



# 《材料科学导论》

徐一飞，高悦

复旦大学高分子科学系

联系方式：[xyf@fudan.edu.cn](mailto:xyf@fudan.edu.cn)  
[yuegao@fudan.edu.cn](mailto:yuegao@fudan.edu.cn)

# 本课程基本信息

**主讲教师：徐一飞、高悦**

**助教同学：**

**课程类型：专业必修 (54学时)**

**课程代码：**

**上课地点：            课程微信群二维码：**

**成绩评定：平时 (10%) + 作业 (30%) + 考试 (60%)**

# 本课程教材

赵长生， 顾宜

## 《材料科学与工程基础》

第三版， 化学工业出版社

在线资源：

<https://www.cipeke.com/course/6696>

注：对第二章内容进行了简化（和《物理化学》课重复），将2.4.1节与2.3节合并（第二讲），2.4.2和2.4.3节与2.5节合并（第三讲）



# 本课程主要参考书

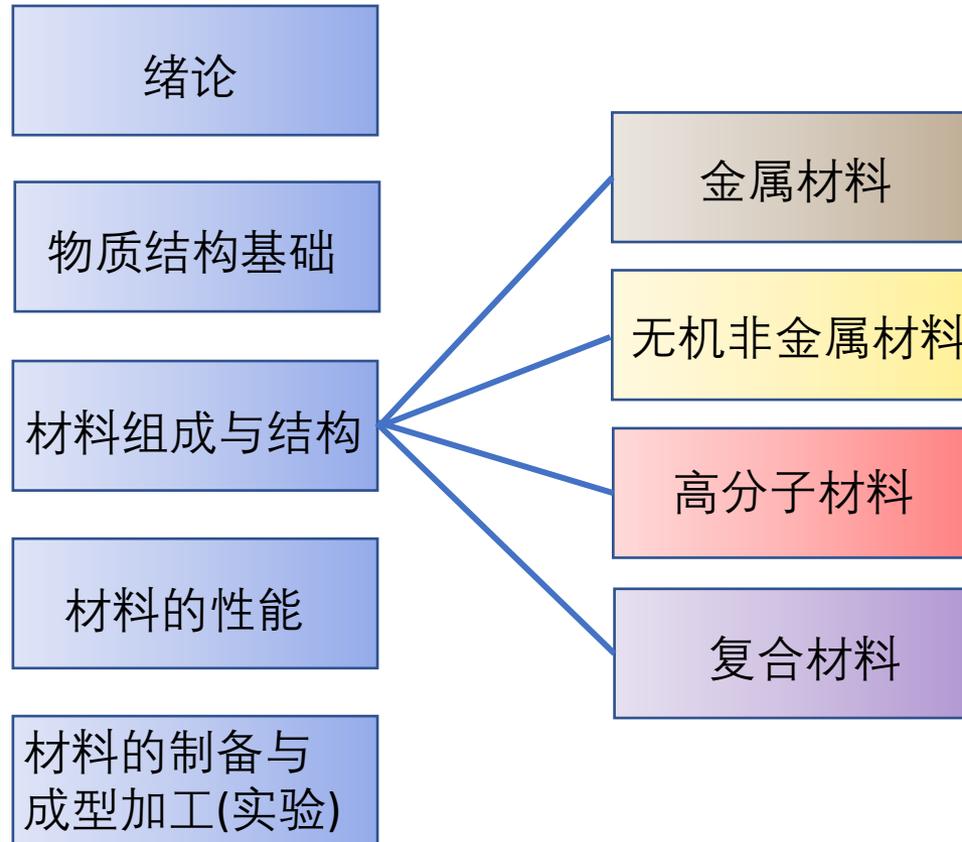
1. 冯端，师昌绪，刘治国，《材料科学导论》，化学工业出版社，2002年
2. 石德珂，《材料科学基础》，机械工业出版社，2003年（第二版）
3. 胡安，章维宜，《固体物理学》，高等教育出版社，2020年（第三版）
4. 黄丽，《高分子材料》，化学工业出版社，2010年（第二版）
5. William D. Callister, Jr., 《Material Science and Engineering: An Introduction》, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd., 2007年(第七版)
6. William F. Smith, 《Foundations of Materials Science and Engineering》, McGraw-Hill, 2006年（第四版）

# 课程教学目标

通过本课程的学习，同学们应能够：

1. 阐述金属、无机非金属、高分子、复合材料四大类材料的组成和结构特点
2. 阐述材料组成结构、性质、性能、合成方式之间的关系
3. 阐述材料学发展的简史，并列举一些材料学未来的发展方向
4. 运用物理公式，对于材料的组成、结构以及转变过程进行定量分析
5. 运用材料科学原理，针对不同工程学需求，选取合适的材料种类，对材料失效问题进行初步分析
6. 对我国材料科学发展过程中面临的“卡脖子”问题提出复合材料学原理的初步设想

# 本课程内容一览



第1-8周：徐一飞

第9-16周：高悦

# 第一章：绪论

## 1.1 材料的定义、分类及基本性质

### 1.1.1 材料的定义

### 1.1.2 材料与人类文明

### 1.1.3 材料的分类

## 1.2 材料科学与工程概述

### 1.2.1 材料科学的形成

### 1.2.2 材料科学的特点

### 1.2.3 材料科学的内容

### 1.2.4 材料科学在工程中的作用

### 1.2.5 材料设计的基本原则

### 1.2.6 新材料的发展方向

# 本讲教学内容

---

1. 材料和材料科学的定义
2. 材料的分类和各类材料的基本性质
3. 材料科学的特点以及和工程学的联系

---

## 1.1 材料的定义、分类及基本性质

# 1.1.1 材料的定义

---

讨论1：什么是材料？

# 1.1.1 材料的定义

## 剑桥辞典:

“可以制作东西的物质”

“a physical substance that things can be made from”

## 维基百科:

“可以构成物体的物质或者混合物”

“a substance or mixture of substances that constitutes an object”

## 教材:

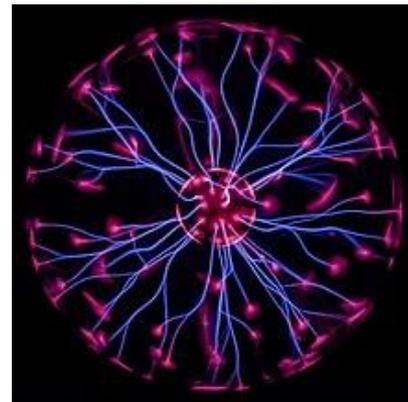
“具有满足指定工作条件下使用的形态和物理性状的物质，是组成生产工具的物质基础”

## 李白，《将进酒》:

“天生我材必有用”

# 1.1.1 材料的定义

## 一材料是有形的物质



固体 (本课程内容)

液体

气体

等离子体

## 一材料有着特定的功用

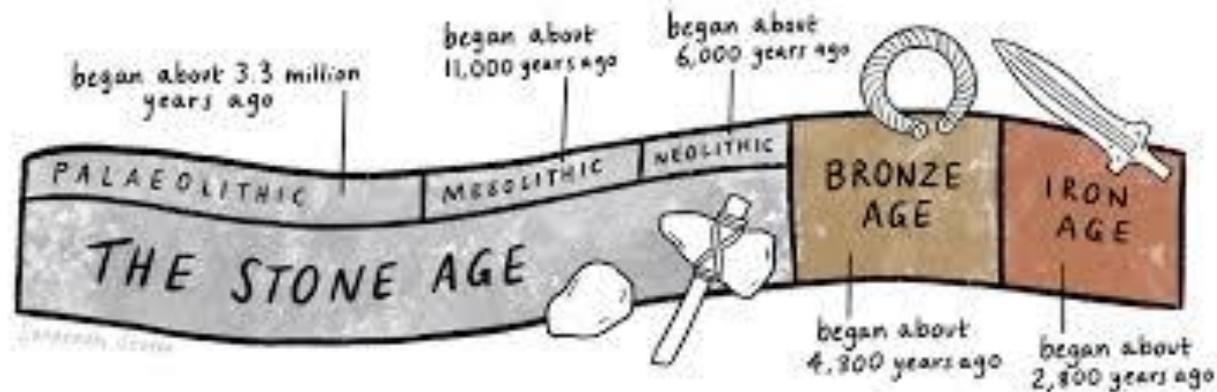


金属:可以用来制作建筑材料、工具、兵器等

湿垃圾:可以制作肥料或燃料油

# 1.1.2 材料与人类文明

—历史学家按照材料将人类史前时代划分为石器时代、青铜器时代和铁器时代



材料是人类文明发展的里程碑

—材料、能源、信息常被称为现代科学的三大基石。新材料是信息技术、生物技术、纳米技术等新技术发展的基础。

# 石器时代：天然材料



旧石器时代的石斧



新石器时代的石雕

—从公元前约三百三十万年起，灵长类动物就具备了用石头、树枝、骨骼制作简单工具的能力（旧石器时代）  
—公元前约1.2万年，人类掌握了制作更为复杂的石器的能力，并创造了早期的文明（新石器时代）

# 石器时代：烧制材料



仰韶文化陶器



宋代官窑瓷器

—早在公元前2.8万年，人们就开始将粘土烧制为陶器，用于宗教活动

—在此基础上，人们又逐渐发展出了砖头、瓷器、玻璃等烧制材料

# 青铜器时代



苏美尔人的青铜器



三星堆青铜器

--利用陶土制备的熔炉可以达到约 $1000^{\circ}\text{C}$ 的高温，使得炼制青铜（铜/锡/铅合金，熔点约 $950^{\circ}\text{C}$ ）成为可能  
--公元前约3300年，两河流域的苏美尔人率先进入青铜器时代（最早的青铜器可能出现于公元前4500年）

# 铁器时代



赫梯人的铁制兵器

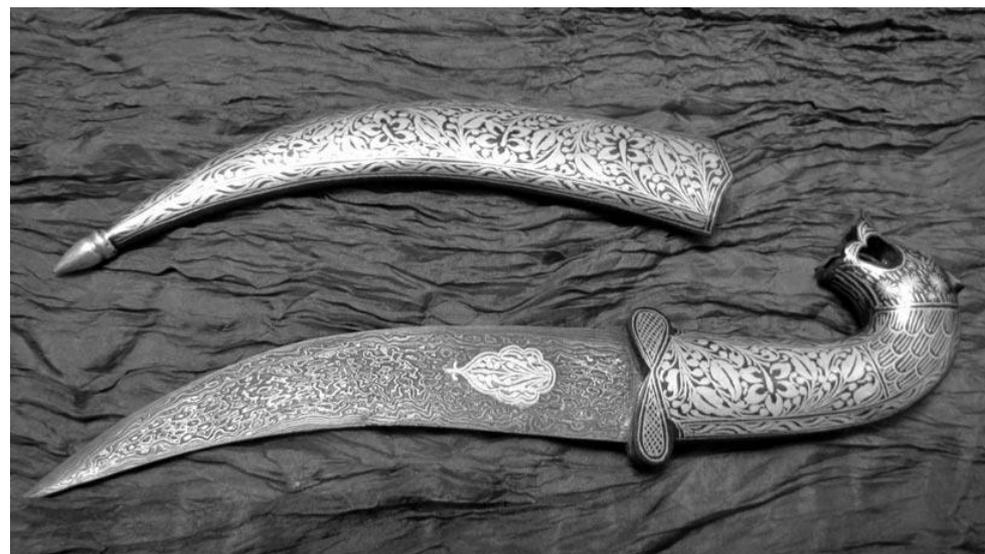


西周时期的玉柄铁剑

——由于铁的熔点更高（约 $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ），在青铜器出现后约一千年，人们才具备了熔铸铁器的能力

——最早的铁器出现于约公元前2500年，或许是由安纳托利亚高原（今土耳其高原）的赫梯人制造（有争议）

# 炼钢技术的发展



印度乌兹钢匕首



现代炼钢工业

- 在铁中掺入少量碳，可以获得力学性质更好的钢。碳素钢和早期铁器同时出现，但直到公元前600年左右，才在印度出现了系统的炼钢工艺
- 随着十八世纪工业革命中蒸汽机和发电机的发明，才产生了现代的大规模炼钢技术

