

63894

TG11-1303

苏联高等学校教学用书

金属与合金的物理性能

Б.Г.李夫舍茨 著

王 潤 等譯

冶金工业出版社

苏联高等学校教学用书

金屬与合金的物理性能

Б. Г. 李夫舍茨 著

王 潤 等 譯

冶金工业出版社

本書是苏联机械制造和冶金高等学校同名課程的教科書。書內闡述了金屬与合金的热学性質、膨胀、磁性、电性、弹性及其它性質。本書的主要內容是物理性能与組織成份的关系，以及用物理方法来解决金屬与合金的金相学与热处理的問題。

本書也适合工厂試驗室和科学研究院的工作人員閱讀。本書由鋼鉄学院金屬物理教研組集体校訂。

Б. Г. Лившиц
ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ
МАШГИЗ (Москва 1956)
金屬与合金的物理性能

王潤 等 譯

冶金工业出版社出版 (北京市灯市口甲45号)

北京市書刊出版業營業許可証出字第093号

冶金工业出版社印刷厂印 新华書店发行

— * —

1959年9月第一版

1959年9月北京第一次印刷

印数3,512册

開本 850×1168 · 1/32 · 320,000字 · 印張12 $\frac{28}{32}$

— * —

統一書号 15062 · 1823 定价1.40元

目 录

作者为中譯本寫的序言	6
前言	7
第一章 金屬元素和化合物	9
第二章 热容和热函	26
基本数量及其关系	26
量热計法和热分析法	27
金屬的热学性質	40
合金的热学性質	54
第三章 磁性	67
A. 抗磁性与順磁性	70
順磁和抗磁磁化率的測量	73
金屬元素的性質	74
熔化、多型性轉变和加工硬化的影响	77
金屬相和多相合金的性質	78
B. 鉄磁性	83
磁化曲綫与磁滯廻綫	83
鉄磁性的測量方法	87
測定磁性的冲击法	87
去磁因数	95
磁强計法	100
在封閉磁路中的測量法	100
測量用发电机	104
甩脫法	107
磁化和去磁的物理本質	107
自发磁化	108
磁化过程	114

金屬和金屬相的性質	133
多相合金的性質	147
鐵磁合金的相轉變和組織轉變的研究	148
平衡相圖的研究	148
鋼的退火、淬火和回火的研究	154
過冷奧氏體的分解及轉變的研究	159
合金時效的研究	165
晶體結構的研究	168
磁性材料	169
變壓器鋼和軟磁材料	170
永磁合金	180
熱磁合金	188
第四章 電學性質	189
基本定義	189
電阻的測量方法	190
關於金屬導電性的一般概念	199
純金屬電阻與溫度及壓力的關係	205
金屬冷加工及退火的影響	211
固溶體的電阻	215
不均勻固溶體	235
金屬的化合物	239
中間相	242
多相合金的導電性	244
冷加工對多相合金電阻的影響	250
在金屬學中電學分析的应用	251
導體合金及電阻合金	265
第五章 導熱性	270
基本定義和依存關係	270
導熱率的測量方法	277
工業合金的導熱率	282

第六章 热电性	291
基本现象与规律.....	291
合金的热电性.....	296
热电势测量法在金属学中的应用.....	298
热电偶用金属和对铜有低热电势的金属.....	304
第七章 密度及热膨胀	307
金属及合金的密度.....	307
热膨胀.....	323
测量转变体积效应及热膨胀的方法（膨胀仪法）.....	345
热处理的膨胀仪研究.....	354
第八章 弹性	362
基本量的定义.....	362
金属的弹性.....	364
合金的弹性模量.....	367
弹性的铁磁性反常现象.....	370
超声波探伤.....	374
第九章 内耗	377
内耗的模型概念.....	377
固体中弛豫现象的不同机理.....	382
内耗的测量.....	384
频率的改变.....	336
不同因素对内耗的影响.....	387
金属的内耗.....	390
合金的内耗.....	392
用内耗法解决金属学中问题的例子.....	393
附录（元素的一些物理性质）.....	396
参考文献	403

