

# 真空理论简介

## 引言

镍基合金以 Ni 含量超过 30wt%之合金称之，由于其具有超群的高温机械强度、耐蚀性质，以及特殊磁性、膨胀、电阻、导热等物理性质，为区别特殊钢材料而被称为超合金（Superalloy）。根据国际市场镍基合金的综合性能品位差别，将镍基合金区分为超级镍基合金与普通镍基合金。超级镍基合金是指综合性能具有世界一流水平的镍基合金。

通过真空冶金技术是实现高性能合金制备的关键工序。为全面制备出高寿命合金攻克关键技术环节。本文简单介绍真空相关理论为真空能量的利用探讨抛砖引玉。

## 理论与技术导读

### ① 麦克斯韦-玻尔兹曼分布

麦克斯韦-玻尔兹曼分布是一个概率分布，在物理学和化学中有应用。最常见的应用是统计力学的领域。任何（宏观）物理系统的温度都是组成该系统的分子和原子的运动的结果。这些粒子有一个不同速度的范围，而任何单个粒子的速度都因与其它粒子的碰撞而不断变化。然而，对于大量粒子来说，处于一个特定的速度范围的粒子所占的比例却几乎不变，如果系统处于或接近处于平衡。麦克斯韦-玻尔兹曼分布具体说明了这个比例，对于任何速度范围，作为系统的温度的函数。它以詹姆斯·克拉克·麦克斯韦和路德维希·玻尔兹曼命名。

### ② 玻色-爱因斯坦凝聚态

常温下的气体原子行为就象台球一样，原子之间以及与器壁之间互相碰撞，其相互作用遵从经典力学定律；低温的原子运动，其相互作用则遵从量子力学定律，由德布洛意波来描述其运动，此时的德布洛意波波长 $\lambda_{db}$  小于原子之间的距离  $d$ ，其运动由量子属性自旋量子数来决定。自旋量子数为整数的粒子为玻色子，而自旋量子数为

半整数的粒子为费米子。玻色子具有整体特性，在低温时集聚到能量最低的同—量子态(基态)；而费米子具有互相排斥的特性，它们不能占据同一量子态，因此其它的费米子就得占据能量较高的量子态，原子中的电子就是典型的费米子。早在 1924 年玻色和爱因斯坦就从理论上预言存在另外的一种物质状态——玻色爱因斯坦凝聚态，即当温度足够低、原子的运动速度足够慢时，它们将集聚到能量最低的同—量子态。此时，所有的原子就象一个原子一样，具有完全相同的物理性质。

根据量子力学中的德布洛意关系， $\lambda_{db}=h/p$ 。粒子的运动速度越慢(温度越低)，其物质波的波长就越长。当温度足够低时，原子的德布洛意波长与原子之间的距离在同一量级上，此时，物质波之间通过相互作用而达到完全相同的状态，其性质由一个原子的波函数即可描述；当温度为绝对零度时，热运动现象就消失了，原子处于理想的玻色爱因斯坦凝聚态。

### ③ 绝对零度 (absolute zero)

物体的温度实际上就是原子在物体内部的运动。当我们感到一个物体比较热的时候，就意味着它的原子在快速运动；当我们感到一个物体比较冷的时候，则意味着其内部的原子运动速度较慢。我们的身体是通过热或冷来感觉这种运动的，而物理学家则是通过温标或称开尔文温标来测量温度的。19 世纪中期，第一代开尔文男爵(开尔文：来源于凯尔特语，含义是“斗士+朋友”(warrior+friend))英国上议院科学家威廉·汤姆森(他通常被称为开尔文男爵，这个头衔来自于流经他在苏格兰格拉斯哥大学实验室的开尔文河)定义了绝对零度(absolute zero)是热力学的最低温度，是开尔文温标定义的零点。是粒子动能低到量子力学最低点时物质的温度。绝对零度是仅存于理论的下限值，其热力学温标写成 K，等于摄氏温标零下 273.15 度

(-273.15℃)。在此规定下没有物质的温度能低于绝对零度。气体的绝对温度与它所包含粒子的平均能量有关，温度越高，平均能量越高，而绝对零度是气体的所有粒子能量都为零的状态，这是一种理想的理论状态。到了上世纪 50 年代，物理学家在

研究中遇到了更多反常的物质系统，发现这一理论并不正确。

物质的温度取决于其内原子、分子等粒子的动能。根据麦克斯韦-玻尔兹曼分布，粒子动能越高，物质温度就越高。理论上，若粒子动能低到量子力学的最低点时，物质即达到绝对零度，不能再低。然而，根据热力学第三定律，绝对零度永远无法达到，只可无限逼近。因为任何空间必然存有能量和热量，也不断进行相互转换而不消失。所以绝对零度是不存在的，除非该空间自始即无任何能量热量。在此一空间，所有物质完全没有粒子振动，其总体积并且为零。

有关物质接近绝对零度时的行为，可初步观察热德布洛伊波长（Thermal de Broglie wavelength）与绝对温度的平方根成反比，因此当温度很低的时候，粒子物质波的波长很长，粒子与粒子之间的物质波有很大的重叠，因此量子力学的效应就会变得很明显。著名的现象之一就是玻色-爱因斯坦凝聚，玻色-爱因斯坦凝聚在 1995 年首次被实验证实。绝对零度表示那样一种温度，在此温度下，构成物质的所有分子和原子均停止运动。所谓运动，系指所有空间、机械、分子以及振动等运动。还包括某些形式的电子运动，然而它并不包括量子力学概念中的“零点运动”。除非瓦解运动粒子的集聚系统，否则就不能停止这种运动。从这一定义的性质来看，绝对零度是不可能任何实验中达到的。