# 世界钢产量的变化 (1850-2014)

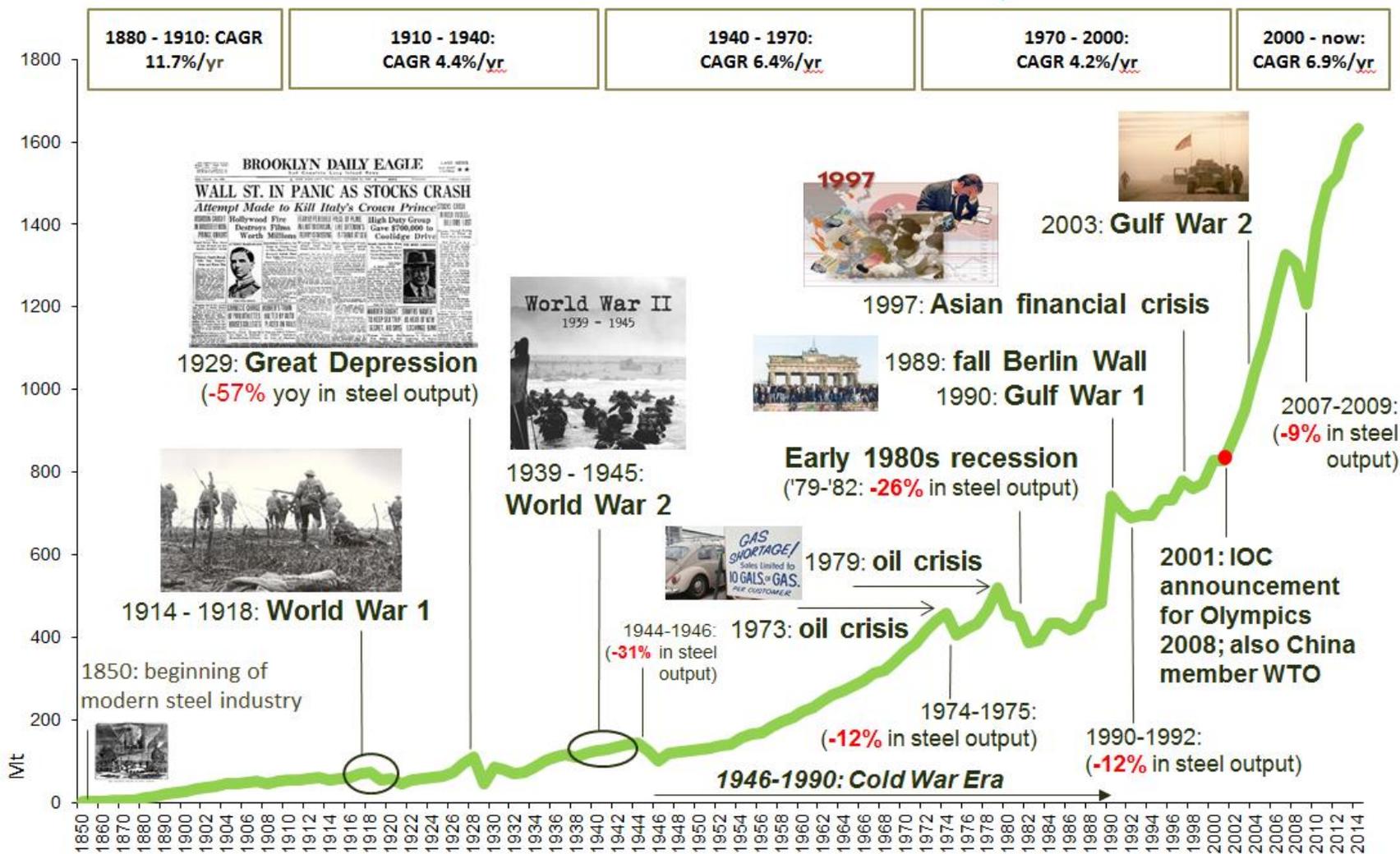


Image by C. Burgering

1850年：6万吨，1900年：2800万吨，2021年：19亿吨

# 高分子材料的兴起



羊毛（主要由角蛋白构成）



用塑料制成的乐高玩具

—人类对天然高分子材料（棉花、羊毛、纤维）等的利用历史悠久

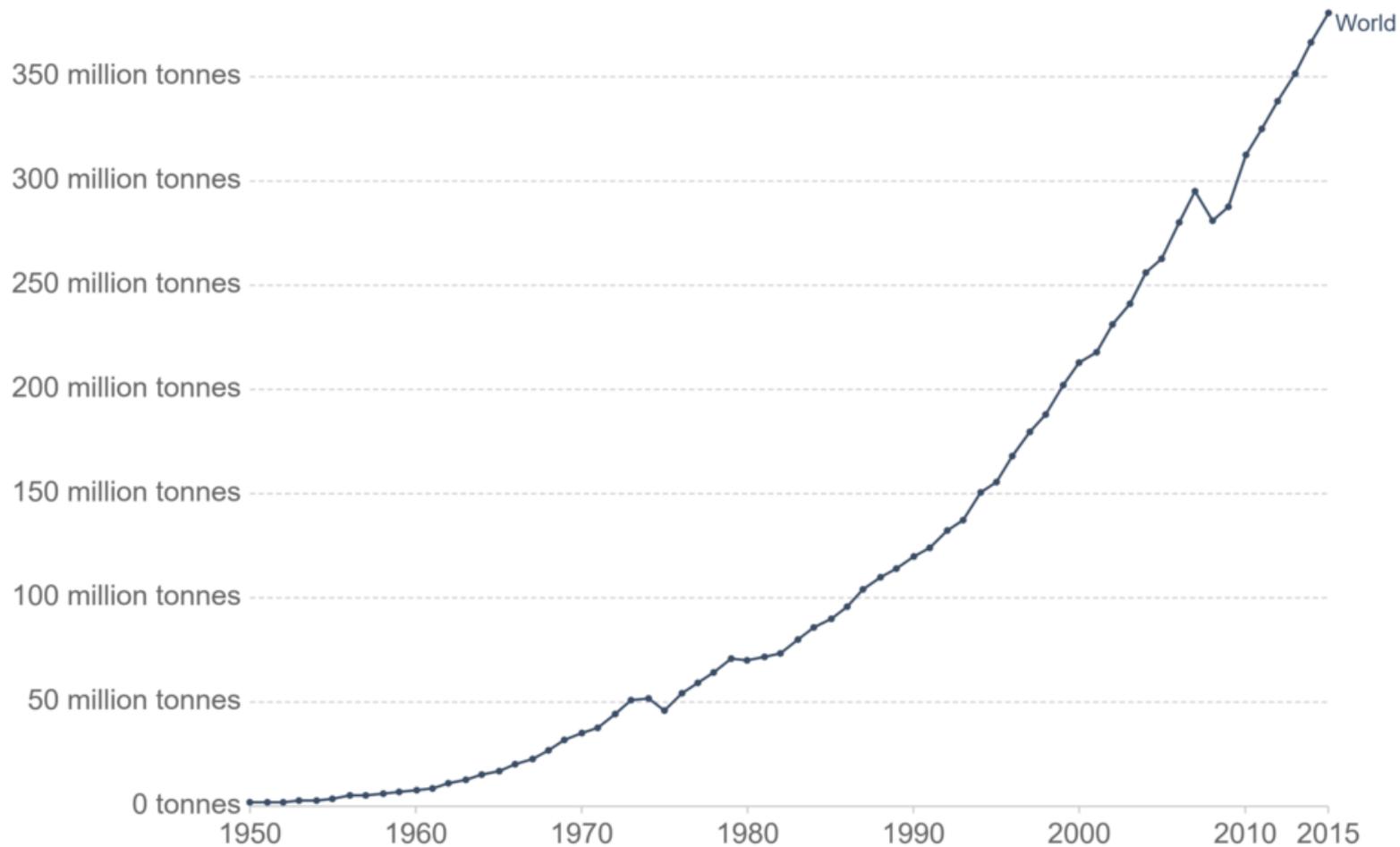
—从1844年美国固特异公司申请硫化橡胶专利开始，人们逐渐掌握了高分子材料的性质，并合成出了多种不同的塑料、橡胶、树脂、液晶等高分子材料。

# 世界塑料产量的变化（1950-2015）

## Global plastics production, 1950 to 2015

Annual global polymer resin and fiber production (plastic production), measured in metric tonnes per year.

Our World  
in Data



Source: Geyer et al. (2017)

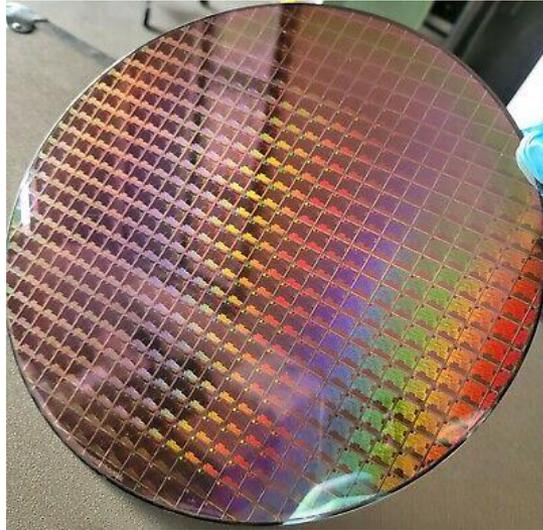
CC BY

一到2015年已经达到3.8亿吨，体积已超过钢铁

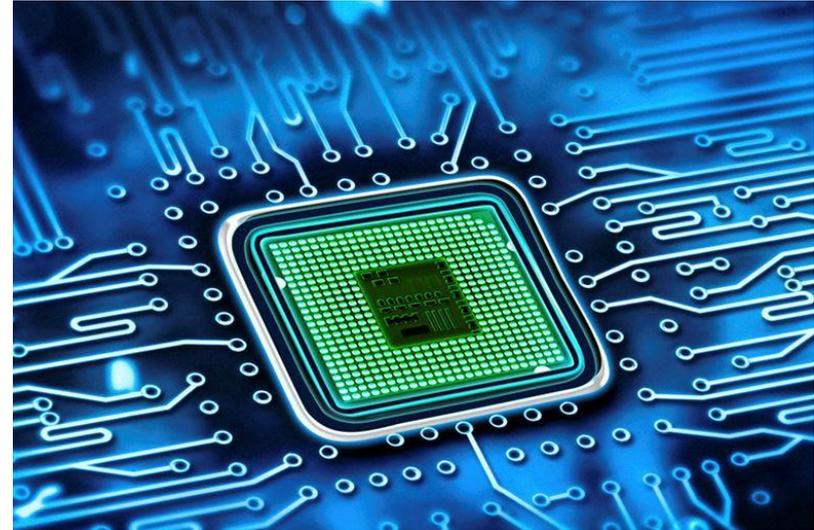
# 半导体材料与信息时代



单晶硅



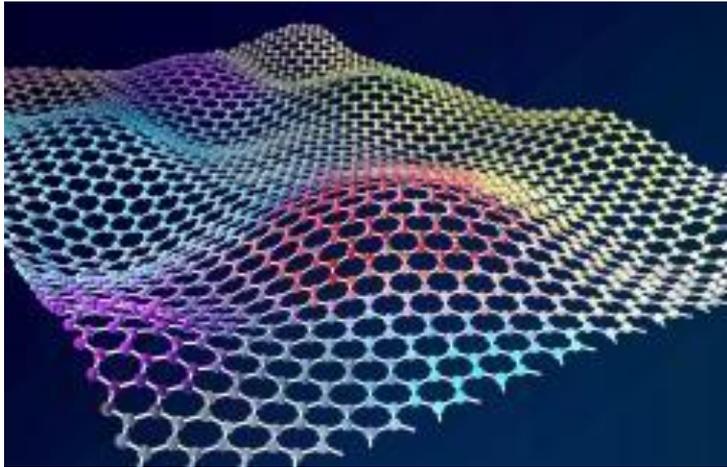
晶圆



集成电路

——随着1947年半导体晶体管的发明，人们逐渐制成了各种高性能的集成电路和其它电子元件，这为现代计算机和通讯技术的发展奠定了基础，也使我们得以迈入信息时代。

# 新材料



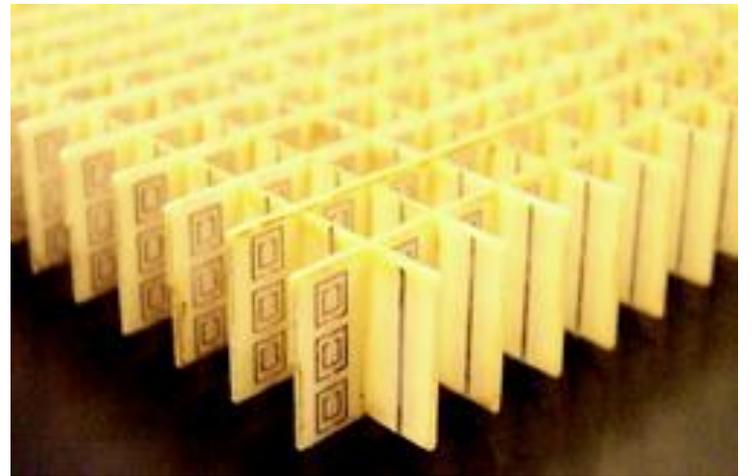
纳米/低维材料



超导材料



生物材料



超材料

—新材料的发现仍不断推动着现代科学的进步

# 1.1.3 材料的分类



金属材料



无机非金属材料



高分子材料



复合材料

- 材料的种类非常多，如钢就有超过3500种
- 材料通常可以按照成分，分为金属、无机非金属、高分子和复合材料四类
- 按照用途，又可以分成结构材料（主要利用力学性能）和功能材料（主要利用光、电、热学等其它性能）

