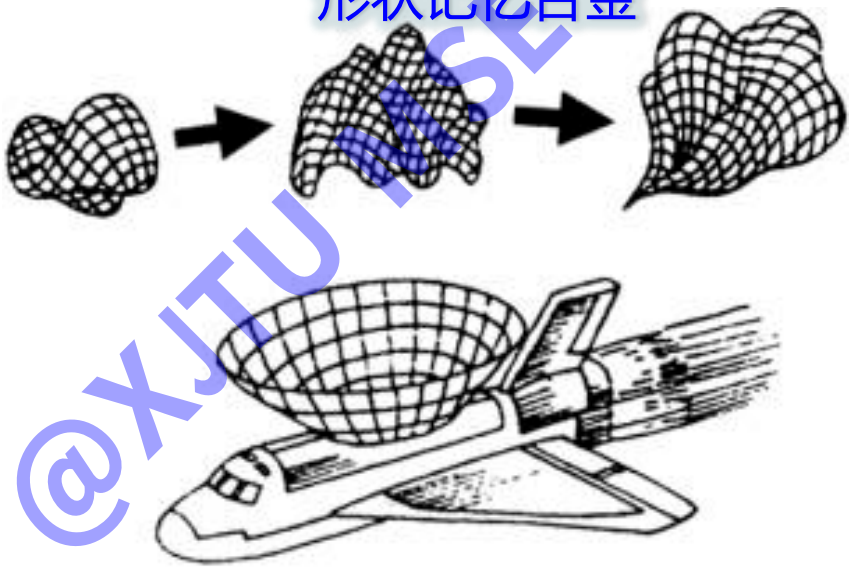
第10章 功能材料

Functional Materials

王继平 2020版 @ AEU MSE

太阳能电池

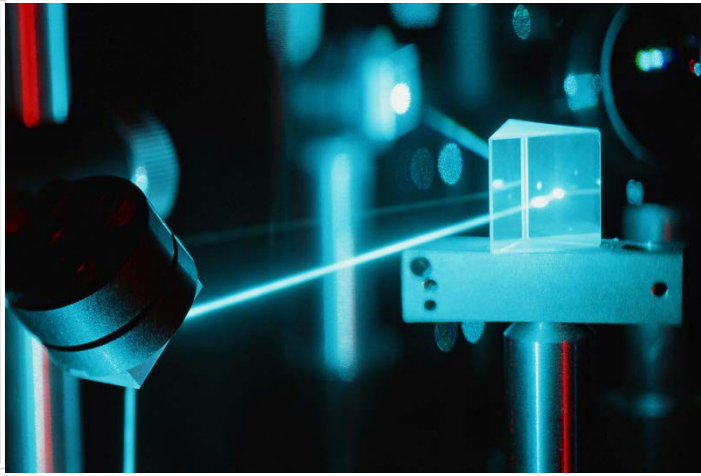
形状记忆合金



磁悬浮列车

隔音屏障

激光器



王继平 2020版 @XJTU MSE

第一节 概述

一、功能材料

小的力
或者小的(应变)位移

以特殊的电、磁、声、光、热、力、化学及生物学等性能作为主要性能指标的材料

VS.