作者为中譯本写的序言

這本書能以伟大的中国人民的文字出版，确是我无上的光荣。尤其使我感到高兴的是：听说在中国看过这本书的不但有学生，而且有科学工作者，其中有不少人我早在他们所发表的论文中就久仰其名了。在这次访问中国期间能和他們亲自交談，使我感到极大的愉快和兴奋。

本書的翻譯工作是由我的学生王潤等同志完成的。我希望我的同行們——中国金屬学家們——能借中譯本的帮助对这本书給以批判性的意見，以便再版时加以修正提高。

这本书的中譯本是在俄文本出版两年半以后完成翻譯的，有些地方还没有来得及修正补充，这是要請讀者原諒的。

我希望，在中国出版这本书的中譯本将是我在伟大的中苏人民友誼中所作出的一点微小的貢獻。

Б.Г. 李甫舍茨

前 言

按照机械制造和冶金高等学校的課程教学大綱，本書属于金相学的范围。其中可把合金的成份和組織看作“自变数”，而物理性質是“函数”。書中所探討的物理性質有：热学性質、体积、磁性、电性、热电性、弹性和內耗。至于与测定金屬及合金在不可逆形变或断裂情形下的强度有关的机械性質，不在本書探討范围之內。

金屬和合金的物理性質与成份及組織之間的关系是本書的基本內容。与此同时（更准确地說，就是为了研究这种关系）本書將探討关于各种性質的基本規律和测定这些性質所用方法的原理。用物理方法来解决金屬及合金的金相学和热处理的問題在本書各章中将处于首要地位。这些就是本課程和本書的基本任务。

作者还企图通过适当的叙述方法来解决另一个任务，这就是用工程上的語言（即通过研究合金工艺学的實驗室所积累的事实）来闡明重要的物理規律。本書的第一及第二版本^①曾成为工厂實驗室和产业部門研究所工作人員的参考書，根据这一事实和作者的講授經驗使作者有理由期望他对解决以上提出的任务所采取的途径是正确的。

本課程在苏联各高等学校是在物理、化学、金相学、X-綫学和合金热处理諸課程之后講授的。

此書本版重行編写了很多。新增加了弹性模量（第八章）和內耗（第九章）两章。結合金屬在門德列耶夫（Менделеев）周期表中的位置对純金屬的性質作了更广泛的研究。

① Б.Г. Лившиц, Физические свойства черных металлов, Металлургиздат, 1937.

Б.Г. Лившиц, Физические свойства сплавов, Металлургиздат, 1946.

變更了敘述合金性質的次序。先敘述各相（固溶體、中間相、化合物）的性質，然後寫多相混合體的性質。在可能的地方，描述了單相合金中相的類型的影響和多相系中各種性質的組織敏感性。大大刷新了有關磁性，比熱和熱膨脹的各章。較詳細地研究和討論了傳導性問題（對馬特辛〔Маттисин〕，維德滿-佛蘭滋-勞倫茲〔Видеманн-франц-Лоренц〕等定律的偏離）。探討了金屬化合物的半導體性質等。

第九章是技術科學副博士 Ю.В. 皮古索夫（Пигузов）所寫；第七章中有一部分是技術科學副博士 Н.А. 索洛維也娃（Соловьева）所寫；所有其餘部份都是本書作者所寫。

莫斯科斯大林鋼學院金相教研組同志，特別是技術科學副博士 В.С. 爾沃夫（Львов），參加了原稿的準備工作，對原稿進行了討論並提出了意見。作者對此表示感謝。

作 者

第一章 金屬元素和化合物

以我們的直接感覺作基礎，金屬可以描述為具有金屬光澤（即能很好地反射光能）和良好的導熱性的物體。金屬具有較其他元素為高的導電性。這種性質大概是金屬最典型的性質。將元素區分為金屬與非金屬時，導電性是最好的標準。