## 讨论2：这三种杯子有何不同？



不锈钢茶杯



玻璃茶杯



塑料茶杯

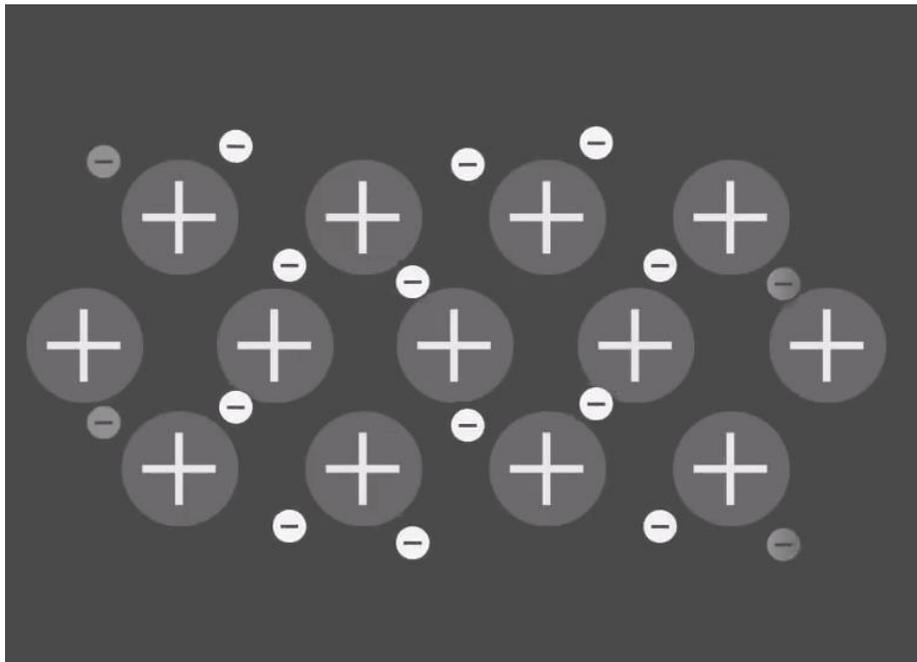
# 金属材料的一些常见性质

- 不容易变形
- 不容易碎
- 耐高温
- 不透明、有光泽
- 导电、导热性好
- 密度较高
- 有些会生锈



# 金属材料的构成

- 主要是金属元素
- 可以含有多种金属元素（合金）和少量非金属元素（如碳）
- 原子间结合方式是金属键



金属键 (Image from FuseSchool - Global Education)

- 黑色金属：** 铁和铁基合金（碳钢、合金钢等）
- 有色金属：** 其它金属材料（铝、铜、锌等）

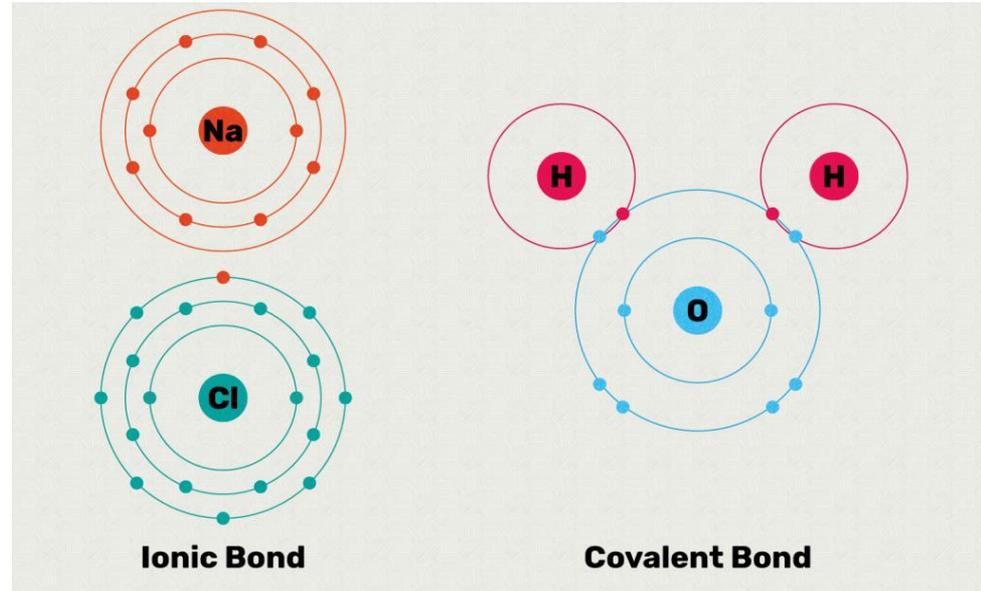
# 无机非金属材料的一些常见性质

- 几乎无法变形
- 容易碎
- 耐高温
- 可以透明（玻璃）  
或不透明（陶瓷）
- 不导电
- 不会生锈



# 无机非金属材料构成

- 非金属元素（如硅），或金属元素/非金属元素形成的化合物（如氧化铝）
- 可以分为陶瓷、玻璃、混凝土、耐火材料等
- 原子间结合方式主要是离子键和共价键



离子键与共价键 (Image from <https://sciencenotes.org/>)

# 高分子材料的一些常见性质

- 容易变形
- 不像玻璃或陶瓷那样易碎，有些还富有弹性（如橡胶）
- 容易上色，也可以是透明的
- 不耐高温
- 不导电、导热性低
- 不会生锈
- 密度低

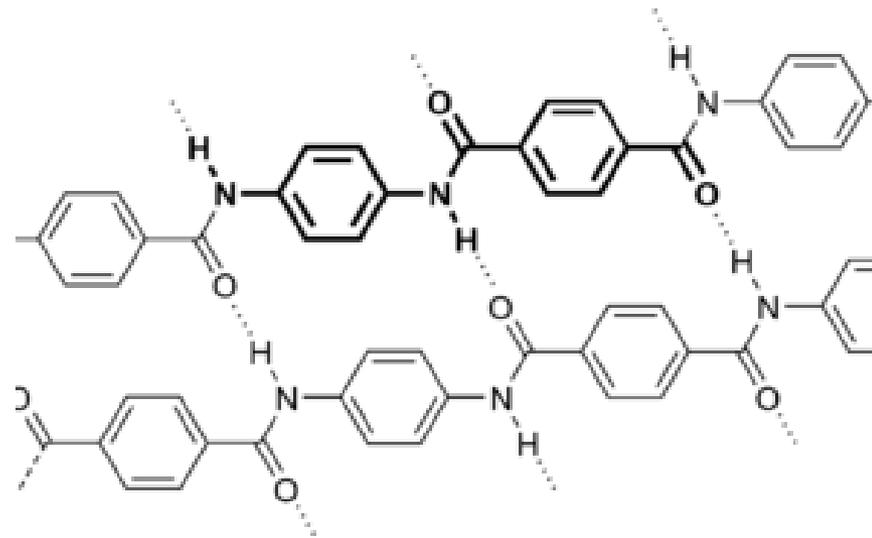


# 高分子材料的构成

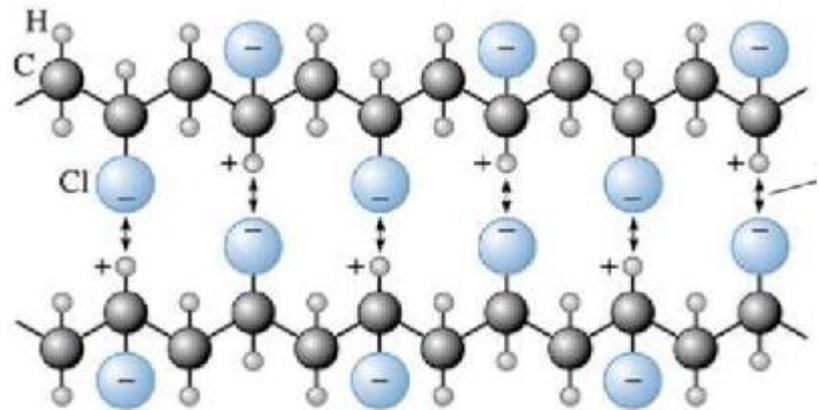
—由C、H、O等元素组成，具有很多重复单元（链状结构）

—包括塑料、橡胶、纤维等

—原子间结合方式：分子内是共价键（强），分子间为氢键和范德华力（弱）



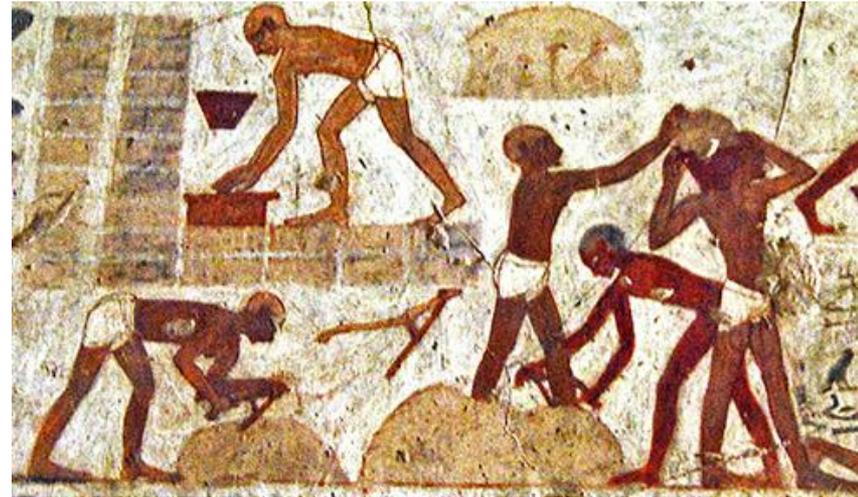
氢键 (Image from Wikipedia)



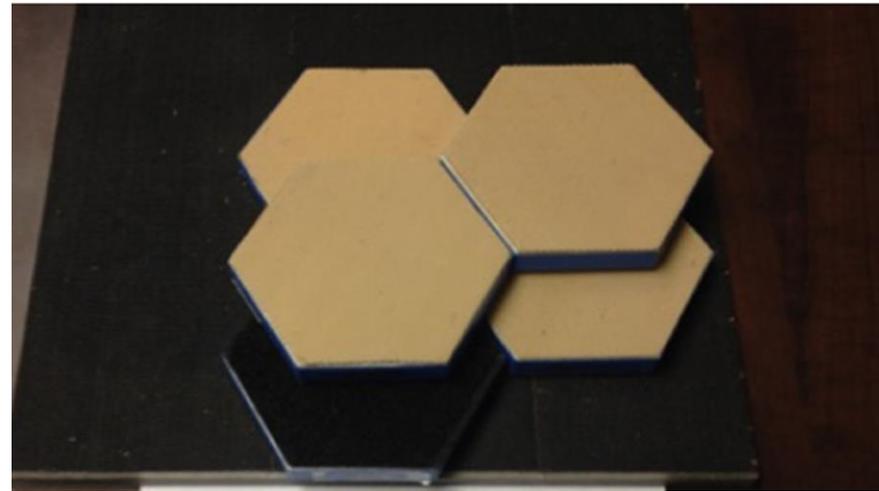
范德华力 (Mihajlović et al., Min. Metall. Inst. Bor., 2014)

# 复合材料

- 复合材料是由多种不同材料复合形成的
- 性能介于几种材料之间（如钢筋混凝土抗压又抗拉）
- 早在古埃及，人们就学会了用稻草和泥浆制作砖头
- 发展新型的复合材料是当前的热点研究方向



