



清华大学
Tsinghua University



热力学与传热学基础

Fundamentals of Thermodynamics and Heat Transfer

授课教师：祝银海 胥蕊娜

授课学时：48+4

开课班级：未央-机械、机械系、电机系

教师1 (课堂授课)



祝银海

李兆基科技大楼A553

yinhai.zhu@tsinghua.edu.cn

能源与动力工程系长聘副教授，博导

- 国家级青年人才项目获得者
- 工程热物理研究所副所长、清华大学山西院清洁供能中心主任
- 中国工程热物理学会热力学分会青委会副主任
- 中国航天第三专业信息网热管理专委会委员

研究方向：空天动力热防护与热利用、热泵

教学经历：

2014-2016 **传热学基础** (机械系)

2017-2023 **热工基础** (工物系)

2020- **传热学** (新大暑期班)

2024- **热力学与传热学基础**

➤ **国家级精品课教学团队**：传热学

➤ **清华大学本科基础课教学团队**：

2022年第二批：工程热力学

2023年第三批：传热学

教师2 (课堂授课)



胥蕊娜 国家杰青 清华大学能源与动力工程系 教授

能源与动力工程系 主任、冲压发动机技术全国重点实验室副主任

国家杰青 (2022年)、中国青年科技奖

研究方向：微纳尺度及复杂条件多相多组分热质传递

荣誉与奖励

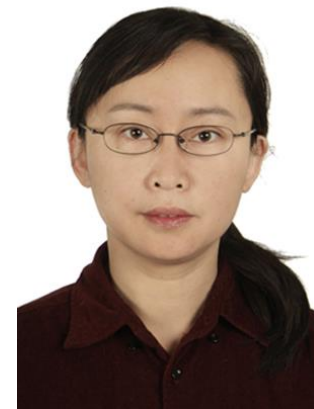
- **国家自然科学奖二等奖** (2014 年, 排名第3)
- **国家技术发明奖二等奖** (2020 年, 排名第3)
- **中国青年科技奖** (2022 年)

学术兼职

- **国家某委科技委 某工程先进舰船动力 主题专家组 成员**
- **国家某科技重大专项 结构热防护与材料 领域专家**
- **Journal of Solar Energy Engineering -Transactions of the ASME 副主编**
- **Science Bulletin 期刊工程学科工作委员会 委员**
- **第10届北京国际传热会议 执行主席**

教师（实验授课）

李辉 高工



电话： 13910997103

邮箱： hui-li@mail.tsinghua.edu.cn

- “动力工程及工程热物理” **国家级实验教学示范中心**，下设“热工学”、“热能工程”、“燃气轮机”、“流体机械”、“热工测量”五个分室。
- 实验教学中心以其科学完整的实践教学体系、优越的实验室软、硬件环境，为学生提供了一流的实践教学平台

助教



齐寅珂, 博士研究生

手机: 13137992986

邮箱: qyk22@mails.tsinghua.edu.cn

地址: 能动系 李兆基科技大楼A549-1



冯忆武, 博士研究生

手机: 18018598715

邮箱: fyw22@mails.tsinghua.edu.cn



胡博兴, 博士研究生

手机: 13720282578

邮箱: hbx23@mails.tsinghua.edu.cn

成绩评定方法

- **考试：**期中（第9周：热力学） / 期末（第17/18周：传热学）, 60%
- **实验：**热力学1次/传热学1次, 8%
- **作业：**每章课后, 20%
- **大作业：**热力学/传热学, 12%

实验课

- 实验课：**第6/14周，2个实验内容**
- 选课时间：9月
- **实验课程原则上不能补做**
- 实验课带预习报告
- 实验课最后一周提交实验报告给实验助教

大作业

- 考察知识的综合运用能力
- 文献调研、解决问题、拓展思考
- **热力学大作业（第3-6周）**
- **传热学大作业（第12-14周）**
- **最新研究进展综述、数值计算编程、理论分析
计算、具体问题解决**

教材与参考书目

教材

- 张学学等，热工基础（第三版），高等教育出版社

参考书目

- 朱明善等，工程热力学，北京：清华大学出版社
- 杨世铭、陶文铨，传热学，北京：高等教育出版社
- Thermodynamics An Engineering Approach, Yunus a. Çengel
- Heat Transfer, Jack Holman

课程内容及性质

- ✓ 热力学与传热学基础由工程热力学和传热学两部分基本内容组成，主要研究热能的合理、有效利用以及热能利用过程和其他热现象中的热量传递基本规律。
- ✓ 热力学与传热学基础是能源动力、航空航天、环境、制冷低温、机械工程等学科的技术基础之一。

