

75
160
62

金属理论概要

Я. И. 弗倫克耳

科学出版社

75

160.1

C.2

金屬理論概要

Я. И. 弗倫克耳 著

何 寿 安 譯

科 學 出 版 社

1957

Я. И. ФРЕНКЕЛЬ
ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ МЕТАЛЛОВ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва Ленинград

1950

內 容 介 紹

本書簡要地討論金屬各種性質的物理理論。全書共分五編，分別討論金屬的电子理論、能帶理論、固体与液体的分子运动論、合金的动力学及金屬的强度与范性。在第一編中，从金屬鍵合特徵与电子的运动特徵出发闡明金屬的热学性質、力学性質、电学性質与磁性。在第二編中，作者对能帶理論与应用作了批判的討論。在第三編中，从描述固体与液体中的原子运动出发討論扩散、固体的熔化等問題。第四編討論有序无序、相图、相变等合金动力学問題。第五編中所討論的則主要是作者本人在范性与强度方面的一些工作。

金 属 理 論 概 要

翻譯者 何 寿 安

出版者 科 学 出 版 社

北京朝陽門大街117号

北京市書刊出版業營業許可證出字第061号

印刷者 上海中科艺文联合印刷厂

总經售 新 華 書 店

1957年7月第 一 版

1957年7月第一次印刷

(滬)0001-3.674

書号：0789 印張：9 13/16

开本：850×1168 1/32

字數：251,000

定价：(10) 1.80元

再版序言

在第一版出版以后不到一年就有第二版的要求，这一情况証明了我们的大学生們和工程师們对于說明金属物理性質的書籍有迫切的要求。

在第二版中，我基本上保留了第一版的全部材料，而在內容的安排上，有些地方作了若干的改变，并且改进了叙述的方式。除此以外，我还加入了新的材料，首先是关于电子运动能帶理論的批判討論，其次是晶体范性形变的理論。

在第一版中，我有意地將有关能帶理論的問題略去，因为在我看来，它是不值得讀者化費精力去研究的。不过，能帶理論在近代理論物理方面是如此广泛的流行，同时，不但在翻譯的書本中而且在苏联的新書中也是这样无条件地采用它作为基础，所以我第一次把我以前口头上与書面上所发表过的、和这問題有关的零星見解收集在一起，决定在这里对能帶理論作一批判的討論。

为了尽可能簡單地叙述能帶理論，并設法使广大的讀者們了解能帶觀念，許多地方我就不得不違反数学結論的严格性，而同时力求事物物理觀念方面的明晰。無論当問題在数学上解答得严格但在物理上并不正确时，或者当正确的物理觀念必須在数学上具有基本的但不是严格的形式时，我都力求將問題的物理本質提到第一位。

应当指出的是，苏联的学者們从金属科学开始萌芽时起，就特別着重在这問題的物理方面。所以，无怪乎金属物理能够在我們苏联形成了独立的物理学部門。苏联的金属物理無論何时都不脫离实际，而是很密切地与苏維埃冶金方面联系着的，并如众所週知的，已达到了卓越的成就。

另一方面，西欧与美国的科学，其形式主义的傾向使得外国的物

理學家往往在形式數學這一方向上去用心發展理論，而對於理論基礎和實際情況符合的程度如何這一問題，則很少注意。比方說，他們認為，關於電子在晶體的週期性力場中運動的問題是數學上有興趣的與美麗的問題，而沒有理會到作為它基礎的、不考慮電子之間的相互作用的這一物理概念是如何的簡陋與無根據。在考慮類似的問題時，我力求簡化問題的數學方面，同時深入到它的物理方面，有時從數學關係式中提出新的物理見解，可是也只是很少的一部分。

在本書的第二版中，我首次加入了關於晶體范性形變一章。儘管這個問題對於技術方面說來具有頭等重要的意義，但是直到最近，理論物理學家們還很少研究到它。所以，近代的金屬理論當然不能回答關心固體力學性質的工程師們所提出的一連串問題。第一個設法解決這實際上非常重要的問題的工作是由我與 T. A. 康托洛娃(Конторова) 在 1938 年合作發表的。一直到十一年以後的現在，國外的物理學家們方才參加研究這一個已被我們所提出的問題。