若在金屬體的两點間產生電位差，則在金屬中便發生自由電子的定向流動。

原子是帶正電的核，在他的周圍分布着電子，電子的數目等於元素在周期表中的原子序數。按照波耳 (Бор) 的模型，電子是成層的分布着，並且距核最遠的電子可以認為是相對地自由的。電流正是由這些電子形成的。所以金屬的導電性叫做電子導電性。這種導電性的特點是當電流通過時不發生物質原子的遷移，這一特點正是電子導電性區別於離子導電性的地方。由於運動着的電子與金屬中原子（離子）的碰撞引起後者的動能增加，結果傳導體被加熱，並放出焦耳熱。

按照現代的觀點，金屬含有自由電子，他們與位於點陣結點上的正離子保持熱平衡，結果好像形成了為所有空間點陣共有的電子氣。不但金屬導電借助於電子氣，而且導熱也是如此。金屬的熱傳導在很大程度上可以解釋為自由電子間和他們與點陣離子的碰撞而進行的能量傳遞。熱電流也可以看作是熱端電子的遷移。

自由電子遷移的可能性可以從伏特首先作出的實驗中看到。假若將 A 和 B 兩種金屬接觸（預先用接地法去電），則在分開後他們將或多或少的帶電；他們中的一個將帶正電，另一個將帶負電。顯然，在金屬接觸時電子氣會由他們中間的一個遷移到另一個去。

在原子最外層的電子叫做價電子，因為在形成金屬化合物（金屬間化合物，金屬和非金屬的化合物），固溶體和其他相時

由他們實現化學結合。

点陣中金屬原子間的金屬結合的存在也归功于自由电子。对这种結合的本質研究的还不够。应当着重指出的是，在純金屬中具有最高对称和最密致排列的点陣。

从这些例子可以看出，金屬的性質在很大程度上决定于价电子相对的自由程度。这个特点从本質上区别开金屬和非金屬。金屬的物理性質为自由电子和阳离子所决定，在每个阳离子中实际上集中了整个原子的質量。在叙述每一性質时，需要注意离子和共有电子的相互作用。

在表 I 中載有門德列耶夫周期表和所有元素自由原子最外层的电子数。原子中所有电子按能級排列。这些能級按升高的次序表示为：1s, 2s, 2p^①, 3s, 3p, (3d, 4s), 4p, (4d, 5s), 5p, (5d, 4f, 6s), 6p, 7s, 6d, 5f。电子能級的填充按以上所述次序进行。括号中的能級是几乎相等的，在各元素中的次序各不相同。为了闡明原子所有的全部电子，需将附于其下的电子数加上最近的前一惰性气体的全部电子数。为了数出一惰性气体的全部电子数，則需将附于其下和附于以前所有惰性气体的电子数（在第 13 列中）相加起来。

例如，鋇原子有以下的电子：

Zr										
1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	5s	
2	2	6	2	6	10	2	6	2	2	
He										
Ne										
Ar										
Kr										

电子总数 40 等于鋇的原子序数。这里从表 I 計算了在鋇下的 4d, 5s 电子和由 He, Ne, Ar, Kr 下的电子数目組成的氬的总电子数。鋇的电子可以写出下式：