先修课程及相近课程学习情况统计：

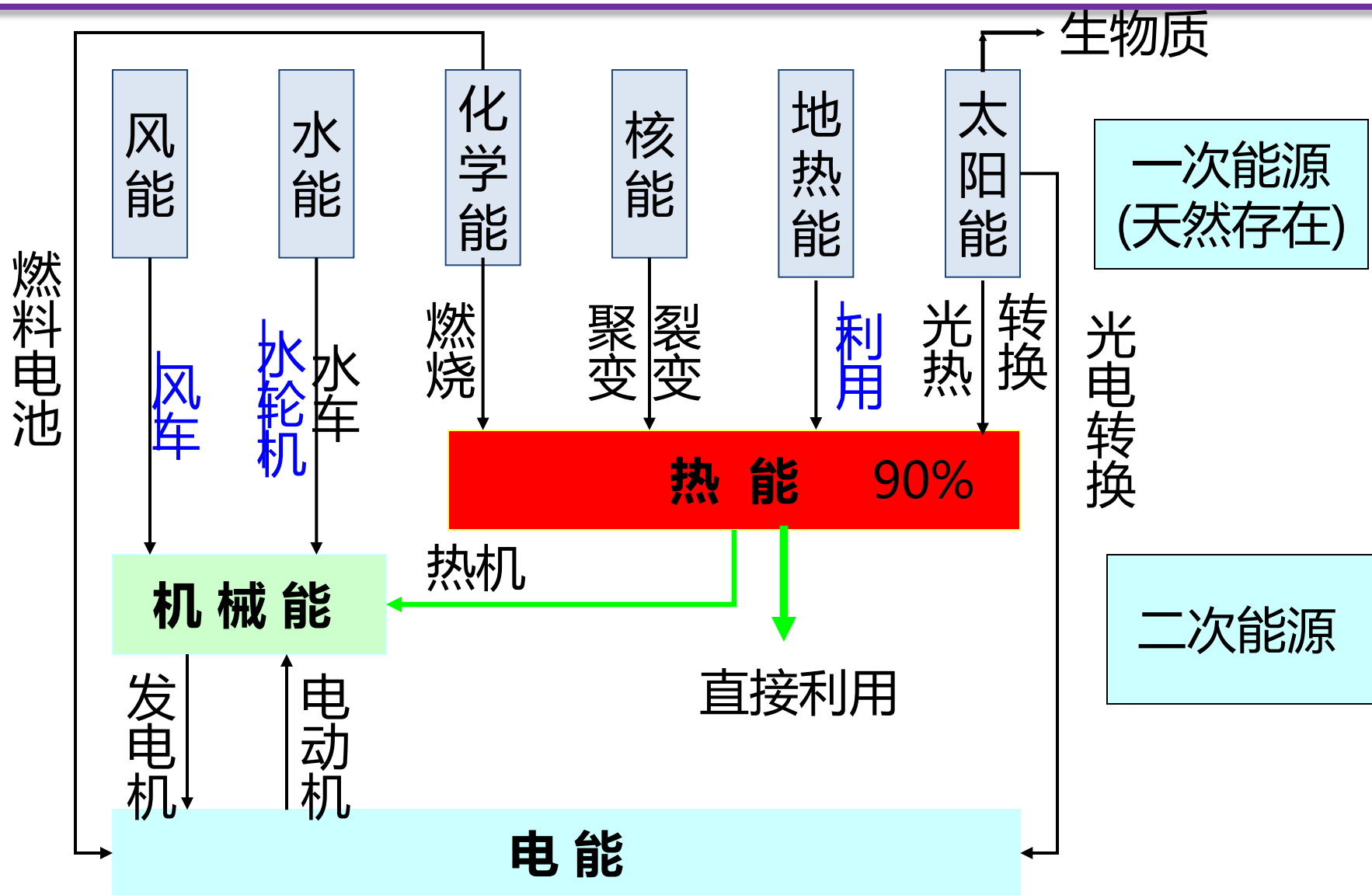
基础物理学-热学

流体力学

绪论

- 0-1 能源形式与现状
- 0-2 热能利用及其转换
- 0-3 研究内容及研究方法
- 0-4 应用及研究领域的拓展

0-1 能源形式与现状



0-2 热量转换装置

- 动力装置（正循环）

- 蒸汽动力装置

- 燃气轮机装置

- 内燃机

- 制冷/热泵装置（逆循环）

共同特点：能量输入、输出（做功、加热/冷却、流动）实现了工质的状态变化，在工质状态连续变化中实现能量传递与转化。

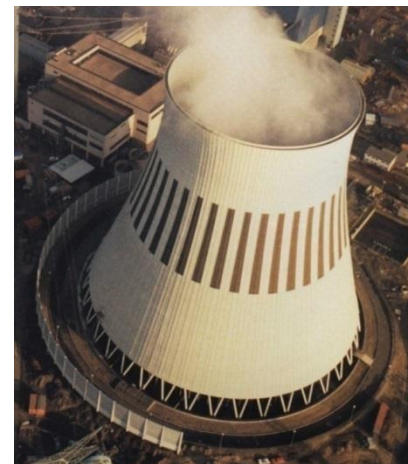
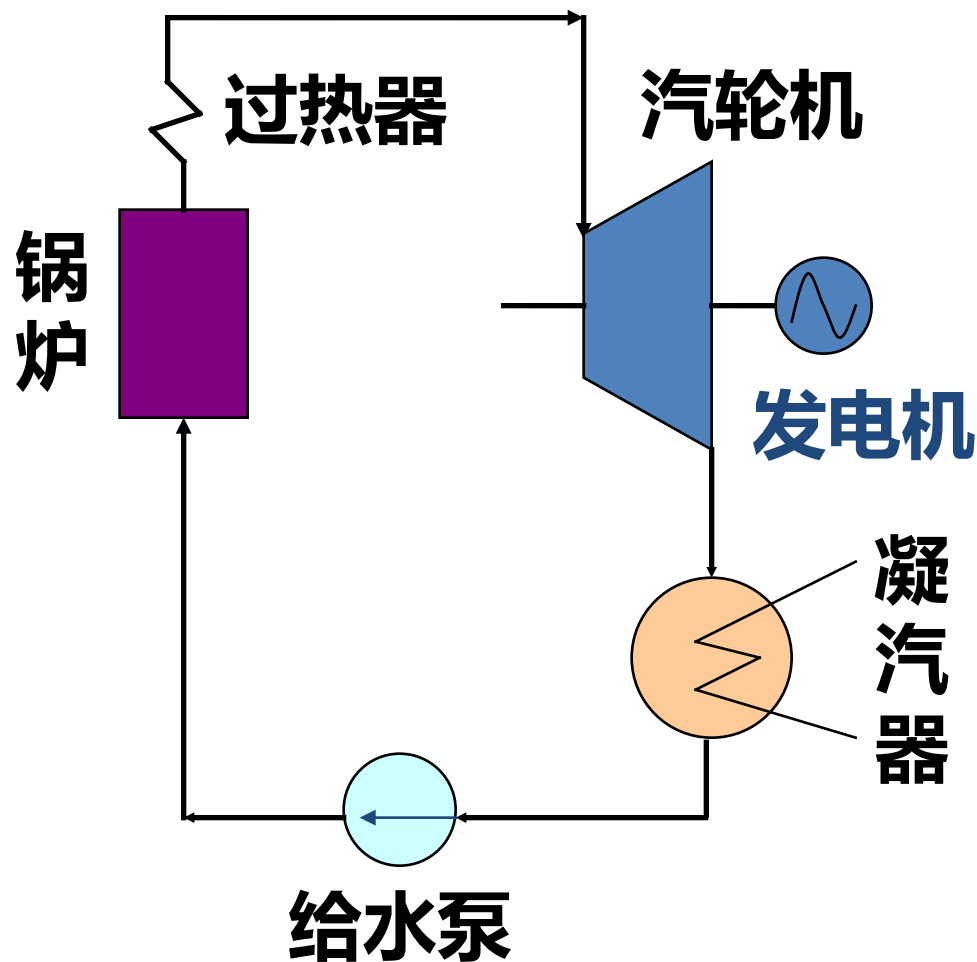
热机种类 heat engine

能量利用率 Energy efficiency

- 发电（蒸汽轮机） 40-50%
- 发电（燃气轮机） 30-40%
- 车辆发动机（内燃机） 25-35%
- 航空发动机（燃气轮机） 20-40%
- 制冷/热泵(非热机，制冷系数，能效比)

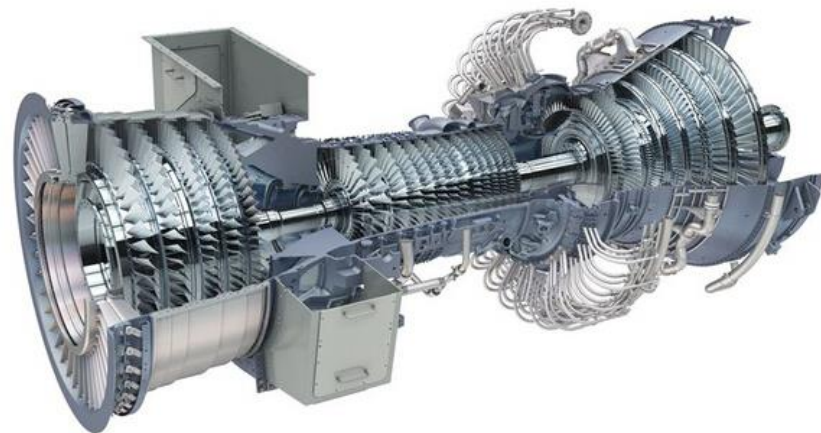
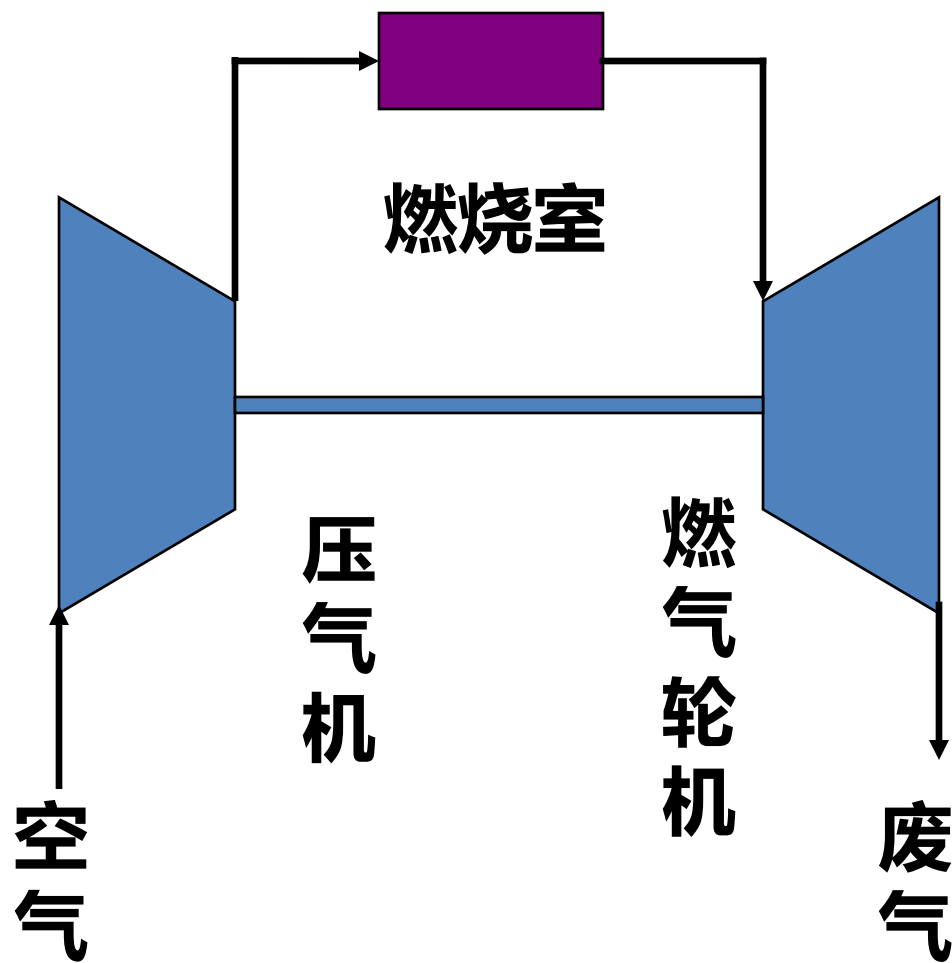
取决于温度工况、能量输入模式、评价方式

0-2-1 蒸汽动力装置基本特点



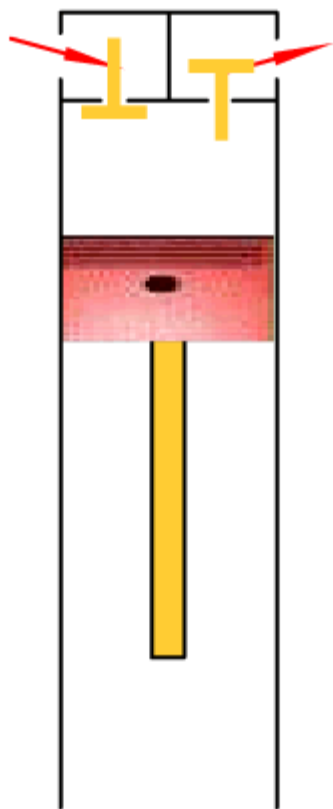
- 1、热源，冷源
- 2、工质（水，蒸汽）
- 3、膨胀做功
- 4、循环（加压、加热、膨胀做功、放热）