结构材料：以力学性能为基础，主要制利用其强度、硬度、韧性等机械性能制成的各种材料

王继平 2020版@XJTU MSE

二、功能材料的分类

按化学成分

- 金属功能材料
- 陶瓷功能材料
- 高分子功能材料
- 复合功能材料

按应用领域

- 电工材料
- 能源材料
- 信息材料
- 光学材料
- 仪器仪表材料
- 航空航天材料

按使用性能

- 电功能材料
- 磁功能材料
- 光功能材料
- 声功能材料
- 热功能材料
- 隐形材料

王继平 2020版@XJTU MSE

功能材料

主要是指具有能够对信息和能量进行获取、传送、转换、存贮和处理等特殊功能的材料。

功能材料的各种特殊功能是通过材料内部发生的各种物理过程和化学过程实现的。

声、光、电、磁等过程都可以用来实现材料的特殊功能。

我们呈现

- 电功能材料
- 磁功能材料
- 热功能材料

2020版 @XJTUMSE

第二节 电功能材料

以特殊的电学性能或各种电效应作为主要性能指标的一类材料

导电材料按导电机理可分为：

电子导电材料和离子导电材料

电子导电材料

- 导体/ 电接点(触头)材料
- 半导体材料
- 超导材料

王继平 2020版@XJTUMSE

一、导体材料

导体的特征：电阻率随着温度升高而升高

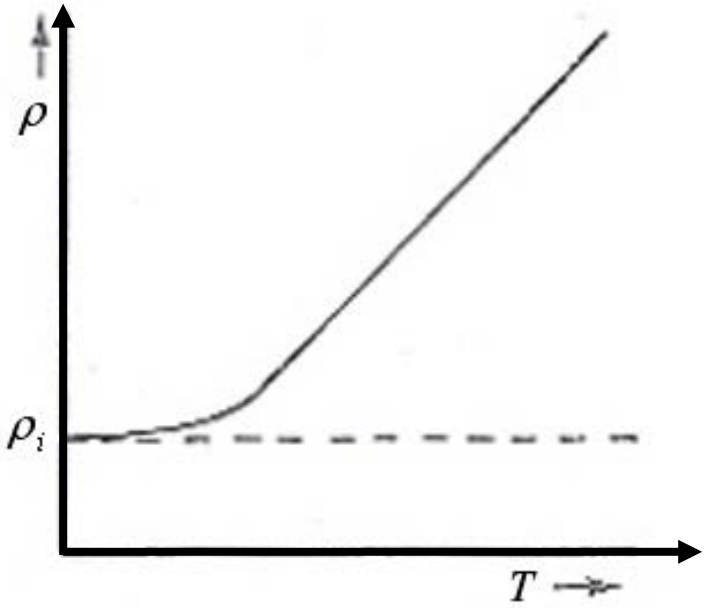
导体电阻率公式

$$\rho = \rho_i + \rho_T$$

ρ_i 取决于**晶格缺陷**的多少

缺陷越多，ρ_i越大，一般与温度无关

ρ_T 取决于**晶格**的**热振动**



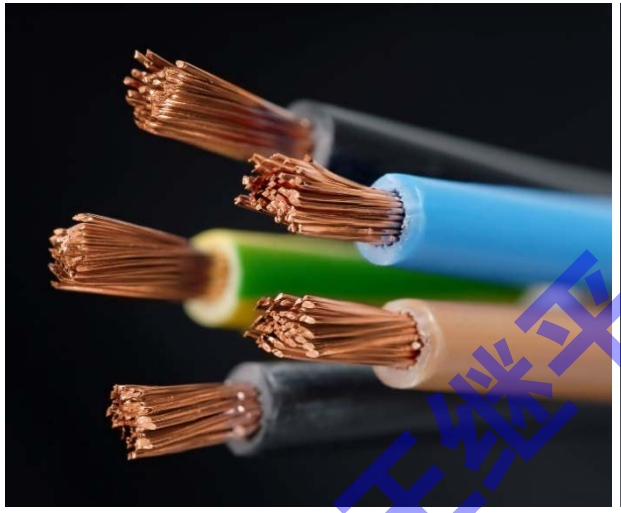
电阻率随温度的变化

王继平 2020版 @XJTU MSE

导体材料的应用

金属导体材料：

电缆、电机、导电引线(布线)材料、辐射屏蔽材料
电池材料、开关材料、传感器材料、信息传输材料
释放静电材料和接点材料



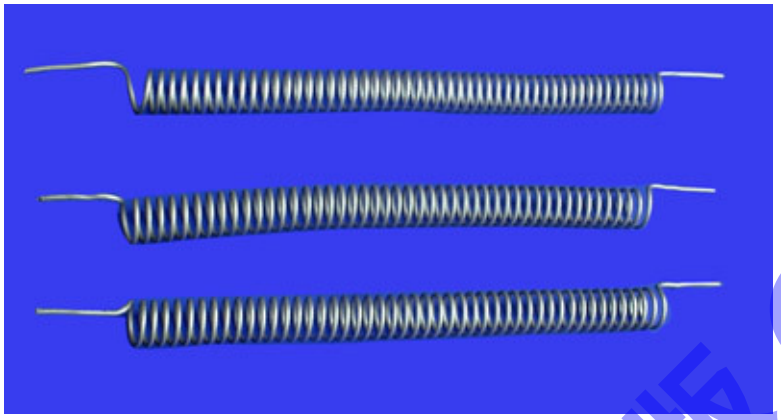
铜导线

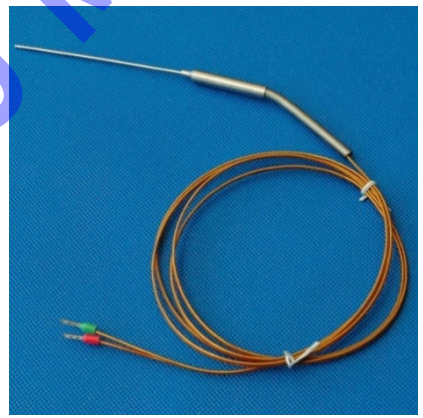
铝导线

王继平 2020版 @XJTU MSE

合金导体材料：

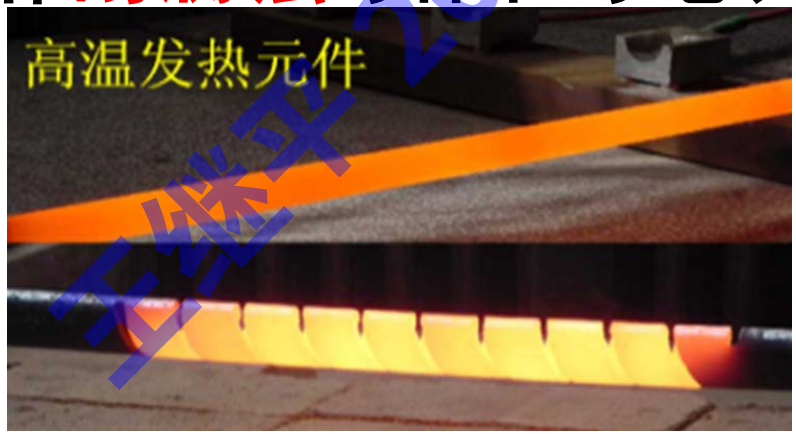
主要用作**电阻材料**和**热电偶**材料（**铂铑-铂热电偶**）





非金属导体材料：

主要用作**耐腐蚀**导体和导电填料



SiC发热元件

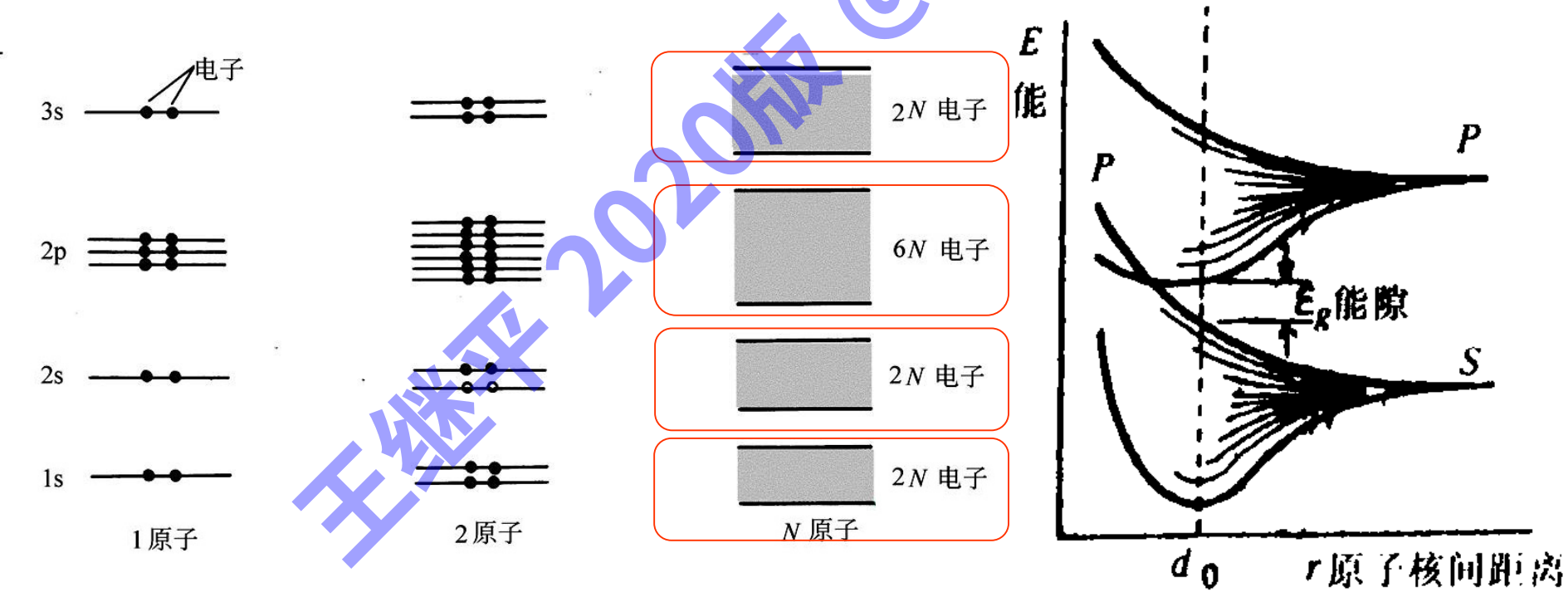
石墨发热元件

王继平 2020版 @XJTU MSE

二、半导体材料

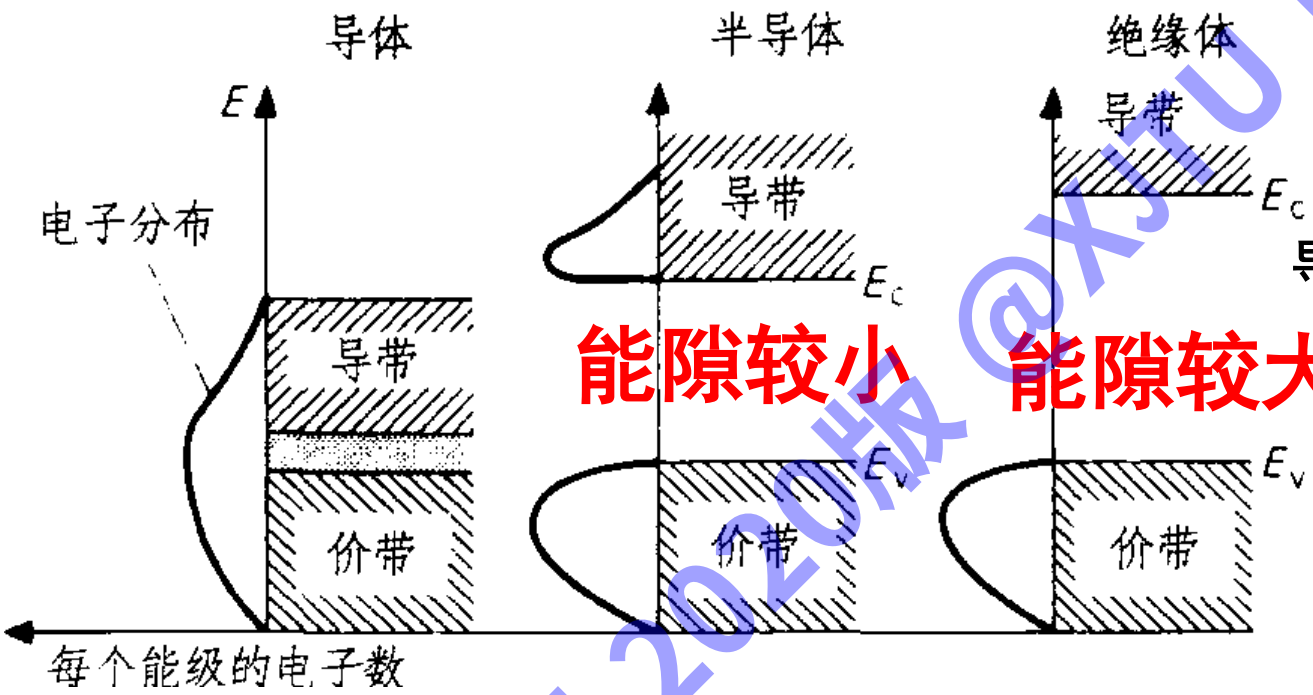
1. 能带的形成

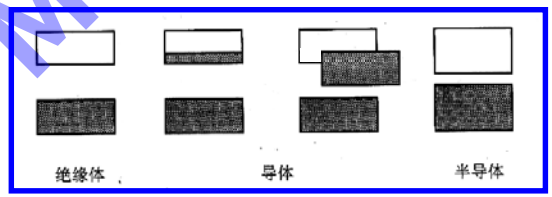
大量原子组成晶体时，各个原子的电子云重叠而使能级分裂。由N 个原子组成的晶体，N 个相同能级构成一个连续的能量带——能带 (energy band)



王继平 2020版 @XJTU MSE

2. 绝缘体、导体、半导体的能带结构比较





导带 (E_C: conduction band)

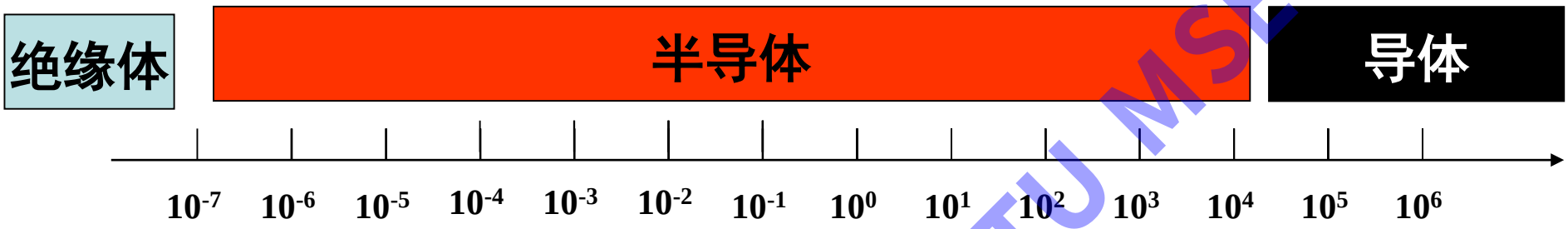
能隙较小 能隙较大

价带 (E_V: valence band)

能隙为零

能隙：价带与导带之间的能量间隙称为能隙，也称禁带宽度，其大小用 E_g 表示

王煜平 2020版 @XJTU MSE



超导体：$\sigma \rightarrow \infty$

电导率σ S/m

半导体

导电性能介于金属和绝缘体之间

$\sigma = 10^{-7} \sim 10^{4}$ S/m

具有负的电阻温度系数

导体具有正的电阻温度系数

王绍平 2020版 @XJTU MSE

半导体 { 本征半导体 / 掺杂半导体 }

(a) 本征半导体intrinsic semiconductor

高纯度的不掺有杂质的半导体，如Si、Ge(锗zhě)

不含任何杂质的、晶格完整的半导体。其导电能力不受任何外来杂质或晶格缺陷影响，只由半导体材料本身的性质决定。在足够低的温度下，它是绝缘体;在较高温度下，由于热激发，其导带中电子数目等于价带中空穴数目。这是一种理想的半导体材料。

1) 本征半导体的载流子

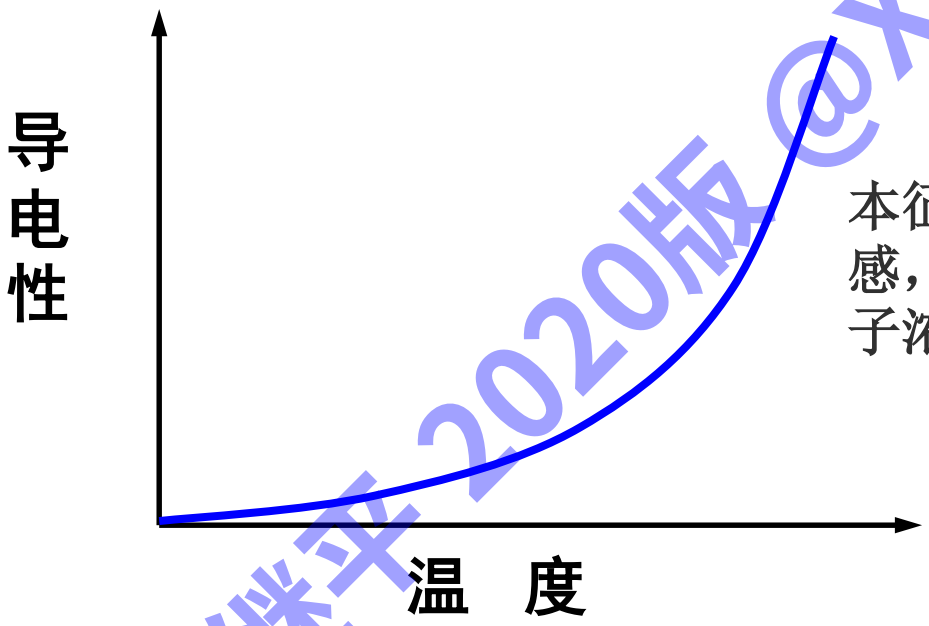
跃迁至导带的电子

价带中产生的空穴

王纯平 2020版 @XJTU MSE

2) 本征半导体的电导率随温度的变化

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g/2kT}$$



本征载流子浓度对温度非常敏感，随着温度升高，本征载流子浓度迅速增大

本征半导体的导电性随温度的变化示意图

王继平 2020版 @XJTU MSE

3. 掺杂半导体

向本征半导体中掺入少量特定杂质的半导体

掺杂半导体 { n 型半导体
p 型半导体

1) n 型半导体

向本征半导体中掺入少量 VA族 (P, As, Sb锑 tī)杂质的半导体

杂质被称为施主

2) p 型半导体

向本征半导体中掺入少量IIIA族 (B, Al, Ga镓, In)杂质的半导体

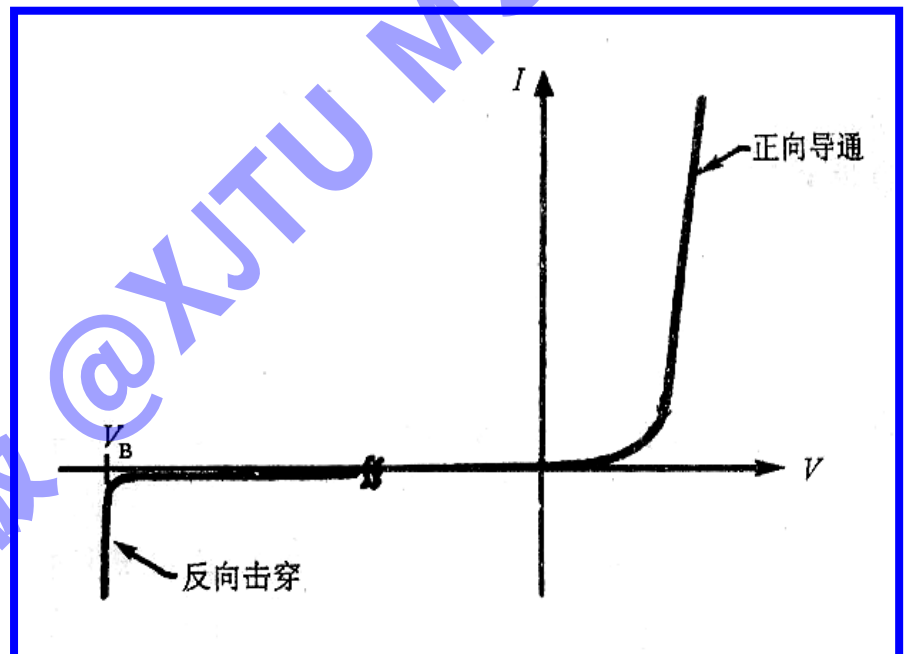
杂质被称为受主

王学平 2020版 @XJTU MSE

3) p-n 结

p 型或 n 型半导体不能直接用来制造半导体器件

必须制备成 p-n 结，才具有单向导电特性



典型 p-n 结的伏-安特性

王继平 2020版 @XJTU MSE

4. 常用半导体材料

1) 元素半导体材料

Si (硅)、Ge (锗zhě)、Se (硒)、Te (碲)…

单体元素构成的半导体材料。

共有12种元素具有半导体性质，
即硅、锗、硼、碲、碘
及碳、磷、砷、硫、锑、锡的某种同素异形体。

王继平 2020版 @XJTU MSE

材 料	熔点/℃	带隙/eV	迁移率/$cm^2\cdot(V\cdot s)^{-1}$		有效质量/m_0	
			电子	空穴	电子(me*)	空穴(mh*)
硼	2030	1.6				
金刚石	4027	5.47	1800	1200		
硅	1420	1.12(I)	1500	450	0.98	0. 16
锗	937	0.66(I)	3900	1900	1.64	0.044
灰锡	231.9	0.082	1400	1200		
红磷	44.2	2.0	220	350		
灰砷	817	1.2	65	60		
灰锑	630.5	0.1	3			
硫	119	2.4				
硒	217	1.8(D)	1	0.2		
碲	449.5	0.3(D)	1100	57	0.038	0.26
碘	113.7	1.3				

王继平 2020版@XJTU MSE

2) 化合物半导体材料

具有半导体性质的化合物

GaAs砷化镓

组成16种二元III-V族化合物半导体

12种II-VI和IV-VI族化合物半导体

$AgGeTe_2$ …

三元、四元化合物较成熟的有GaAsP、AlGaAs、GaInP、InAsP、InGaAsP、AlGaAsSb等

王继平 2020版 @XJTU MSE

3) 固溶体半导体材料

Bi-Sb (铋-锑)

由两种或两种以上的元素或化合物半导体相互溶合而成的材料称为固溶体半导体

$Ga\text{-}As_{1-x}P_x$ (镓砷磷)