可惜，范性形變的理論仍然處於發展的開始階段中，需要許多物理學家們進行更多的與更緊張的勞動以便獲得在實際上一向所需要的結論。

Я. 弗倫克耳

1950 年 2 月，列寧格勒

初版序言

本書是根据我在 1946 年秋季学期里对列宁格勒多科性工业学院教員与冶金專業五年級学生所作的演講写成的。講稿是速記的；但是速記必須根本修改，正由于不可能利用适当的速記稿，所以有許多的演講都已經重新編写。

开头九講主要討論金属的电子理論；其余的十講討論固体与液体的分子运动論——取材內容主要是談金属，虽然具体談的时候沒有特別把金属的特殊性考虑在內。

本書所取的材料，我在其他書中与論文中早已叙述过，不过，对于工程人員說来，在形式上是难懂一些。这一次我力求尽可能地把这些理論用簡單的——虽然往往是不严格的——形式叙述出来。

在討論金属的电子理論时，我有意避开一切与所謂晶体的「能帶理論」有关系的問題，——这倒不是因为它过于复杂，而是因为这种复杂性，按照我的意見，完全沒有被所得結果的意义所証实。只要想一下这方面就够了，即金属的电学性質也象許多其他的性質一样，在熔化时实际上並沒有改变，而对于熔化了金属而言「能帶」〔布里淵 (Brillouin) 区〕的观念完全不能应用。因此，我限于簡單叙述金属的电子理論，这理論是我在 1929—1930 年研究过的。我还在这里加入了鉄磁理論的一些問題。

第二編（第十講至第十八講）是关于固体和液体金属的分子运动論，以及金属与合金中的相变，在这一編中我从我的《液体动力学理論》一書中借用了一部分。在这一編中，液体的彈性-粘滯性理論的某些应用（第十五講）、十七講的二元合金分解理論和熔度綫图以及这种分解的某些动力学問題都是新的材料。

最后，我要感謝列宁格勒工业学院 Л. И. 苏西潘諾夫 (Шыр-

ланов) 講師, 他的課堂筆記對本書的編寫有極大的幫助, 他並且擔任本書的打字稿與原稿 (主要是完全散亂了的速記稿) 的校訂, 以及插入公式等工作。

Я. 弗倫克耳

1947 年 11 月 5 日, 列寧格勒

譯 序

Я. И. 弗倫克耳在這本《金屬理論概要》中，深入淺出地、生動地敘述了有關金屬性質的物理理論。原書在數學的運算上力求簡明，雖然不很嚴格，也能使讀者讀了本書之後很容易樹立起理論中的物理概念。原書的對象是以工程人員為主，因而對問題的处理上，以描述性的方式為多。不僅如此，作者在好些章節中，提出了有關問題的个人見解，很值得從事有關問題的研究工作者注意，縱然這些意見尚待檢驗與討論。

譯文中所用的名詞，主要是根據物理學名詞上的譯名。由於在原書所用的名詞中有許多還沒有適當的標準譯名，而譯者所用的譯名不一定妥當，故在譯本末尾附有中俄對照索引，供作讀者參考。

譯本中的各編譯文，分別由湯定元先生、陳志全與李國棟先生、洪朝生先生、潘孝碩先生、錢臨照先生校閱。譯本的出版是與他們的大力協助分不開的，譯者向他們表示十分感謝。

譯 者

目 录

再版序言	ix
初版序言	xi
譯 序	xiii

第一編 金属的电子理論

第一章 粒子間作用力的电学理論	1
§1. 原子間內聚力的起源及其性質	1
§2. 电子公有化是化学鍵的来源	5
§3. 量子条件; 稳定粒子系統的势能与动能的关系	8
§4. 金属蒸汽凝聚时价电子的公有化	11
§5. 公有电子在金属中的运动	15
第二章 金属中斥力的动力学性質; 金属的密度、 压缩率和强度	18
§1. 双原子的固体模型	19
§2. 金属中的內聚力与斥力的特性	20
§3. 金属的状态方程和密度	23
§4. 金属的压缩率和强度	26
§5. 熔化金属的表面張力	31
§6. 公有电子脱离金属的逸出功	33
第三章 低温下固体中的热运动	35
§1. 杜隆-珀替定律及低温下固体热容量的初步理論	35
§2. 一維固体(原子鏈)热容量的声学理論	39
§3. 德拜的热容量理論	42
§4. 声子	45
第四章 电子按能級分布及其热能	48