#### ④ 海森堡不确定性原理

一个微观粒子的某些物理量（如位置和动量，或方位角与动量矩，还有时间和能量等），不可能同时具有确定的数值，其中一个量越确定，另一个量的不确定程度就越大。测量一对共轭量的误差（标准差）的乘积必然大于常数  $h/4\pi$ （ $h$  是普朗克常数）是海森堡在 1927 年首先提出的，它反映了微观粒子运动的基本规律——以共轭量为自变量的概率幅函数（波函数）构成傅立叶变换对；以及量子力学的基本关系。霍金对该定律的论断：“妄想通过物理定律推算未来事件的努力是可笑的，从计算机科学来看，这种推算是一种无限递归，终止递归的条件是得到未来某一时刻的状态，但

算法需要知道自己得出结果后计算者对环境的影响（必须考虑）因而陷入递归，因为终止条件是无法达成的，故算法无法完成。”

### ⑤ 卡西米尔效应

大多数人认为，真空是空荡荡的。但是，根据量子电动力学（一门在非常小的规模上描述宇宙行为的理论），没有比这种观点更加荒谬的了。实际上，真空中到处充满着称作“零点能”的电磁能，这正是麦克莱希望加以利用的能量。“零点能”中的“零”指的是，如果把宇宙温度降至绝对零度（宇宙可能的最低能态），部分能量就可能保留下来。实际上，这种能量是相当多的。物理学家对究竟有多少能量仍存在分歧，但麦克莱已经计算出，大小相当于一个质子的真空区所含的能量可能与整个宇宙中所有物质所含的能量一样多。卡西米尔效应(Casimir effect)就是在真空中两片平行的平坦金属板之间的吸引压力。这种压力是由平板之间空间中的虚粒子(virtual particle)的数目比正常数目少造成的。它是由荷兰物理学家亨德里克·卡西米尔(Hendrik Casimir)于1948年提出的一种现象，此效应随后被侦测到，并以卡西米尔为名以纪念他。

### ⑥ 特斯拉效应

1935年，特斯拉（一生拥有交流电、无线电、无线能量传输、X光设备、电动机、变压器、遥控技术等1000多项发明专利的天才科学家）在其实验室打了一个深井，并在井内下了钢套管。然后，他将井口堵塞好，并向井内输入不同频率的振动。奇妙的是，在特定的频率时，地面就会突然发生强烈的振动，并造成了周围房屋的倒塌。当时的一些杂志评论说：“特斯拉利用一次人工诱发的地震，几乎将纽约夷为了平地”。这就是著名的特斯拉实验。这种小输入强输出的超级传输效应称为特斯拉效应。

### ⑦ 挠场机制

挠场(torsion field)又称自旋场(spin field)或扭场(axion field)是物体自旋角动量扭曲时空坐标所产生的场。爱因斯坦1915年提出《广义相对论》时，并未考

考虑物体的自旋效应。1920年代，卡坦(Cartan)首先在广义相对论中考虑物体自旋导致时空的扭曲，因而产生挠场。在广义相对论中，爱因斯坦假设挠场不存在，但德国大数学家 Weyl 在 1930 年代指出数学上并不能将它排除。挠场是万有引力、电磁力、弱作用力、强作用力之外的另一种力，为第五种力。自然界各个层次都存在涡旋现象，从基本粒子、原子结构、等离子体收缩、超导、超流、龙卷风、类星体、黑洞等等；而且与涡旋相关的现象都有着许多未知的物理过程，例如最近发现超导体中的涡旋也具有记忆效应，因此，很自然会想到应当存在与这种涡旋相关的场的存在。许多自然现象有着标度不变性，电解过程尖端效应产生的核过程，可以用天文物理观察到的类星体涡旋模型来解释。依此类推，类星体涡旋模型也可以用放电现象及由此产生的异常高能带电粒子的现象加以解释。

### ⑧ 零点能

现代科学家认为真空并不意味着一无所有，真空是由正电子和负电子旋转波包组成的系统。而与这种现象伴生的能量，称为零点能，也就是说，即使在绝对零度，这种真空活性仍然保持着。狄拉克从量子场论对真空态进行了描述，把真空比喻为起伏不定的能量之海。J. Wheeler 估算出真空的能量密度可高达  $10^{13}\text{J}/\text{cm}^3$  如果零点能可以提取，无疑将是人类所能够利用的最佳能源了。它是洁净、廉价的能源，是大自然给予人类的“免费的午餐”。宇宙中所有的物质都来源于零点电磁涨落能，我们身上的每一个物质粒子不停地与真空零点能发生能量交换，也就是，没有任何一个物理体系称得上是孤立体系的。根据物理真空的性质，我们可以从空间任何一点提取零点能，并转换成我们所需要的能量形式。原子中电子绕核转；太阳系中，行星绕太阳转，几十亿年永不停息；超导和超流现象，这些都是大自然给我们的关于能源的启示。

### ⑨ 真空不空

首先我们要明确什么叫空，什么叫不空。目前科学界的观点是以是否存在物质来判断的，存在物质非空，不存在物质为真空，那么什么叫做物质，用爱因斯坦的理论，



物质也是能量的一种，那么也就是说有形的东西其实是由无形的东西构成的。除此以外，我们宇宙中除了的物质还有规则，不同的物质，都在遵从一定的规则运行，规则在哪里，他弥漫在整个空间之中。