由砷化镓和磷化镓组成的镓砷磷三元固溶体

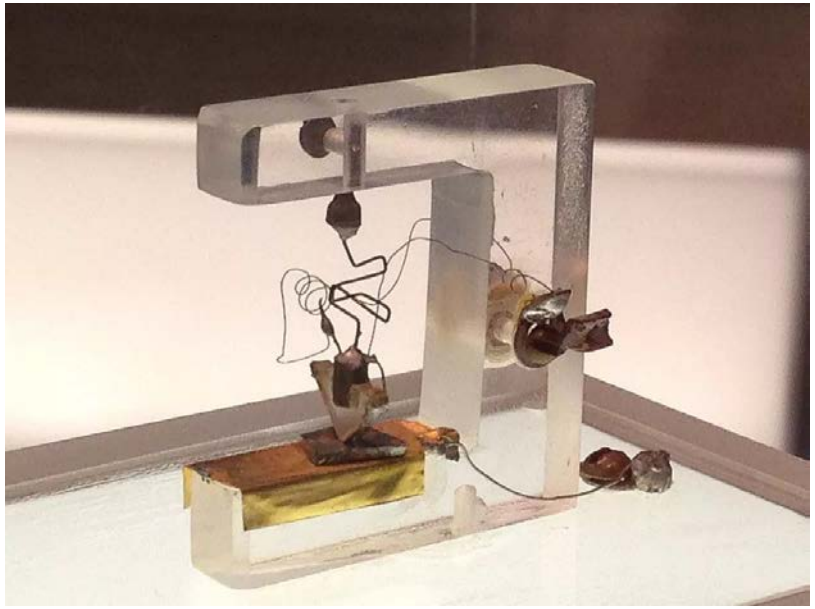
王继平 2020版 @XITU MSE

5. 半导体材料应用举例

双极型晶体管 (开关)　　场效应晶体管

半导体激光器　光电二极管　有源微波二极管

王继平 2020版 @XJTU MSE



第一只晶体管（原件在贝尔实验室）

巴丁、肖克利、布拉顿

1956年，获得了诺贝尔物理学奖

王继平 2020版 @XJTU MSE

John Bardeen

巴丁两次获得诺贝尔奖1972

共同提出低温超导理论，即通常所说的BCS理论

王继平 2020版 @XJTU MSE

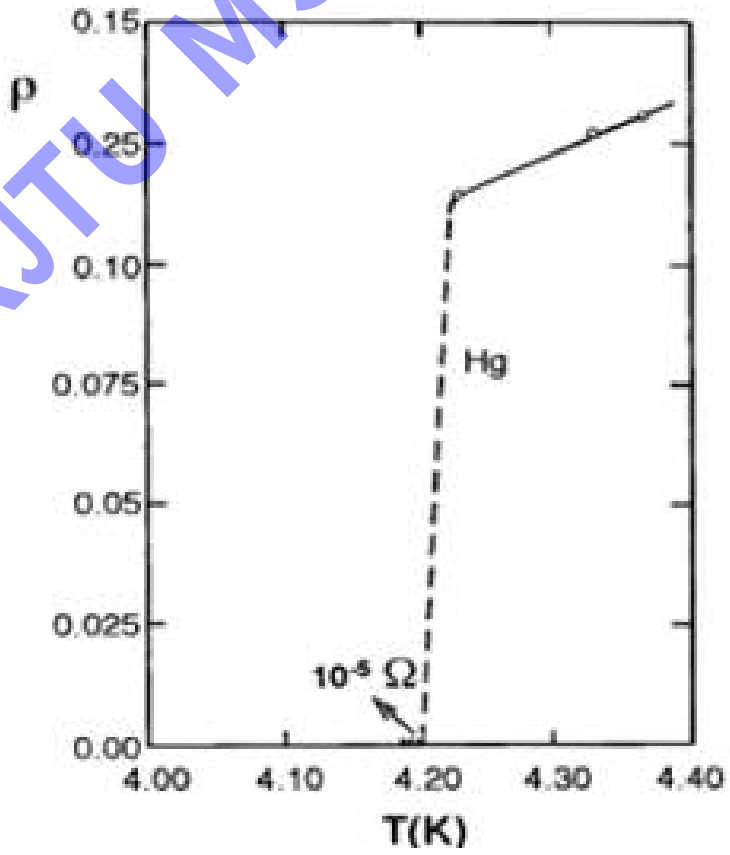
三、超导材料

1. 超导现象

材料**电阻**随**温度降低**而**减小**，
并(在T_C温度以下)最终呈现零电阻

T_C—超导临界温度

具有超导现象的材料称为
超导材料



汞在4.2K电阻完全消失

王继平 2020版 @KJTU MSE

2. 超导体的基本特性

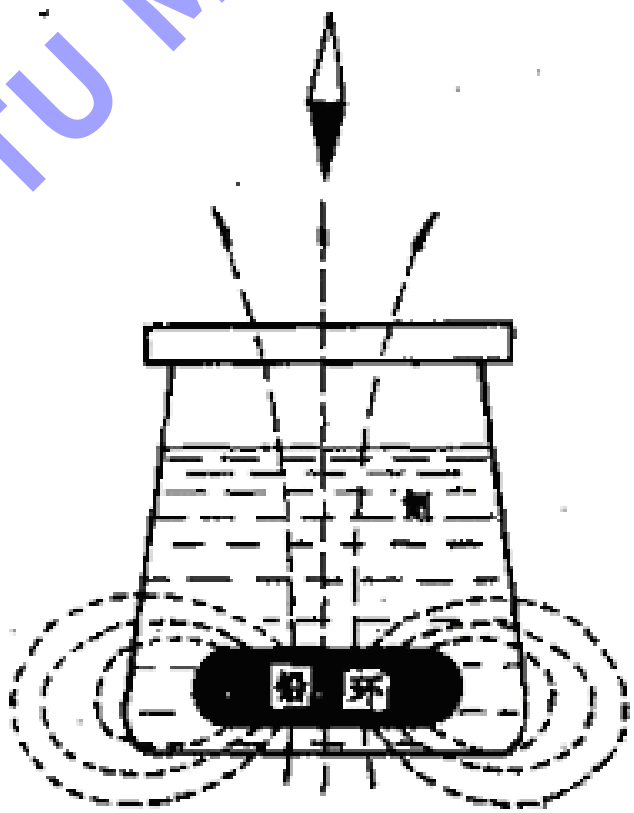
1) 零电阻 (超导电性)

闭合回路中电流永久流动

J_C—临界电流密度

将超导体导线做成闭合电路，电流永无休止地流动

将一个铅环冷却到7.25K以下，用磁铁在铅环中感应出几百安培的电流，从1954年3月16日直到1956年9月5日，铅环中的电流不停流动，数值也没有变化



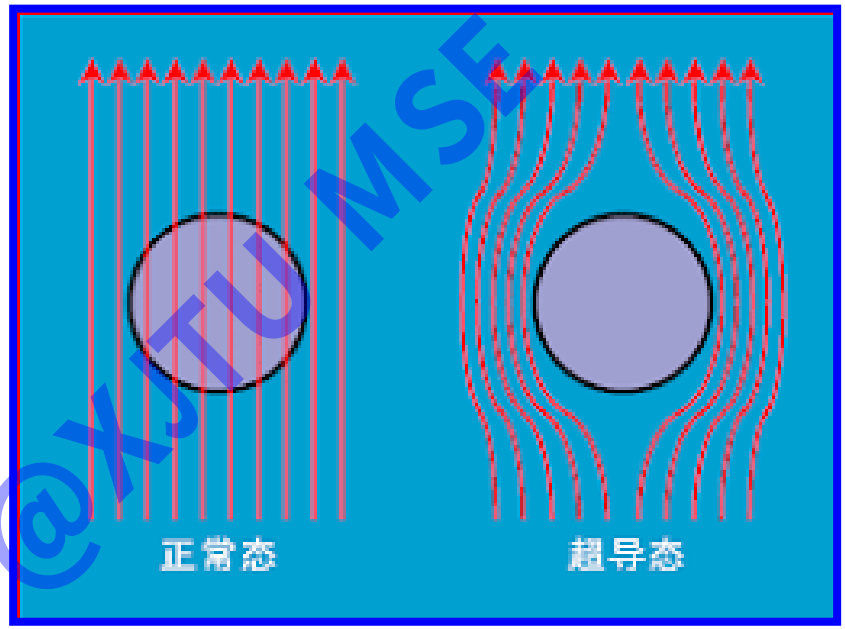
铅环中的电流不停的流动，形成一个永久的磁场，使一枚磁针悬浮

王煜平 2020版 @XJTU MSE

2) 抗磁性(迈斯纳效应)

磁悬浮

H_C—临界磁场强度

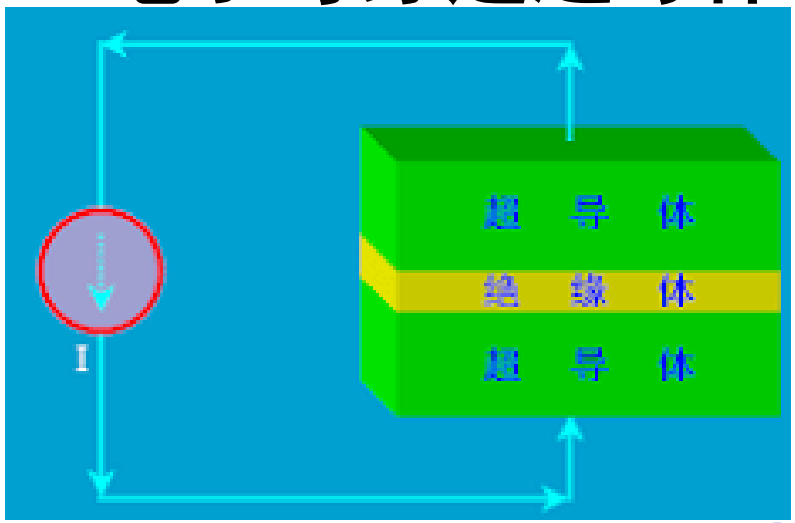


磁体和超导体相互靠近时，磁体的磁场会使超导体表面中出现超导电流→形成的磁场，超导体内部，恰好和磁体的磁场大小相等，方向相反。这两个磁场抵消，使超导体内部的磁感应强度为零

王继平 2021版 @XJTU MSE

3) 约瑟夫森效应

电子可穿过超导体中的绝缘体夹层(1nm)

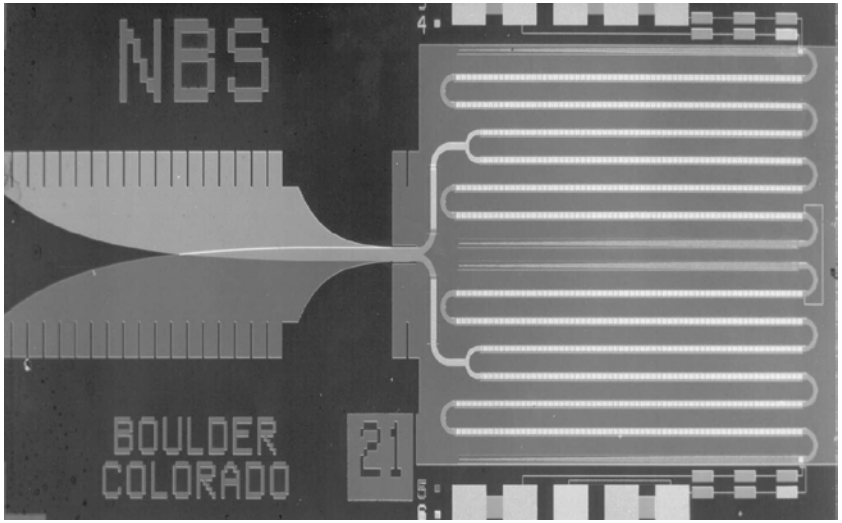


约瑟夫森效应示意图

1962年约瑟夫森(Brain D. Josephson)对超导体-氧化层-超导体(S1IS2)夹层结构(Sandwich)

如氧化层厚度在20Å左右, 超导体中的Cooper对能无阻地通过氧化势垒层,形成无损耗的超电流

Josephson junction 安德森等人在实验中证实



由美国国家标准技术研究所所研发、作为标准电压之约瑟夫森结阵列芯片

王继平 2020版 @XJTU MSE

3. 常用超导材料

1) 元素超导体

共26种：Ti，Zr…

T_C太低（最高的Nb，~9.2K），无实用价值

2) 合金超导体

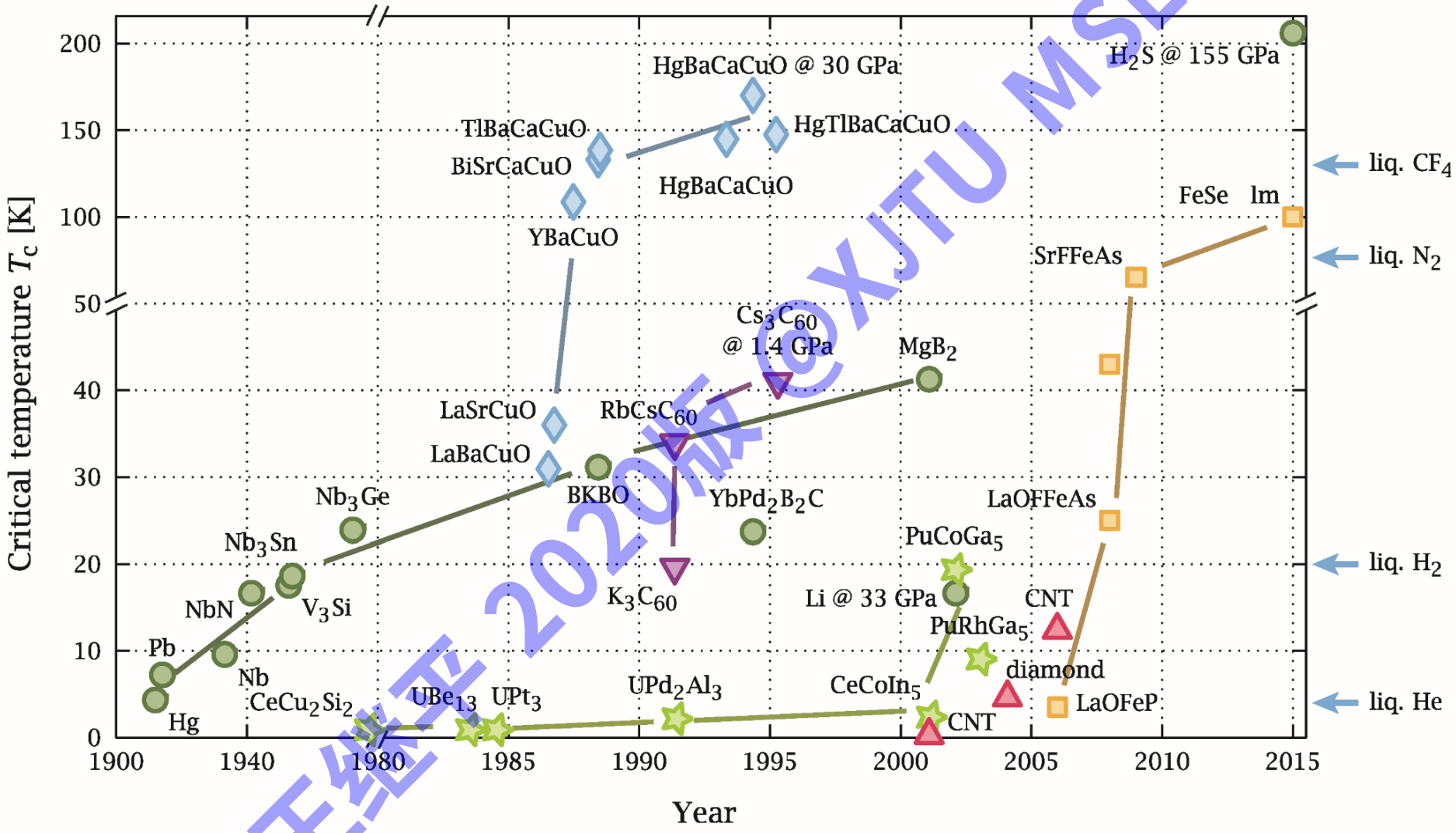
$GeNb_3$（23.2K 铌三锗），Ti-Nb 系合金 (10K)