0-2-2 燃气轮机基本特点

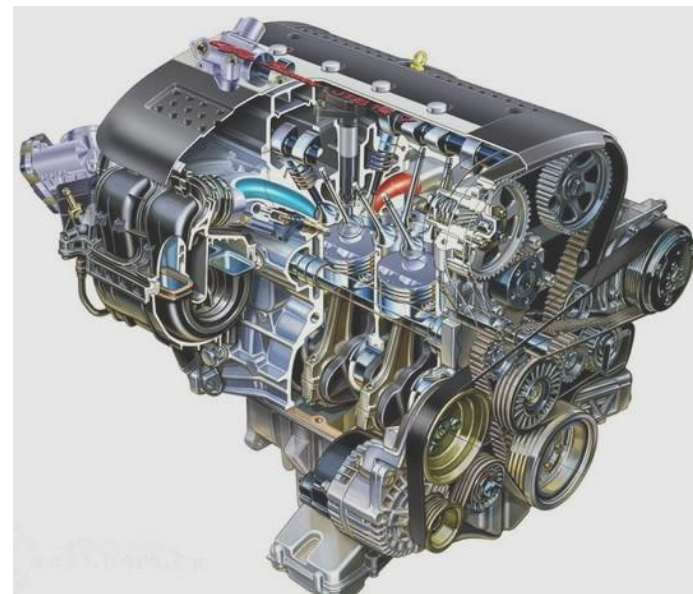


- 1、热源，冷源
- 2、工质（燃气）
- 3、膨胀做功
- 4、循环（加压、加热、膨胀做功、放热）

0-2-3 内燃机装置基本特点

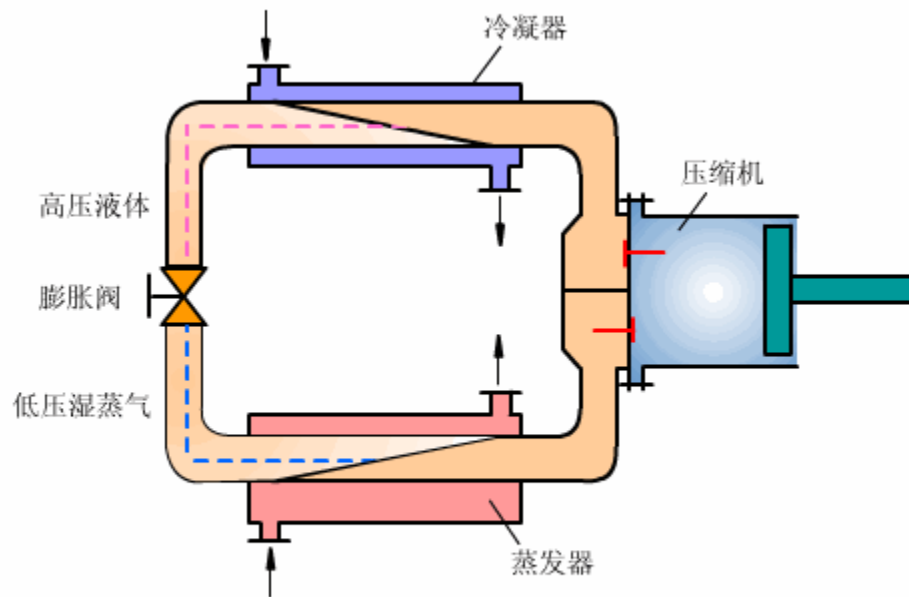


吸气 压缩
 点火
膨胀 排气



- 1、热源，冷源
- 2、工质（燃气）
- 3、膨胀做功
- 4、循环（加压、加热、膨胀做功、放热）

0-2-4 制冷/热泵装置基本特点

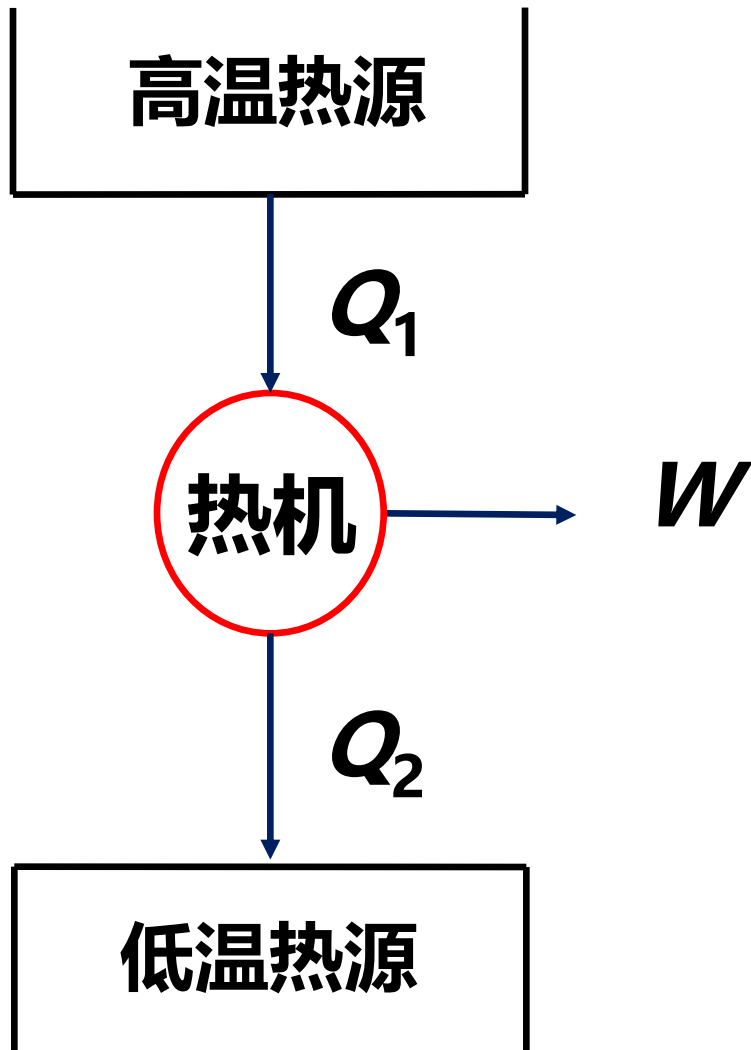


蒸气压缩式制冷系统

- 1、热源，冷源
- 2、工质（制冷剂）
- 3、热量从低温排向高温物体
- 4、循环 (加压、放热、节流、吸热)

0-2-5 热力装置共同基本特点

正循环



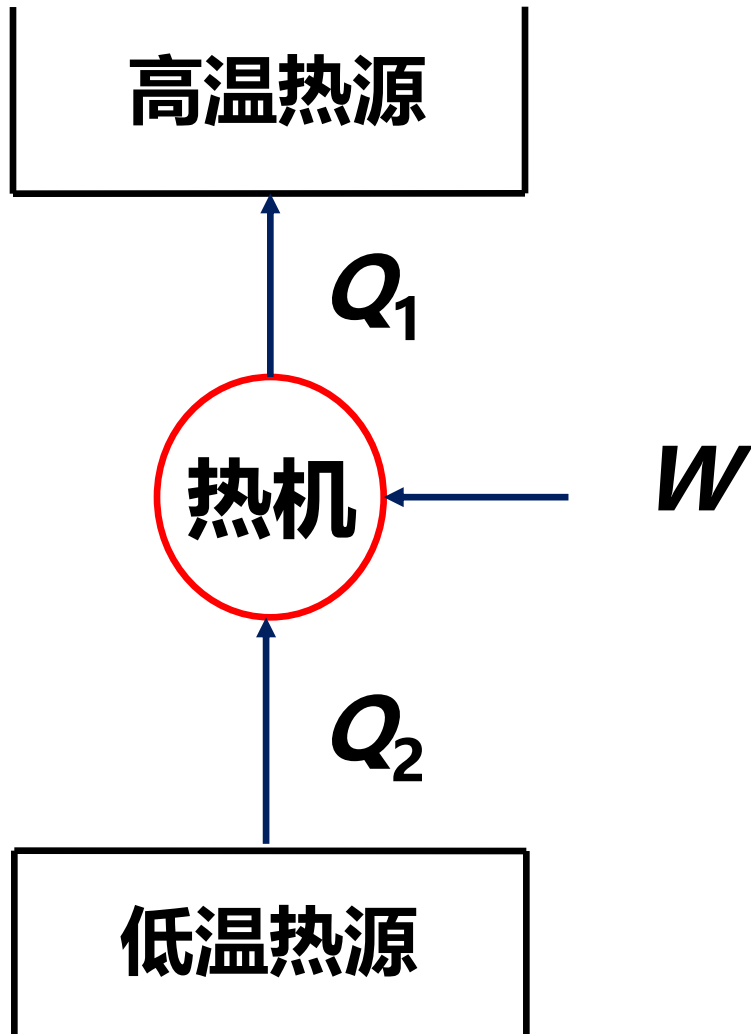
- 1、热源/冷源
- 2、工质
- 3、容积变化功
- 4、循环

热效率

$$\eta = \frac{\text{收益}}{\text{代价}}$$
$$= \frac{W}{Q_1}$$

0-2-5 热力装置共同基本特点

逆循环



- 1、热源/冷源
- 2、工质
- 3、容积变化功
- 4、循环

制冷循环：制冷系数

$$\varepsilon = \frac{\text{收益}}{\text{代价}} = \frac{\text{吸热}}{\text{耗功}} = \frac{Q_2}{W}$$

