加工性能。

#### 2.1.1.3 碳和氮对不锈钢性能的影响

碳通过固溶强化可显著提高奥氏体不锈钢的强度，因此随钢中碳含量的增加，不锈钢的强度提高。但是析出碳、氮化物和氧化物会降低铁素体不锈钢韧性、提高脆性转变温度。在铁素体不锈钢中，碳和氮促进晶间腐蚀，使其晶间腐蚀敏感性远远高于一般的 18-8 奥氏体不锈钢。碳还会增大铬镍奥氏体不锈钢的点蚀倾向。但是碳可提高奥氏体不锈钢在高浓氯化物中的耐应力腐蚀的能力。由于碳的有害作用，不仅在不锈钢冶炼过程中应按要求尽量控制碳的含量，使其尽量低，而且在随后的热、冷加工和热处理等过程中也要防止不锈钢的表面增碳，避免析出铬的碳化物。

氮能显著提高不锈钢的耐点蚀性能。氮富集在表面膜和膜与基体界面处，提高了表面膜的稳定性；氮固溶在奥氏体中，提高了钢的耐蚀性；氮原子可以消耗氢原子，从而减缓了微区 pH 值的下降，起到了缓蚀作用。氮对不锈钢耐缝隙腐蚀性的影响与耐点蚀的影响是一致的，氮的作用机制也与碳对点蚀的影响机制基本相同。氮对铬镍不锈钢的强化效果高于碳，是一种廉价的强化元素。合理使用氮元素是一种很好的选择。

#### 2.1.1.4 钼的影响

钼是不锈钢中仅次于铬的重要元素，除了产生固溶强化外，钼可提高钢的耐



蚀性，特别是钢的耐点蚀、耐缝隙腐蚀性能和耐应力腐蚀性能。

钼的作用仅当钢中含有较高量的铬时才有效。在不锈钢中铬量越高，钼提高钢的耐点蚀性的效果越明显。钼能促进 Fe-Cr 合金的钝化，从而使不锈钢在还原性介质中的耐蚀性提高。而且钼可以形成有一定缓蚀作用的钼酸盐，所以含钼不锈钢具有较好的耐应力腐蚀性能。

#### 2.1.1.5 铜的影响

在普通铬镍不锈钢中，铜可以改善其耐蚀性，尤其是改善钢在还原性介质中的耐蚀性。在马氏体沉淀硬化不锈钢中，铜的作用主要是引起二次硬化效应。除沉淀粒子作用外，铜的固溶强化也是一个重要因素。铜与钼相配合，加速不锈钢中钼的溶解，形成  $\text{MoO}_4^-$ ，强烈促使不锈钢中铬的钝化及铬向表面膜中富集，从而提高钢的耐蚀性，进一步提高含钼奥氏体不锈钢在还原性介质中的耐蚀性。奥氏体不锈钢中铜含量一般在 1%~4% 范围内。

铜能降低铬镍奥氏体不锈钢的室温强度，但是使其塑性提高，特别是对铬镍奥氏体不锈钢冷成形性有良好的作用，同时铜也显著地降低钢的热加工性，因此含铜的奥氏体钢多在要求冷加工的一些用途中使用。

#### 2.1.1.6 其他元素对不锈钢的影响

钴在马氏体不锈钢中提高了钢的回火稳定性，对二次硬化有明显影响。随着钴含量增加，硬化效果随之增加。钴降低了钼在基体中的溶解度，促进了含钼的特殊金属间化合物的沉淀。钴价格昂贵，因此仅在一些特殊用途的钢中使用。

钛和铝在不锈钢中主要是起时效强化作用，并提高回火稳定性和增强二次硬化效应。但是过高的钛含量将使钢的裂纹敏感性提高，即提高钢的脆性。

硅可以使不锈钢获得较好的韧性，当不锈钢中硅量小于 0.10% 时，不锈钢具有较好的韧性。硅可以在不锈钢的表面形成一层氧化硅膜，从而提高双相不锈钢的抗氧化性能。

钨离子具有减缓腐蚀作用，而且还提高不锈钢的耐点蚀性能。但是若考虑钨对双相不锈钢焊接性能和冲击韧性的影响，钨的含量要控制在适当的范围内。

### 2.1.2 常用马氏体不锈钢

根据钢中合金元素的差别，可将马氏体不锈钢分为马氏体铬不锈钢和马氏体铬镍不锈钢两大类型。同时马氏体不锈钢又可分为低碳、中碳和高碳三种类型。对于马氏体铬镍不锈钢又可分为普通马氏体铬镍不锈钢、沉淀硬化不锈钢和马氏体时效不锈钢。马氏体不锈钢可以通过热处理进行硬化。

1Cr13、2Cr13、3Cr13 和 4Cr13 是马氏体不锈钢中用途较大的几个牌号。1Cr13 属于半马氏体型，即除马氏体外，组织结构中还有铁素体组织。2Cr13、3Cr13 和 4Cr13 为马氏体型不锈钢，此类钢中，随其碳含量的增加，强度和硬度提高，而冷塑性和韧性下降，同时耐蚀性降低。