强度高，H_C低，J_C高，早期应用

3) 金属间化合物超导体

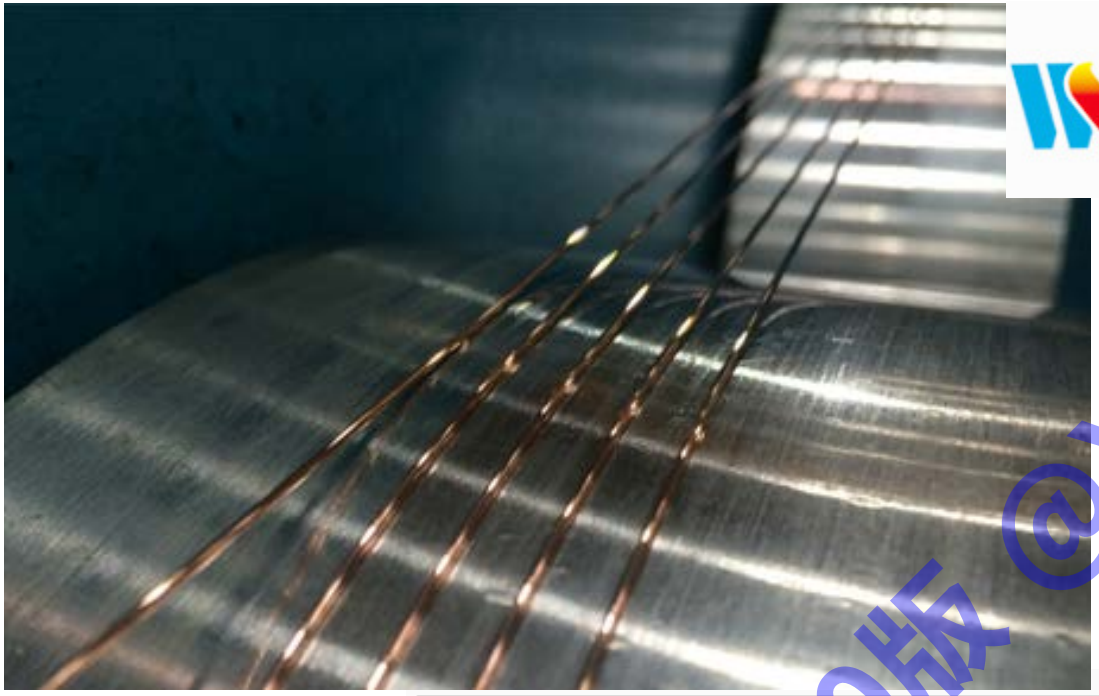
Nb_3Sn（18.3K），H_C比合金超导体高

王继平2020版 @XJTU MSE



超导临界温度时间线 **1900 to 2015**

王绍平 2020版@XJTU MSE



西部超导材料科技股份有限公司
Western Superconducting Technologies Co.,Ltd.

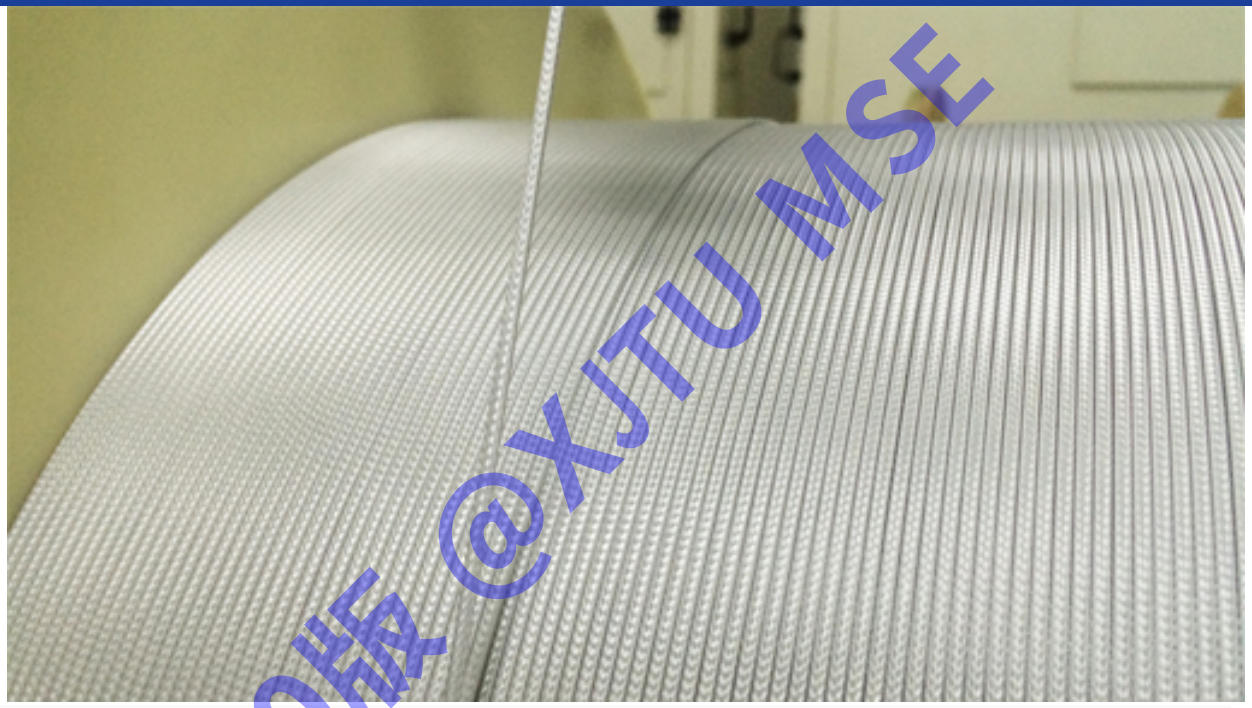
国内唯一的NbTi和Nb3Sn低温超导线材生产线。
现已具备年产棒材3500吨、NbTi、Nb3Sn低温超导线材400吨的生产能力

Nb_3Sn

指标名称	ITER要求	股线性能
镀Cr后直径(mm)	0.820±0.005	0.818-0.822
单根线材长度(m)	>1000	Max.>5000
扭绞节距(mm)	15±2	14.1-16.1
Cr层厚度(μm)	2.0+0/-1	1.40-1.92
铜与非铜区体积比	1.0±0.1	0.90-1.04
RRR值(273/20 K)	> 100	>100
临界电流Ic (A)@4.2 K，12 T	>190	225-248
n值@4.2 K，12 T	>20	34-44
单位体积磁滞损耗(mJ/cm3)@4.2 K， ±3 T	<500	380-433

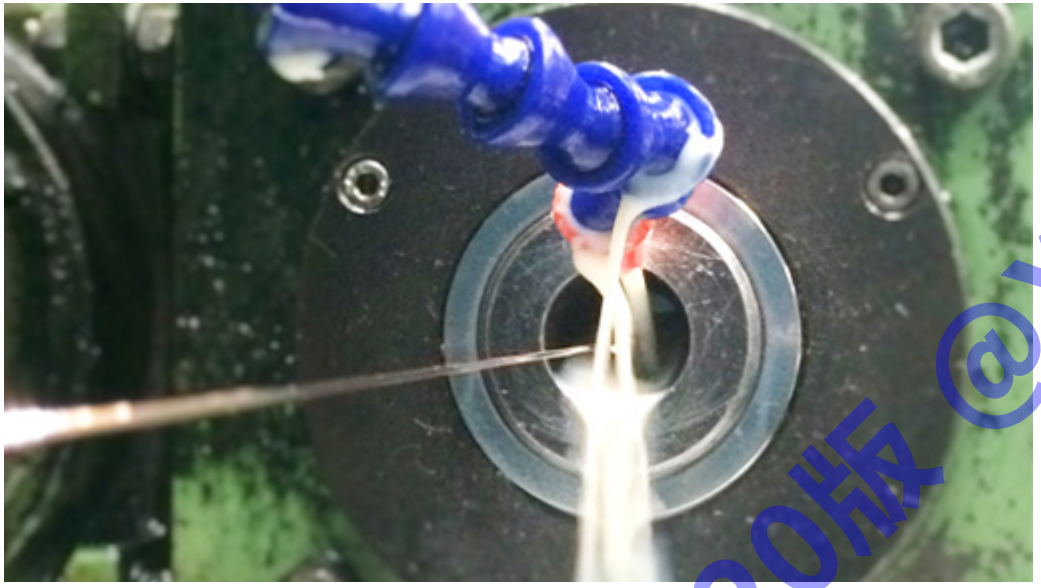
王继平 2020版 @XJTU MSE

NbTi超导线



型号	NbTi芯数	尺寸（mm）		铜比	Ic (A) @ 4.2K， 5T	RRR(273K/10K)	尺寸公差
		裸线	涂漆后				
F18-10	18	1.70×1.10	1.80×1.20	10	400	>120	±0.005
F24-7	24	1.70×1.10	1.80×1.20	7	520	>120	±0.005
F36-4	36	1.70×1.10	1.80×1.20	4	810	>120	±0.005
F54-2.5	54	φ1.016	φ1.067	2.5	628	>120	±0.005
F630-1.3	630	1.2×0.75	1.28×0.83	1.3	1000	>120	±0.005

王继平 2020版 @XJTU MSE



2001年1月，MgB_2问世，超导温度至39K。

*T*c值表明MgB_2可以与便携低温冷却器一起用作在20K的温度下无冷冻剂磁体的导体。 MgB_2超导线未来的潜在应用包括MRI系统，超导FCL，变压器，电感器，电动机和发电机。 其中，最有希望的应用是MRI系统，超导FCL和风力涡轮发电机。

西部超导通过规模制造技术成功生产了2km的MgB_2线，在20K时Jc为43000A / cm。

王继平2020版 @XJTU MSE

4) 陶瓷超导体

YBaCuO (90K), BiCrCoCuO (110K 铋系), TlBaCaCuO (120K)

可在液氮温度 (77K)，称为高温超导体

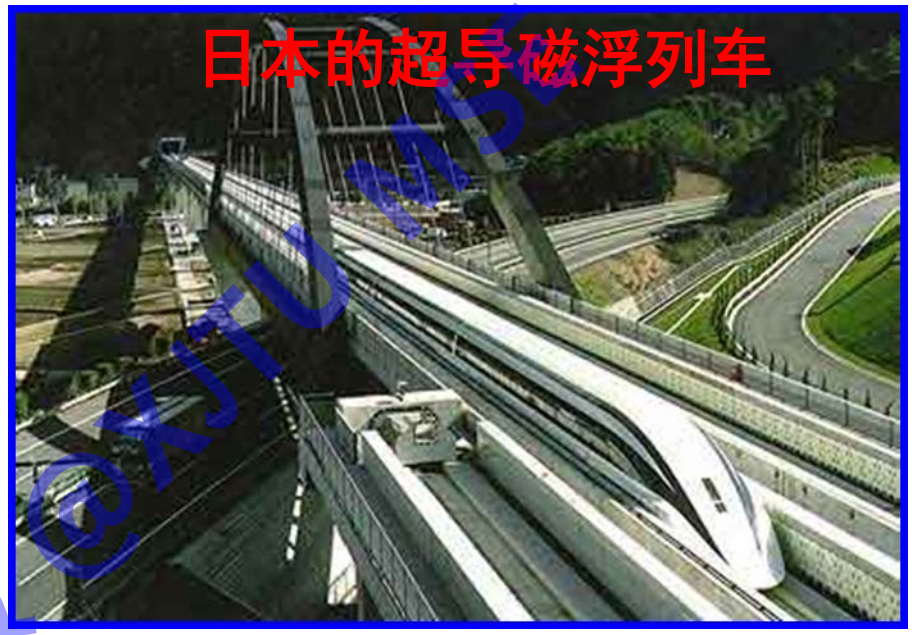
可望实用

5) 高分子超导体

在数亿帕气压下，可超导，但 T_C低 (10K)