1466145

§1. 用电子波来描述公有电子在金属中的运动	48
§2. 絕對零度下电子按量子态的分布	50
§3. 在 $T > 0$ 时电子的分布	58
§4. 公有电子的热能	55
§5. 热电子发射	57
§6. 以公有电子的热能为条件的金属热容量	59
§7. 金属的热导率与电导率	60
第五章 金属电导率与热导率的絕對数值	64
§1. 物質中电子自由路程的平均長度	64
§2. 电子自由路程的平均長度是电子波散射系数的倒数	66
§3. 金属的电阻与溫度及杂質的关系	69
§4. 金属熔化时电导率的改变	71
§5. 超导电	72
第六章 磁性	75
§1. 与溫度无关的金属順磁性	76
§2. 鉄磁性的量子理論基础	77
§3. 鉄磁体分裂成磁畴的原因	79
§4. 鉄磁体的技术磁化曲线	82
§5. 內分子場理論	84

第二編 电介質和金属的能帶理論

第七章 晶体对 X 射綫及阴极射綫的散射	89
§1. 一維情况中的 X 射綫选择反射	89
§2. 原子的热振动对 X 射綫选择反射的影响	91
§3. 三維的一般情况及上述結果的量子解釋	98
§4. 公有电子并不参与金属对 X 射綫的选择反射	94
第八章 金属中公有电子的运动	97
§1. 无相互作用的电子在周期力場中的金属模型	97
§2. 一維周期場中的电子运动問題的近似解答	98
§3. 公有电子在閉合原子鏈中的运动	102
§4. 能帶理論中單个电子的速度与能量	105

§5. 电子在能帶間的跃迁及能帶的傾斜	109
第九章 固体电介質的能帶理論	113
§1. 电介質和电子型半导体中的公有电子	113
§2. 在半导体中, 电子公有化程度与溫度的关系; 雜質的作用	115
§3. 金属中公有电子与正孔的散射及其《自縛》	117
§4. 常态电介質中的电子公有化理論的批判探討	120
第十章 金属的能帶理論	125
§1. 能帶理論在金属上的应用; 极化的二維模型	125
§2. 能帶理論在固态金属和合金結構上的应用	129
§3. 具有电介質特性的金属間合金	131

第三編 固体与液体的分子运动論及 其在金属中的应用

第十一章 金属的热膨胀及与原子振动有关联的热导率	134
§1. 热膨胀是由于原子間力的不对称性	134
§2. 热膨胀系数的計算	136
§3. 非金属固体热导率的量子(声子)理論	139
§4. 金属的声子热导率与电子热导率	142
第十二章 实际固体中的热运动	144
§1. 固体中原子的滲合作用	145
§2. 高溫下晶体点陣的热分解	148
§3. 空穴与离位原子的独立形成	150
第十三章 固体中的原子扩散	154
§1. 离位原子与空穴的逗留時間	154
§2. 空穴与原子在晶体点陣中移动的平均速度, 原子的各种滲合机制	158
§3. 原子在固体中的自扩散系数	162
§4. 自扩散方程的基本結論	164
第十四章 固体的分子运动論	167
§1. 从空穴機構的观点来看晶体的熔化	167
§2. 晶体的三原子模型及其稳定性	168

§3. 三原子晶体模型的状态方程	171
§4. 晶体点阵过渡状态的不稳定性	175
第十五章 熔化理論	179
§1. 固体的自由能	179
§2. 熔化的热力学理論	181
§3. 液体的空穴理論	184
第十六章 液态分子运动論	189
§1. 液体中原子热运动的特性	189
§2. 液体原子的逗留時間	191
§3. 液体中的自扩散系数与扩散系数	193
§4. 外来原子在液体中的迁移率	195
§5. 液体的流动性(粘滯性)	199
§6. 液体粘滯系数的計算	202
第十七章 理論与各方面的对比及应用	205
§1. 上述理論的結果与拔欽斯基公式的对比	205
§2. 非晶形物体的彈性弛豫理論	208
§3. 唯象的理論与分子运动理論的比較	212
§4. 上述的概念在地球上的应用	213

第四編 合金的动力学理論

第十八章 有序合金	217
§1. 有序合金; 原子交互排列上的远程序与近程序	217
§2. 有序合金中的居里点	221
§3. 合金的有序化对其电导率的影响	225
§4. 合金的无序化与純金属的熔化	226
第十九章 分解的合金	230
§1. 將二元合金分解过程形式地归結为有序化过程	230
§2. 关于二元合金分解的一般考虑	232
§3. 二元合金分解成两个固态相的一般理論	233
§4. 熔度图	238
§5. 气体在固体与液体中的溶解	243