古埃及壁画中的造砖流程



美军LAST复合装甲， Mayer, J. Mec. Behav. Biomed. Mater., 2017

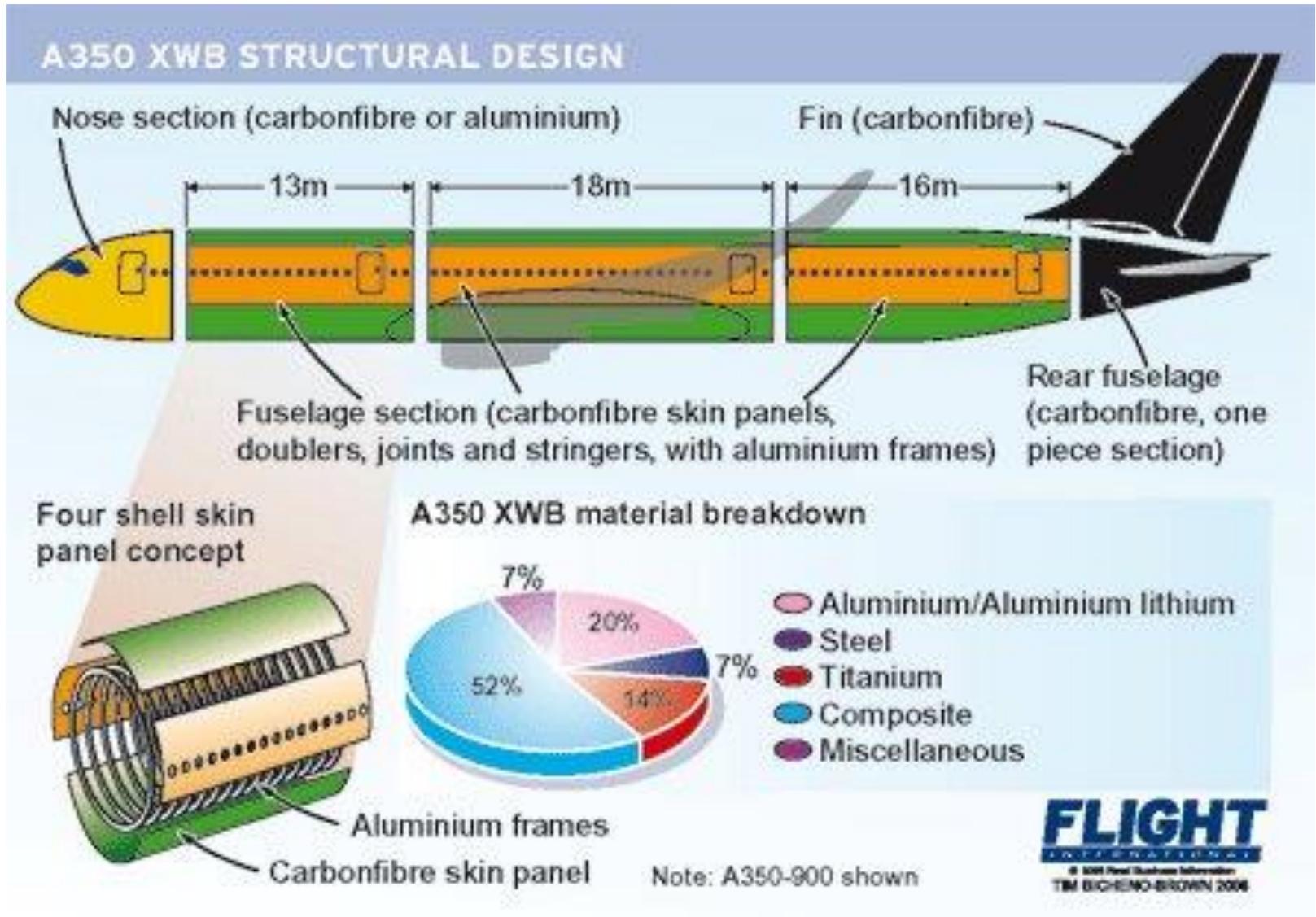
# 讨论3

制造一架客机，需要用到哪些材料？



Airbus A350 XWB型客机

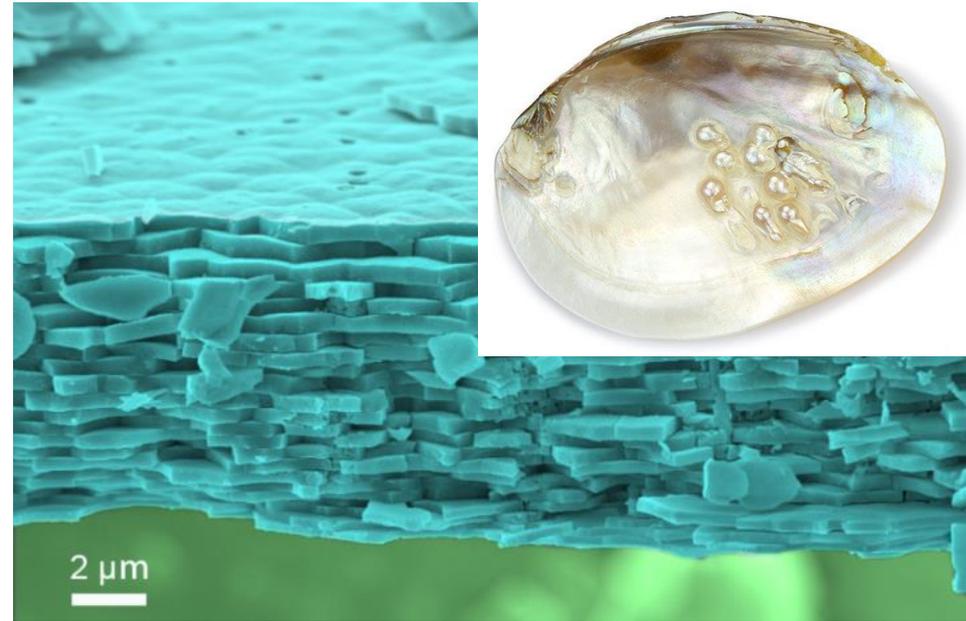
# 空客A350 XWB用到的材料



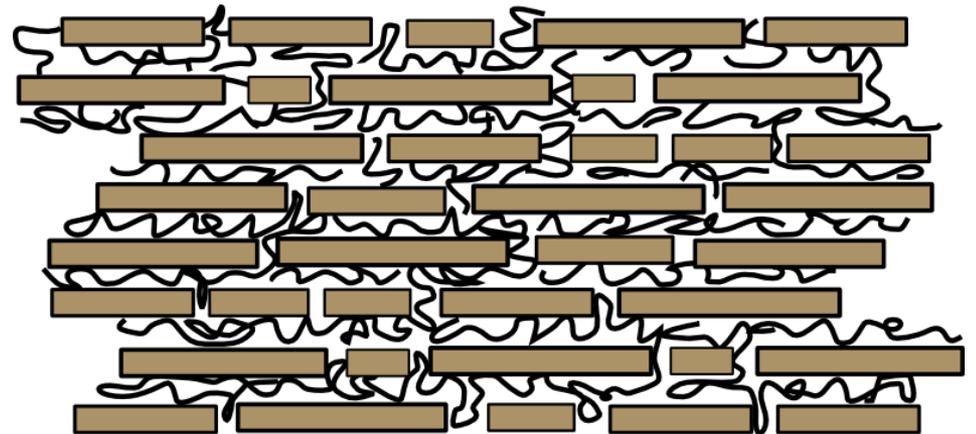
# 扩展知识：杂化材料

—与复合 (composite) 材料不同，杂化 (hybrid) 材料是有机/无机材料在纳米甚至原子尺度的复合

—材料之间的充分结合使得杂化材料的性能可以超越其组分（而非介于几种组分之间）



珍珠母内部结构的SEM照片



珍珠母结构的示意图 (Wikipedia)

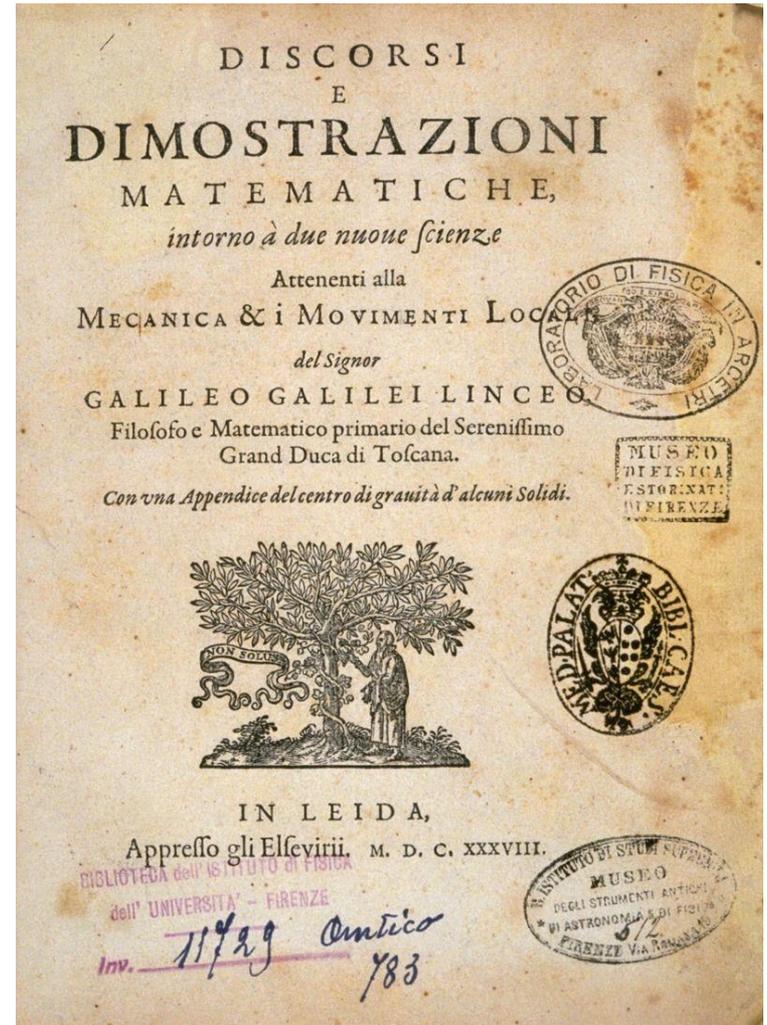
---

## 1.2 材料科学与工程概述

# 1.2.1 材料科学的形成

—尽管材料对于人类文明极端重要，长期以来却未能形成系统的材料科学

—早期的材料科学形成于启蒙时代，科学家们开始运用物理、化学和工程学知识来研究上古时代遗留下来的一些冶金学和矿物学问题



伽利略1638年的著作《关于两种新科学的对话》中将材料科学和物体运动学列为两种新科学

# 1.2.1 材料科学的形成

--二战以后，美国率先将“材料科学”列为一个单独的交叉学科

--由于材料和工程学的紧密联系，这一学科常常被称为“材料科学与工程”

--1958年，美国西北大学冶金系率先更名为“材料科学系”，后更名为“材料科学与工程系”

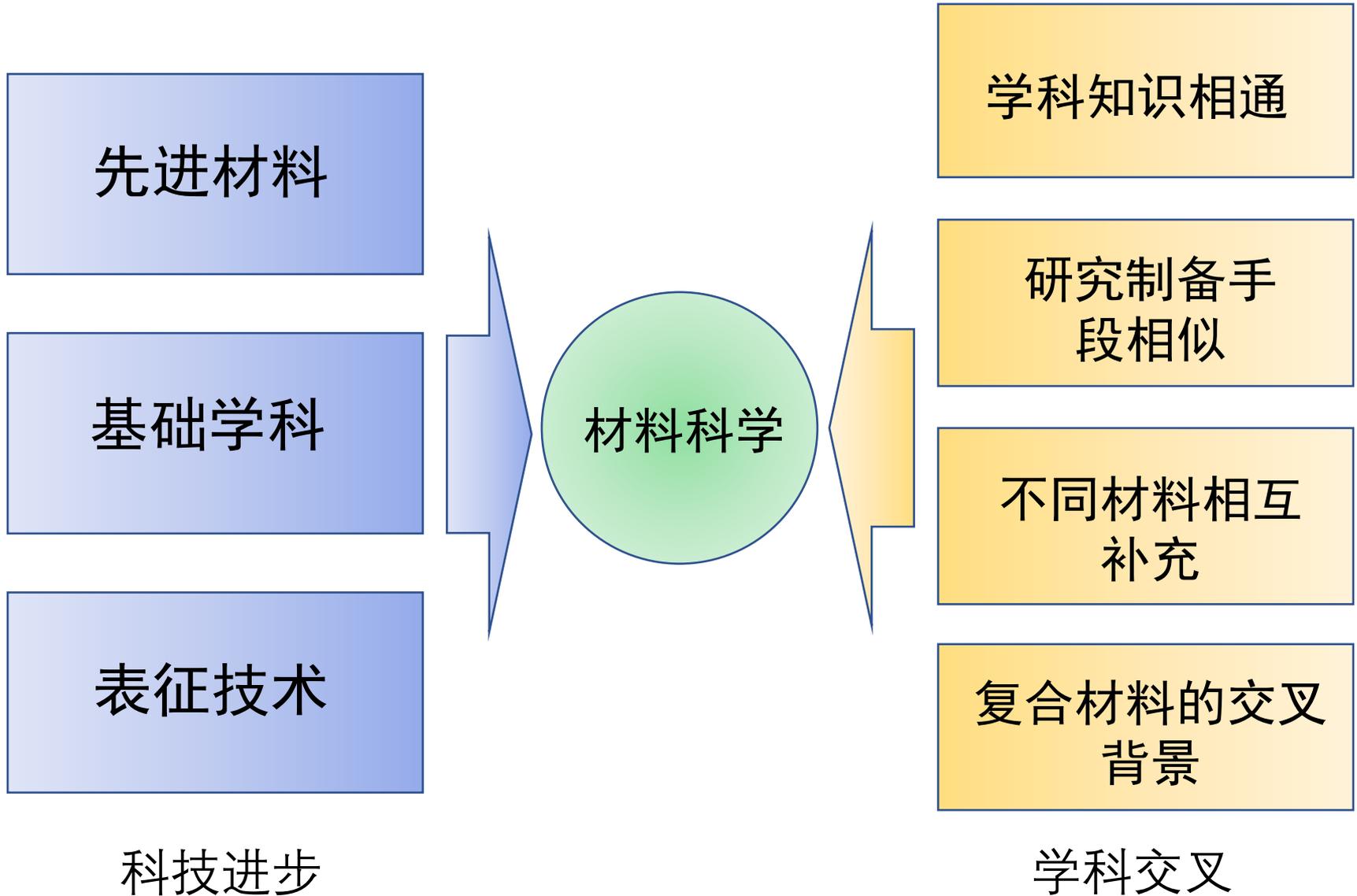
--冷战期间，受美国政府资助，材料科学得到了迅猛发展



Northwestern | McCORMICK SCHOOL OF ENGINEERING  
**Materials Science & Engineering**

美国西北大学材料科学与工程系

# 1.2.1 材料科学的形成



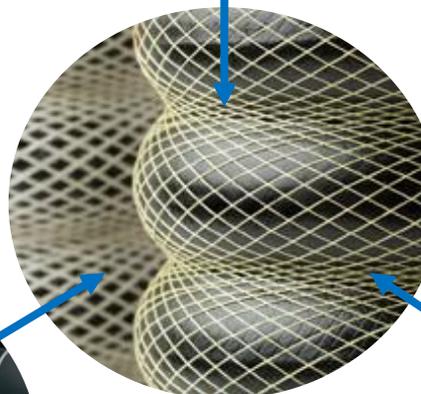
材料科学形成的推动因素

# 1.2.2 材料科学的特点

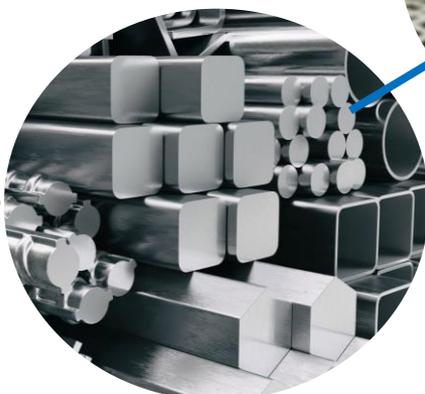
## 特点1：交叉性



无机化学



先进复合材料



冶金学



有机化学

固体物理

固体化学

光学

声学

电子学

量子物理

量子化学

计算科学

生物学

医学

...

