



第九章 基础材料

主讲人：杨振国

办公室：先进材料楼 407室

电话：65642523

电子信箱：zgyang@fudan.edu.cn



9.1 金属材料

9.2 陶瓷材料*

9.3 聚合物材料*

9.4 复合材料*

9.5 半导体材料*



9.1 金属材料

9.1.1 概述

- 钢铁材料: 黑色金属 (钢和铸铁) 和有色金属.
- 铁基金属及合金称为黑色金属 (ferrous metal) ; 非铁基金属及合金称为有色金属 (nonferrous metal).
- 黑色金属以含碳量的不同分为 钢和铸铁。
含碳量小于2.11%的铁基合金称为钢(steel) ;
含碳量大于2.11%的铁基合金称为铸铁(cast iron)。

钢铁是重要的基础材料, 广泛应用于各个领域, 占有所有材料总量的90%以上。



9.1.2 钢铁的分类

钢铁种类繁多，分类如下：

1. 化学成分 (chemical composition)

碳素钢和合金钢。

a. 碳素钢

$w_c \leq 0.25\%$ 的碳素钢称为低碳钢；

$w_c = 0.25 \sim 0.60\%$ 的碳素钢称为中碳钢；

$w_c > 0.60\%$ 的碳素钢称为高碳钢。

b. 合金钢

合金元素总量 $w_t \leq 5\%$ 的钢称为低合金钢；

合金元素总量 $w_t = 5 \sim 10\%$ 的钢称为中合金钢；

合金元素总量 $w_t > 10\%$ 的钢称为高合金钢。



合金钢按添加元素的种类,再细分为锰钢(16Mn)、铬钢(2Cr13)、铬钼钢(15CrMo)等。

2. 金相组织 (metallographic structure)

供应状态: 正火 (空气气氛) ;

退火 (介质气氛) 。

a. 正火状态 (低碳钢、中碳钢、低合金钢)

珠光体钢、马氏体钢、贝氏体钢等。

b. 退火状态 (高合金钢)

平衡态组织: 亚共析钢、共析钢和过共析钢。



3. 冶金质量(metallurgical quality)

按钢中有害元素P、S含量不同, 分为:

- a. 普通钢: $w_P \leq 0.045 \sim 0.035\text{wt}\%$, $w_S \leq 0.05 \sim 0.035\text{wt}\%$;
- b. 优质钢: $w_P \leq 0.035\text{wt}\%$, $w_S \leq 0.035\text{wt}\%$;
- c. 高级优质钢: $w_P \leq 0.025\text{wt}\%$, $w_S \leq 0.025\text{wt}\%$ 。

4. 用途(use)

分为结构钢、工具钢、特殊钢等。

结构钢一般用于制作工程结构和机器零部件。

工程结构钢也叫工程构件用钢, 可分为建筑用钢、桥梁用钢、船舶用钢、压力容器用钢等。



● 常规构件（结构件）一般用普通碳素钢(普碳钢)或普通低合金高强度钢（普低钢）制作。

各种机器零部件用钢通常是优质钢或高级优质钢，但要求不高的零件也可用普碳钢或普低钢制作。

机器零件用钢按工艺和用途，可分为：

渗碳钢、调质钢、弹簧钢（65Mn，60Si2Mn）、轴承钢等，它们用优质碳素钢和优质合金钢制成。

工具钢用于制造各种加工和测量工具，按用途分为刃具钢、模具钢和量具钢。

● 特殊场合使用的钢叫特殊钢。具有特殊的物理和化学性能，比如不锈钢、耐热钢、耐磨钢、耐寒钢等。



9.1.3 钢中的杂质元素

● 钢的成分除**Fe**、**C**元素外，还有原料及冶炼时遗留的**Si**、**Mn**、**P**、**S**、**N**、**H**、**O**等杂质元素，以及为改善性能加入的合金元素如**Cr**、**Ni**、**Mo**、**W**等。

钢中几个杂质元素对性能的影响主要有：

1. Si元素

Si作为脱氧剂加入钢中： $2\text{FeO} + \text{Si} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{SiO}_2$ 。