工业和真空科学上的真空指的是，当容器中的压力低于大气压力时，把低于大气压力的部分叫做真空，而容器内的压力叫绝对压力；另一种说法是，凡压力比大气压力低的容器里的空间都称做真空。工业真空有程度上的区别：当容器内没有压力即绝对压力等于零时，叫做完全真空；其余叫做不完全真空。而狭义相对论等狄拉克之前的物理理论中的真空则特指不存在任何物质的空间状态，对应于工业里的完全真空。按现代物理量子场论的观点，真空不空，其中包含着极为丰富的物理内容。狭义相对论等理论中的真空只是普朗克常数趋于 0 时的近似情形。

支持理论 1. 绝对零度不可达到，真空也不例外，所以真空是有能量的

支持理论 2. 海森堡不确定性原理表明，我们不可能同时精确地测出一对共轭量，所以，可以“空”，不能“无”。因此，在真空中，粒子不停地以虚粒子、虚反粒子对的形式产生，而又互相湮灭，在这个过程中，总的能量保持不变。

支持理论 3、一个瑞典物理学家小组成功地实现了真正意义上的“无中生有”——首次从真空中创造出闪光。该小组让一个特殊组件在磁场中以  $1/20$  倍光速移动，并通过改变磁场的方向导致该组件出现“震动”。这样做的结果是从真空中产生了一束粒子流——这完全符合理论预计。这一不寻常的发现被认为是物理学的一项重大进展。物理真空是一个强烈涨落的动力学体系，如果能通过有效的途径提取出物理真空中的能量，它确实可以是一种取之不尽用之不竭的干净的能源。

爱因斯坦在用场论观点研究引力现象时，已经认识到空无一物的真空观念是有问题的，他曾提出真空是引力场的某种特殊状态的想法。首先给予真空崭新物理内容的是 P. A. M. 狄拉克。狄拉克于 1930 年为了摆脱狄拉克方程负能解的困境，提出真空是充满了负能态的电子海。当负能态的电子吸收了足够的能量跃迁到正能态成为普通电子时，电子海中才能留下可观测的空穴，即正电子。从体系的能量角度考查，这种情况比只有电子海的真空状态要高，因此真空就是能量最低的状态。从现代量子场论的

观点看，每一种粒子对应于一种量子场，粒子就是对应的场量子化的场量子。当空间存在某种粒子时，表明那种量子场处于激发态；反之不存在粒子时，就意味着场处于基态。因此，真空是没有任何场量子被激发的状态，或者说真空是量子场系统的基态。

#### ⑩ 镍基合金的晶体结构

镍基合金的晶体结构主要为高温稳定之面心立方体（FCC）奥氏体结构，为了提高其耐热性质，添加了大量的合金元素，这些元素不仅形成一次相（液—固态形成相）还会形成各种二次相（固—固态形成相），提升了镍基合金之高温强度。二次相的种类包含各种形式之 MC、M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>、M<sub>6</sub>C、M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 碳化物，主要分布在晶界以及如  $\gamma'$  或  $\gamma''$  等结构的金属化合物。 $\gamma'$  与  $\gamma''$  相之化学组成大致是 Ni<sub>3</sub>(Al,Ti) 或 Ni<sub>3</sub>Nb。此类有序相在高温下非常稳定，经由一次相和二次相的强化可得到优良的潜变破坏强度。典型镍基合金之微组织如图 1：

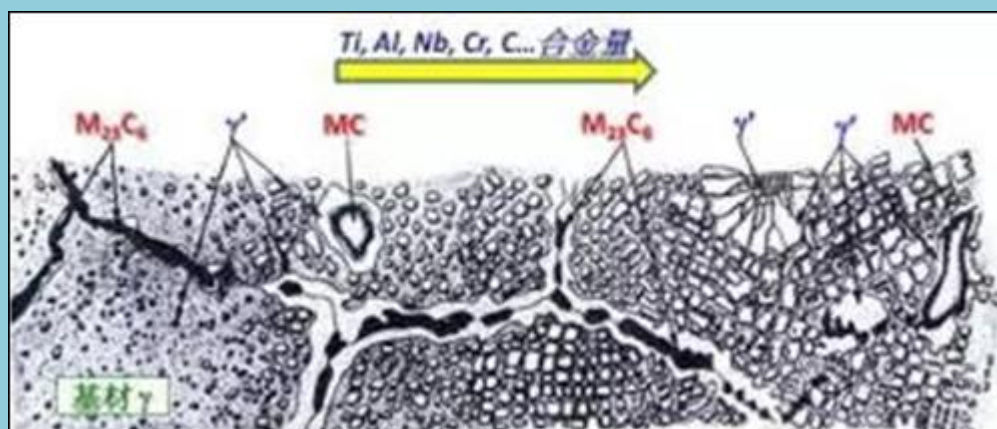


图 1 典型镍基合金之微组织

随着合金化程度的提高，其显微组织的变化有如下趋势： $\gamma'$  相数量逐渐增多，尺寸逐渐增大，并由球状变成立方体，同一合金中出现尺寸和形态不相同的  $\gamma'$  相。此外，在铸造合金中还出现在凝固过程中形成的  $\gamma + \gamma'$  共晶，晶界析出不连续的颗粒状碳化物并被  $\gamma'$  相薄膜所包围。这些微组织的变化改善了合金的性能。此外，现代镍基合金的化学成份十分复杂，合金的饱和度很高，因此要求对每个合金元素（尤其是主要强化元素）的含量严加控制，否则会在使用过程中容易析出其他有害的拓扑相，如  $\sigma$ 、Laves 相等，将损害合金的强度和韧性。