# 1.2.2 材料科学的特点

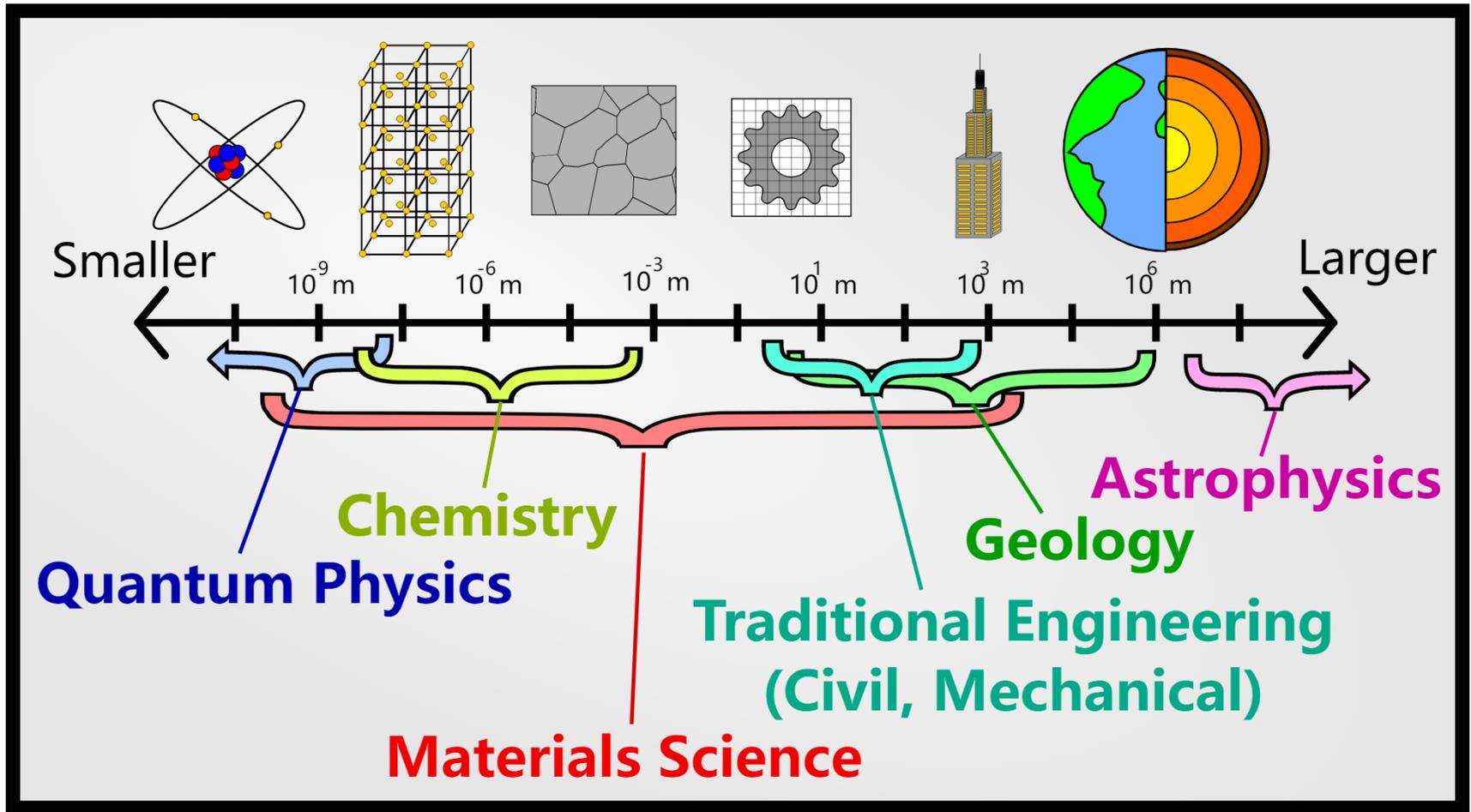


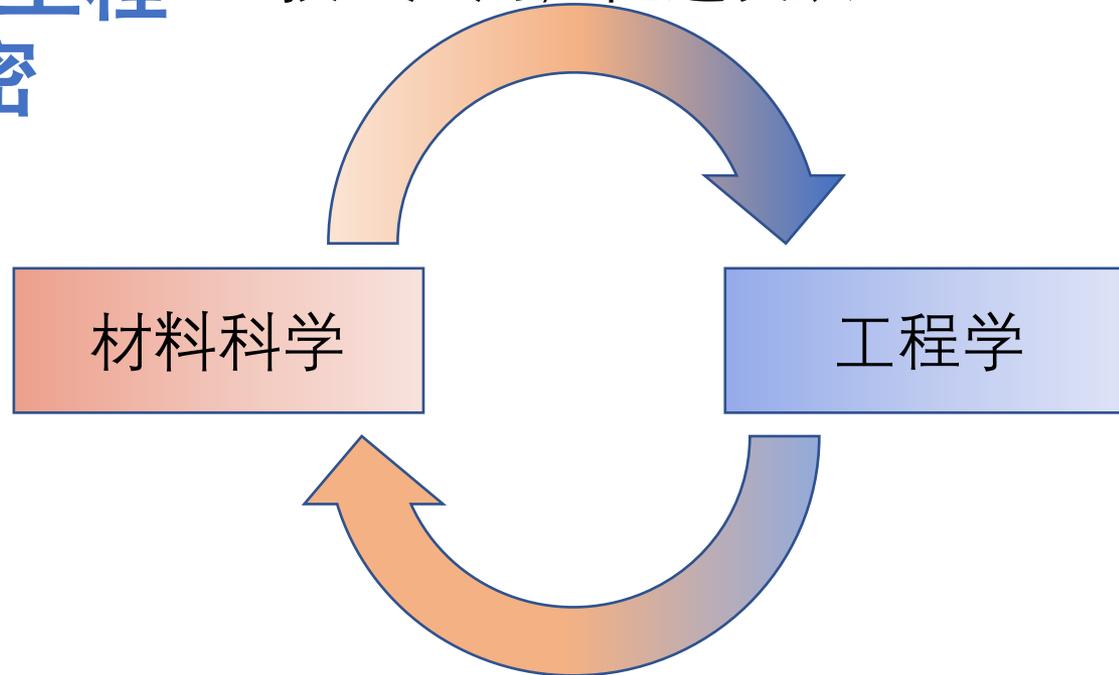
Image adapted from <https://msestudent.com/>

- 从原子尺度 ( $<10^{-10}$  m) 到大型工程尺度 ( $10^3$  m)
- 需要坚实的交叉学科背景和广阔的科学视野

## 1.2.2 材料科学的特点

### 特点2：和工程学联系紧密

投入应用，促进发展



发展表征手段，调控结构，  
促进发展

**材料科学：**研究材料（有用物质）的科学

**工程学：**根据科学知识，设计改良有用物体（材料、建筑、机械等）的学科

# 1.2.2 材料科学的特点

## 特点3：明确的应用性

—材料科学的研究目的：发展新材料，以及更好的理解、使用和优化已有材料

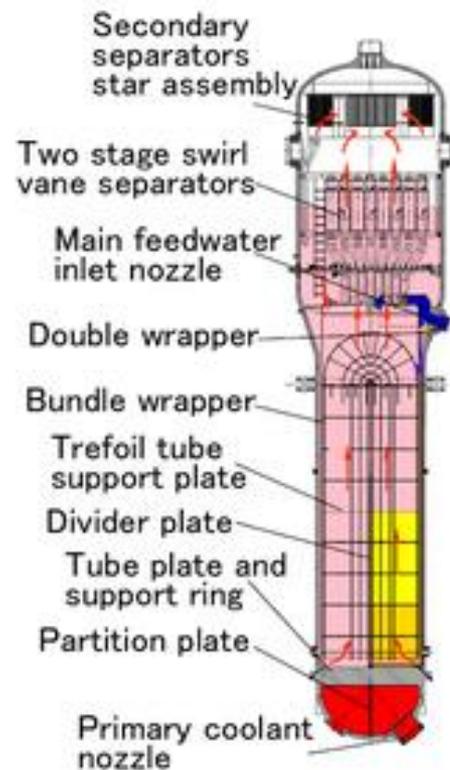
—需要结合社会和国家的发展需求，和物理、化学等更加基础的学科存在区别

# 应用案例1：第四代核电站的支撑环



核电站

- 核电站反应堆的底部需要一个支撑环使其保持平稳
- 第四代核反应堆底部的支撑环需要承载约7000吨的重量，消耗200多吨不锈钢
- 无焊接制造支撑环的技术长期为美国所垄断



核反应堆构造图

(<http://nuclearstreet.com/>)

# 应用案例1：第四代核电站的支撑环



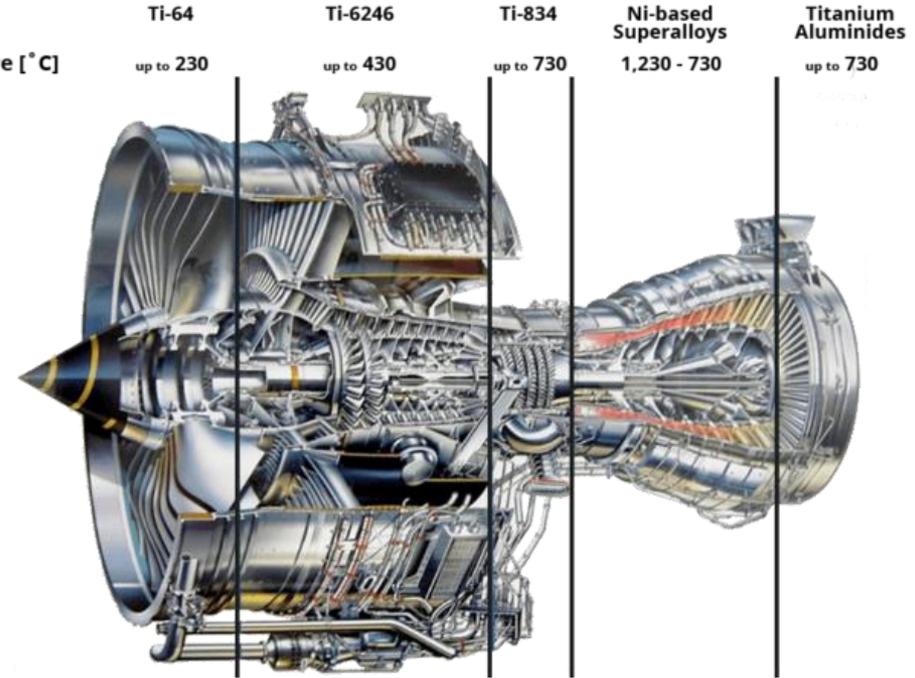
多层热压粘结法制造支撑环的工艺, Sun et al., J. Mater. Sci. Tech., 2021

一中科院金属研究所李依依院士团队将多个钢坯热压成大型钢坯, 并进一步展宽成直径达15.6米的无缝支撑环, 为国家节省了上千亿的资金

# 应用案例2：钛铝合金叶片一体成型技术

—航空发动机的叶片需要轻质高强度的材料  
—上世纪90年代，美国AMG公司发展了钛铝合金，其密度仅为通用的镍基合金的一半，且力学性能更加优异  
—钛铝合金的一体成型技术为美国所垄断

e.g.  
Operating temperature [°C]



用钛铝合金制作的航空发动机  
(<https://amg-nv.com/>)