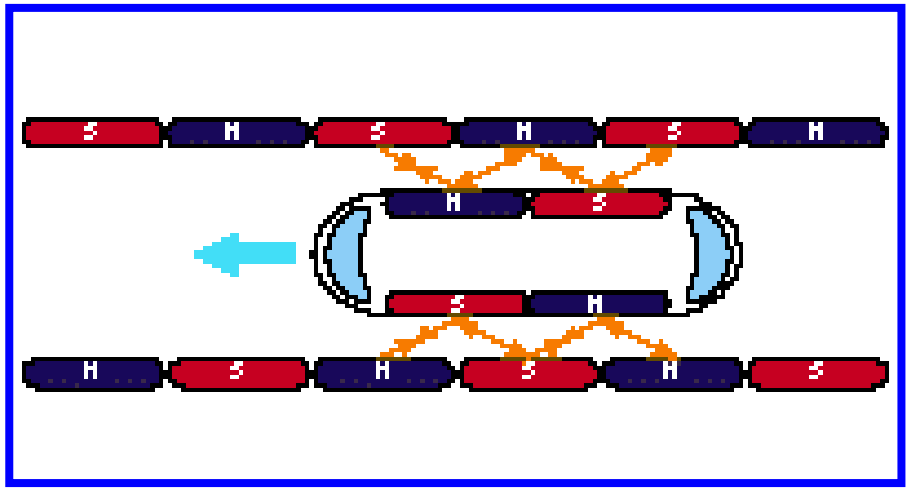
4. 超导材料应用举例

王绍平 2020版 @XJTU MSE



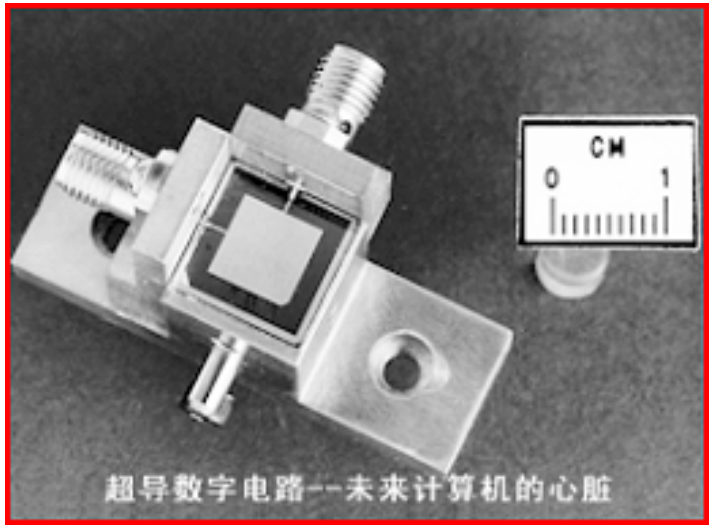
http://www.smtdc.com/cn/index.html

磁浮列车



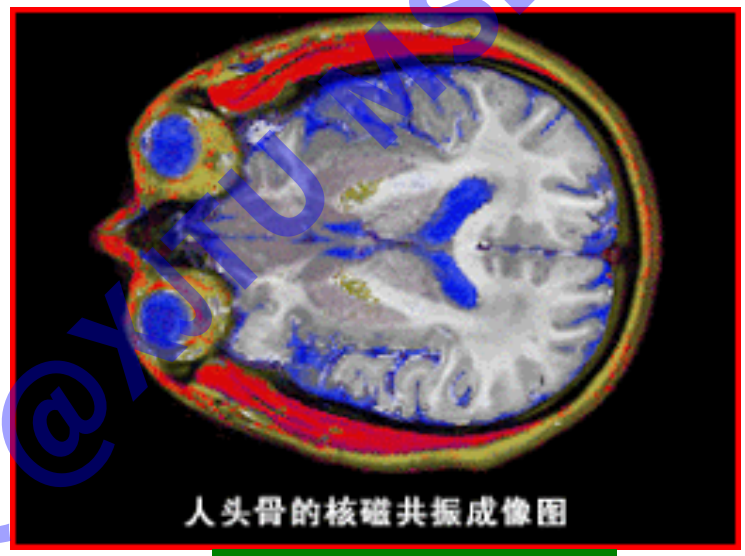
王铁军 2020版@XJTU MSE

超导数字电路

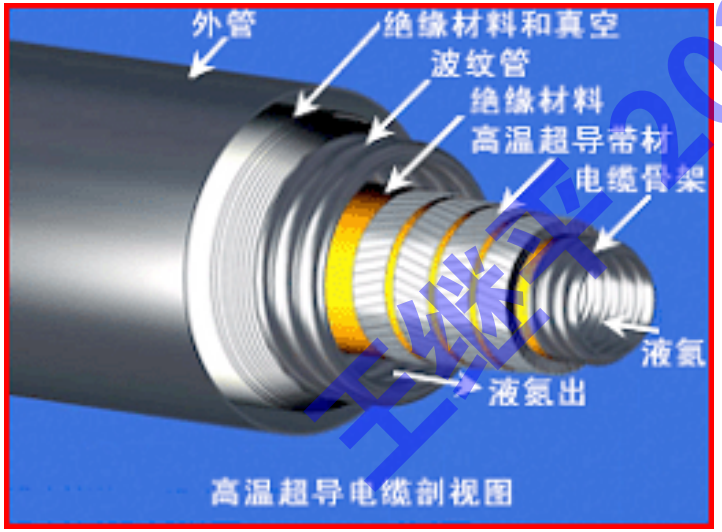


超导数字电路--未来计算机的心脏

超导核磁共振

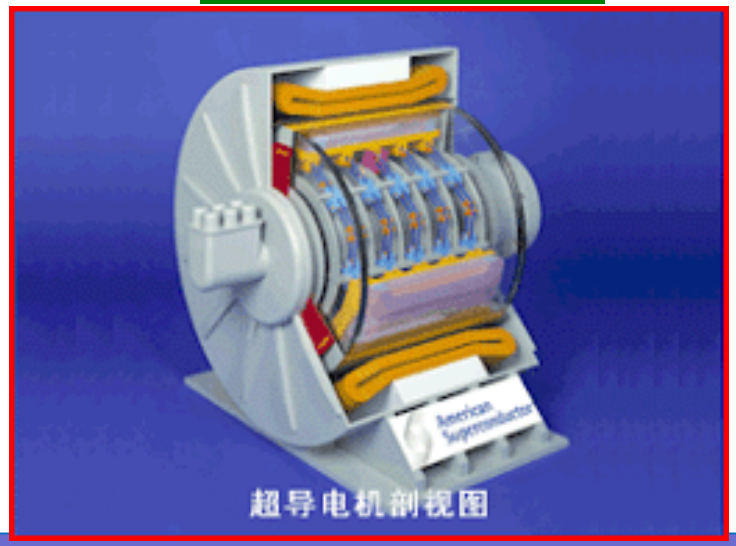

人头骨的核磁共振成像图

超导电缆



高温超导电缆剖视图

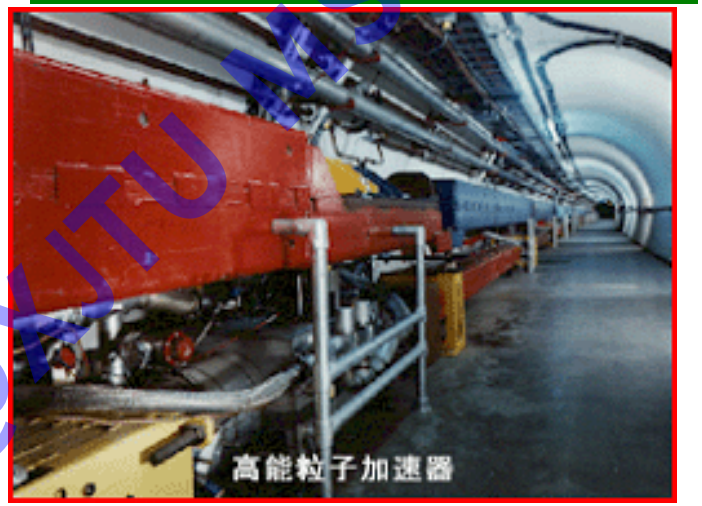
超导电机


超导电机剖视图

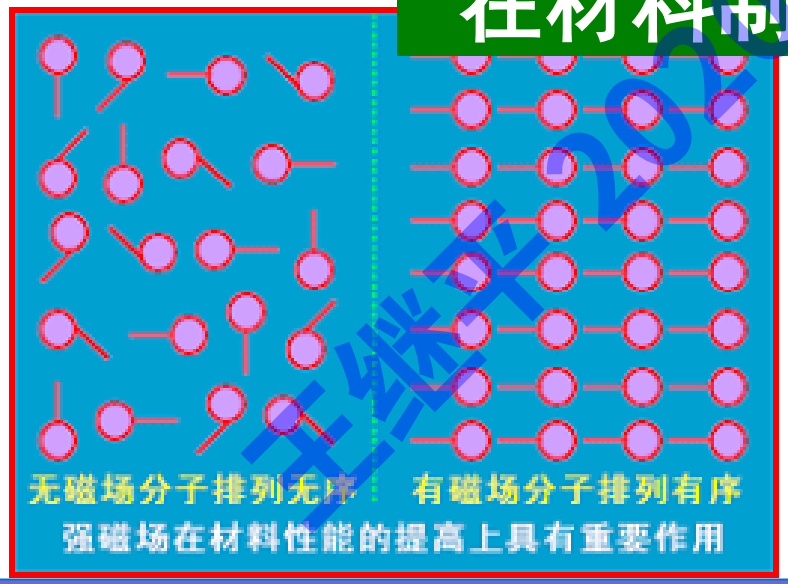
王继扬2020版 @xjtu_wsl

在军事工业中的应用

高能粒子加速器



在材料制备中的应用



王继平 2022版 @XJTU_MSE

第三节 磁功能材料

一、材料的磁感应

1. 真空磁感应强度

$$B_{真} = \mu_0 H$$

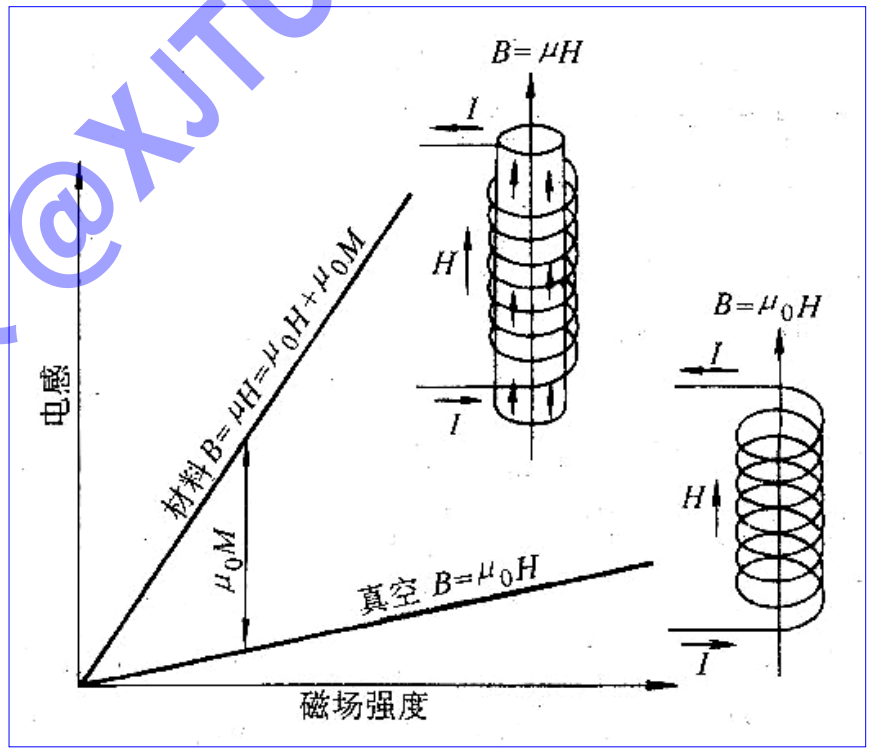
式中，H — 磁场强度

μ_0— 真空磁导率

2. 材料的磁感应强度

$$B_{材} = \mu H$$

式中，μ — 材料的磁导率



物质的磁感应

王继平 2020版 @XJTU MSE

二、抗磁体、顺磁体和铁磁体

1. 抗磁体 内部磁矩削弱了外磁场的材料

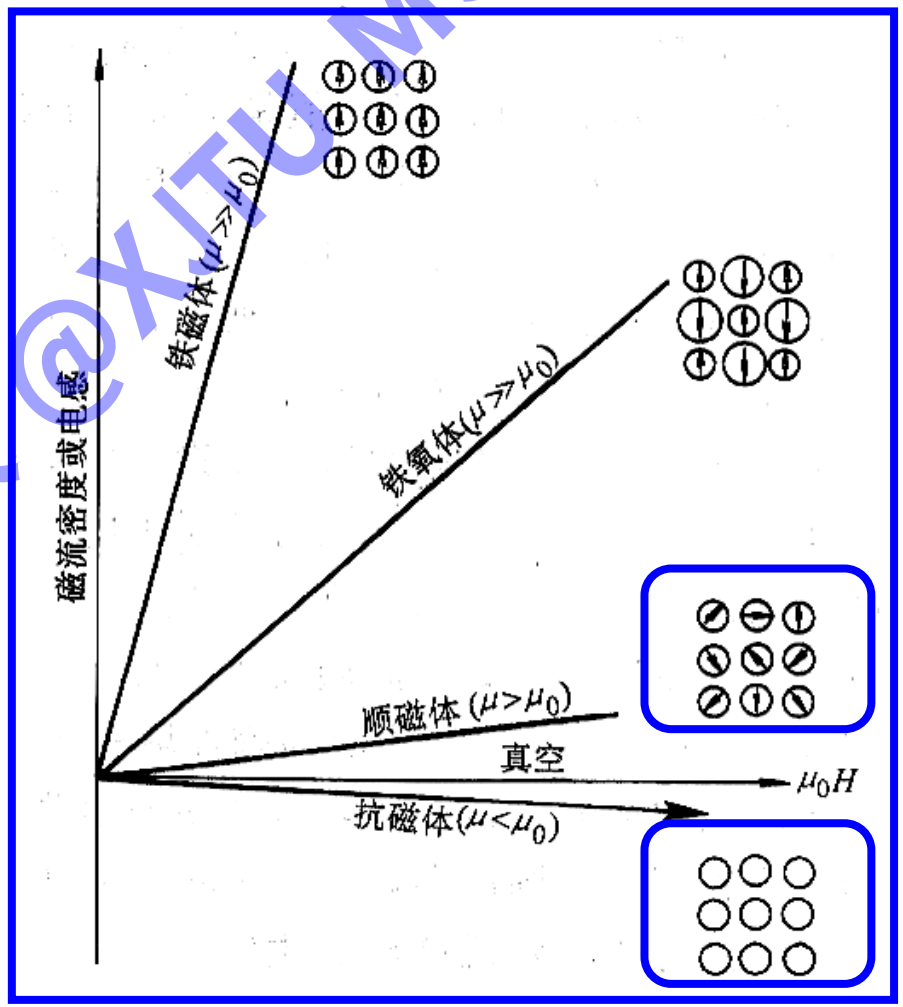
即 $\mu < \mu_0$

如惰性原子、一价碱金属离子、二价碱土金属离子

2. 顺磁体 内部磁矩稍增强外磁场的材料

即 $\mu > \mu_0$

如大多数金属元素

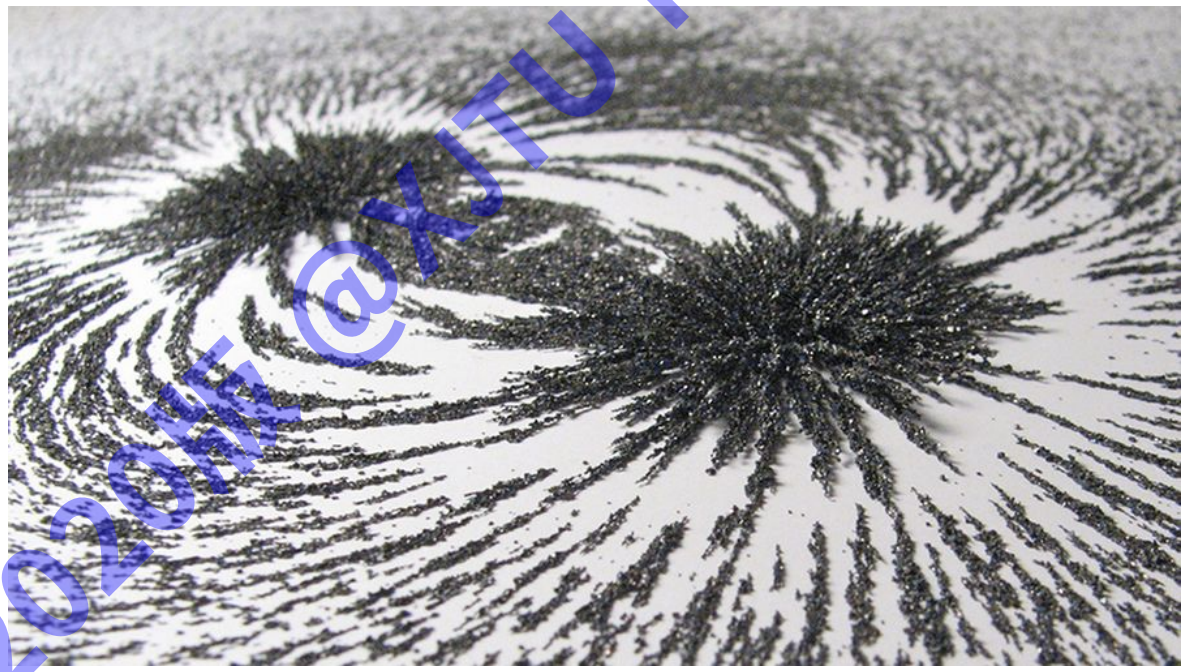


各种物质的磁化

王继平 2020秋 @XJTU MSE

王继平 2020届 @XJTU MSE

法拉第实验用的圆环线圈



《电学实验研究》

《论法拉第的力线》 麦克斯韦

王继平 2020版@XJTU MSE

3. 铁磁体

内部磁矩大大增强外磁场的材料

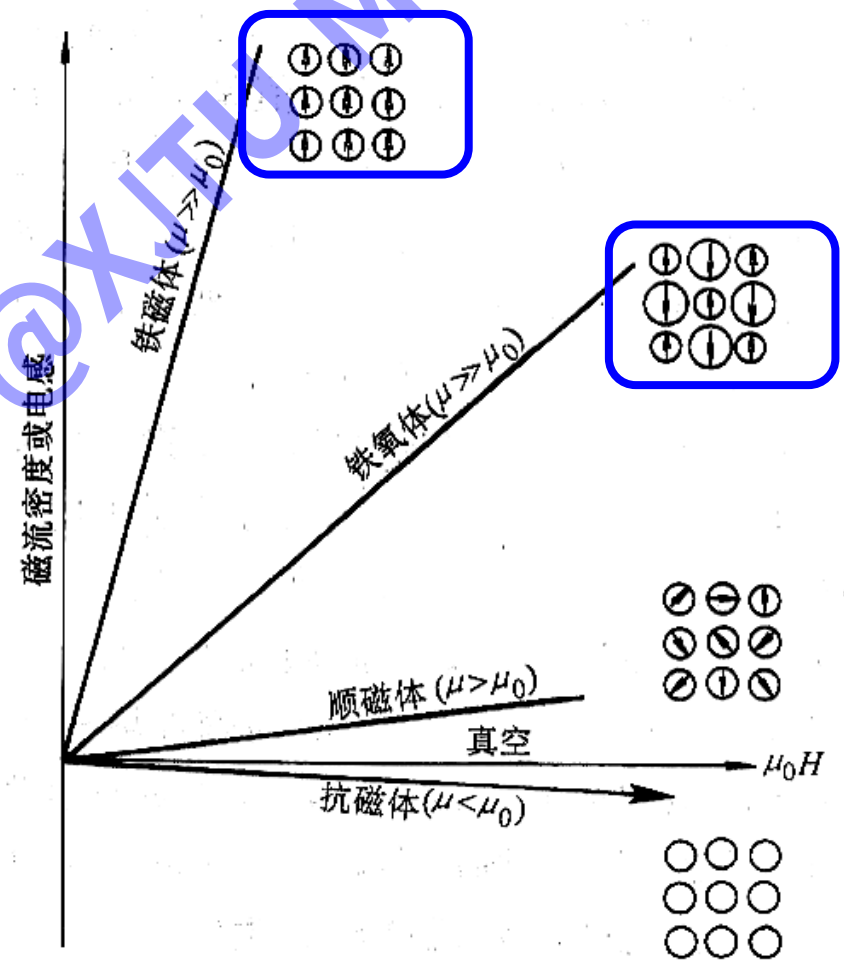
即$\mu >> \mu_0$

如 Fe、Co、Ni、Gd (钆 gá)

4. 铁氧体

具有铁磁性的金属氧化物

如 $MO \cdot Fe_2O_3$，其中MO为金属氧化物 通常是MnO或ZnO



各种物质的磁化

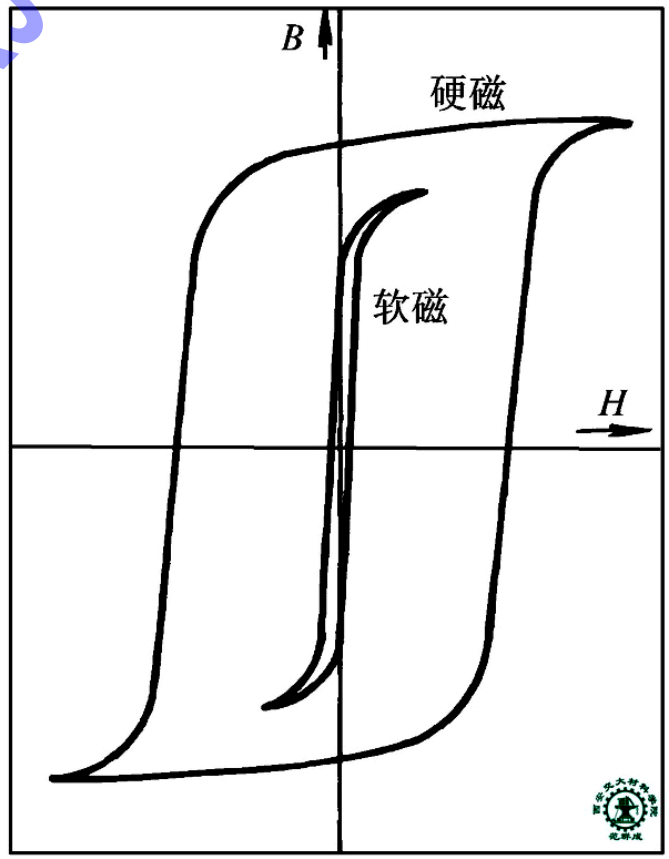
王继平 2020版 @XJTU MSE

三、软磁材料

在外磁场作用下很容易磁化，去掉外磁场时又很容易去磁的磁性材料

1. 软磁材料的特性

高磁导率，低矫顽力



王继平 2020版 @XJTUMSE

2. 常用软磁材料

1) 电工纯铁

$w_C = 0.04\%$ 适用于直流变压器铁芯

2) 硅钢片

$w_{Si} = 0.5\% - 4.5\%$ 适用于交流变压器铁芯

3) Fe-Al合金

$w_{Al} = 6\% - 16\%$ 适用于弱磁场变压器铁芯

4) 铁氧体软磁材料

以Fe_2O_3为主要成分的复相氧化物，制作磁性天线、中周变压器、增感线圈、电视聚集线圈的重要材料

王崇愚 2020版 @XJTU MSE

四、硬磁材料

在外磁场作用下不容易磁化，去掉外磁场时又不容易去磁的磁性材料

1 硬磁材料的特性

低磁导率，高矫顽力

2 常用硬磁材料

1) 铝镍钴系 (Fe-Al-Ni-Co, 阿尔尼科)

良好的磁特性和热稳定性，剩磁高，磁能面积大，矫顽力适中