#### 11 潜变

潜变 (Creep) 也称蠕变, 是在应力影响下固体材料缓慢永久性的移动或者变形的趋势。它的发生是低于材料屈服强度的应力长时间作用的结果。当材料长时间处于加热当中或者在熔点附近时, 蠕变会更加剧烈。蠕变常常随着温度升高而加剧。不像脆性断裂, 蠕变变形并不会在应力作用下突然断裂。而是, 应变会在长时间应力作用下积累。蠕变变形是一种“时间依赖”的变形。这种变形的速率与材料性质、加载时间、加载温度和加载结构应力有关。取决于加载应力和它的持续时间, 这种变形可能变得很大, 以至于一些部件可能不再发挥它的作用, 例如, 涡轮叶片的蠕变将会使叶片接触到外套, 导致叶片的失效。蠕变常常是工程上和冶金上评价在高应力或高温下工作的部件所需要关注的。

## 12 金属疲劳

金属疲劳是指材料、零构件在循环应力或循环应变作用下, 在一处或几处逐渐产生局部永久性累积损伤, 经一定循环次数后产生裂纹或突然发生完全断裂的过程。当材料和结构受到多次重复变化的载荷作用后, 应力值虽然始终没有超过材料的强度极限, 甚至比弹性极限还低的情况下就可能发生破坏, 这种在交变载荷重复作用下材料和结构的破坏现象, 就叫做金属的疲劳破坏。金属疲劳英文词条名: fatigue of metal。金属疲劳是指一种在交变应力作用下, 金属材料发生破坏的现象。机械零件在交变压力作用下, 经过一段时间后, 在局部高应力区形成微小裂纹, 再由微小裂纹逐渐扩展以致断裂。疲劳破坏具有在时间上的突发性, 在位置上的局部性及对环境和缺陷的敏感性等特点, 故疲劳破坏常不易被及时发现且易于造成事故。应力幅值、平均应力大小和循环次数是影响金属疲劳的三个主要因素。

金属内部结构并不均匀, 从而造成应力传递的不平衡, 有的地方会成为应力集中区。与此同时, 金属内部的缺陷处还存在许多微小的裂纹。在力的持续作用下, 裂纹会越来越大, 材料中能够传递应力部分越来越少, 直至剩余部分不能继续传递负载时, 金属构件就会全部毁坏。



## 13 金属腐蚀原理

金属材料受周围介质的作用而损坏，称为金属腐蚀 (Metallic Corrosion)。金属的锈蚀是最常见的腐蚀形态。腐蚀时，在金属的界面上发生了化学或电化学多相反应，使金属转入氧化（离子）状态。这会显著降低金属材料的强度、塑性、韧性等力学性能，破坏金属构件的几何形状，增加零件间的磨损，恶化电学和光学等物理性能，缩短设备的使用寿命。

### 13.1 点蚀 (Pitting Corrosion)

由于金属材料中存在缺陷、杂质和溶质等的不均一性，当介质中含有某些活性阴离子（如  $\text{Cl}^-$ ）时，这些活性阴离子首先被吸附在金属表面某些点上，从而使金属表面钝化膜发生破坏。一旦这层钝化膜被破坏又缺乏自钝化能力时，金属表面就发生腐蚀。这是因为在金属表面缺陷处易漏出活性金属，使其呈活化状态，而钝化膜处仍为钝态，这样就形成了活性—钝性腐蚀电池，由于阳极面积比阴极面积小得多，阳极电流密度很大，所以腐蚀往深处发展，金属表面很快就被腐蚀成小孔，这种现象被称为点蚀。

### 13.2 缝隙腐蚀 (Crevice Corrosion)

在电解液中，金属与金属或金属与非金属表面之间构成狭窄的缝隙，缝隙内有关物质的移动受到了阻滞，形成浓差电池，从而产生局部腐蚀，这种腐蚀被称为缝隙腐蚀。缝隙腐蚀常发生在设备中法兰的连接处，垫圈、衬板、缠绕与金属重叠处。

### 13.3 应力腐蚀 (Stress Corrosion)

材料在特定的腐蚀介质中和在静拉伸应力（包括外加载荷、热应力、冷加工、热加工、焊接等所引起的残余应力，以及裂缝锈蚀产物的楔入应力等）下，所出现的低于强度极限的脆性开裂现象，称为应力腐蚀开裂。应力腐蚀开裂是先金属的腐蚀敏感部位形成微小凹坑，产生细长的裂缝，且裂缝扩展很快，能在短时间内发生严重的破坏。应力腐蚀开裂在石油、化工腐蚀失效类型中所占比例最高，可达 50%。

#### 13.4 腐蚀疲劳 (Corrosion Fatigue)

由于腐蚀介质而引起的抗腐蚀疲劳性能的降低,称为腐蚀疲劳。疲劳破坏的应力值低于屈服点,在一定的临界循环应力值(疲劳极限或称疲劳寿命)以上时,才会发生疲劳破坏。而腐蚀疲劳却可能在很低的应力条件下就发生破断,因而它是很危险的。