# 应用案例2：钛铝合金叶片一体成型技术



—中科院金属研究所的杨锐研究员，经过十年的研发，终于成功制成了钛铝合金叶片，并被用于国产C919客机的发动机上

# 1.2.3 材料科学的内容

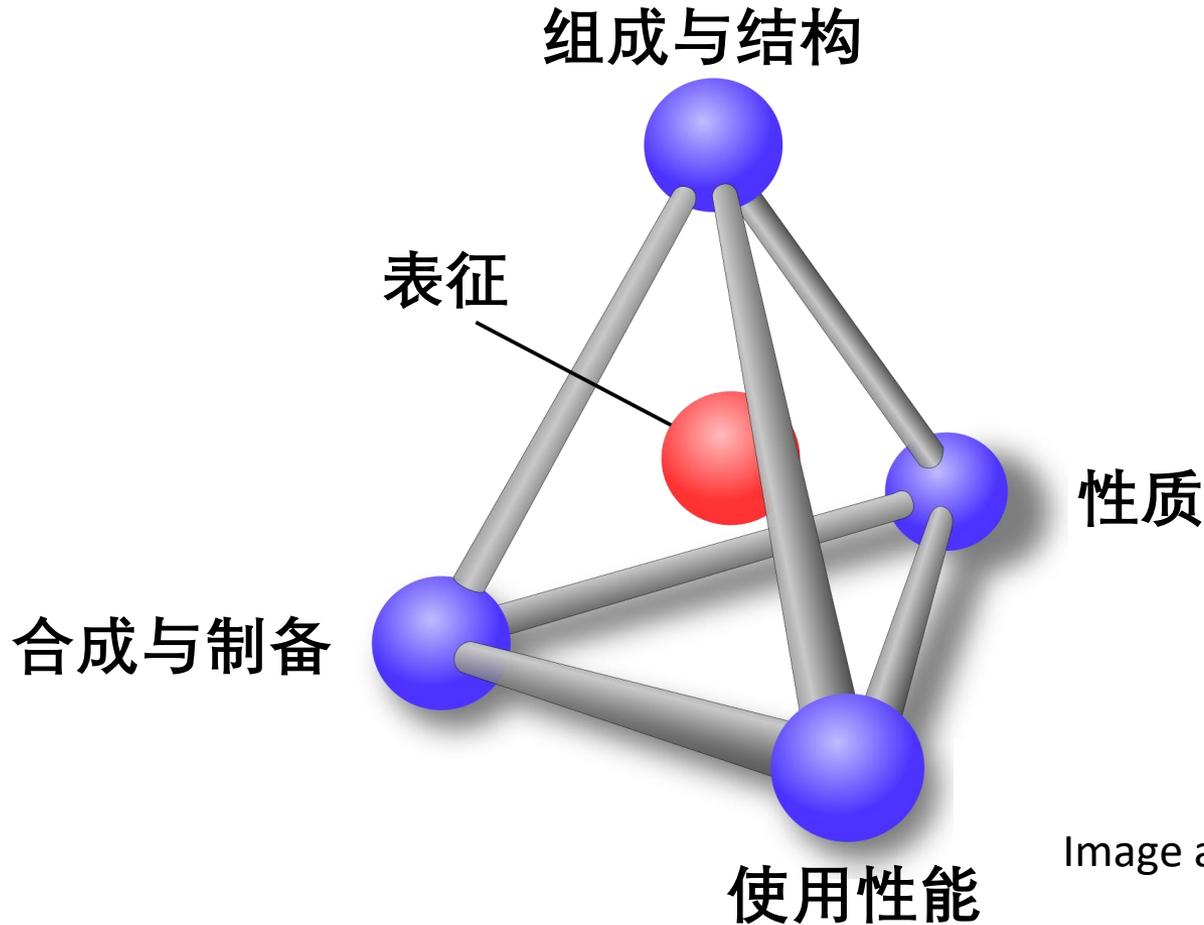


Image adapted from Wikipedia

—材料科学是研究材料组成与结构、性质、合成与制备、以及使用性能的一门交叉学科。

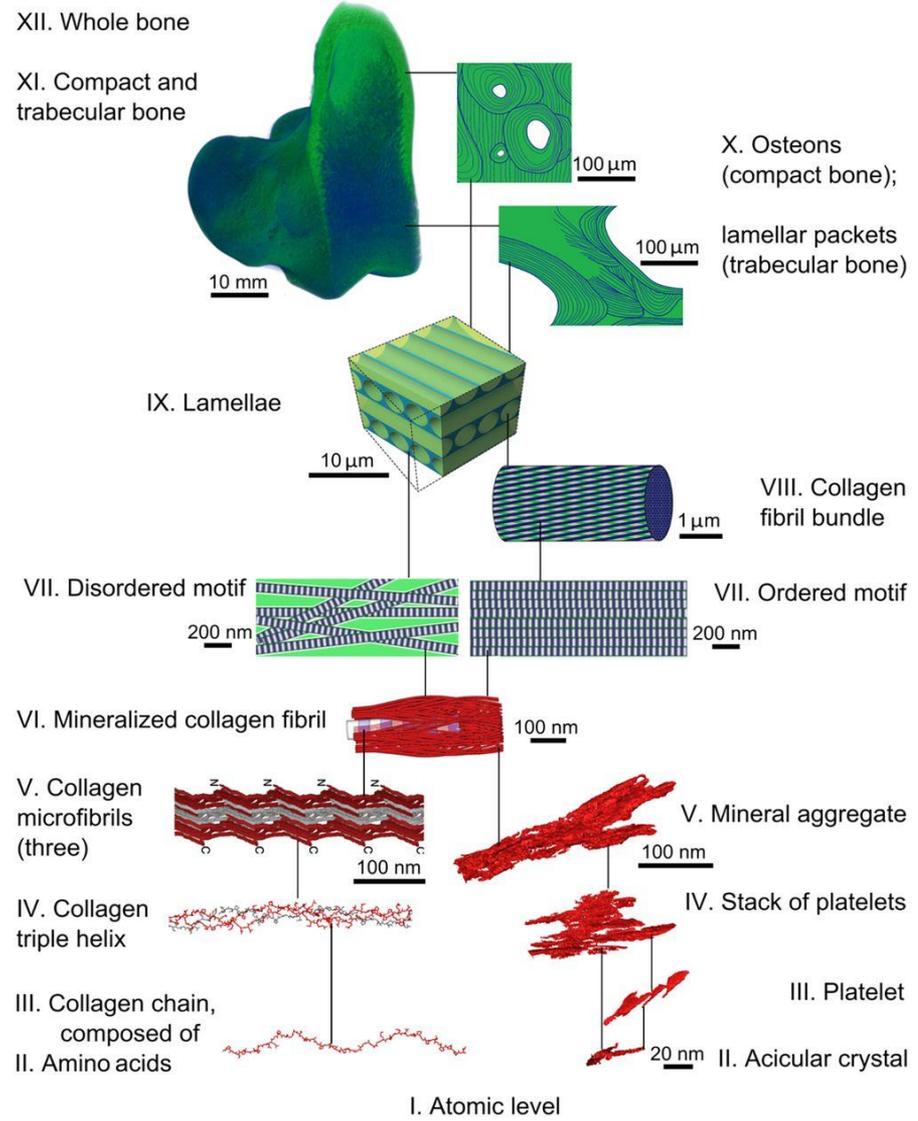
—其核心是通过表征获取的实验数据

# 内容1：材料的组成与结构



—通过了解材料的组成和不同尺度的结构，我们可以更好的理解其性质并设计合成方法

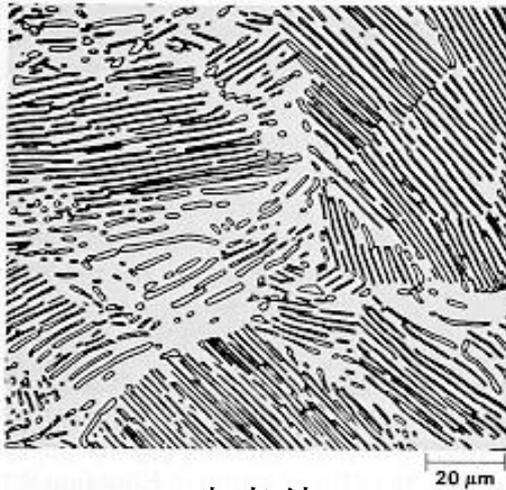
—和物理、化学关系密切，是本课程的学习重点



骨骼的十二级结构(Reznikov et al., Science, 2018)

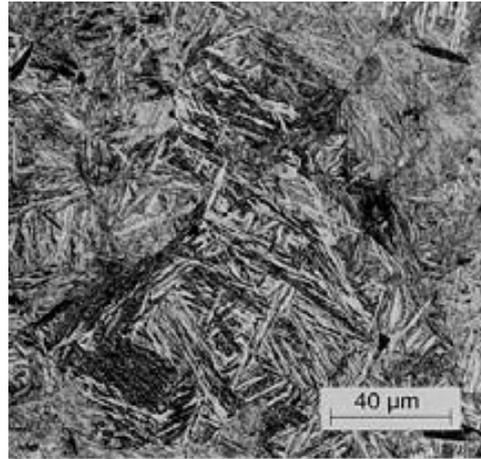
# 结构与性能的关系：钢的微观结构和性能

冷却速度



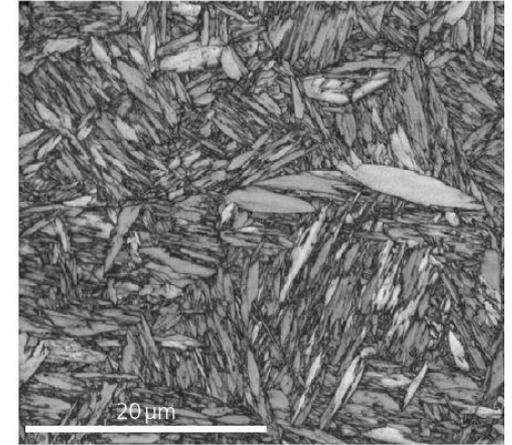
珠光体

([www.princeton.edu](http://www.princeton.edu))



贝氏体

([www.giessereilexikon.com](http://www.giessereilexikon.com))



马氏体

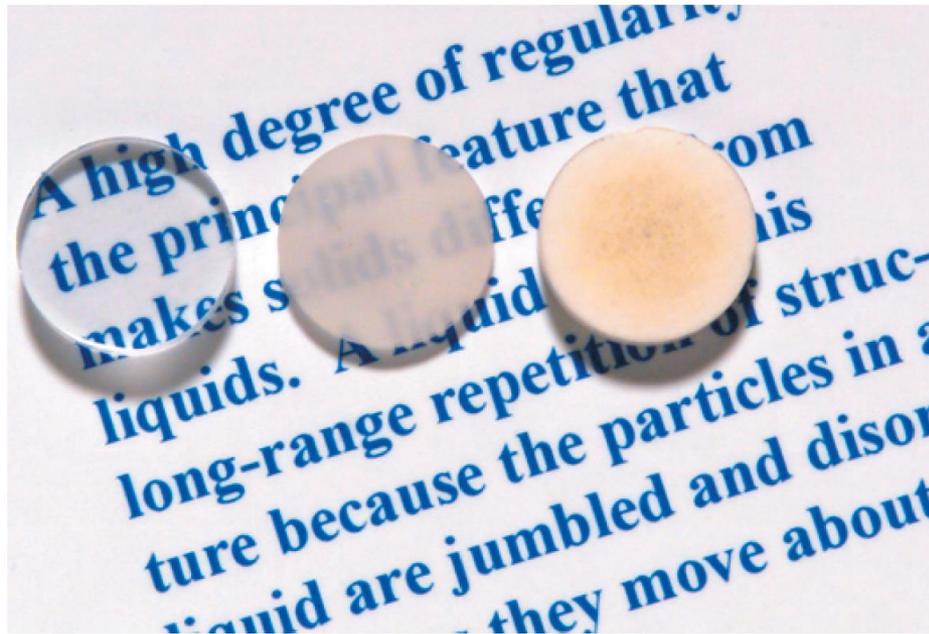
([www.metallurgyfordummies.com](http://www.metallurgyfordummies.com))

硬度

韧性

# 内容2、3：材料的性质和使用性能

- 材料的组成和结构，共同决定了材料的力学、光学、电学、热学、磁学等性质
- 使用性能是材料在使用状态下的行为（如可靠性，使用寿命等）
- 本课程将在“材料的性能”部分进行合并讲解



内部结构不同的三块氧化铝材料，分别为透明、半透明和不透明  
(Callister, Material Science and Engineering: An Introduction, 2007)