硬而脆，难加工　　铸造或粉末烧结成形

王崇琴 2020版 @XJTU MSE

2) 铁氧体硬磁材料 ($BaFe_{12}O_9$，钡恒磁)

与金属硬磁材料相比，电阻大、涡流损失小，成本低，耐化学腐蚀

3) 稀土系永磁 (钕铁硼永磁合金，磁王)

稀土元素与过渡族金属Fe、Co、Cu、Zr等或非金属元素B、C、N等组成的化合物

高矫顽力，磁能面积最大，体积小、重量轻、

2011-5-16高精度粒子探测器--"阿尔法磁谱仪2"搭乘美国“奋进号”航天飞机驶进寰宇

“MADE IN CHINA”、内径约1.2米、重约2.6吨、中心磁场强度1370高斯 环形永磁铁

新型高磁能积钕铁硼材料

王俭平 2020@XJTU MSE

五、磁致伸缩材料

磁性材料在外磁场作用，产生伸长或缩短的现象称为磁致伸缩

随磁场强度增大

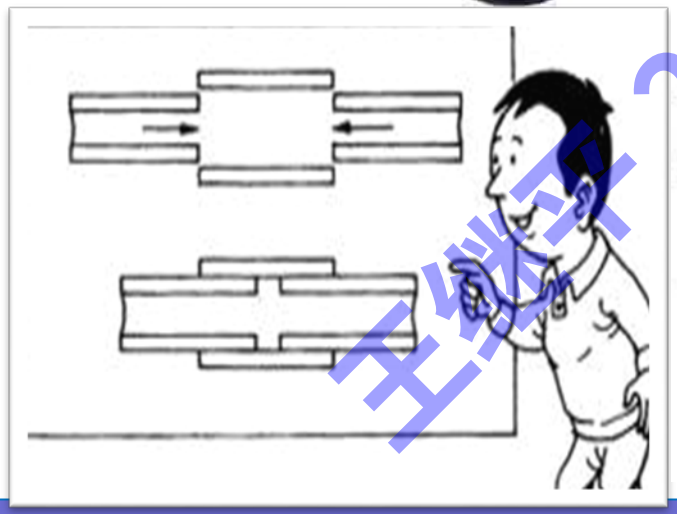
Fe 伸长 Ni缩短

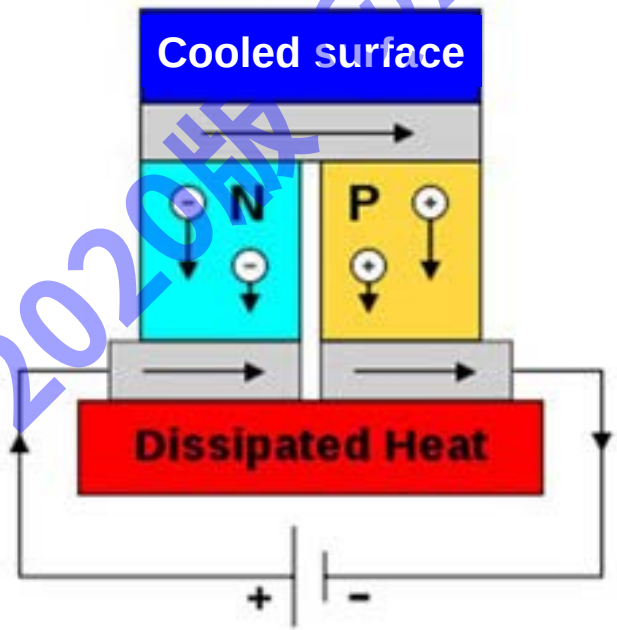
王继平 2020版 @XJTU MSE

第四节 热功能材料

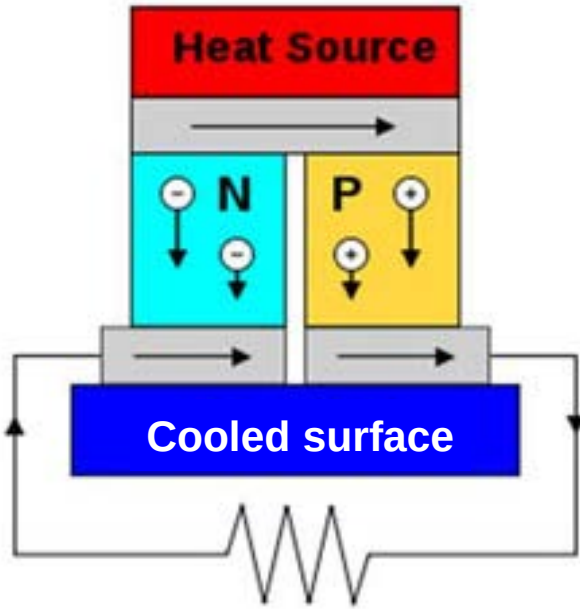
随温度变化，材料某些物理性能发生显著变化

热胀冷缩　　形状记忆效应　　热电效应





A



B

王然平 2020版 @XJTU MSE

一 膨胀材料

热膨胀：是指材料的长度或体积在不加外力时随温度的升高而变大的现象

热膨胀的本质 原子间的平均距离随温度的升高而增大即是由原子的非简谐振动引起的

热膨胀系数

$$\alpha = \frac{1}{L} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta T}$$

材料热膨胀系数：与其原子间的接合键强弱有关

结合键越强，则给定温度下的热膨胀系数越小

王俊平 2020版@XJTU MSE

陶瓷的结合键 (离子键和共价键) 最强
金属的 (金属键) 次之
高聚物的 (范德华力) 最弱

热膨胀系数 (单位：10^{-6}/K)

铝	23.2
铜	17.5
灰铸铁	9.0

花岗岩	3.0
石墨	2.0
钻石	1.3
碳纤维	-0.5

尼龙	120.0
聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)	85.0
聚氯乙烯 (PVC)	80.0

王维平 2020版 @XJTU MSE

1) 低膨胀材料

- 低膨胀材料是热膨胀系数较小的材料，也叫因瓦 (Invar) 合金
- 主要应用于精密仪器、标准量具等以保证仪器精度的稳定及设备的可靠性

2) 定膨胀材料

- 定膨胀材料是指在某一温度范围内具有一定膨胀系数的材料，也称可伐 (Kovar) 合金
- 主要用于与玻璃、陶瓷等材料相封接，要求与被封接材料的膨胀系数相匹配

工学平2020版 @XJTUMSE

低膨胀材料因瓦 (Invar) 合金

名称	成分	晶系	磁性	α（1/℃）	T_c 或 T_N/℃
Fe-Ni 因瓦	35Ni-65Fe	立方	铁磁	1.2×10^{-6}	232
超因瓦	32Ni-64Fe-4Co	立方	铁磁	0.0	230
不锈因瓦	37Fe-52Co-11Cr	立方	铁磁	0.0	127
Fe-Pt 因瓦	75Fe-25Pt	立方	铁磁	-30×10^{-6}	80
Fe-Pd 因瓦	69Fe-31Pd	立方	铁磁	0. 0	340
Cr 基因瓦	94Cr-5.5Fe-0.5Mn	立方	反铁磁性	$\sim1\times10^{-6}$	～45
Mn 基因瓦	α –Mn	立方	反铁磁性	$<10^{-6}$（4. 2K）	－178
Gd-Co 因瓦	67Co-33Gd	立方	亚铁磁	3×10^{-6}	～160
Y2Fe17 因瓦	10.5Y-89.5Fe	六方	铁磁	—	－29
非晶态 Fe-B 因瓦	83Fe-17B	非晶态	铁磁	（1～2）$\times10^{-6}$	～320