影响材料腐蚀疲劳的因素主要有应力交变速度、介质温度、介质成分、材料尺寸、加工和热处理等。增加载荷循环速度、降低介质的PH值或升高介质的温度,都会使腐蚀疲劳强度下降。材料表面的损伤或较低的粗糙度所产生的应力集中,会使疲劳极限下降,从而也会降低疲劳强度。

#### 13.5 空蚀 (cavitation; cavitation erosion)

又称气蚀,穴蚀。流体在高速流动和压力变化条件下,与流体接触的金属表面上发生洞穴状腐蚀破坏的现象。空穴在高压区被压破并产生冲击压力,破坏金属表面上的保护膜,而使腐蚀速度加快。空蚀的特征是先金属表面形成许多细小的麻点,然后逐渐扩大成洞穴。气蚀是在气泡形成过程中产生,而气泡溃灭时不产生气蚀。据报道,采用高速摄影技术观察气泡形成过程。通过分析气泡产生的数量( $3 \times 10^7$ 个/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ )和真正对材料表面产生气蚀破坏的气泡数量( $1/30000$ )及气蚀冲击间隔(100min)推断,过流部件表面金属材料的破坏主要是由于一种强大猛烈的冲击波,而不是由金属材料疲劳破坏造成。

### 14 磁性合金

呈现铁磁性的精密合金材料。磁性合金在外加磁场中,可表现出三种情况:(1)不被磁场吸引的,叫反磁性材料;(2)微弱地被磁场所吸引的物质,叫顺磁性材料;(3)被磁场强烈地吸引的物质,称铁磁性材料,其磁性随外磁场的加强而急剧增高,并在外磁场移走后,仍能保留磁性。物质的磁性与其内部电子结构有关。反磁性金属的原子中电子都已成对,正、反自旋的电子数目相等,由电子自旋而产生的磁矩互相抵消,因此原子磁矩为零,故不为外磁场所吸引。顺磁性金属原子中,正反自旋的电

子数目不等，原子的磁矩不为零。由于无规则的热运动，原子磁矩的方向各异。放入磁场时，原子磁矩沿磁场方向取向而略有偏转，表现出微弱的磁化，除去外磁场，原子磁矩又混乱分布，磁化消失。磁性参数和技术磁性是衡量磁性合金性能优劣的技术参数，如饱和磁化强度  $M_s$ （饱和磁感应强度  $B_s$ ）、剩余磁化强度  $M_r$ （剩余磁感应强度  $B_r$ ）、矫顽力、各种磁导率、矩形比、磁滞损耗等等都反映在合金的磁化曲线和磁滞回线上。不同的磁性合金有不同的磁化曲线和磁滞回线，适用于不同器件的设计应用。这些是磁性合金的技术磁性。它与外界条件的影响和磁性状态的改变密切相关，涉及到合金内部磁畴的成因和结构，以及磁畴在各种条件（如外磁场、应力、温度等）下的运动和变化。

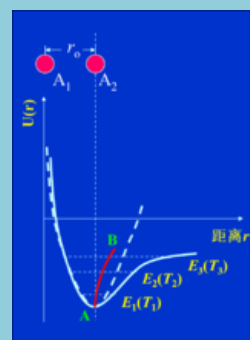
## 15 软磁

矫顽力（磁性材料在饱和磁化后，当外磁场退回到零时其磁感应强度  $B$  并不退到零，只有在原磁化场相反方向加上一定大小的磁场才能使磁感应强度退回到零，该磁场称为矫顽磁场，又称矫顽力  $H_c$ 。矫顽力的大小受晶粒尺寸变化的影响最为强烈。对于大致球形的晶粒，矫顽力随晶粒尺寸的减小而增加，达到一最大值后，随着晶粒的进一步减小矫顽力反而下降。同时，因为矫顽力来源于不可逆磁化过程，因此造成不可逆磁化机理的主要因素是材料中存在磁各向异性（包含磁晶、感生和应力等各向异性）以及杂质、气孔、缺陷等因素也会影响矫顽力的大小。） $H_c < 1\text{kA/m}$  的磁性合金，其特点是矫顽力低、磁导率（线圈流过电流后、产生磁通的阻力、或者是其在磁场中导通磁力线的能力磁导率  $\mu$  等于磁介质中磁感应强度  $B$  与磁场强度  $H$  之比，即  $\mu = dB / dH$ 。）高和铁心损耗低，在外磁场作用下极易磁化；当外磁场去除后，磁性随之消失。此类合金广泛用于各种变压器、电机、继电器、电磁铁、磁记录、磁屏蔽及通信工程、遥测遥感系统和在仪器仪表中作为磁性元器件。由于应用中对磁性合金的要求不同，因此发展成多种合金。若按组成化学成分可分为工业纯铁、硅钢、铁镍合金、铁钴合金、铁铝和铁硅铝合金等。若按使用特性可分为高起始磁导率合金、高磁感合金、高

导磁合金、高矩形比合金、恒导磁合金、耐蚀软磁合金和温度补偿合金等。由于软磁合金性能的多样性，决定了影响其性能的因素的多样性。主要影响因素有：化学成分、杂质、应力及其分布、组织结构、晶体取向、有序转变，磁退火等。例如合金的饱和磁化强度、居里温度、磁致伸缩系数及电阻率和耐蚀性等特性与化学成分密切相关。合金中的杂质、特别是碳、氮、氧和氢等形成间隙固溶体的元素对软磁性能有显著损害，因为当形成间隙原子时，由晶格畸变引起的微观应力分布，直接钉扎畴壁位移，从而使矫顽力和磁导率显著恶化，应尽量去除。但在一定条件下，某些杂质也会起到有利作用，例如少量的间隙杂质元素可提高合金的电阻率和力学性能。又如细小的AlN、MnS和微量的氧分别有利于硅钢的二次再结晶的发展和控制铁镍合金的晶粒度。