# 内容4：材料的合成与制备

一基于对材料组成、结构、性质和使用性能的深入了解，可以设计相应的合成与制备方法



熔炼

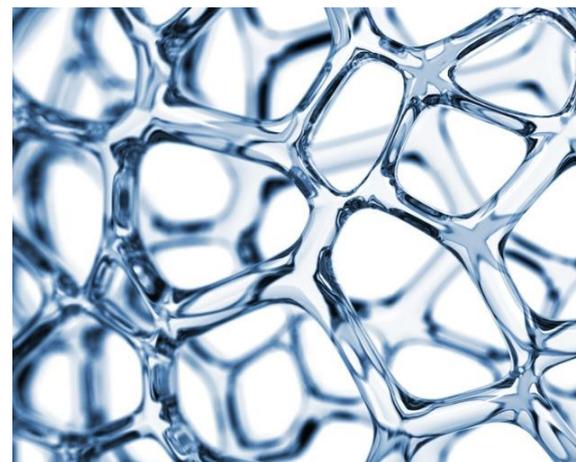


烧制

一由于时间限制，本课程只进行简要介绍

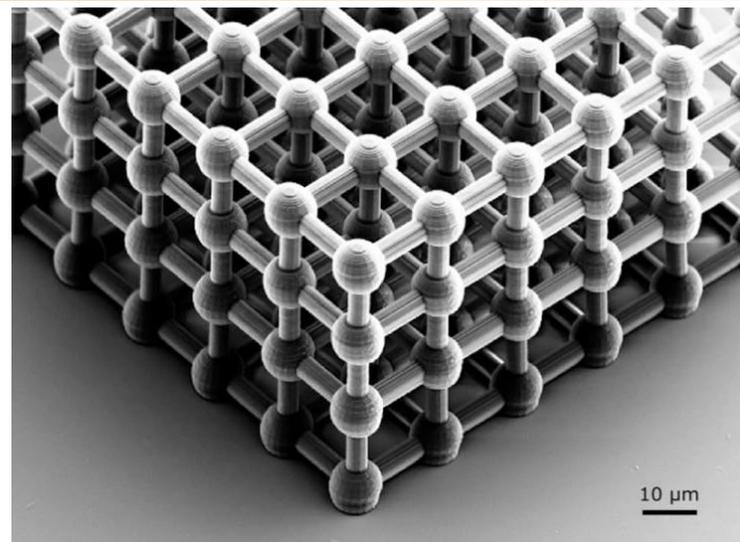
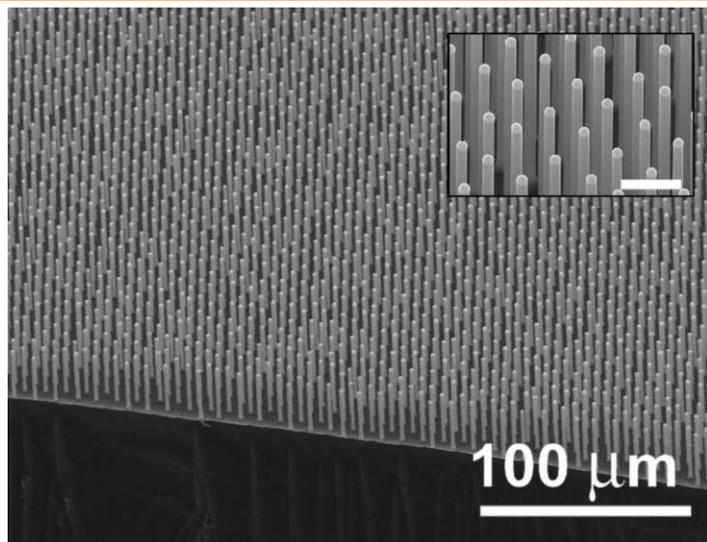


熔体纺织



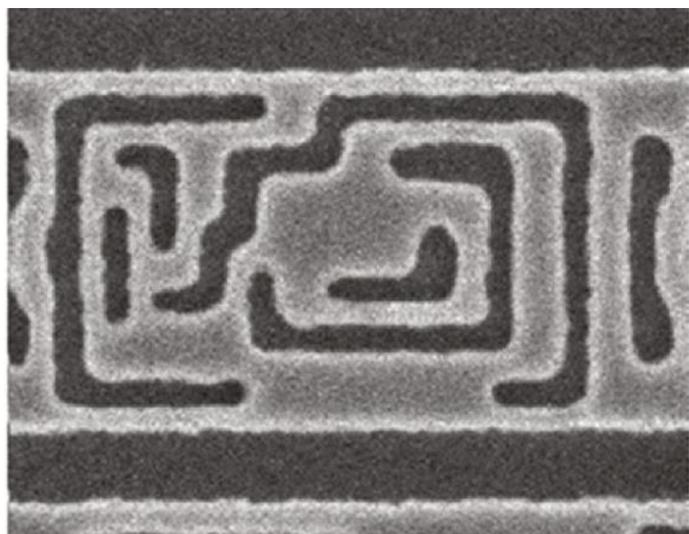
溶胶-凝胶法

# 扩展知识：一些先进的纳米材料制备方法

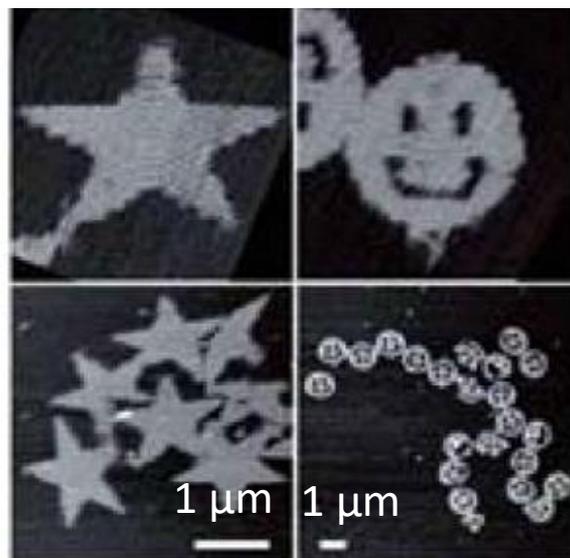


气-液-固-化学气相沉积法 (Kayes et al., APL, 2007)

双光子3D打印技术 ([www.photonhive.com](http://www.photonhive.com))



极紫外光刻技术 (Greg McIntyre, IMEC)

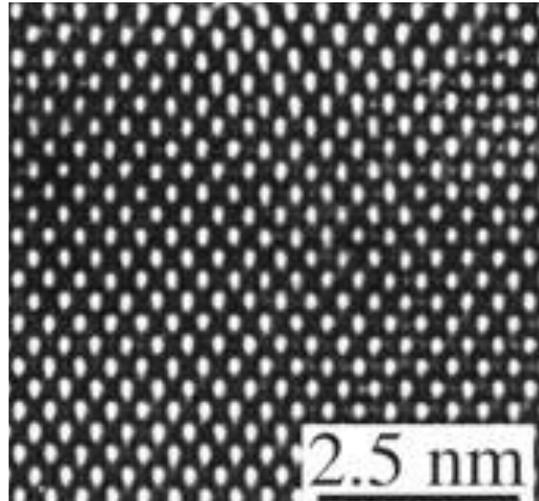


自组装方法 (Castro et al., Nat. Meth., 2011)

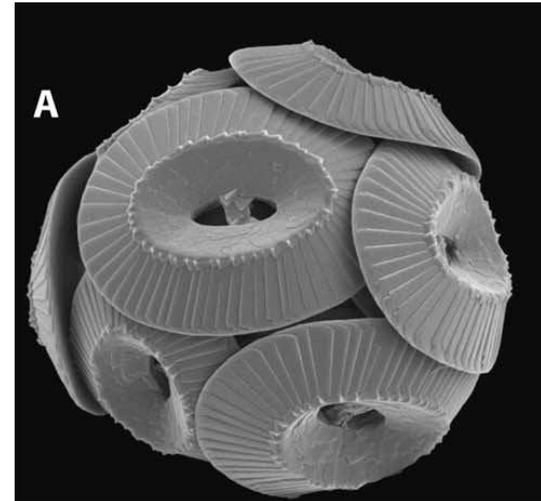
# 内容5：材料的表征

—从20世纪初，人们先后发明了电子显微镜、X射线衍射、原子力显微镜等先进表征方法，为材料学的发展打下了基础

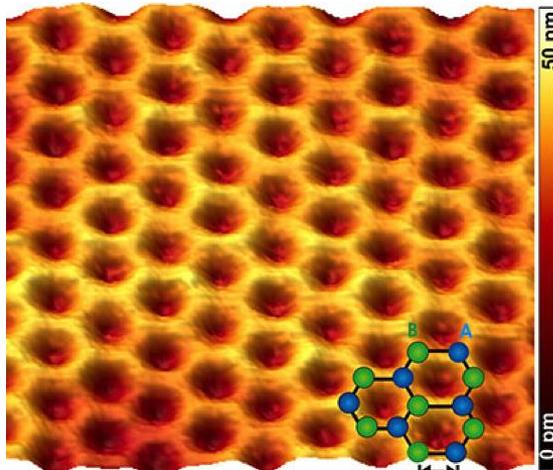
—不在本课程中进行专门介绍



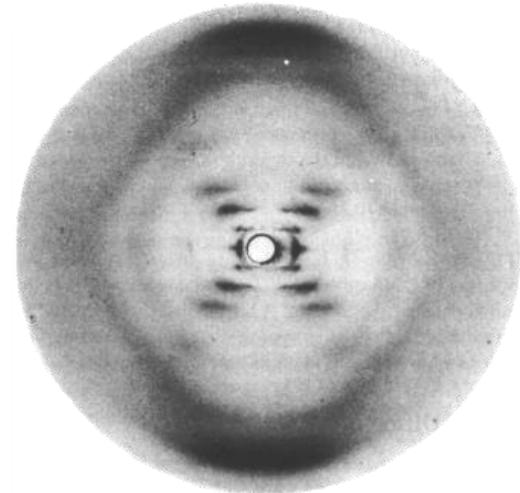
透射电子显微镜  
Transmission Electron  
Microscopy, Williams & Carter



扫描电子显微镜  
Monteiro et al., Sci. Adv., 2016



原子力显微镜,  
Zmescience.com



X射线衍射,  
Franklin & Goslin

# 1.2.4 材料科学在工程中的作用

—材料科学在建筑、机电、信息、能源、生物、医学、航天…等几乎所有工程领域均有重要应用

—主要作用包括：

1. 新设备的设计
2. 已有设备的改良
3. 设备故障和失效的分析



荷兰DSM公司，主营生物医药和光电材料

# 应用1：新设备的设计

- 材料科学的发展，可以允许我们设计一些新设备
- 例如对半导体性质的深入研究，促成了晶体管的发明，代替了笨重的真空管，在此基础上又诞生了集成电路
- 半导体还可以用于制作温控和发光器件

真空管



1907

晶体管



1947

集成电路



1963

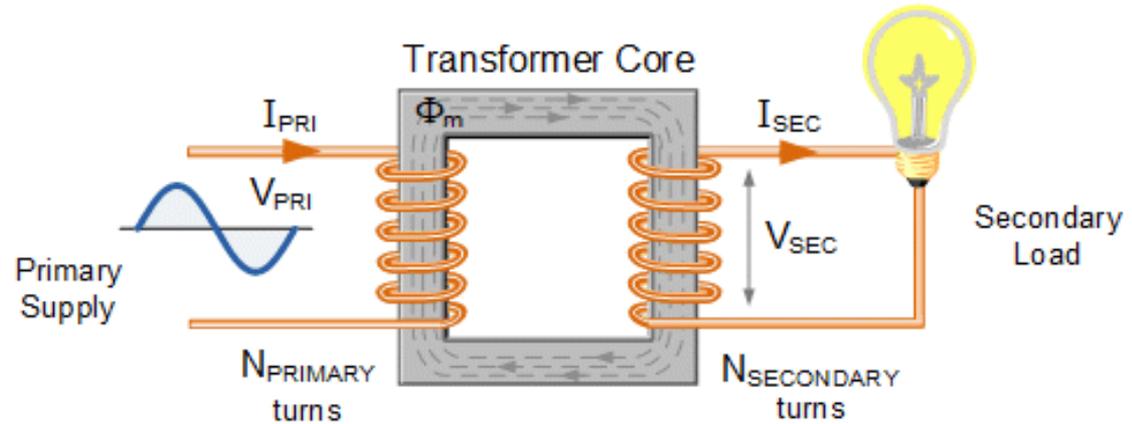
## 应用2: 已有设备的改良

—材料科学可以帮助我们不断改良已有的设备

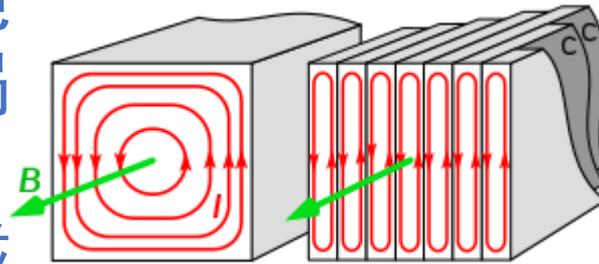
—例如变压器的磁芯（起初是纯铁，后发展为铁硅合金）中变化的磁场会产生涡状电流，其焦耳热会消耗能量

—将磁芯分割成互相绝缘的薄层，可以减小涡流损失

—非晶态金属制作的磁芯，涡流消耗更小（目前成本略高）



变压器的结构 (electronics-tutorials.ws)



通过多层结构减小涡流  
(Wikipedia)



国产非晶态变压器芯  
(Teeyocore.com)