王继平 2020版 @XJTU MSE

定膨胀材料可伐 (Kovar)合金

名称	成分 ω %				线膨胀系数 α/（10^{-6}/℃）				用途
	Ni	Fe	Co	Cr	0～300℃	0～400℃	0～500℃	0～600℃	
4J42	41.5～42.5	余			4.4～5.6	5.4～6.6			与软玻璃、陶瓷封接
4J43	42.5～43.5	余			5.6～6.2	5.6～6.8			与软玻璃、陶瓷封接
4J45	44.5～45.5	余			6.5～7.7	6.5～7.7			与云母封接
4J54	53.5～54.5	余			10.2～11.4	10.2～11.4			精密机床基尺
4J58	57.5～58.5	余			11.73	11.92	12.07	12.28	与软玻璃封接
4J6	41.5～42.5	余		5.5/6.3	7.5～8.5	9.5～10.5			与软玻璃封接
4J28		余		27～29			10.4～11.6		与软玻璃封接
4J29	28.5～29.5	余	16.5～17.5		4.7～5.5	4.6～5.2	5.9～6.4		与硬玻璃封接
4J34	28.5～29.5	余	19.5～20.5		6.2～7.5	6.2～7.6	6.5～7.6	7.8～8.4	与 95%Al_2O_3 封接
4J36	36～37	余	5～6	Cu3～4	5.5～6.5	5.6～6.6	7.0～8.0	≤9.5	与 95%Al_2O_3 封接

王继平 2020版 @XJTU MSE

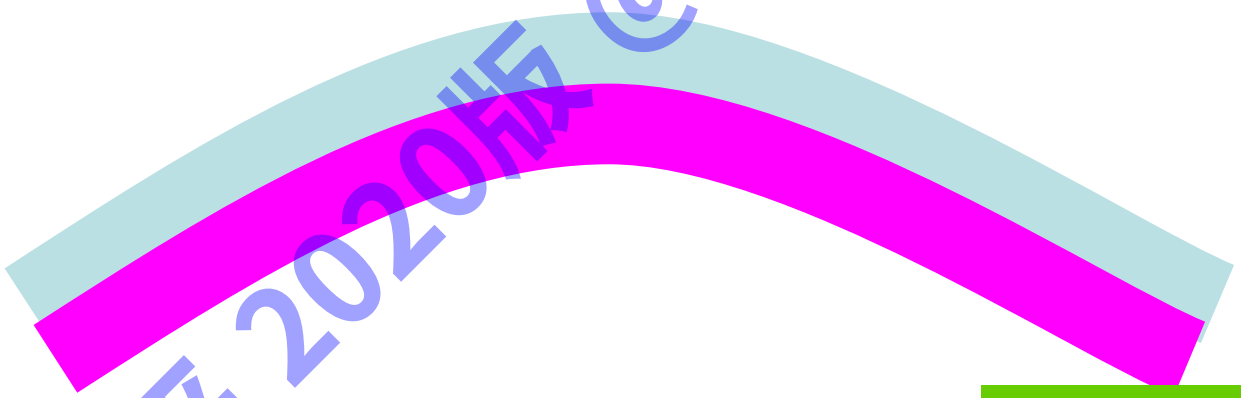
3) 热双金属材料

由膨胀系数不同的两种金属片沿层间焊合在一起的叠层复合材料

未受热

高	主动层 Mn75Ni15Cu10
低	被动层 Ni36

受热后



可作为各种测量和控制仪表的传感元件

王继平 2020版 @XJTU MSE

二、形状记忆合金

太空天线
直径数米的庞然大物

如何装在小小的登月舱送上太空？

王继平 2020版 @XJTU MSE

1 形状记忆现象 (演示实验)

(a) 原始形状 (b) 拉 直 (c) 加热后恢复

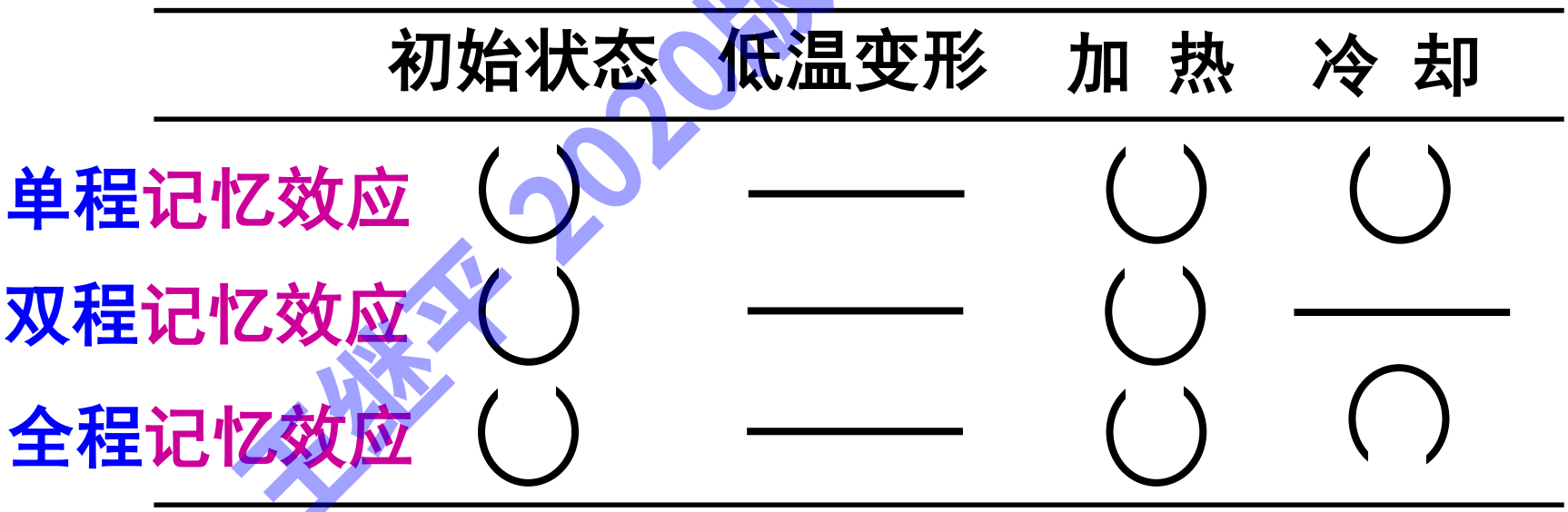
形状记忆效应简易演示实验

王继平 2020版 @XJTU MSE

2 形状记忆效应

合金处于低温相时变形，加热到临界温度(逆相变点)通过逆相变恢复其原始形状，称之为形状记忆效应

包括三种效应

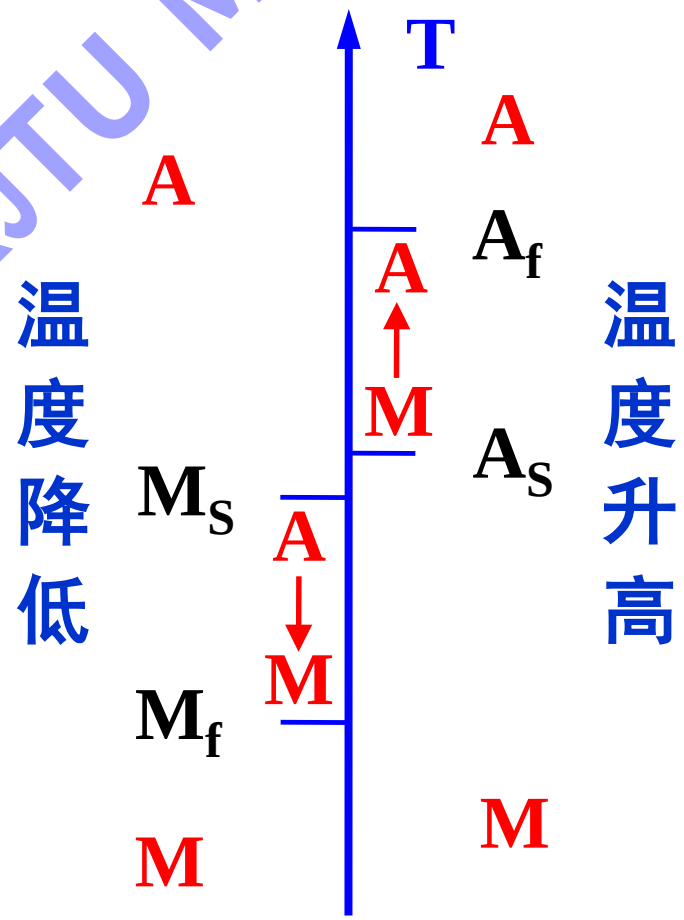


王继平 2020版 @XJTU MSE

3 形状记忆原理简介

形状记忆合金中会形成一种特殊的马氏体片，它可以随温度的降低而长大，随温度的升高而弹性缩小，这种特殊的马氏体被称为**热弹性马氏体**

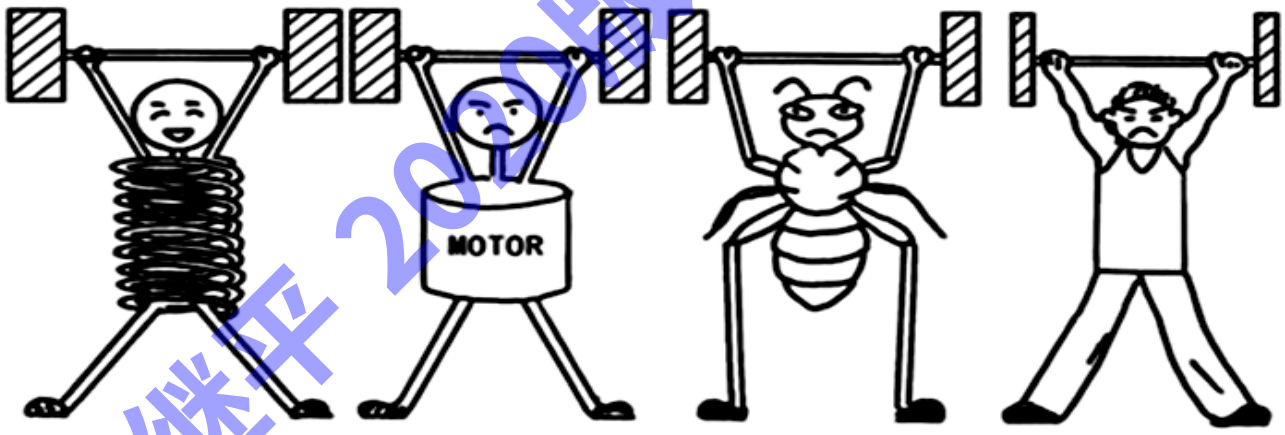
热弹性马氏体逆相变时能够完全地恢复到和相变前形状一样的母相状态



云学长 2020届 @XJTU MSE

（a）原始形状 （b）折成球形装入登月舱 （c）太阳能加热后

形状记忆合金天线



（a）记忆合金 （b）马 达 （c）蚂 蚁 （d） 人

形状记忆合金 大力士

王继平 2020版 @XJTU MSE

4 常用形状记忆合金

常用形状记忆合金
- Ti-Ni 系合金
- Cu 系合金
- Fe 系合金

1. Ti-Ni 系合金

w_{Ni}=54.08-56.06% Ti-Ni 合金 最早 实用合金，目前用量最大的形状记忆合金

具有高的抗拉强度，疲劳强度，耐蚀性，密度较小

Ti-Ni-Nb、Ti-Ni-Cu、Ti-Ni-Fe 等是新型的形状记忆合金

Ti-Ni 系合金性能优良，但成本高、难加工

王崇平 2020版 @NTU MSE

2. Cu 系合金

Cu-Zn-Al、Cu-Ni-Al

实用的 Cu 系形状记忆合金

与Ti-Ni 合金相比，Cu-Ni-Al 功能要差一些，但加工容易，成本低

3. Fe 系合金

Fe-Pt、Fe-Pd、 Fe-Ni-Co-Ti、Fe-Ni-C、Fe-Mn-Si 等系列合金

成本比 Ti-Ni 系合金及 Cu 系合金低得多，且易于加工，具有明显的竞争优势

有些高分子材料也具有形状记忆功能

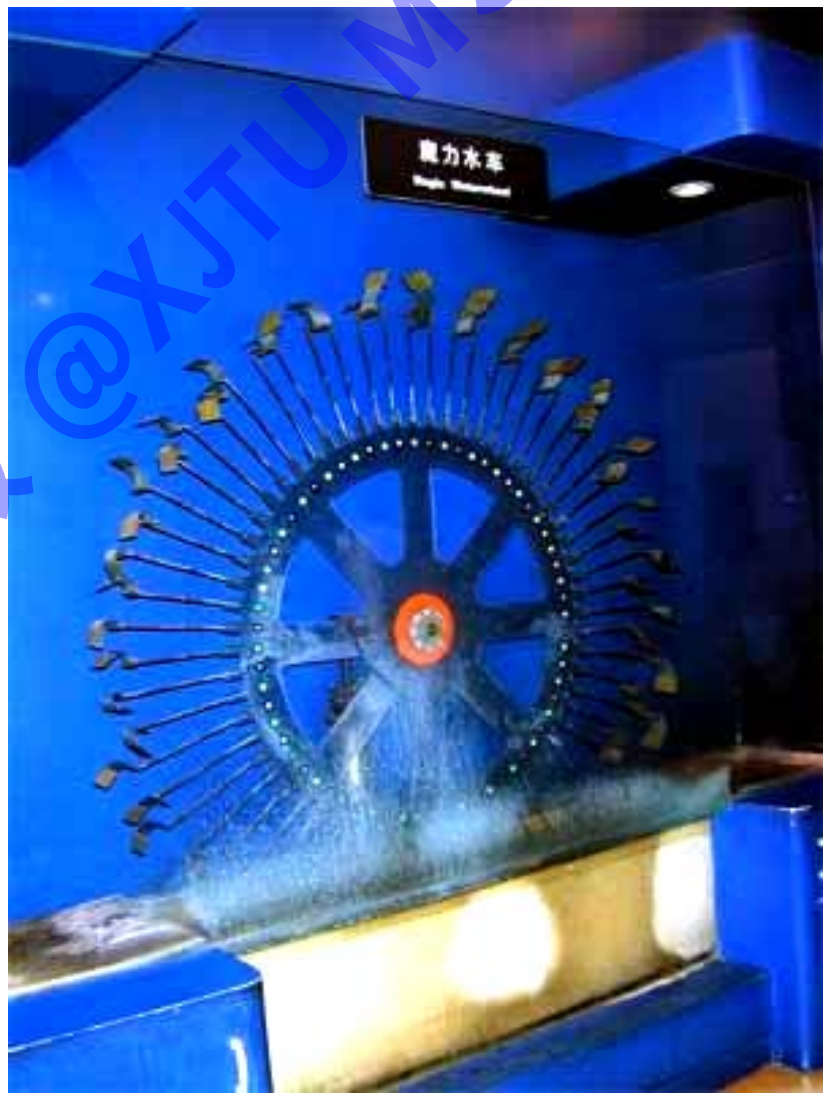
王继平 2020版 @XJTU MSE

5 形状记忆合金应用举例

“魔力水车”