它溶于铁素体中，对钢的强度有强化作用。

2. Mn元素

炼钢时脱除铁矿石中的**S**、**O**，需添加**Mn**元素：



Mn是有益元素，溶于铁中形成置换固溶体，溶于渗碳体中形成合金渗碳体，对钢的强度有强化作用。



3. P元素

P是从矿石中带入的，溶于铁素体中，使钢强化、硬度增大，但塑性、韧性大大下降，引起“冷脆”，导致冷加工和焊接性能变差，尤其在低温下冷脆现象更为严重，一般严格控制 $w_P < 0.045\%$ 。

4. S元素

S是炼铁时由焦炭带入的。它在钢中以FeS形式使钢变脆，尤其FeS与Fe可形成低熔点(985°C)共晶体(FeS+Fe)。当钢在1000~1200°C热轧时，分布在奥氏体晶界上的共晶体(FeS+Fe)发生熔化，使钢发生轧裂，故称“热脆”。通常加入Mn元素形成高熔点MnS(1600°C)解决S的热脆问题。



5. N元素

钢中溶入过量的N后，在低温下N以 Fe_2N 、 Fe_4N 形式析出，使钢的强度、硬度提高，但塑性、韧性下降，称为“**时效脆化**”。一般通过加入Al、Ti、V来解决。

6. O元素

炼钢时O会形成 FeO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MnO 等非金属夹杂物，使钢性能变差。夹杂物易引起应力集中，在疲劳载荷作用下成为开裂源，故需严格控制其含量。

7. H元素

H是以原子态或分子态存在于钢中，引起“**氢脆**”，产生“**白点**”，形成**微裂纹**，通常在缺陷处聚集，产生很大的内应力，使钢“**发裂**”，故需严格控制。



9.1.4 钢的编号和钢种

我国的钢材编号采用数字、化学符号及拼音字母并用的原则，即钢中合金元素用元素符号表示，如Mn、Cr、Ni、Mo等，稀土元素用“RE”表示。

钢材的产品名称、用途、冶炼和浇注方法等用汉语拼音字母表示，见表9-1。

我国钢材的编号大致如下：

1. 普通结构钢

(1) 普通碳素结构钢

该类钢的牌号（钢号）是由表示屈服强度Q及其数字、质量等级（A、B、C、D）和脱氧方法（F、b、Z、TZ）等符号三部分组成。

表9-1 常用钢号中拼音字符及含义

名 称	牌号表示		名 称	牌号表示		名 称	牌号表示	
	汉 字	拼 音 字 母		汉 字	拼 音 字 母		汉 字	拼 音 字 母
平炉	平	<i>P</i>	滚动轴承钢	滚	<i>G</i>	铸钢		<i>ZG</i>
酸性转炉	酸	<i>S</i>	高级优质钢	高	<i>A</i>	磁钢	磁	<i>C</i>
碱性侧吹转炉	碱	<i>J</i>	船用钢	船	<i>C</i>	铆螺钢	铆螺	<i>ML</i>
顶吹转炉	顶	<i>D</i>	桥梁钢	桥	<i>q</i>	容器用钢	容	<i>R</i>
沸腾钢	沸	<i>F</i>	锅炉钢	锅	<i>G</i>	低淬透性钢	低	<i>d</i>
半镇静钢	半	<i>b</i>	钢轨钢	轨	<i>U</i>	矿用钢	矿	<i>K</i>
易切钢	易	<i>Y</i>	焊条用钢	焊	<i>H</i>			
碳素工具钢	碳	<i>T</i>	高温合金	高温	<i>GH</i>			



质量等级符号表示普碳钢中杂质元素P、S的含量不同。A、B级P、S含量较高，C、D级P、S含量较低，质量好。质量等级还可表示材料性能的冲击温度不同。例如，A级不要求做、B级为 20°C 、C级为 0°C 、D级为 -20°C 下的冲击性能试验。

脱氧方法符号表示沸腾钢 (F)、半镇静钢 (b)、镇静钢 (Z) 和特殊镇静钢 (TZ)。最后两种钢号的脱氧方法一般可省略。沸腾钢为脱氧不完全的钢，塑性、韧性较差。镇静钢脱氧完全，塑性、韧性较好。