制热循环：制热系数

$$\varepsilon' = \frac{\text{收益}}{\text{代价}} = \frac{\text{放热}}{\text{耗功}} = \frac{Q_1}{W}$$

0-3 研究内容与研究方法

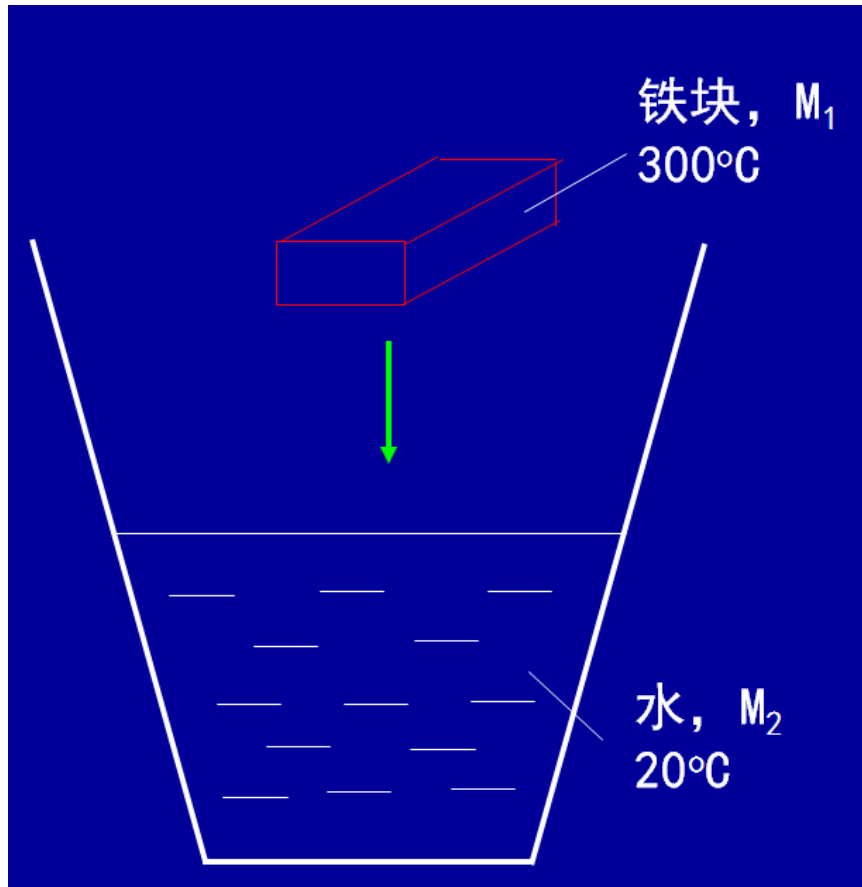
《热力学与传热学基础》由工程热力学和传热学组成

- 热力学 (Thermodynamics) 是研究能量的科学，由希腊字母 therme (heat) 和 dynamis (power) 组成
- 传热学 (Heat transfer) 不仅要解释热能如何转移，还要预测速率

热力学研究的问题： 以提高热功转化效率为目标，研究循环中工质的状态变化，探讨循环模式、工况对循环的影响及循环优化

传热学研究的问题： 热量传递基本规律、传热强化及弱化

传热学与工程热力学区别



热力学: t_m, Q

传热学: 过程的速率

$$t = f(x, y, z, \tau); Q = f(\tau)$$

工程热力学的研究内容与方法

本课程研究内容

- 热能和机械能及其它形式能量间相互转换的规律
- 工质的热力学性质
- 热力过程和热力循环

本课程研究方法

- **宏观热力学（经典热力学）**：用宏观物理量描述其状态，其基本规律是无数经验的总结
- **微观热力学（统计热力学）**：从微观粒子的运动及相互作用角度研究热现象及规律

工程热力学采用宏观分析方法进行研究，不涉及物质的微观结构和物质分子、原子的微观行为，但工质热物理性质研究需要用到微观热力学

传热学的研究内容与方法

本课程研究内容

- 热量传递的规律
- 物体内的温度分布
- 传热的强化/弱化

本课程研究方法

在认识微观机理的基础上，将所研究的对象看作连续体，用宏观的方法进行研究。理论研究与实验研究并重。

0-4 热工学应用领域

在下列技术领域大量存在热力学和传热问题

- 能源动力、制冷、建筑环境、化工、机械
- 新能源、微电子、核能、航空航天
- 微机电系统（MEMS）、新材料、纳米技术
- 军事科学与技术、生命科学与生物技术...