中国科技馆

大轮子，无外驱动力
“永不停息”地旋转着



王继平 2020版 @XJTU MSE

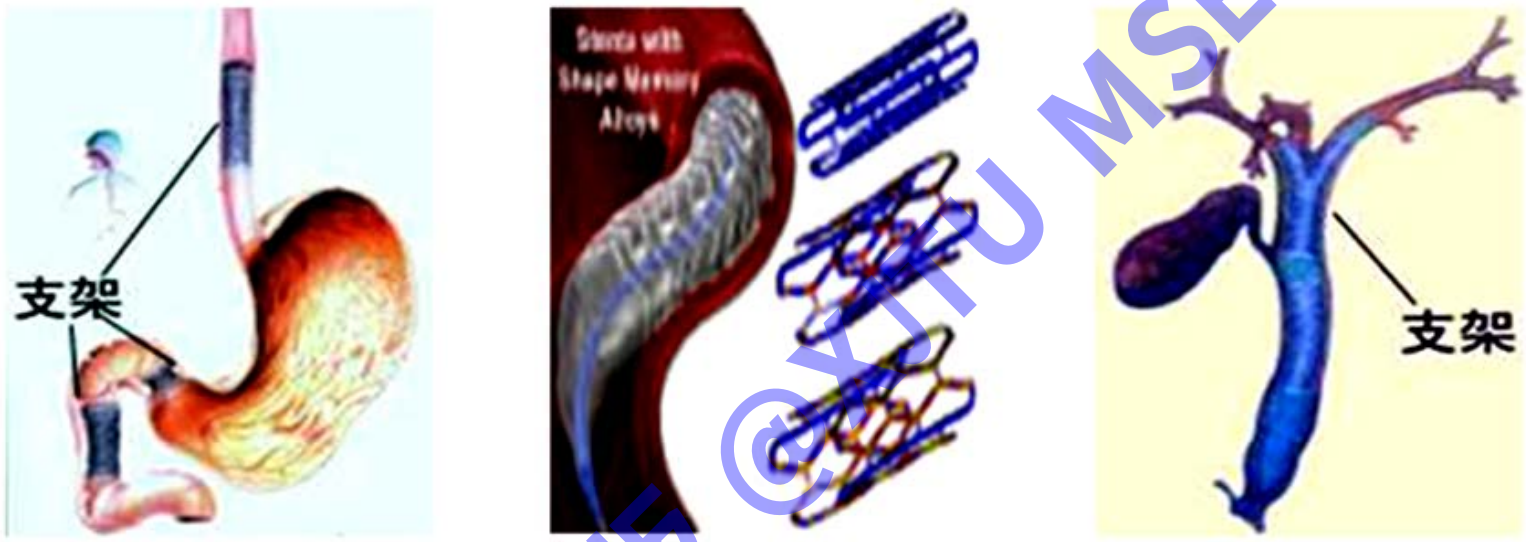
“魔力水车”的叶片是用有双程记忆功能的形状记忆合金片制作的，能记住自己两个温度时的形状

水槽里的水有60°C左右，叶片入水后，它要回到60°C温度时的形状。在形状变化的过程中，叶片对水有一个作用力，水对叶片的反作用力就使轮子旋转起来

当叶片出水冷却后，叶片会恢复到低温时的形状。叶片的形状在这两个温度之间循环变化，就使轮子自动地永不停息地旋转

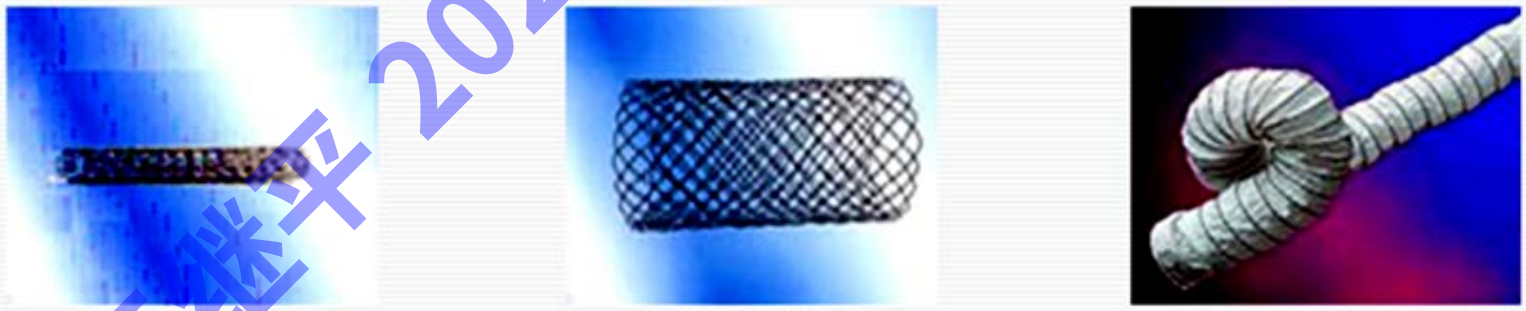
王继平 2020版 @XJTU MSE

临床医学中的应用



（a）消化道内支架 （b）血管内支架 （c）胆道内支架

腔内支架临床应用实例



（a）预压缩 （b）受热扩张后 （c）植入腔道内效果

医用腔内支架的应用原理示意

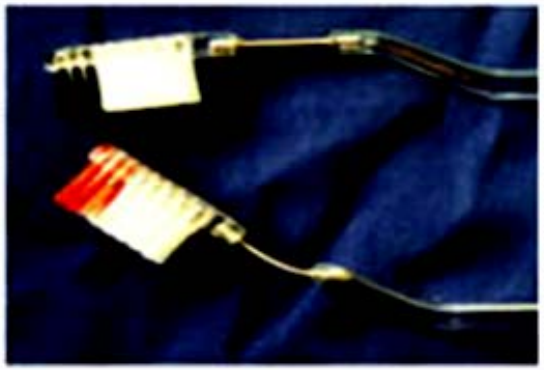
王崇平 2020版 @YJU MSE

日常生活中的应用

形状记忆合金眼镜架

（a）智能水温调节器

（b）移动电话天线

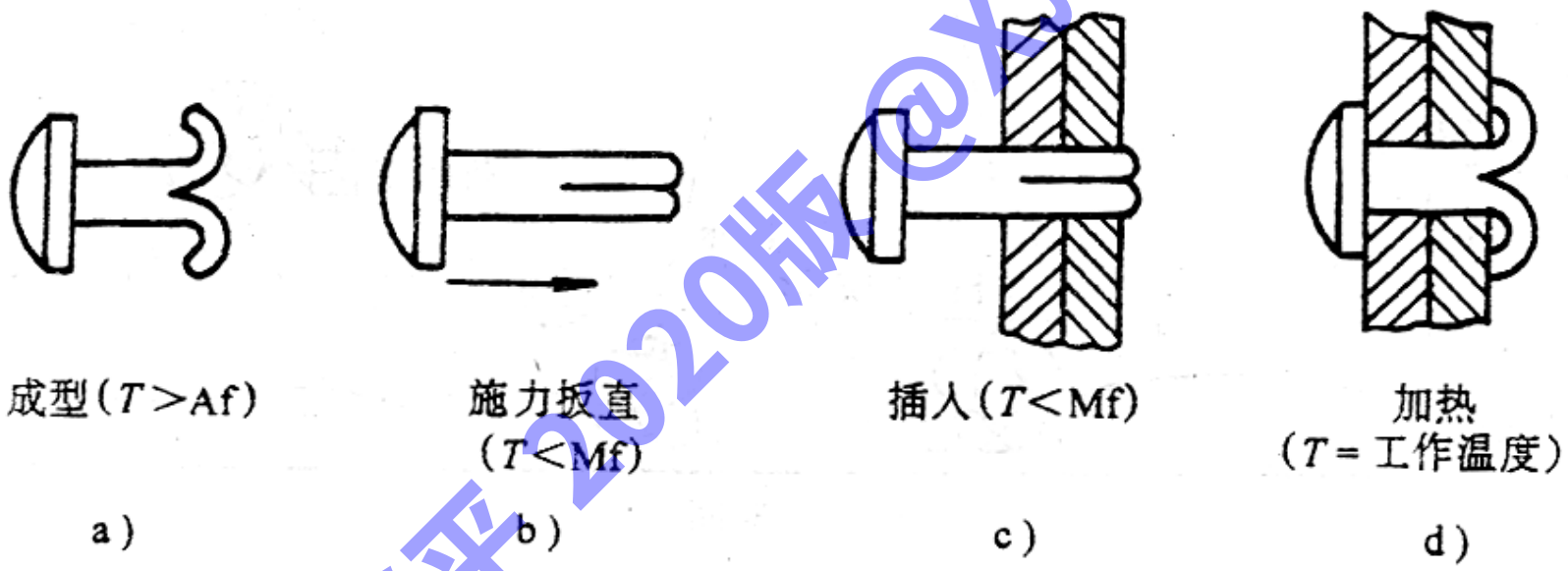


（c）牙 刷

形状记忆合金的应用实例

王继平 2020版 @XJTU MSE

怎样用形状记忆合金铆钉将两块板铆接？



记忆合金用作铆钉的工作原理图

王继平2020版@XJTU MSE

三、测温材料

热电偶–测温原件，是由两种不同材料导线连接成的回路，其感温的基本原理是热电效应

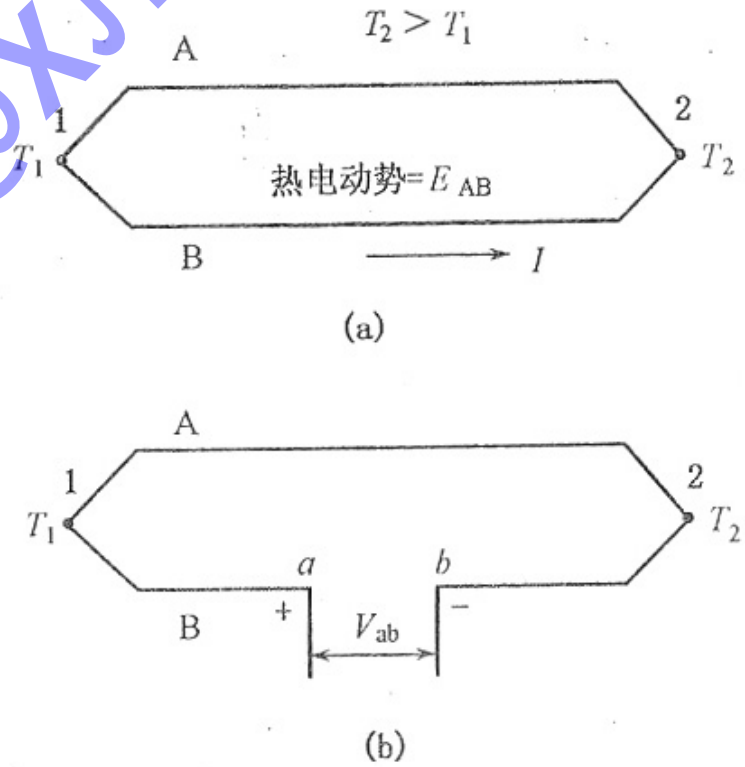
由两种不同的导体A、B

在不同的温度T_1，T_2

回路中有电流通过-热电流

回路中出现电动势E_{AB}

-珀尔贴电动势



塞贝克效应

王继平2020版 @XJTU MSE

常用热电偶材料

热电偶材料	适合温度范围
铜-康铜	-200-400℃
镍铬-镍铝	<1300℃
铂铑-铂	<1350℃ 短期可达1600 ℃
钨-铼	<2500℃ 短期可达2800 ℃
金铁	-269-0℃
低温热电偶	-270-0℃

王继平 2020版@XJTU MSE

常用热电偶材料

序号	热电偶名称或代号	正热电极材料		负极材料		热电偶材料
		代号	名义成分	代号	名义成分	
3	S 型	SP	PtRh10	SN	Pt100	GB3772—83, IEC
4	N 型	NP	NiCr14.5Si1.5	NN	NiSi45Mg0.1	ZBN05004—88, IEC
5	K 型	KP	NiCr10	KN	NiSi3	GB2614—85, IEC
6	J 型	JP	Fe	JN	NiCu55	GB4994—85, IEC
7	E 型	EP	NiCr10	EN	NiCu55	GB4993—85, IEC
8	T 型	TP	Cu100	TN	NiCu55	GB2903—82, IEC
9	镍铬－金铁	NiCr	NiCr10	AuFe	Au－0.000 7(x_B^*)	GB2904—82
10	铜－金铁	Cu	Cu100	AuFe	Au－0.000 7(x_B^*)	GB2904—82
11	钨铼 3－钨铼 25	WRe3	WRe3		WRe25	ZBN05003—88 ASTME696—84
12	钨铼 5－钨铼 26	WRe5	WRe5		WRe26	ZBN05003—88, ASTME988—84
13	钨铼 5－钨铼 20	BP5	BP5	BP20	BP20	ГОСТ3044—84
14	镍铬－考铜(XK)	HX9.5	HX9.5	МНМЦ43－0.5	CuNi43Mn0.5	ГОСТ3044—84, ГОСТ492—73
15	HK－CA	HK	Ni17Co2Al2Mn1Si	CA	Ni35Al1.5Mn1Si	ГОСТ6071—51, ГОСТ6072—51

* x_B——摩尔分数。

王继平 2020版 @XJTU MSE