比如，钢号Q235-AF，表示屈服强度为235MPa的沸腾钢，不需要做冲击试验；而钢号Q215-b表示屈服强度为215MPa的半镇静钢。



(2) 普通低合金结构钢

该类钢的牌号由“数字+(元素+数字)+(元素+数字)+...”等部分组成。

最前面的两位数字表示平均含碳量的万分数；合金元素以化学元素表示，合金元素后面的数字(一位或两位数)表示该元素的平均百分数。如果合金元素平均含量低于1.0%，一般不标明其含量。

例如，钢号16Mn表示： $w_C=0.16\%$ 、 $w_{Mn} < 1\%$ 的耐低温、低合金结构钢。

再比如，钢号20Cr2Ni2表示： $w_C=0.2\%$ 、 $w_{Cr}=2\%$ 、 $w_{Ni}=2\%$ 的低合金结构钢。



2. 优质碳素结构钢

该类钢号是用钢中平均含碳量的两位数字表示，单位为万分之一。

例如，钢号45表示： $w_C=0.45\%$ 的中碳钢。

对含锰量较高的钢，Mn需标出。例如，钢号25Mn表示： $w_C=0.25\%$ 、 $w_{Mn}=0.7\sim 1.0\%$ 的结构钢。

沸腾钢、半镇静钢及优质碳素结构钢，在钢号后要特别标出。例如：

钢号15g： $w_C=0.15\%$ 的锅炉钢；

钢号08F： $w_C=0.08\%$ 的沸腾钢。



3. 碳素工具钢

碳素工具钢是在钢号前加“T”、其后数字表示钢中含碳量的千分之几。

例如，钢号T8表示： $w_C=0.8\%$ 的工具钢。

若为优质碳素工具钢，在钢号末端应加“A”，如钢号T10A表示： $w_C=1.0\%$ 的优质碳素工具钢。

4. 合金结构钢

这类钢号表示方法与普通低合金钢类似。

例如，钢号60Si2Mn表示： $w_C=0.6\%$ 、 $w_{Si}=2\%$ 、 $w_{Mn}=1\%$ 的合金结构的弹簧钢。



5. 合金工具钢

该类钢号与合金结构钢相同，只是含碳量表示法不同，而合金元素表示方法相同。

钢号前表示含碳量，是千分数。当含碳量大于或等于1.0%时不标出。

高速钢是一类高合金工具钢，钢号中一般不标出含碳量，仅标出合金元素符号及其含量。

例如，钢号9Mn2V表示： $w_C=0.9\%$ 、 $w_{Mn}=2.0\%$ 、 $w_V<1\%$ 的模具钢。

又比如，钢号W18Cr4V表示： $w_C=0.7\sim 0.8\%$ 、 $w_W=18\%$ 、 $w_{Cr}=4\%$ 、 $w_V<1\%$ 的钨系高速钢。



9.1.5 普通结构钢

普通结构钢由于冶炼简便、成本低、批量大，主要用于制作各种工程结构，如屋架、桥梁、汽车构件、船舶、压力容器件等，故一般将其称为构件用钢。

9.1.5.1 一般构件用钢的性能要求

构件用钢的特点是使用时不作相对运动，长期承受静载作用，故要有一定的温度、环境和性能的要求。



1. 使用性能

(1) 力学性能

保证构件有相当的强度、刚度和足够的塑性变形能力。 σ_b / σ_s 较大且 δ 、 ψ 较大时，一般对缺口的敏感性和冷脆倾向较小。

(2) 化学稳定性

材料有一定的耐大气、海水等环境腐蚀能力。

2. 工艺性能

构件在使用时有冷变形、焊接成形及连接工艺要求，故需要有良好的冷变形性能和焊接性能。



9.1.5.2 普通碳素结构钢（普碳钢）

普碳钢产量占钢铁总产量的70~80%，其中大部分用作工程结构件，少量用作普通零件。

根据国家标准GB700-88，分为Q195、Q215、Q235、Q255和Q275等五类。此类钢一般制成各种型材，主要用在建筑、车辆等行业。

钢号Q195含碳量低、塑性好，用于制造铁钉、铁丝及各种薄板，比如黑、白铁皮即镀锌钢板，马口铁即镀锡钢板，还用作冲压件和焊接结构件。

Q215、Q235、Q255等钢号也用于制作一些普通零件如铆钉、螺钉、螺母、以及一些渗碳件。

为适应特殊用途的需要，常常在普碳钢的基础上，进一步提出某些特殊性能要求，形成一系列专用的构件用钢，如冷冲压用钢、桥梁用钢等。

例如， 桥梁用钢： Q235q、 16q等；

锅炉用钢： 20g、 22g 等；

船舶用钢： C10， C20等。

每种专用构件用钢在冶金标准中都有相应的技术条件规定，可从相关标准中查到主要成分和材料的机械性能。



9.1.5.3 普通低合金构件用钢 (普低钢)