能源动力：火电站、气冷堆、压水堆、燃气轮机燃烧室/叶片及发动机冷却

新 能 源：太阳能热利用和热发电、热电转换、制氢、地热发电、风电、燃料电池

制冷与建环：空调、热泵、供暖；建筑节能

机械加工与制造：铸造、淬火、焊接、微型器件与激光器件冷却

军 事：飞机、坦克、航空母舰、激光武器、弹药贮存

航空航天： 发动机高温叶片气膜与发汗冷却
火箭推力室的再生冷却与发汗冷却
卫星与空间站热控制
空间飞行器重返大气层冷却
超高声速飞行器热防护
核热火箭、电火箭

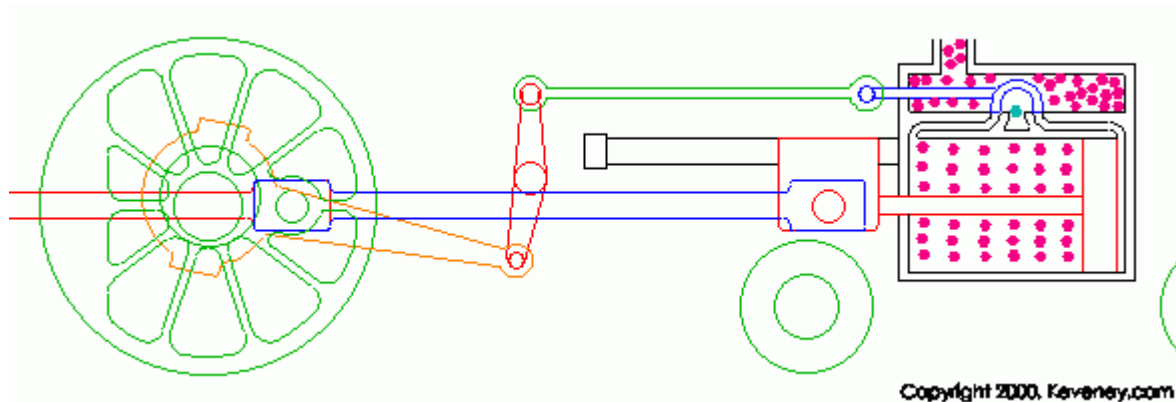
微电子： 电子芯片冷却

生物医学： 冷热刀、生物芯片、组织与器官的
冷冻保存

0-4-1 能源动力

瓦特的蒸汽机

1769年

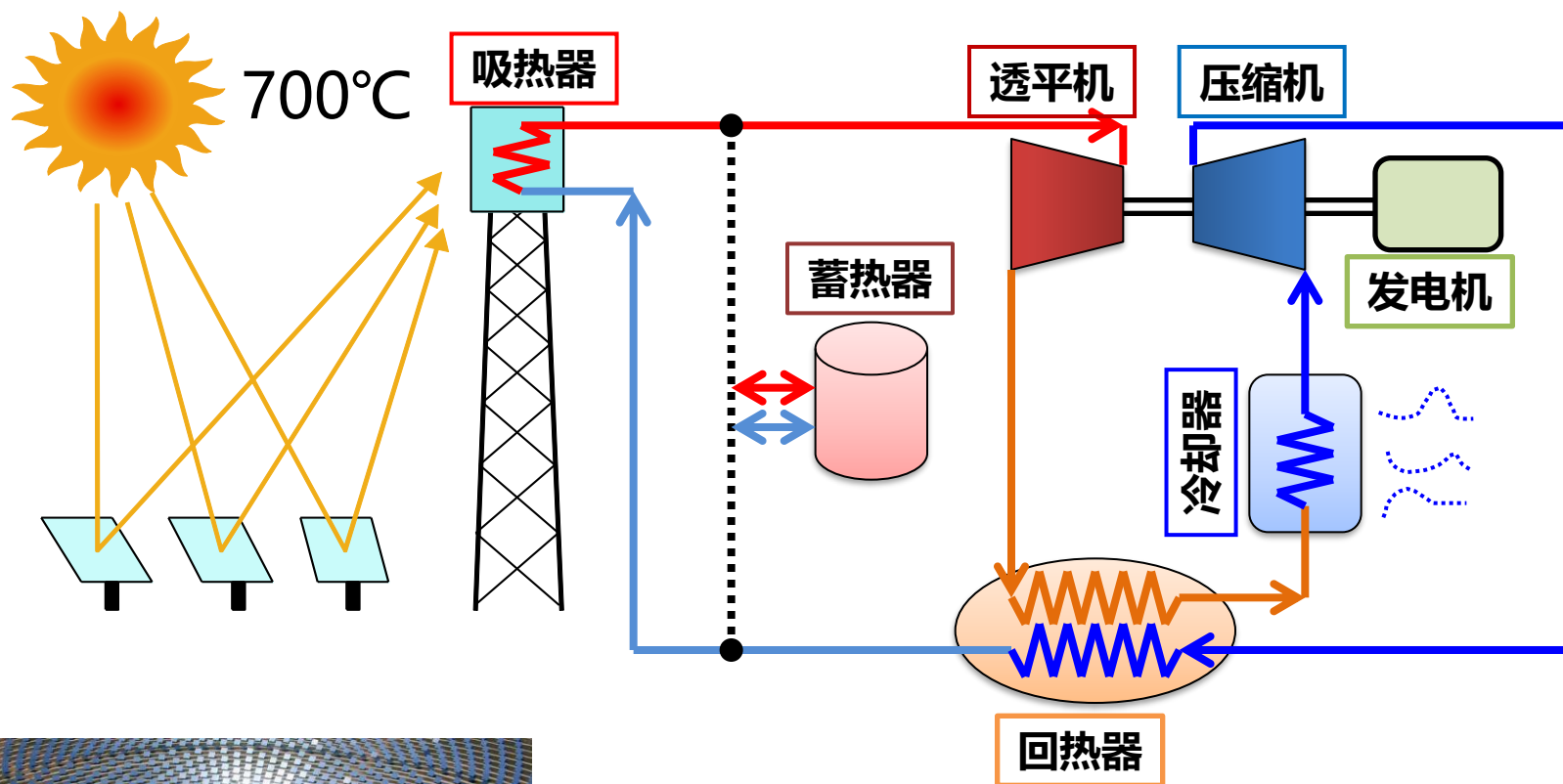


蒸汽动力装置

燃烧室的中心温度
可达 2000°

超超临界（蒸汽温
度不低于 593°C ）

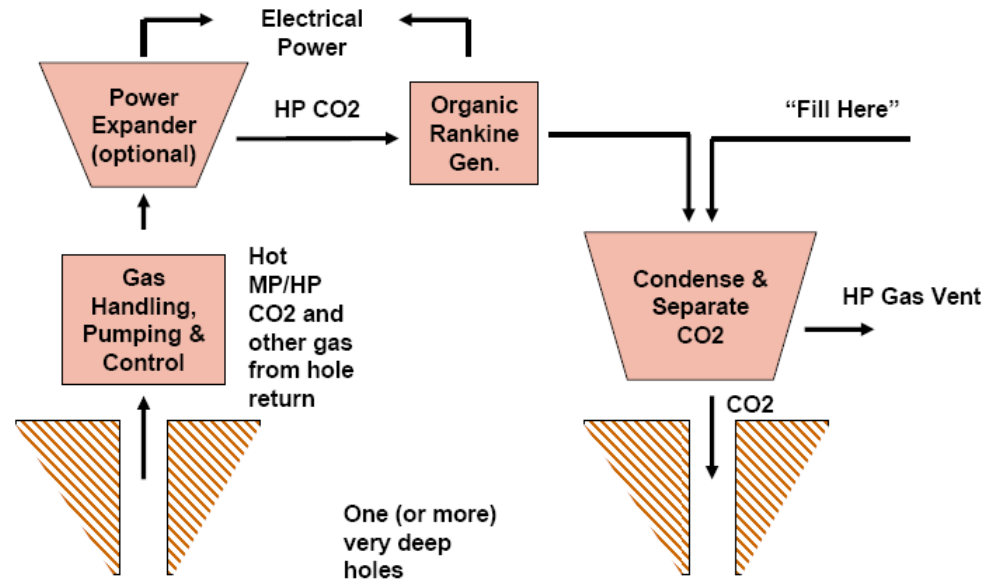
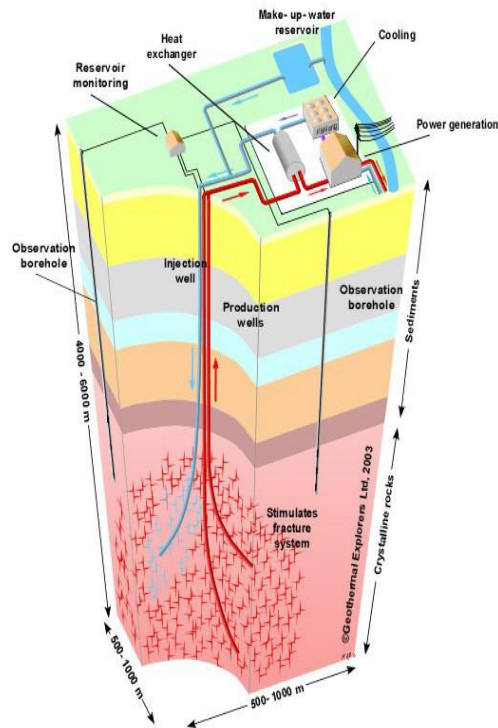
高温太阳能热发电系统



- 塔式聚光系统：热源温度高，规模大，效率高
- 超临界CO₂：既是吸热流体，又是循环工质
- 系统设备：紧凑、体积小
- 下一代太阳能热发电技术

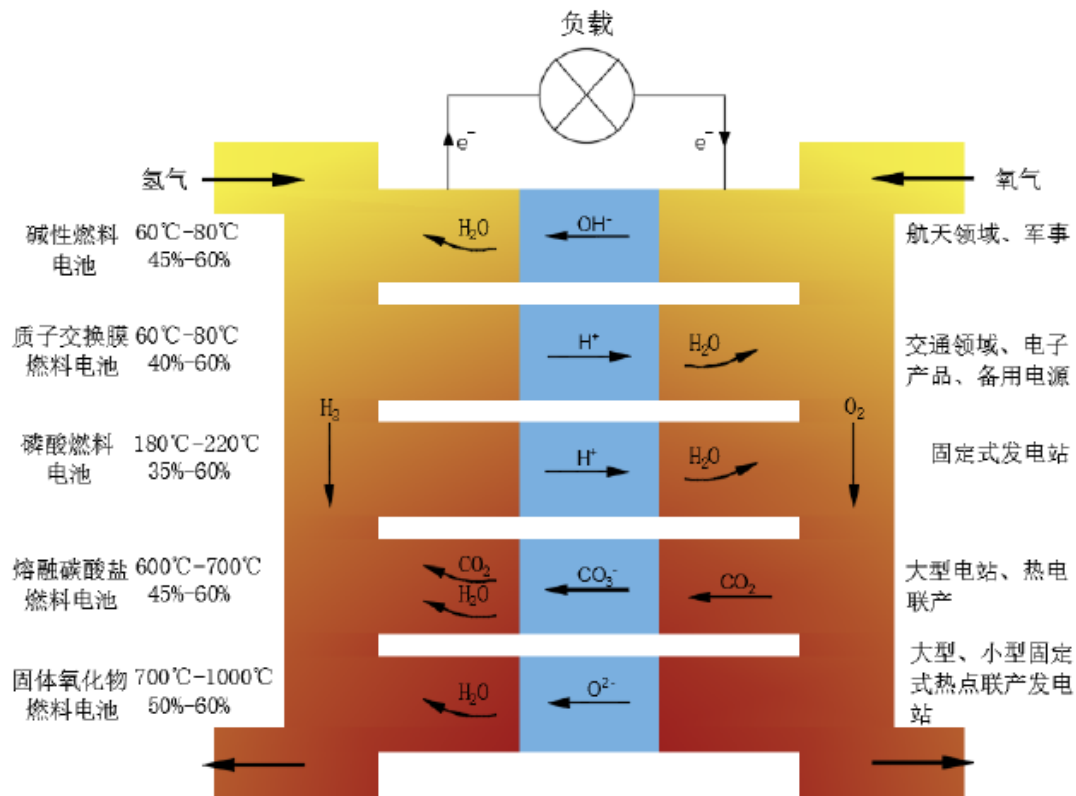
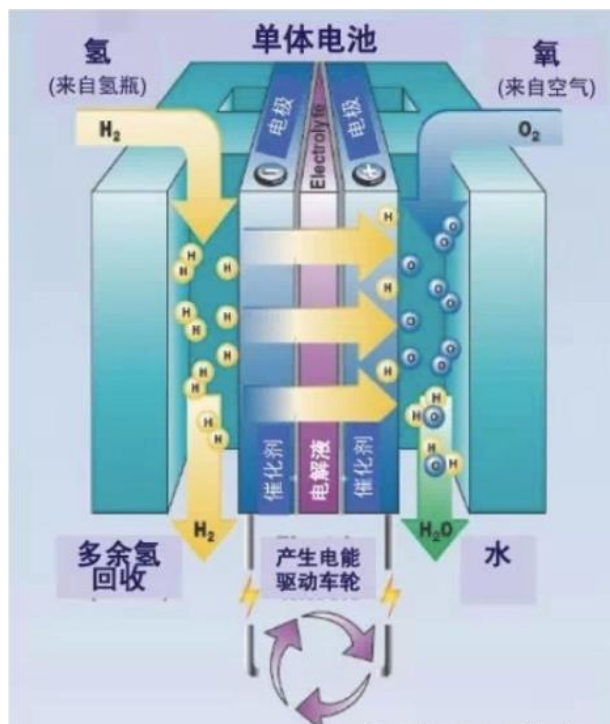
增强型地热系统