## 16 金属热膨胀

金属在温度升高时，其体积增大，温度降低时体积缩小。热膨胀与温度、热容、结合能以及熔点等物理性能有关。影响材料膨胀性能的主要因素为相变、材料成分与组织、各异性的影响。其本质是金属原子势能曲线不是严格对称的抛物线，即势能随原子间距的减小，比随原子间距的增加而增加得迅速。由于原子的能量随温度增加而增加，结果：原子振动的平均位置随温度升高沿AB曲线变化，温度越高，平均位置移得越远，膨胀越大。



- ✓ 格律乃森定律：热膨胀系数与定容比热容成正比，它们有相似温度依赖关系，在低温下随温度升高急剧增大，而到高温则趋于平缓。
- ✓ 熔点较高的金属具有较低的膨胀系数原子间的结合力强，势能曲线深而狭窄，升高同样的温度，质点振幅增加的较少，热膨胀系数小。
- ✓ 固溶体的膨胀系数取决于溶剂基体和溶质的膨胀系数以及它们的相对含量。当溶质的膨胀系数高于溶剂时，将增大膨胀系数。当溶质的膨胀系数低于溶剂时，将减小膨胀系数。组元之间形成无限固溶体时，任意成



分固溶体的膨胀系数将处于两组元膨胀系数之间。

- ✓ 固体结构疏松，内部空隙较多，当温度升高，原子振幅加大，原子间距离增加时，部分的被结构内部空隙所容纳，宏观膨胀就小。
- ✓ 复合体中有多晶转变组分时，因多晶转化的体积不均匀变化，导致膨胀系数的异常变化。复合体内的微裂纹可引起热膨胀的滞后现象，尤其是大晶粒样品。结构对称性较低的单晶体，其膨胀系数具有各向异性，不同的晶向有不同的线膨胀系数。一般来说，弹性模量高的方向将有较小的膨胀系数，反之亦然。多晶材料往往存在微晶的择优取向，从而在一定程度上具有晶体的各向异性。

## 17 电磁感应原理

电磁感应 (Electromagnetic induction) 是指放在变化磁通量中的导体，会产生感应电动势，若将此导体闭合成一回路，则该电动势会驱使电子流动，形成感应电流。构成物质的基本单元是原子，原子由电子和原子核构成，核又由质子和中子构成，电子带负电，质子带正电，是正、负电荷的基本单元，中子不带电。所谓物体不带电就是电子数与质子数相等，物体带电则是这种平衡的破坏。在自然界中不存在脱离物质而单独存在的电荷。在一个孤立系统中，不管发生了什么变化，电子、质子的总数不变，只是组合方式或所在位置有所变化，因而电荷必定守恒。无论在微观粒子，还是在天体都存在质量旋转，包括自转和公转。“电荷”和“磁荷”是质量旋转引起的物理效应，其中电现象是旋转引起时空形变效应，产生电场磁现象是时空形变旋转效应。电场和磁场反过来影响质量旋转，保持质量旋转稳定性。确切地说，电场、磁场和质量旋转是相辅相成的，也就说质量旋转和电场、磁场是同一存在两个方面。

## 18 涡流

在一根导体外面绕上线圈，并让线圈通入交变电流，那么线圈就产生交变磁场。由于线圈中间的导体在圆周方向是可以等效成一圈圈的闭合电路，闭合电路中的磁通

量在不断发生改变，所以在导体的圆周方向会产生感应电动势和感应电流，电流的方向沿导体的圆周方向转圈，就像一圈圈的漩涡，所以这种在整块导体内部发生电磁感应而产生感应电流的现象称为涡流现象。

交流的磁场在金属内感应的涡流能产生热效应，这种加热效率高，达到 50~90%；加热速度快；用不同频率的交流可得到不同的加热深度，这是因为涡流在金属内不是均匀分布的，越靠近金属表面层电流越强，频率越高这种现象越显著，称为“趋肤效应”。工业上把感应加热依频率分为四种：工频（50 赫）；中频（0.5~8 千赫）；超音频（20~60 千赫）；高频（60~600 千赫）。工频交流直接由配电变压器提供；中频交变电流由三相电动机带动中频发电机或用可控硅逆变器产生；超音频和高频交流由大功率电子管振荡器产生。

无心式感应熔炉的用途是熔炼铸铁、钢、合金钢和铜、铝等有色金属。冶炼锅内装入被冶炼的金属，让交变电流通过线圈，被冶炼的金属中就产生很强的涡流，从而产生大量的热使金属熔化。所用交流的频率要随坩锅能容纳的金属质量多少来选择，以取得最好的效果。例如：5 千克的用 20 千赫，100 千克的用 2.5 千赫，5 吨的用 1 千赫以至 50 千赫。

## 19 饱和蒸汽压

在密闭条件中，在一定温度下，与固体或液体处于相平衡的蒸气所具有的压强称为饱和蒸气压。同一物质在不同温度下有不同的饱和蒸气压，并随着温度的升高而增大。根据不同元素的饱和蒸气压不同，采用减压真空蒸馏使金属元素分离。