普低钢又称低合金高强钢，英文缩写HSLA钢。

从成分上看，象16Mn为低碳、低合金元素钢种，是为适应大型工程结构（如大型桥梁，压力容器及船舶等）以减轻结构重量、提高可靠性及节约材料的需要而发展起来。

我国列入原冶金部标准的普低钢，按屈服强度高低分为300MPa级、350MPa级、400MPa级、450MPa级、500MPa级和650MPa级六个级。这类钢含碳量低，满足构件钢的工艺性能要求，再加入以Mn为主的少量合金元素，达到提高力学性能的目的。



在此基础上,再加入极少量强碳化物元素如V、Ti、Nb等,不但提高了强度,还消除钢的过热倾向。

比如, Q235、16Mn、15MnV等钢种的含碳量相当,但在Q235中加入1%的Mn(实际只相对多加0.5~0.8%)时,就变成16Mn钢,屈服强度提高了50%,可达到350MPa。

又比如,在16Mn基础上再加V(0.04~0.12)%,屈服强度可提高到400MPa;在合金化过程中其他性能也得到了改善,提高了构件的使用安全性,减少了原料和能源消耗,经济效益和社会效益也显著提高。



9.1.6 优质结构钢

优质结构钢分为优质碳素结构钢及优质合金结构钢，用于制造重要零部件，如齿轮、轴、轴承、弹簧等。

机器零件要加工成各种各样的形状尺寸，工作时常受到各种各样的动静载荷的作用，需要考虑强度、塑性和韧性的协调性，选材时要综合考虑。

以下是几种不同材料选用的不同钢号：

渗碳钢(外硬内韧)，比如各种齿轮等：25 ($w_C \leq 0.25\%$)

调质钢(强韧匹配)，比如曲轴等：45 ($w_C \leq 0.5\%$)

弹簧钢：65、85、65Mn

滚动轴承钢：GCr15 ($w_C \leq 1\%$, $w_{Cr} \leq 1.5\%$)

(注：这类优质结构钢Cr是用千分数表示的。)



9.1.7 特殊性能钢

特殊性能钢（特种钢）是指具有特殊物理化学性能并可在特殊环境下工作的钢。例如，不锈钢、耐热钢、耐磨钢和低温钢等。

1. 不锈钢

在腐蚀介质中，材料性能稳定且腐蚀速度极慢的钢，称为不锈钢，主要有五种类型：

- (1) 奥氏体不锈钢(0Cr18Ni9/304), 数字0表示 $w_c \leq 0.08\%$
- (2) 铁素体不锈钢(00Cr17Mo), 数字00表示 $w_c \leq 0.03\%$
- (3) 马氏体不锈钢(2Cr13), $w_c \leq 0.2\%$, $w_{Cr} \leq 13\%$
- (4) 双相不锈钢(2205), $w_{Cr} \leq 22\%$, $w_{Ni} \leq 5\%$
- (5) 沉淀硬化不锈钢 (0Cr17Ni7TiAl), $w_{Cr} \leq 17\%$, $w_{Ni} \leq 7\%$

常用低碳不锈钢和超低碳不锈钢的特殊表示法：

例如，0Cr18Ni9 (GB) 是常用耐腐蚀低碳不锈钢，我国称为18-8，美国牌号是304 (AISI、ASTM)。日本牌号是SUS304(JIS)；其元素含量是：
 $w_C \leq 0.08\%$ ， $w_{Cr} \leq 18.0 \sim 20.0\%$ ， $w_{Ni} \leq 8.0 \sim 10.0\%$ ， $w_{Si} \leq 1.0\%$ ， $w_{Mn} \leq 2.0\%$ ， $w_P \leq 0.045\%$ ， $w_S \leq 0.03\%$ 。