EGS: Enhanced Geothermal System



世界上目前开采和利用地热资源主要是水热型地热，占已探明地热资源的10%左右。干热岩是一种没有水或蒸汽的热岩体，主要是各种变质岩或结晶岩类岩体。干热岩普遍埋藏于距地表3—10km的深处，温度范围在150—650°C之间

燃料电池



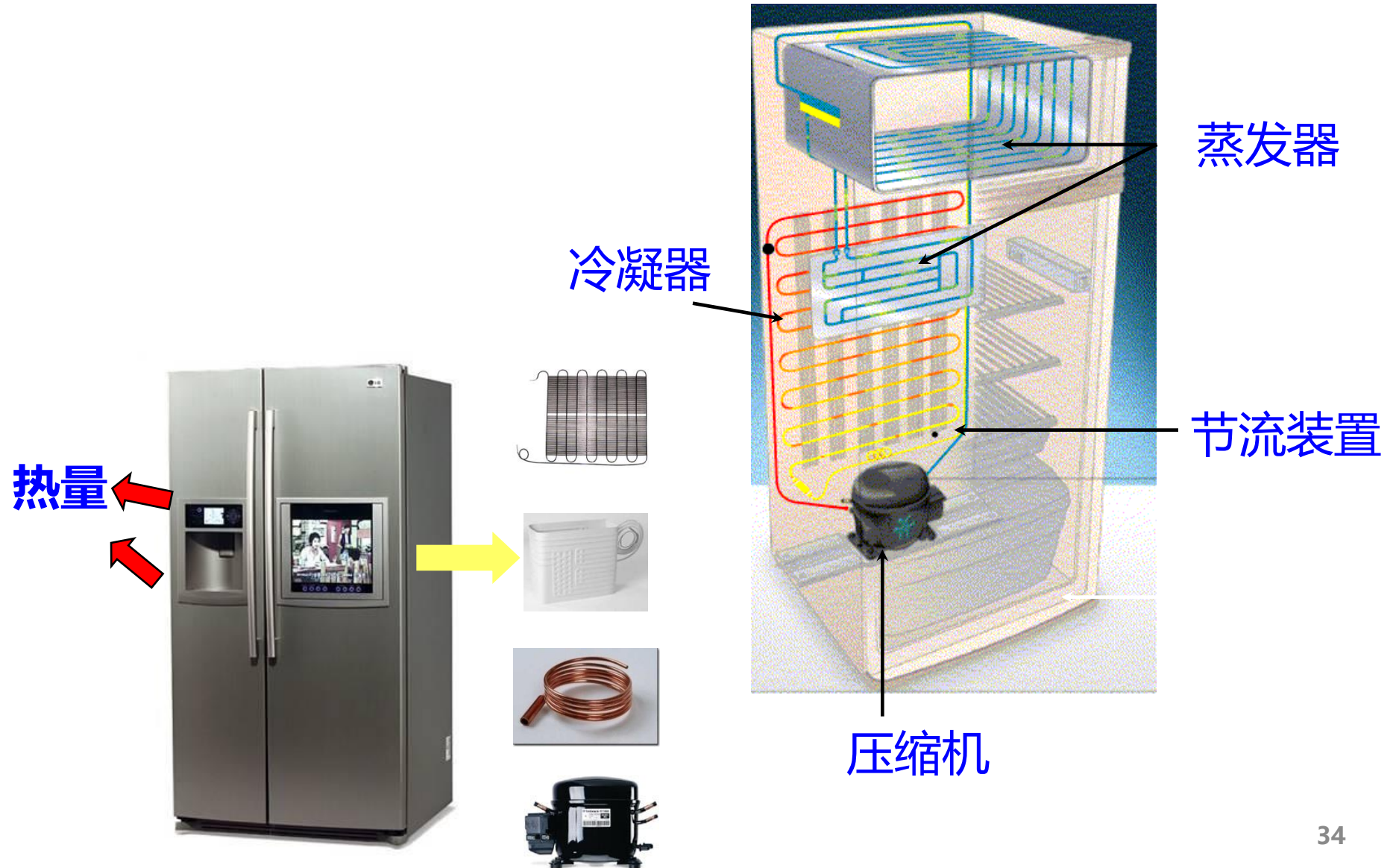
燃料电池(Fuel Cell)是一种将存在于燃料与氧化剂中的化学能直接转化为电能的发电装置。

不同燃料电池的特点和应用范围

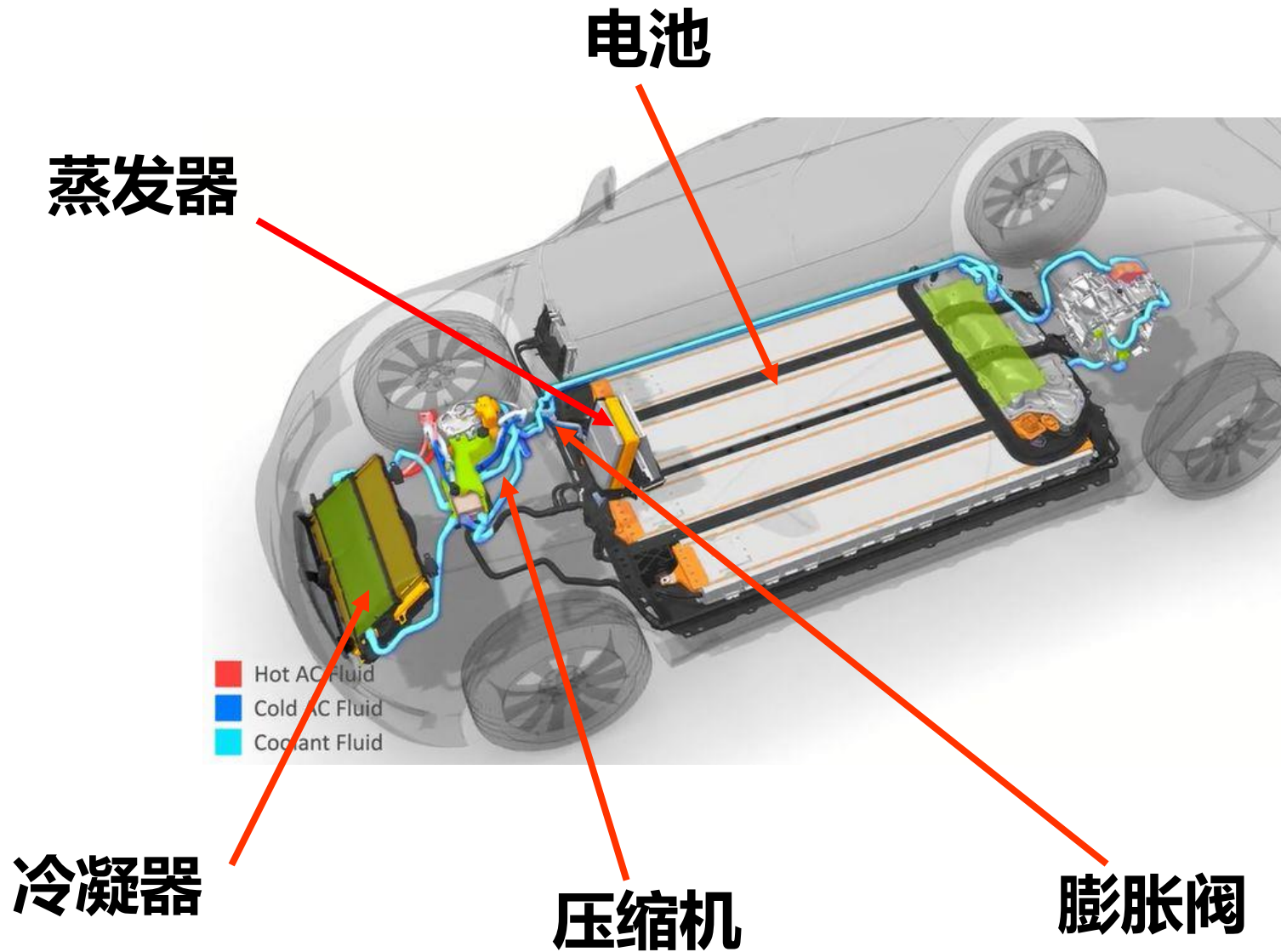
燃料电池氢能利用系统



0-4-2 制冷与热泵



Tesla电动汽车空调/热泵系统



0-4-3 航空航天（1）：高超声速飞行器

大大缩短人类航行时间、21世纪的速度核武器

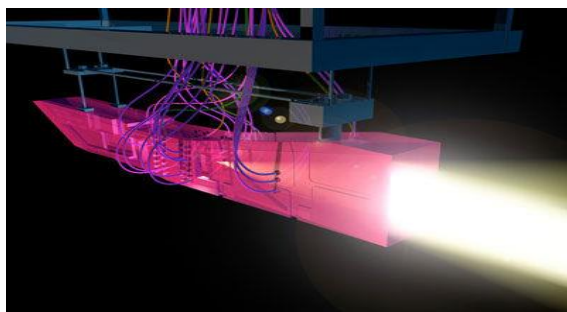


- 美国空军已成功试飞**无动力**高超声速飞行器（**X-43**），在以**超燃冲压发动机**为动力的**X-51**上**耗时9年**，速度达到**马赫5.1**，只飞行3分钟
- 外媒称：中国于2015年6月成功试飞**无动力**高超声速滑翔器（**Wu-14**），速度可达**马赫10**