① 原書中无 2P—譯者。

表 1

門德列耶夫周期表和自由原子的外层电子数

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1s	H 1												B 2 1	C 2 2	N 2 3	O 2 4	F 2 5	He 2
2s 2p	Li 1	Be 2																Ne 2 6
3s 3p	Na 1	Mg 2											Al 2 1	Si 2 2	P 2 3	S 2 4	Cl 2 5	Ar 2 6
3d 4s 4p	K 1	Ca 2	Sc 1 2	Ti 2 2	V 3 2	Cr 5 1	Mn 5 2	Fe 6 2	Co 7 2	Ni 8 2	Cu 10 1	Zn 10 2	Ga 10 2 1	Ge 10 2 2	As 10 2 3	Se 10 2 4	Br 10 2 5	Kr 2 2 6
4d 5s 5p	Rb 1	Sr 2	Y 1 2	Zr 2 2	Nb 4 1	Mo 5 1	Tc 5 2	Ru 7 1	Rh 8 1	Pd 10 0	Ag 10 1	Cd 10 2	In 10 2 1	Sn 10 2 2	Sb 10 2 3	Te 10 2 4	J 10 2 5	Xe 2 2 6
4f 5d 6s 6p	Cs 1	Ba 2	La 1 2	Hf 14 2 2	Ta 14 3 2	W 14 4 2	Re 14 5 2	Os 14 6 2	Ir 14 7 2	Pt 14 9 1	Au 14 10 1	Hg 14 10 2	Tl 14 10 2 1	Pb 14 10 2 2	Bi 14 10 2 3	Po 14 10 2 4	At 14 10 2 5	Rn 2 2 6
5f 6d 7s	Fr 1	Ra 2	Ac 1 2	Th 2 2 2	Pa 2 1 2	U 3 1 2	Np 4 1 2	Pu 5 1 2	Am 7 1 2	Cm 7 1 2	Bk 9 1 2	Cf 10 1 2						

$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^2 5s^2$ 。

在表 I 里沒有引証 La 和 Hf 間的 稀土元素。他們各有 2 个 6s 电子和 1 到 14 个 4f 电子。

絕大多数的元素是金屬，值得注意的是在第 4、5、6 周期中，在从 Sc 到 Ni、Y 到 Pd、La 到 Pt 的各金屬中，3d、4d、5d 的填充是在其后的 4s、5s 和 6s 已滿之后进行。这些 d 层未填滿的金屬叫做过渡金屬，而其余的金屬，即 d 层已全滿或完全未填者，叫做普通金屬。以后将会看到，按他們的性質說，过渡金屬与普通金屬有很大的区别。

在金屬和非金屬之間划絕对的界限是不可能的。在 1V、V、VI 族（表 I 中的 14、15、16 豎行）的普通元素中有介于金屬和非金屬之間的元素。Si、Ge、As、Se、Te 和 α -Sn（灰錫）六元素屬於这一类。例如，在 V 族里随着原子序数的增加，逐漸由非金屬（N、P—絕緣体）向有高导电性的金屬（Sb、Bi）过渡。屬於半导体的 As 位于他們的中間。在 1V 和 VI 族（14 和 16 豎行）中也有同样的情形。H、He、B、C（金剛石）、N、O、P、S、卤族元素和惰性气体，無疑地屬於非金屬。其余的元素都是金屬。

金屬与非金屬的区别，可以用从孤立原子取出連系最松的电子所需的功来标志。这功叫做电离势，以电子伏特为单位表示。各元素的电离势列在表 2 中。从这里可以看出，在門德列耶夫周期表的每一周期中，随着原子序数的增加。电离势也增大，到惰性气体达到极大值。这是由于当原子序数增加时核的电荷也随之增加，从而核对最外电子的束縛作用也随之增加。具有最大的电离势是惰性气体的特征。这是由于他們的电子层結構完善的結果。当从惰性气体向繼其后的硷族元素过渡时，电离势急剧减少，这表示核与附加的 S-电子的結合力不大。