第二十章 固溶体分解的动力学	246
§1. 热动平衡体系中的复相涨落	248
§2. 热动不平衡体系中的临界尺寸的核及相变速率	249
§3. 过饱和固溶体分解的动力学	253
§4. 相变动力学	257

第五編 强度与范性

第二十一章 金属的脆性强度	261
§1. 晶体結構上的缺陷是工程强度低于理論强度的原因	262
§2. 尺寸因素	263
§3. 强度的統計理論	264
§4. 裂痕影响强度的理論	267
第二十二章 金属的范性	271
§1. 硬化与回复	271
§2. 位錯是范性形变的原始要素	273
§3. 一維的、原子的动态位錯模型(按弗侖克耳与康托洛娃)	275
§4. 位錯傳播时的衰减作用	281
§5. 孿晶的傳播乃是取向位錯的运动, 橫向型的平移位錯	284
§6. 各向同性連續介質中的位錯理論	287
§7. 金属物体的范性特点	291
§8. 金属粉末的热压結机制(陶瓷冶金)	292
中俄名詞对照索引	295

第一編

金屬的电子理論

第一章

粒子間作用力的电学理論

在凝聚狀態下，亦即在固态或液态下，金屬的物理特性表現得很鮮明，在开始研究它們之前，我們應該先研究它們在气态下的性質，金屬在气态中完全沒有暴露出它的特殊性。的确，金屬蒸汽和其他的任何气体一样，都是絕緣体，所不同于其他气体者，仅在于金屬蒸汽具有比較小的原子游离能（即价电子結合得比較弱）。

在第一級近似中，金屬的蒸汽可以看作由許多完全自由的原子所組成，它們彼此之間毫無相互作用。可是，事实上，当任何两个原子相靠近时，也就是說当它們互相碰击时，其間多多少少要产生显著的吸引力，这种吸引力使原子在碰击后的运动方向和速度值較碰击前有显著的改变。

这种力并不是金屬蒸汽所特有的，在其他的气体中，例如在惰性气体中也常遇到，我們称它为原子間的內聚力，或称为范德瓦耳斯（Van der Waals）力。它得名于一位荷蘭的科学家。这位科学家在气体的理論中破天荒第一次提出了这种力，并將它应用到气体凝結成液体的理論上。

§ 1. 原子間內聚力的起源及其性質

上面已經提到，随便什么气体，包括金屬蒸汽在內，原子之間都有原子間內聚力作用着。在气态下粒子間相联系的力与在惰性气体

中原子間作用力是具有完全一样的性質，換句話說是相吸引的力，它的數值隨原子間距離的增大而迅速下降。

電子理論的發展已經引出這樣的結論，即粒子間的內聚力是電的、而且是靜電的力，也就是異號帶電粒子間相吸引而同號帶電粒子間相排斥的庫倫力。這些帶電的粒子就是原子外殼的電子及電子繞着它而運動的正電原子核。

正因為和原子大小相比時原子彼此間的距離（金屬或非金屬並沒有不同）並不是太小的，故原子間的內聚力就是由一方是電子與另一方是原子核所組合成的異號電荷間的引力和同號電荷間的斥力底合力。

那麼，為什麼這時候引力占優勢呢？要知道，原子中的電子總電荷等於原子核中的電荷而與之符號相反，因為原子總起來看是中性的。

對於這一問題的一般回答如下：由於吸引力的影響，異號（即帶異號電荷）的粒子就靠攏一些，因此，彼此間的引力也就增加了（因為力是與距離平方成反比的）。同時，同號粒子彼此疏遠了一些，因此，其間的斥力也就減弱了。結果，引力超過斥力。

這情形可以用眾所週知的帶電物體（如火漆棒）對中性粒子，如小紙片、接骨木球等所表現的吸引作用的簡單例子來很好地說明之。

這種吸引作用是由於在中性粒子中存在着數量相等的兩種符號的電荷。當中性物體接近帶正電的物體時（如火漆棒端），中性物體上的負電荷比整個中性物體本身更要接近帶正電物體一些，而正電荷則接近得差一些。因此物體上面對着作用電荷的一邊出現了異號電荷，而在另一邊則出現了同號電荷。這樣，引力增強而斥力減弱。