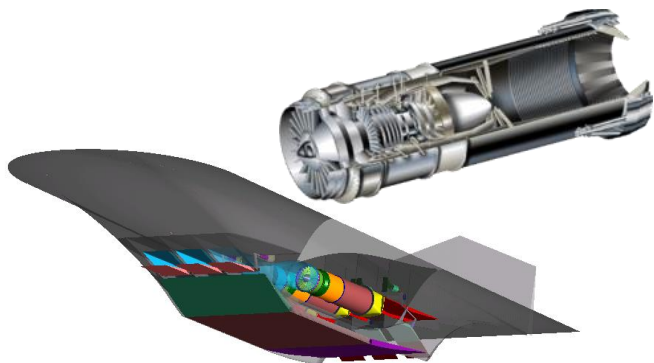


极高温、高热流壁面热防护

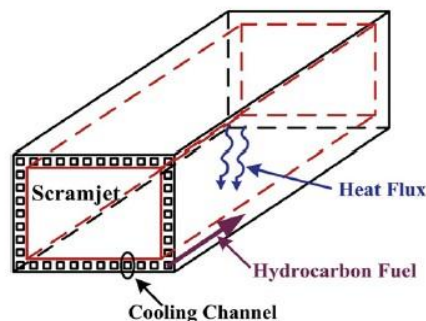
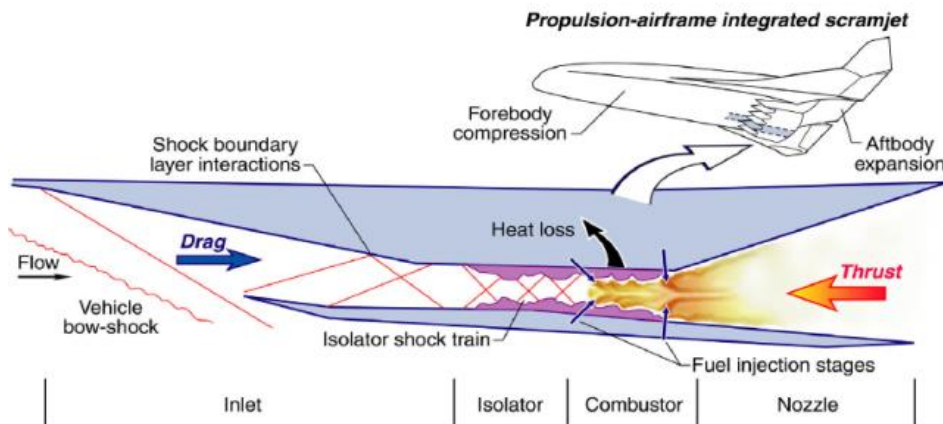
➤核心是超燃冲压发动机和涡轮/冲压组合发动机
飞行马赫数到6时，飞行器头部来流滞止温度达1800K，燃烧室温度2800K 以上