从表 2 可以看出，非金屬有較金屬为高的电离势，其值在 10 电子伏特以上（硼除外）。金屬有比这低的数值，在絕大多数情

形下介于从 4 到 9 电子伏特之間。中間元素 (Si、Ge、As、Se、和 Te) 的电离势为 8~10 电子伏特。

表 2

原子的电离势 (一次电离)，电子伏特

H 13.53	He 24.47	Li 5.36	Be 9.28	B 8.25	C 11.21	N 14.47	O 13.55	F 18
Ne 21.46	Na 5.11	Mg 7.61	Al 5.96	Si 8.10	P 11.0	S 10.31	Cl 12.96	Ar 15.69
K 4.32	Ca 6.09	Sc 6.7	Ti 6.81	V 6.76	Cr 6.74	Mn 7.40	Fe 7.83	Co 8.5
Ni 7.61	Cu 7.68	Zn 9.36	Ga 5.97	Ge 8.09	As 10.5	Se 9.70	Br 11.5	Kr 13.94
Rb 4.16	Sr 5.67	Y 6.5	Zr 6.92	Mo 7.2	Ru 7.7	Rh 7.7	Pd 8.3	Ag 7.54
Cd 8.96	In 5.76	Sn 7.30	Sb 8.35	Te 8.96	J 10.5	Xe 12.08	Cs 3.87	Ba 5.19
Ce 6.54	Pr 5.76	Nd 6.31	Sm 6.55	Eu 5.64	Gd 6.95	Tb 6.74	Dy 6.82	Ib 6.23
Os 8.7	Pt 8.88	Au 9.19	Hg 10.38	Tl 6.07	Pb 7.38	Bi 7.25	Rn 10.70	W 8.1
							Ra 5.25	

在非金屬晶体中作用着共价結合，这由属于二邻原子的价电子成对結合实现。作为典型非金屬的金刚石的每一原子給出其最外层的四个电子 ($2s^2 3p^2$) 与四个邻原子形成共价結合。結果，金刚石的空間点陣以具有配位数 4 为特点。与金刚石同一族的、叫做金屬和非金屬間的中間型的并具有金刚石型点陣結構的元素 (Si, Ge, α -Sn)，也有配位数 4。这些元素有一些金屬屬性，原子序数愈高表現愈显著。因之，可以認為在 Si、Ge、 α -Sn 中的价电子較在金刚石中的为自由；并且与点陣中的离子結合較弱。对于孤立原子，这种看法可以从原子的电离势由 C 到 Sn 的減弱所証实。

从以上所述，可以看出在金刚石、Si、Ge 和 α -Sn 的晶体中配位数等于 $8-N$ ，这里 N 是价电子数，也即等于門德列耶夫周期表中“族”的号数。这对于其他高价元素也适用。

配位数为 3 的 As、Sb 和 Bi (V 族) 有較复杂的菱面晶系的点陣。配位数为 2 的 Se 和 Te (VI 族) 有更复杂的由原子螺旋鏈形成的点陣。这种原子鏈是由比較弱的范德瓦尔斯 (Ван-дер-Ваальс) 力結合的, 它們是从晶体的原子結構向分子結構的过渡形式。例如, 配位数为 1 的碘 (VII 族) 晶体是由以弱的范德瓦尔斯力結合的双原子的分子所形成。

随着非金属元素的原子价的增加, 他們点陣的結合强度和致密度減少。高价 (从 4 到 6) 中間元素有某种程度的金属性質, 其原子之間的結合, 大概部份是共价的, 部份是金属的。共价結合表現愈完善, 則实现共价結合的价电子愈不自由。这些电子处于被他們結合的二原子之間, 他們在空間点陣中其他位置找到的几率是很小的。这表明非金属点陣中結合是有方向性的, 这已用实验方法証明 [1]。

在金属中价电子是公有的, 不是属于一对相邻的原子, 而是属于整个晶体的。每一电子在任一离子附近的几率是一样的, 这就引致金属中結合的无方向性。配位数不决定于金属元素的价数, 并且几乎对所有的金属都很高。通常, 金属的空間点陣都致密而且高度对称。大多数金属具有配位数为 12 的面心立方和六方密排点陣和有配位数为 8 的体心立方点陣。

以下金属具有这种点陣:

面心立方: α -Ca, β -Ce, Sr, Th, Pb, α -Sc, β -La, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Rh, Ir, r -Fe, Cu, β -Co;

体心立方: Cs, Rb, K, Na, Li, β -Ti, β -Tl, β -Zr, Ta, α -W, Mo, V, α -(δ -) Fe, Cr, Nb, Ba;

六方密排点陣: Hf, Mg, α -Ti, Cd, Re, Os, Ru, Zn, α -Co, Be, β -Ca, β -Sc, Y, α -La, α -Tl, α -Zr。

为了研究合金的物理性質和他們的組織的关系, 首先需要描述合金中形成的金属相。現在只能經驗地将金属系統中的固体相分类, 因为原子間的結合的理論还远未成熟。在描述元素的化学