## 20 表面张力

液体表面任意二相邻部分之间垂直于它们的单位长度分界线相互作用的拉力。表面张力的形成同处在液体表面薄层内的分子的特殊受力状态密切相关。表面张力的存在形成了一系列日常生活中可以观察到的特殊现象。例如：截面非常小的细管内的毛细现象、球形液滴现象与涟波现象等。凡作用于液体表面，使液体表面积缩小的力，

称为液体表面张力。它产生的原因是液体跟气体接触的表面存在一个薄层，叫做表面层，表面层里的分子比液体内部稀疏，分子间的距离比液体内部大一些，分子间的相互作用表现为引力。就象你要把弹簧拉开些，弹簧反而表现具有收缩的趋势。含氮、氧等元素的液体的表面张力较大；含 F、Si 的液体表面张力最小；温度升高表面张力减小。

## 21 黏度

黏度又称黏滞系数，是量度流体黏滞性大小的物理量。流体中相距  $dx$  的两平行液层，由于内摩擦，使垂直于流动方向的液层间存在速度梯度  $dv/dx$ ，当速度梯度为 1 个  $\frac{F/S}{dv/dx}$  单位，相邻流层接触面  $S$  上所产生的黏滞力  $F$  (亦称内摩擦力) 即黏度，以  $\eta$  表示： $\eta = \frac{F/S}{dv/dx}$  Pa·s。其大小与物质的组成有关，质点间相互作用力愈大，黏度愈大。组成不变时，固体和液体的黏度随温度的上升而降低。

## 22 比热容

比热容 (Specific Heat Capacity, 符号  $c$ )，简称比热，亦称比热容量，是热力学中常用的一个物理量，表示物体吸热或散热能力。比热容越大，物体的吸热或散热能力越强。它指单位质量的某种物质升高或下降单位温度所吸收或放出的热量。其国际单位制中的单位是焦耳每千克开尔文 [ $J/(kg \cdot K)$ ]

## 23 导热系数

导热系数是指在稳定传热条件下，1m 厚的材料，两侧表面的温差为 1 度 ( $K, ^\circ C$ )，在 1 秒内 (1s)，通过 1 平方米面积传递的热量，单位为瓦/米·度 ( $W/(m \cdot K)$ ) 根据傅立叶定律，热导率的定义式为： $k_x = -\frac{q_x''}{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)}$  热流密度/温度梯度

## 24 扩散与勒夏特列原理

扩散现象 (diffusion) 是指物质分子从高浓度区域向低浓度区域转移直到均匀分布的现象，速率与物质的浓度梯度成正比。勒夏特列原理告诉：如果改变可逆反应的条件 (如浓度、压强、温度等)，化学平衡就被破坏，并向减弱这种改变的方向移动。楞次定律可表述为：“感应电流在回路中产生的磁通总是反抗 (或阻碍) 原磁通

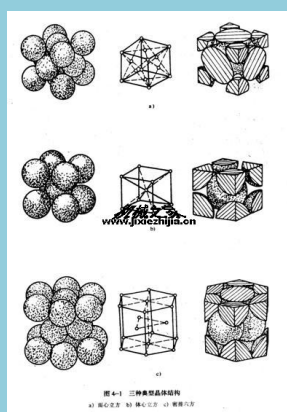
量的变化。”

## 25 自由能

自由能是指在某一个热力学过程中，系统减少的内能中可以转化为对外做功的部分，它衡量的是：在一个特定的热力学过程中，系统可对外输出的“有用能量”。可分为亥姆等温条件下体系做功的本领霍兹自由能和等温条件下体系做功的本领吉布斯自由能。

## 26 晶体结构

晶体以其内部原子、离子、分子在空间作三维周期性的规则排列为其最基本的结构特征。晶体结构即晶体的微观结构，是指晶体中实际质点（原子、离子或分子）的具体排列情况。金属原子通过**金属键**结合而成金属晶体。典型结构有 A1、A2 和 A3 型等三种。晶体中每一原子周围所具有的，与其等距离的最近邻的原子数目叫配位数。



在这三种结构型式中，每个原子为很多相同的原子所包围，从而配位数很高。考虑金属学问题往往采用一个较简单的模型，即把金属原子（离子实）看成是刚性球体，它们之间相互吸引，从而结合在一起。如果将上述的金属典型结构与等径刚球三种较密的排列方式相对应，如图 4 所示，与 A1 和 A3 型相应的各为立方和六方最密排列，每个刚球与周围的 12 个刚球邻接，配位数记为 12。与 A2 型相应的是立方体心密排，每个刚球为周围 8 个刚球相包围，此外，尚有 6 个次近邻刚球，距离只比 8 个最近邻远 15%左右，因此往往要考虑到次近邻的作用。有时将 A2 型的配位数记为 8+6，即有效配位数要大于 8。在上述密排结构中存在两种间隙位置，即四面体间隙和八面体间隙。在某些条件下，这些间隙空间可成为金属或合金中自身的或外来的原子所在位置，例如碳就可以占据铁点阵中的间隙位置。

## 27 金相



金相组织是反映金属金相的具体形态,如马氏体,奥氏体,铁素体,珠光体等等。广义的金相组织是指两种或两种以上的物质在微观状态下的混合状态以及相互作用状况。钢材常见的金相组织有:铁素体、奥氏体、渗碳体、珠光体等