00Cr19Ni10是超低碳不锈钢(304L)，其中L表示
 $w_C \leq 0.03\%$ ，其它含量基本相同，但Ni、Cr上升1%。

还有一种常用的耐点蚀不锈钢叫316 (AISI)，我国牌号为0Cr17Ni12Mo2。若是316L，则是超低碳不锈钢，牌号为：00Cr17Ni14Mo2， $w_C \leq 0.03\%$ 。



2. 耐热钢

高温下具有良好的抗蠕变性和抗高温氧化性的钢叫耐热钢。例如，18-8 (1Cr18Ni9)、12Cr1MoV、X20CrMoV12.1、10CrMo910、P91/P92、T91/T92等。

3. 耐磨钢

表面经强化的结构钢、工具钢和滚动轴承钢等，均具有高的耐磨性，这类钢称为耐磨钢。可分为高锰钢和低合金耐磨钢。例如，20Mn、0Cr18Ni9 (304)等。

另外，还有可焊接的耐磨铸钢 (ZG)。例如，ZGMn13-1表示 $w_{\text{Mn}}=13\%$ ， $w_{\text{C}} > 1.0\%$ 的耐磨钢。



9.1.8 铸铁

1. 铸铁的特点

铸铁是指C: 2.5~4.0%、Si: 1.0~3.0%、Mn: 0.1~0.5%并有少量P、S等杂质成分组成的铁碳合金。

铸铁的显微组织含有石墨相，石墨化程度决定了铸铁的性能和类型。石墨主要有以下作用：

- (1) 切削加工性好；
- (2) 铸造性良好；
- (3) 良好的耐磨性；
- (4) 较好的减振性。

但是，石墨的形态和分布对铸铁的力学性能也影响很大；含量高，抗拉强度也越低，材料变脆。

2. 铸铁的种类

- 按显微组织形貌和断口颜色，铸铁分为白口铸铁、灰口铸铁和麻口铸铁三类。
- 按照化学成分，铸铁分为白口铸铁、灰口铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁、可锻铸铁和合金铸铁等六种。

例如，HT(灰口铸铁): HT100、QT(球墨铸铁): QT400-18、KTH (可锻铸铁) KTH300-10等，其中前一个数字表示抗拉强度，后一个数字表示延伸率。

铸铁用量很大。例如，机床的床身、床头箱、尾架、内燃机的气缸体、缸套、活塞环以及凸轮轴、曲轴等都是铸铁制造的。在农用机械、汽车、拖拉机、机床等行业中，铸铁件约占总重量的(40~90)%。



9.1.9 有色金属

9.1.9.1 概述

- 所有非铁基金属及其合金，通称为有色金属。但生活中及工程上最常用的有色金属有四种：

铝及铝合金

铜及铜合金

钛及钛合金

镁及镁合金

1. 铝及铝合金的特点

- 晶体结构是FCC，熔点是660⁰C。
- 密度低、比强度高。纯铝密度只有2.7g/cm³，仅为铁的1/3左右。
- 优良的物理、化学性能。导电性能好、磁化率低、耐腐蚀性等。
- 加工性能好。铸造性能好、易于塑性变形，经热处理后具有较高的强度。

2. 纯铝及用途

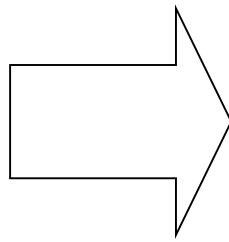
名称	纯度	用途
高纯铝	99.93%-99.99%	科学研究、制作电器
工业高纯铝	98.85%-99.9%	铝箔、铝合金原料
工业纯铝	98.0%-99.0%	电线、电缆、配置合金

- 纯铝强度低，一般不用作结构材料。纯铝中含有Fe、Si、Zn等元素时，性能会下降。

3. 铝的改性

铝中加入合金元素后，如Ti、Mg等，可提高其合金强度，并保持其良好的加工性能。

提高强度的方法



固溶强化

时效强化

弥散强化

细晶强化

4. 铝合金的种类及通途

变形铝合金



铝丝、铝箔、铝合金型材等

铸造铝合金



复杂形状的铸件等



9.1.9.3 铜及铜合金

1. 铜及铜合金的特点

- 晶体结构是FCC，密度是 8.9 g/cm^3 ，熔点是 1083°C 。
- 优良的物理、化学性能。导电、导热和耐蚀性好，是很好的抗磁性材料。
- 加工性能好。容易冷热成形，铸造铜合金的铸造性能好。
- 具有某些特殊的力学性能，如优良的减摩性和耐磨性，高的弹性极限和疲劳强度。
- 外观色泽美观。