超燃冲压发动机

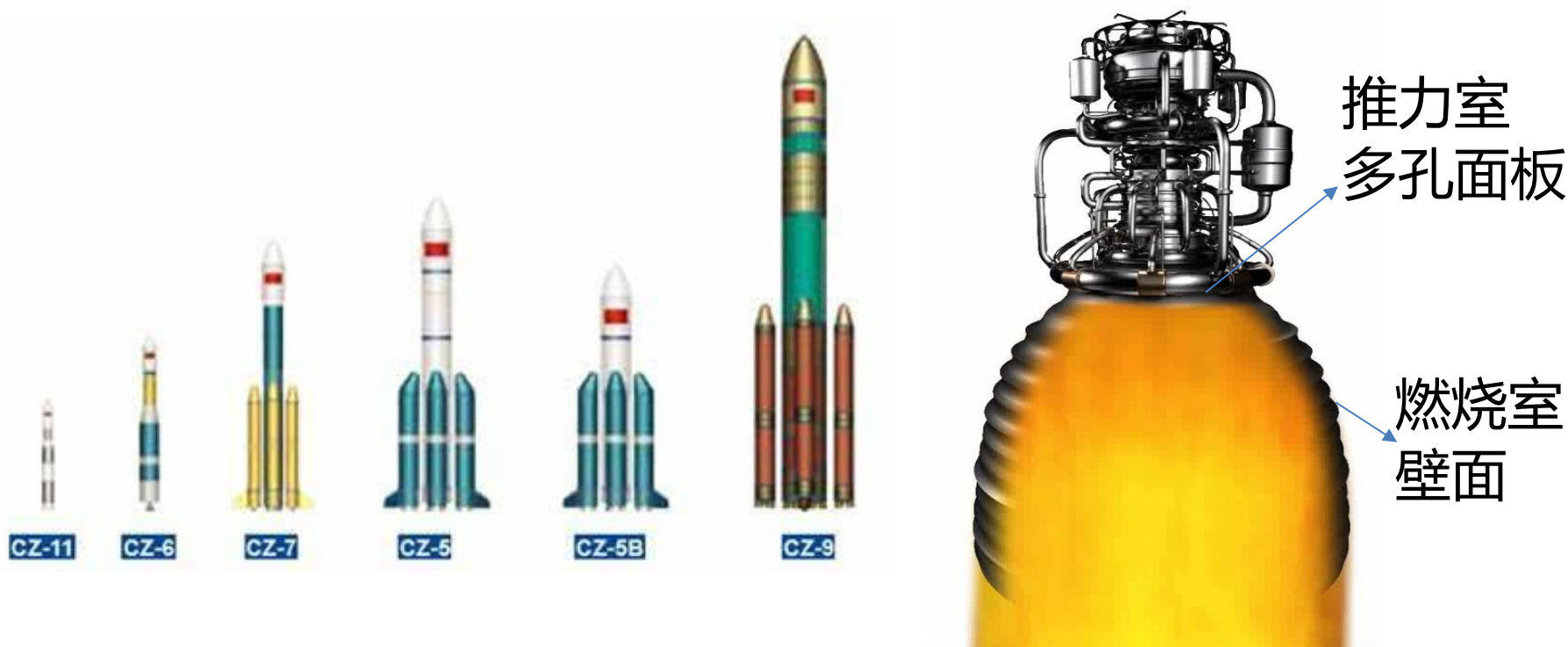


涡轮/冲压组合发动机



超临界压力
燃料冷却

航空航天 (2) : 火箭发动机

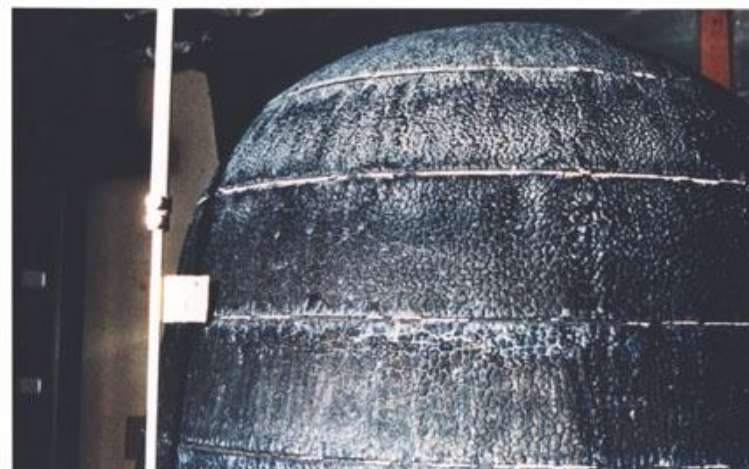


温度高达3000 ~ 4700K, 热流密度高达100MW/m²

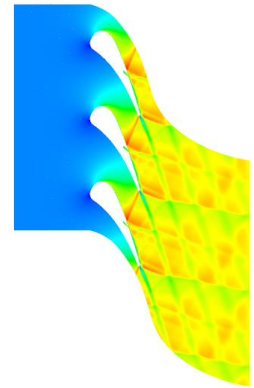
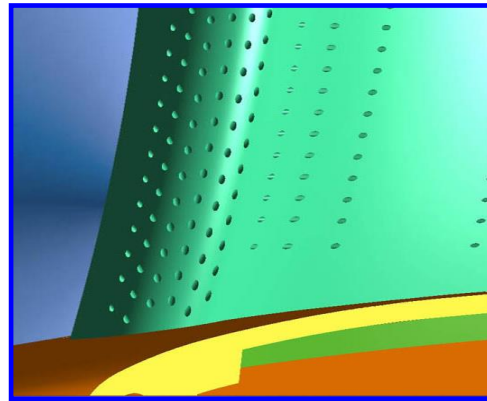
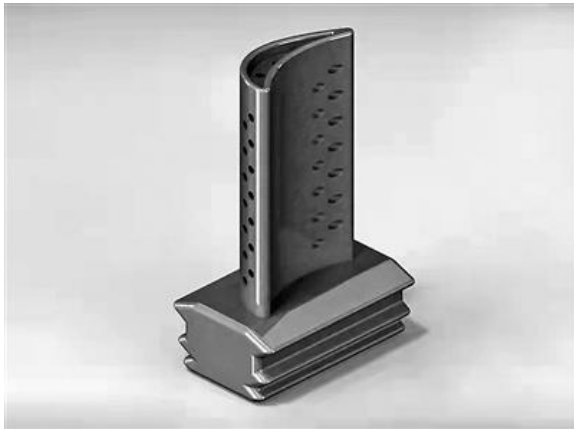
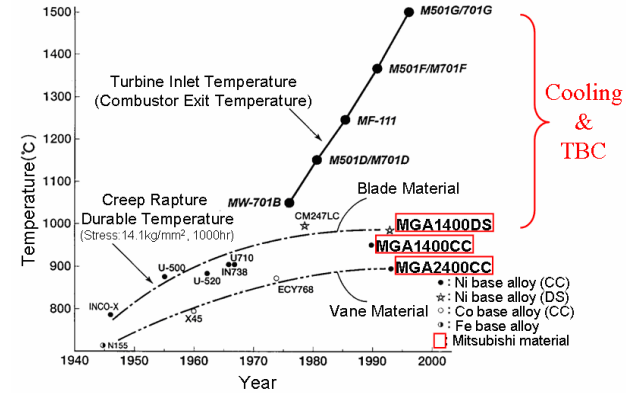
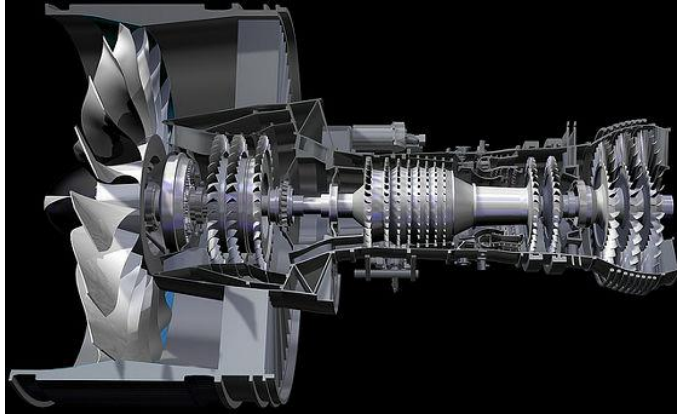
航空航天 (3) : 再入

飞行器的再入热防护

- 高超声速
- 大热流密度、大加热量：卫星最大热流密度 2 MW/m^2 ，弹头高达 420 MW/m^2
- 气动加热可造成飞行器焚毁

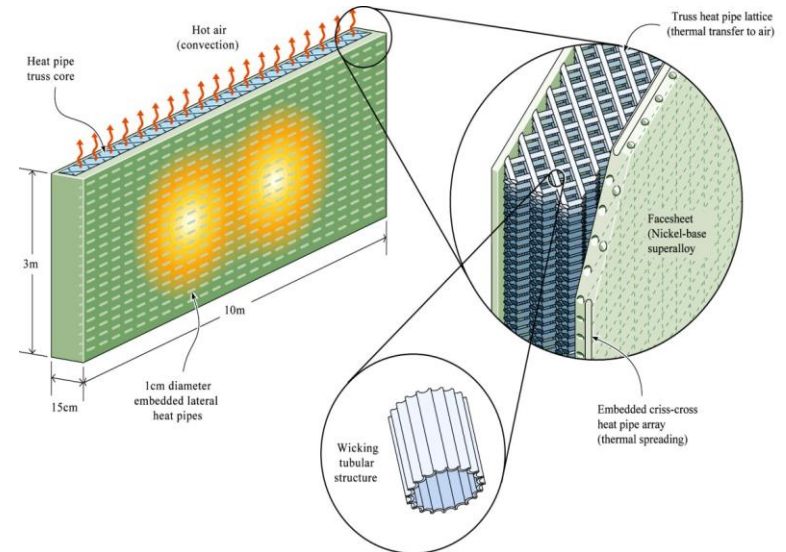
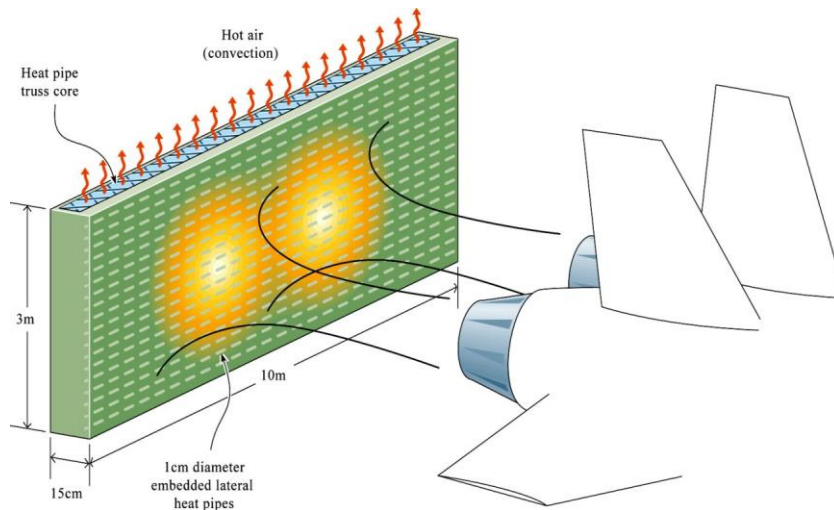
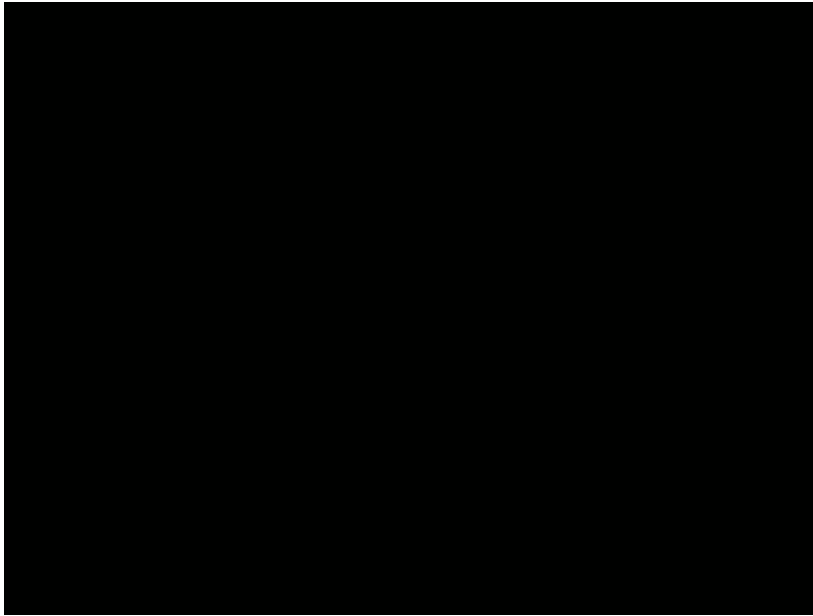


航空航天 (4) : 航空发动机



新一代涡扇发动机的燃气温度达到2200K，在加力状态下燃气温度更高，大大超过材料的耐温极限

航空航天 (5) : 航母飞机起飞热防护



教学内容

第一篇 工程热力学（前8周）

知识传授	能力培养
<ul style="list-style-type: none">➤ 基本概念➤ 热力学第一定律➤ 理想气体的性质与热力过程➤ 热力学第二定律与熵➤ 水蒸汽与湿空气➤ 动力循环➤ 制冷循环	<ul style="list-style-type: none">➤ 正/逆循环构建➤ 包含传热、做功的热力过程建模➤ ...

教学内容

第二篇 传热学 (后8周)

知识传授	能力培养
<ul style="list-style-type: none">➤ 热量传递的基本方式➤ 热传导 (稳态、非稳态、数值解基础)➤ 对流换热(强迫对流、自然对流、沸腾与凝结换热)➤ 热辐射换热➤ 传热过程与换热器	<ul style="list-style-type: none">➤ 热传递量的计算➤ 导热的数值求解➤ 换热器设计➤ ...