## 28 拓扑

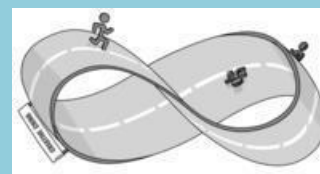
拓扑 Topology 是研究几何图形或空间在连续改变形状后还能保持不变的一些性质的一个学科。它只考虑物体间的位置关系而不考虑它们的形状和大小。拓扑的中心任务是研究拓扑性质中的不变性。

在拓扑学里不讨论两个图形全等的概念,但是讨论拓扑等价的概念。比如,尽管圆和方形、三角形的形状、大小不同,在拓扑变换下,它们都是等价图形。在一个球面上任选一些点用不相交的线把它们连接起来,这样球面就被这些线分成许多块。在拓扑变换下,点、线、块的数目仍和原来的数目一样,这就是拓扑等价。一般地说,对于任意形状的闭曲面,只要不把曲面撕裂或割破,他的变换就是拓扑变换,就存在拓扑等价。

应该指出,环面不具有这个性质。设想,把环面切开,它不至于分成许多块,只是变成一个弯曲的圆桶形,对于这种情况,我们就说球面不能拓扑的变成环面。所以球面和环面在拓扑学中是不同的曲面。

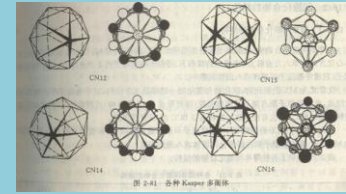
直线上的点和线的结合关系、顺序关系,在拓扑变换下不变,这是拓扑性质。在拓扑学中曲线和曲面的闭合性质也是拓扑性质。

我们通常讲的平面、曲面通常有两个面,就像一张纸有两个面一样。但德国数学家莫比乌斯(1790~1868)在 1858 年发现了莫比乌斯曲面。普通纸带具有两个面(即双侧曲面),一个正面,一个反面,两个面可以涂成不同的颜色;而莫比乌斯曲面纸带只有一个面(即单侧曲面),一只小虫可以爬遍整个曲面而不必跨过它的边缘!



我们把这种由莫比乌斯发现的神奇的单面纸带,称为“莫比乌斯带”。

合金拓扑密堆相 TCP 相 (Topologically Close-Packed Phases) 是由大小不同的原子适当配合, 得到全部或主要是四面体间隙的复杂结构。其空间利用率及配位数均很高, 由于具有拓扑学的特点, 故称之为拓扑密堆相。已经发现的有: (1) Laves 相 (2)  $\sigma$  相 (3)  $\mu$  相 (4) (5) R 相 (6) P 相等。特点为: (1) 密排 (2) 高配位数 (3) 层状结构 (4) 四面体堆垛 (5) Kasper 相和 Kasper 多面体 (6) 机械性能硬而脆



真空理论的生产应用——真空感应熔炼

真空感应熔炼技术在钢铁合金材料上的应用从 20 世纪 40 年代开始, 已经有几十年的历史。对于镍基合金等高合金类材料的制备, 国内外企业基本采用此工艺技术。但是真空感应熔炼的技术着力点基本停留在真空冶金过程中隔绝与大气接触从而保证易氧化元素不被氧化, 通过负压下不同元素饱和蒸汽压的差别分离低熔点杂质元素, 从而达到净化材料提高纯度的范畴。对于真空与电磁感应交互作用下发生的而大气状态下不能发生的熔体合金元素原子间物理化学反应机制, 基本没有深入研究结果。但是在生产实践中, 冶金工作者已经发现了“真空”对合金质量的影响会形成不同质量性能的材料, 进一步发现这是因为合金微观组织结构发生变化引起。因为真空不空, 真空实际上可以理解为充满负能态的电子海。根据麦克斯韦-玻尔兹曼分布, 温度函数体现了系统粒子运动状态, 而玻色-爱因斯坦凝聚态反应出温度为绝对零度时热运动消失的原子冷凝。然而量子力学表述粒子集聚系统的“零点运动”是不可能瓦解的, 绕场机制就是一个例证。因此开尔文定义的绝对零度是不存在的。卡西米尔效应则进一步证明真空态中能量的存在。特斯拉效应深入开示了能量利用的形式。真空本身就是能量, 这种能量状态处在能量最低状态, 更容易激发在常压下不易发生的原子间作用。从而消弱原子团结合力, 使得原子团扩散运动加强进而使得不同合金元素混合深度加大, 原子键结合力均匀且牢固。同时气体及低熔点元素更容易脱离熔体

向真空区域扩散。材料纯度及组织排列结构更加符合理想。因为合金的晶体结构决定了材料的潜变强度、疲劳寿命、耐腐蚀特性、电磁特性、热膨胀特性等宏观体征。通过类似真空反应手段等生产工艺方法，控制材料微观组织结构的制备，可以最终获得适合不同使用环境材料性能指标，如金属膨胀一致性、磁性能状态一致性、抗疲劳、抗潜变、寿命延长等需求。比如依靠一次相及二次相强化的高温合金晶体结构在真空反应与电磁感应的交互作用下，能够突破常规冶金工艺的元素排列微观结构极限，获得更微观的合金化组织结构。宏观表现不仅体现出元素偏析下降、 $\gamma'$ 相、 $\gamma''$ 相、碳化物相的形貌大小理想化、更由于中短程原子团的分裂使得合金接触面积加大，金属键牢固增强、拓扑密排相合理化、金相长期稳定性加强，从而获得更高等级的材料金属膨胀一致性、磁性能状态一致性、低腐蚀率、抗疲劳、抗潜变、高使用寿命。

沈阳金纳新材料股份有限公司