# 应用3：故障和失效分析

—材料科学知识可以帮助人们更好的分析设备故障的原因，从而避免事故的再次发生

—1986年，美国挑战者号航天飞机在起飞后73秒爆炸，造成7名宇航员丧生

—事故原因是由于当天的低温导致橡胶O型环失去密封性，使得推进器产生的热气点燃了燃料

—本可避免！



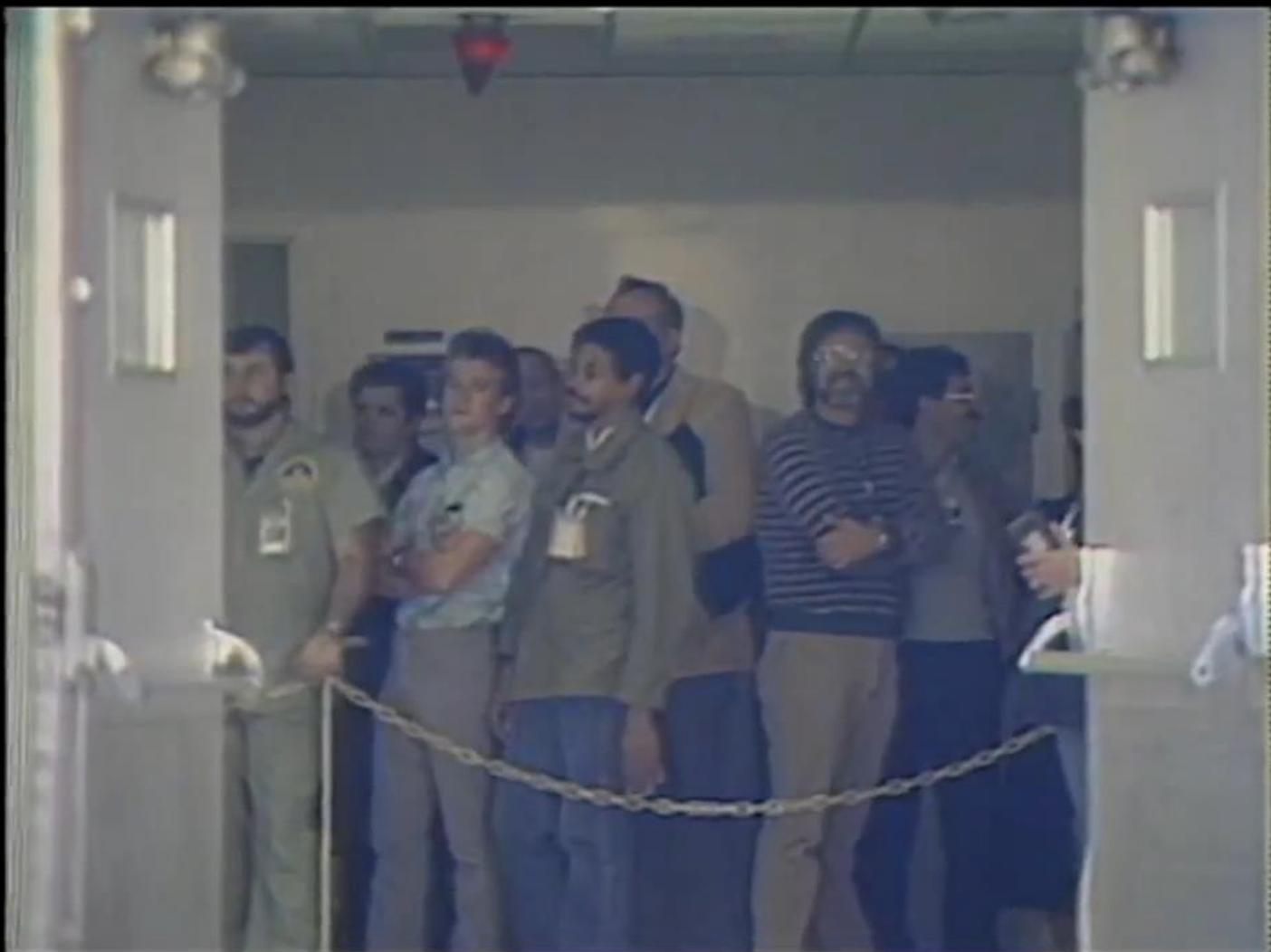
美国挑战者号航天飞机事故



橡胶O型环

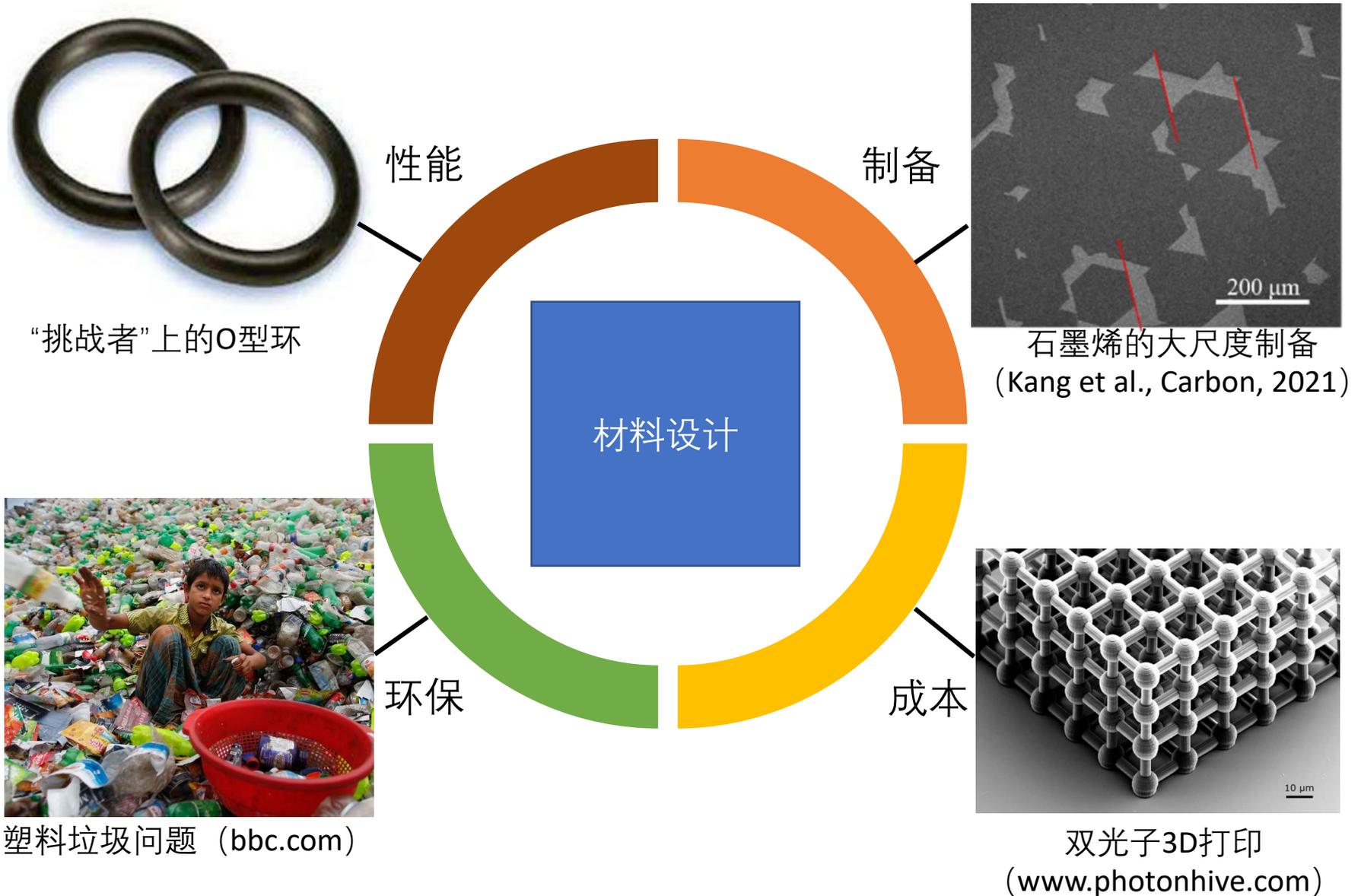


Richard Feynman在听证会现场



挑战者号航天飞机失事影像

# 1.2.5 材料设计的基本原则



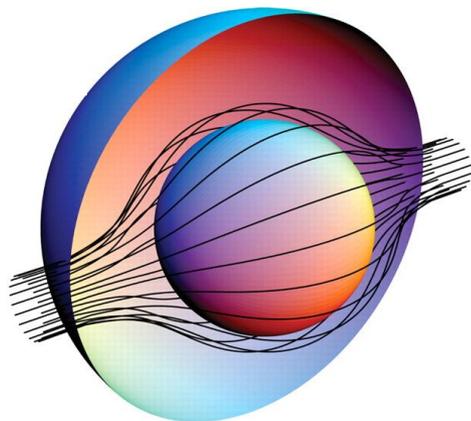
# 1.2.6 新材料的发展方向

--新功能

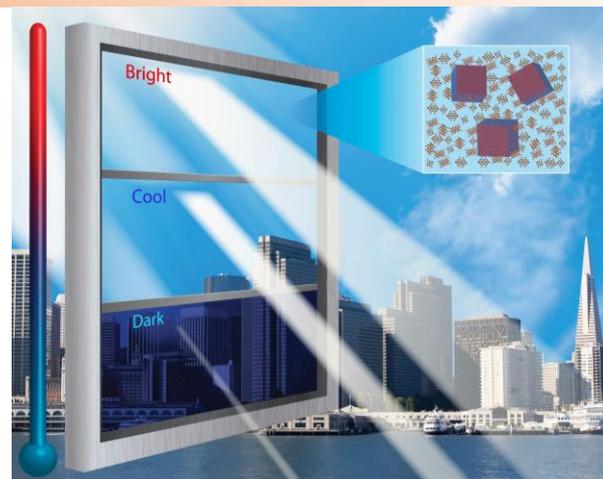
--多用途

--智能化

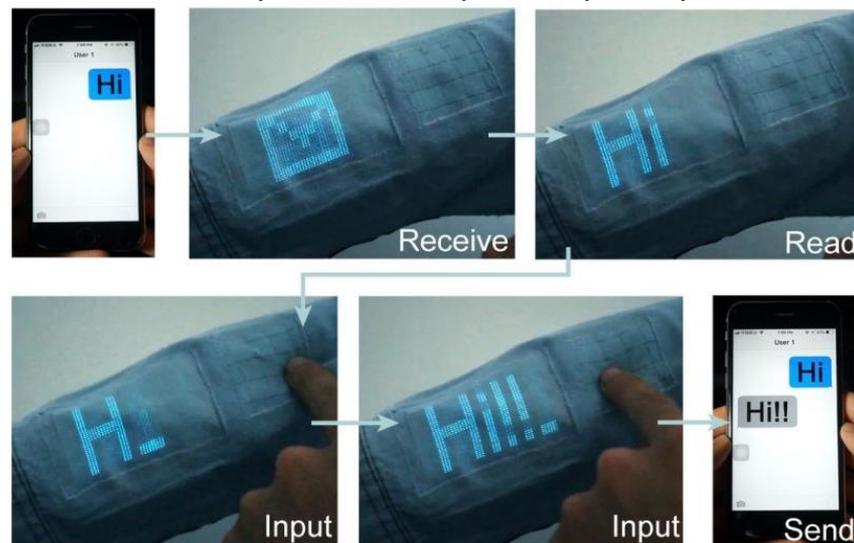
--环保健康



基于负折射材料的光学隐身斗篷  
(Pendry et al., Science, 2006)



掺杂纳米晶体制备的智能玻璃  
(Lordés et al., Nature, 2013)



可穿戴织物显示器  
(Shi et al., Nature, 2021)

--将在本课程的最后进行简介

# 总结

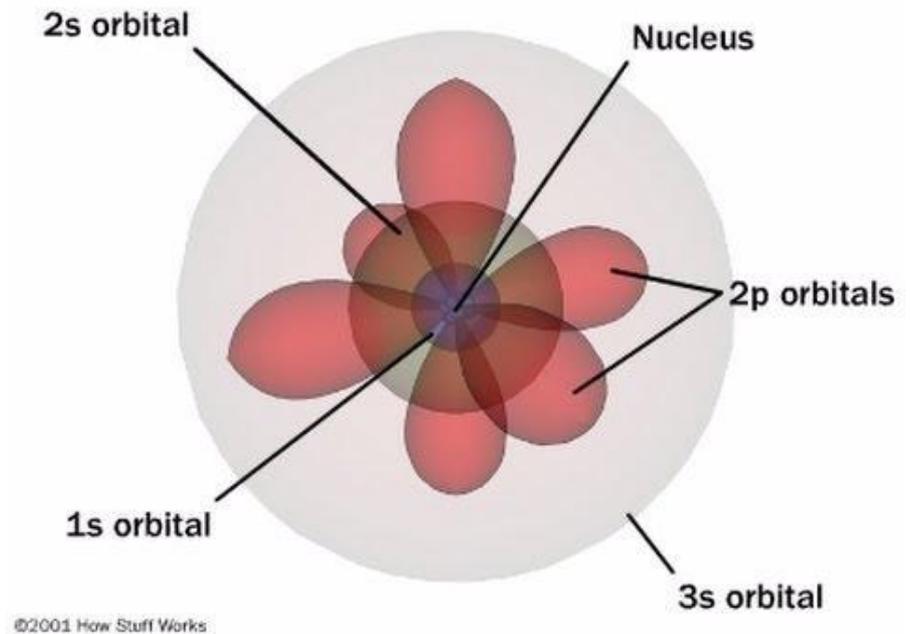
---

- 材料是有用的物质，可分为金属、无机非金属、高分子和复合材料四类
- 材料科学是研究材料组成与结构、性质、合成与制备、以及使用性能的交叉学科
- 材料科学和工程学有着紧密的联系

# 下一讲内容

--在下一讲中，将为同学们介绍物质的原子结构，以及原子间结合的基本方式

--将对相关的一些量子力学概念进行简单的探讨



# 习题

- 1.请简述材料的四种分类及其各自的特点
- 2.飞机翅膀的选材，需要注意哪些性能？说说你的理由
- 3.有哪些材料可以用来制作饮料包装？各有什么优点和缺点？
- 4.纳米材料具有哪些特殊性质和应用？请调研后进行作答
- 5.纸张属于什么类型的材料？请简述纸张的成分、结构和性质
- 6.请在四类材料中任选一种，简述其发展史（300字以内）