2. 纯铜

- 纯铜为紫色，又称紫铜。主要用于制作电导体导线、电子器件互连线等。
- 工业纯铜分为4种：T1、T2、T3、T4。编号越大，纯度越低。
- 纯铜强度低，一般不用作结构材料。

3. 铜合金的种类

铜中加入合金元素后，可提高合金的强度并保持良好的加工性能，共有三种：

- **黄铜：**以Zn为主要合金元素。具有良好的加工性能，优良的铸造性能和良好的耐腐蚀性能。
- **青铜：**以Sn为主要合金元素。主要用于铸造形状复杂的零件，抗腐蚀性能比黄铜好。
- **白铜：**以Ni为主要合金元素。具有较好的强度和塑性，可进行冷加工变形，抗腐蚀性能也好。



9.1.9.4 钛及钛合金

1. 钛及钛合金的特点

- 密度低 ($4.5\text{g}/\text{cm}^3$)、比强度高。
- 耐高温性、耐腐蚀性、耐低温性和韧性好。
- 加工要求比较复杂，成本较高。



2. 纯钛

- 密度是 $4.5\text{g}/\text{cm}^3$ ，熔点是 1680°C ，线膨胀系数小。
- 晶体结构： $T < 882^\circ\text{C}$ ，HCP结构 ($\alpha\text{-Ti}$)；
 $T > 882^\circ\text{C}$ ，BCC结构 ($\beta\text{-Ti}$)。
- 钛在大气、海水及酸碱中的耐蚀性能好。
- 导热性一般。
- 纯钛塑性好，强度高，可加工成细丝和薄片。



3. 钛合金的种类

● **α -钛合金**：Ti中加Al、B等 α 稳定元素,可获得 α -Ti合金。这种合金的室温强度较低，但高温（500~600⁰C）下强度较好，抗氧化性和抗蠕变性好。

● **β -钛合金**：Ti中加入Mo、Cr、V等元素后可获得 β -Ti合金。这种合金强度高、冲压性能好，通过淬火和时效可达到性能强化。

● **$\alpha + \beta$ 钛合金**：这种合金塑性好，容易锻造、压延和冲压，可通过固溶和时效进行强化。热处理后，其强度可提高50%~100%。



9.1.9.5 镁及镁合金

1. 镁的特点

- 熔点为 650°C ，密度为 $1.7\text{g}/\text{cm}^3$ ，仅为铁的 $1/4$ 、铝的 $2/3$ ，比强度高。
- 镁的电极电位较低，表面易氧化，耐蚀性差。
- 镁的晶体结构属于HCP，塑性变形能力较差。

2. 镁合金的特点

- **比重小：** 金属结构材料中重量最轻（铝的2/3重）
- **比强度高：** 比铝还要好。
- **震动吸收性好：** 可将震动能吸收并转化成热放出。
- **易机械加工**
- **耐冲击性好**
- **电磁屏蔽性好**
- **可再生利用：** 有利于环境优化。

3. 镁合金的种类

变形镁合金



镁合金各种型材

铸造镁合金



可成型复杂形状的铸件，
如汽车发动机气缸等



9.2 陶瓷材料*

9.3 聚合物材料*

9.4 复合材料*

9.5 半导体材料*

第九章 习题

1. 概述钢铁材料的分类。
2. 有色金属分哪几种？试举例说明。
3. 概述钢中主要杂质元素对钢的性能影响。
4. 简要说明以下金属材料缩写符号的含义及其碳元素的平均含量：20、16MnR、12Cr1Mo、0Cr18Ni9、304、316L、Q235、T8A、20g、304L。
5. 陶瓷材料是如何分类的？概述普通陶瓷和先进陶瓷的不同点。
6. 概述聚合物材料的分类，试举出五个以上热塑性和热固性树脂的名称及其它们在生活中的应用实例。
7. 复合材料是什么？它分哪几类？它的主要特性是什么？
8. 什么是半导体材料？它主要是哪些材料？发展趋势是什么？
9. 什么叫印制电子？请举三个以上的有机半导体材料及其应用。