結果引力超過斥力。

不難証明，在這種情況中所表現的總引力是與距離的 5 次方成反比（不像電荷間的引力是與其間距離平方成反比）。

由相類似的想像出發，就容易了解兩中性物體也一樣能夠互相吸引。我們設想有兩個中性物體，每一個中性物體均由兩種帶異號

电的粒子所組成。两磁鉄在一起就是与此系統相似的磁的比喻。

一般說来，两磁鉄可以互相吸引或者互相排斥，这要看它們是怎样相向而定：是同性端相向呢抑是异性端相向。倘若在这时磁鉄能够自由地繞自身軸而轉动，那么它們首先將轉到异性端相靠近而同性端相远离时为止。結果，引力比斥力表現得强。在合适的取向下，总引力是与距离的 7 次方成反比。

因此，正負电荷在空間上已分离开了的两中性物体，例如有一定电矩的两个电偶极子，即使每物体中的相反电荷(极)間的距离比两物体間的距离短得多，也同样能够互相作用。在这个情况下，其間作用力的数值与两物体的电矩成正比（电矩即物体中两极之一的电荷与两极距离的相乘积）。

除了上述的两个具有不变电矩的中性物体間的相互作用以外，这样的有一个有电矩的物体也能够吸引另外一个原来沒有电矩的物体，而在前者所生电場的影响下，在后一个原无电矩的物体中出現了、或者說《感应》出了电矩。这个被称为电感应的吸引作用，与原来沒有磁性的鉄块挨近永久磁鉄，从而感应使鉄块暂时成为磁鉄而相吸引的情况完全相类似。

原来沒有磁性的物体被磁化了；同时磁鉄与被它所磁化了的物体也像异极相向的两永久磁鉄一样相互吸引。

内部含有两种符号电荷的物体，其間相吸引的力可以按照完全相类似的方式而产生。假設，其中一物体的电荷因为某种緣故而已被分离开来，并造成了电偶极子，那么当它挨近另外一个物体时，后者所含的电荷也同样被分离，因而使被吸引的电荷比被排斥的电荷更靠近于吸引电荷。

中性物体中异号电荷的分离过程称为物体的电极化作用。

当未被极化的物体移近另一个在空間上电荷已被分离开了的物体时，也就是說当挨近有电矩的物体时，前者即被后者所极化，亦即同样有了电矩。結果两物体互相吸引。在这个情况中，引力与距离的 7 次方成反比。

現在我們可以回答這個問題：為什麼當任何物質的兩個原子接近時，其間即產生引力？

乍看起來，兩個原子都沒有電矩，因為組成這兩個原子的電荷是混在極小的中性粒子內的。

實際上，我們談到最小的粒子、即單個原子時，不能說異號電荷是混在一起的。

例如，氫原子是一個由正電的原子核和離原子核有相當距離并繞着原子核而轉動的電子所組成的系統。

因此，在氫原子中，兩種電荷向來是分離開的。它們之間的距離不大，其數量級是 10^{-8} 厘米，但它畢竟是有限的距離。只要另一粒子離開氫原子的距離比氫原子本身的尺度稍大，則在這距離上，該氫原子對另一粒子——特別是對於另一個同樣原子——的作用和有恒定電矩的物體對未被極化的粒子的作用完全相同。

在孤立的氫原子中，負電荷的引力中心位於原子中心，恰好和原子核相重。不過，若把它挨近到另外一個氫原子，那麼情況就改變了。

倘若，第一個原子不存在時，第二個原子中的電子是沿着以原子核為中心的圓周而均勻地轉動着，那麼當第一個原子挨近時，第二個原子的電子運動將被打亂：它將沿着第一個原子的總電場對它作用的方向移動。

與上面所舉的例子不同之處，就在於前例中使粒子極化的電荷是看作靜止的，而這裡，這些電荷之一（即第一個原子的電子）則是迅速地轉動着的。

這情況可以拿磁的比喻來說明。倘若將永久磁鐵靠近鐵屑，那麼不管磁鐵的取向如何，雖然力量不同，但總是要吸引這些鐵屑的。顯然，磁鐵轉動時仍舊保持着引力，而且引力數值是在某一定值的上下起伏着。

回到氫原子上，我們就得到這樣的結論，即每一氫原子都要使另外一個氫原子極化，因此在任何時刻，這些原子間都存在着引力。