相互作用时，認為他是由离子結合，共价結合和金屬結合實現。关于結合的类型这里不准备詳細敘述。

化学結合的存在是由元素形成各种金屬相和其他相的前提。金屬和非金屬电离子的原子間的靜电（离子）結合，是由于金屬元素易于給出价电子，他們归併到非金屬元素。这样，金屬和非金屬原子有異号电荷并相互吸引，并由此实现他們間的結合。

为了标志金屬相，金屬結合和共价結合有最重要的意义。像很多离子化合物一样，金屬相結晶成原子晶体类型而不是分子晶体类型。

在各种金屬元素的化学相互作用下形成各种相，把它們都叫做化合物也未尝不可。但是金屬化合物这种广泛的定义，对于金屬相的分类毫无益处。以后，为了加强对比，把金屬化合物狭义地了解为有以下特性的相：1）按物理性質說，它远区别于它的組成元素；2）有几乎固定的成份，它在很狹的範圍內变化，而且可用簡單的原子浓度比写出；3）由各組成元素形成化合物时具有大的生成热。

在很多情况下，这种化合物有共价結合。

按化学本質說，与純金屬最相近的是在它們的基础上形成的固溶体。它們的成份可能很接近純金屬——溶剂；在这个情況下，固溶体按其性質說将与溶剂区别很少。定性地說，固溶体的原子結構和金屬溶剂的相同，并以金屬結合為其特征。溶解度极限通常随溫度而增加，这种增加可能很大。相同結構的組元可能无限互溶，即組成連續固溶体。

在化合物和金屬固溶体之間有很大一組所謂中間相存在。这些相的性質和結構是多种多样的。他們的成份可能在很寬範圍內变化，这一点与固溶体类似。然而它們的点陣結構和性質可能与組元金屬差別极大；它們在平衡相图上的区域与以組元金屬為基的固溶体区域之間有多相区把它們分开。从这些特点来看，中間相在一定程度上又与化合物相似。只有根据結構和性質的實驗数

据，才可判断中間相与化合物相近还是与固溶体相近。

在金屬物理的現狀下，远非所有中間相都可分类。其中很多不能归入具有一定特点的任一組別。但有些中間相可以經驗地分为以下四类：1) 电子化合物；2) 有砷化鎳結構的相；3) 間隙相；4) σ -相。

Н.С. 庫尔納科夫 (Курнаков) [2], [3] 的較为普适的分类，是将中間相分为道尔頓体 (Дальгсид) 和別尔多利体 (Бертолид)。道尔頓体的特点是在性質与成份的关系曲線上在单相区内有“畸異点 (‘сингулярная точка’)” (按庫尔納科夫)。畸異点与組元浓度的簡單比值点相对应。若在中間相范围内，在性質-成份曲線上沒有畸異点存在，則此中間相是別尔多利体。按庫尔納科夫和其同事們的数据所作出的 Bi-Tl 系 (图 1) 中的 r -相可作为这种相的例子 [4]。

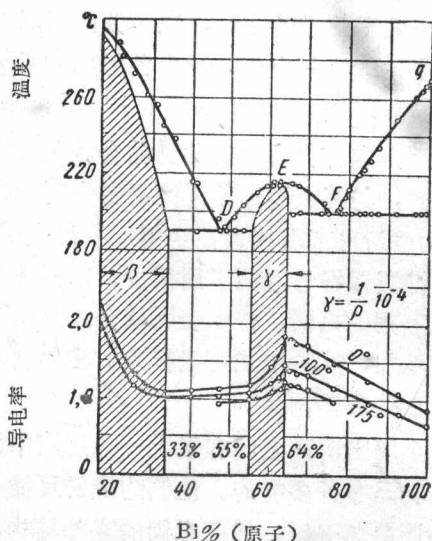


图 1 Tl-Bi 合金的平衡相图和电导率 [4]

前面列出的中間相分类与Н.С. 庫尔納科夫的分类不符合。

在电子化合物、有砷化鎳結構的相和其他相中既有道尔頓