

高等學校教學用書



電 工 材 料

Н. П. 鮑高羅齊茨基

В. В. 拜申柯夫 合著

В. М. 塔列耶夫

甘 明 道 譯

龍 門 聯 合 書 局

本書係根據蘇聯動力出版社(Государственное энергетическое издательство)出版的鮑高羅齊茨基(Н. П. Богородицкий)、拜申柯夫(В. В. Пасынков)、塔列耶夫(В. М. Тареев)合著“電工材料”(Электротехнические материалы) 1950 年版譯出。原書經蘇聯高等教育部審定為動力及電工院系教科書。

電 工 材 料

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
Н. П. БОГОРОДИЦКИЙ,
В. В. ПАСЫНКОВ, В. М. ТАРЕЕВ 合著
甘 明 道 譯

★ 版權所有 ★

龍 門 聯 合 書 局 出 版

上海市書刊出版業營業許可證出 029 號

上海茂名北路 300 弄 3 號

新 華 書 店 總 經 售

新 中 央 印 刷 所 印 刷

上海康定路 158 號

開本: 850×1168 1/32

印數: 9,501—12,000 冊

印張: 12²⁴/₃₂ 插頁: 6

1953 年 12 月 第 一 版

字數: 350,000

1956 年 5 月 第五次印刷

定價: (10) 2.10 元

序

創製解決電氣工程上的任何問題所必要的新材料和不斷改進舊有材料，都與電氣工程的發展及電氣工業對材料質量要求的提高同時並進的。

爲了製造功率較大的電源，大型蓄電池的製造可以認爲是材料實際應用的開端，它的電動勢是由於不同的金屬製成的圓片間的接觸電位差所產生的。這電池是俄國科學家B.B.彼得羅夫在1802年組成的。

彼得羅夫電池中用了8400片銅片及鋅片，並以浸過電解液的紙爲墊襯。藉這種電池之助他是世界上第一個得到電弧的人。

1832年俄國的科學家和技術家И. И. 西林創立了第一條陸上電報線，而在1837年創立了第一條水底電線以連接彼得堡和克隆許泰特。陸上電報電纜用玻璃管和棉紗作絕緣。對於水底電纜，西林是第一個在世界上應用橡膠絕緣的人。

1834年俄國科學院院士B.C.約可皮創造了第一個電動機，並將它用在船舶上作爲電動力。

1873年俄國發明家A. H. 駱特根創造了第一個白熾燈；俄國工程師И. H. 約勃洛溪可夫在1876年發明了“電燭”，電氣照明才開始廣泛應用。在我們同胞的這些發明裏曾利用了所有的主要電工材料：導體和半導體——銅、鋅、炭等；磁性材料——鐵、鋼；電的絕緣品——玻璃、瓷器、橡膠、棉紗。因此尚在電氣工程發展的初期，俄國的科學家們和工程師們已在電工材料應用的領域裏開闢了第一條道路。

隨着電氣工程的發展，材料的正確選擇日益重要，因這能幫助電氣工作人員解決發生在他們面前的問題。

祖國電氣工業各部門的迅速增長也引起了：所用材料的名目不斷增加，製造技術的不斷改進，以及日益廣泛地利用了從前在工程上沒有

用過的新原料。

符拉奇米爾·伊里奇·列寧下了卓越的定義：“共產主義——這就是蘇維埃政權加全國電氣化。”並因此他特別指出電氣工程的發展對我們祖國的重要性。在從前看來似乎是很巨大而難以完成的具有歷史意義的 ГОЭЛРО^① 計劃，不但是已經實現並且還超額完成了。

如果在 1914 年戰前俄國每年所發電能共計為二十億千瓦小時，則 1941 年偉大衛國戰爭前所發電能已等於四百八十億千瓦小時。在這段時期裏電廠的功率增加十一倍。蘇聯的電能生產水準已躍升到全世界第二位而在歐洲佔第一位。

在恢復和發展國民經濟的戰後五年計劃裏已經規定了在 1950 年電能和生產的使用要增加到 820 億千瓦小時，也就是說，較 1940 年超過 70%。

在斯大林五年計劃的年代裏，蘇聯電氣工程和電氣工業的巨大發展，把電工材料工業的最迅速的發展問題也提到第一位來，以使質量的高超完全符合最新技術的要求，並以現代化的技術用國產原料製造。

在我們的年代裏，罕有從適當試驗的結果發現新型的電工材料。而是需要預先把工程材料裏所能用的這些物質的物理、機械和化學性能深入地進行研究。

爲了瞭解材料的電性和磁性、機械強度、材料的老化及其他性能，必須研究物質的物理性能、它的化學成分和結構。

工業上所需的電工材料的研究和繼續探查是列在我們的專門科學研究院的題目之內的。

專業工程師和傑出的斯達漢諾夫工作者正在研究院和工廠的試驗車間裏研究最新的製造技術及試製。

在我國，生產實踐的可能性與有科學根據的要求相結合就奠定了良好的條件。就在這些條件之下，近年來電工材料工業才能獲得巨大

① ГОЭЛРО—Государственная Комиссия по Электрофикации Республики
——譯者。

的成就。

材料的質量對於現代電氣工程有重大意義，故研究專業課程“電工材料”需要列入培養電氣工程師的教學大綱裏。這課程規定下列主要任務。

1. 探討在研究和試驗電氣工程上所用的材料時所根據的理論基礎。
2. 按照電工材料的用途、成分和性能以確定它們的分類。
3. 研究材料用於電氣工程上時的基本特性以估計其適用性以及這些特性的測定方法。
4. 說明電工材料製造技術的基本特點。

列寧格勒的B. И. 烏里揚諾夫(列寧)電機學院工作人員和全蘇函授動力學院工作人員參加了本教科書的編著工作。

莫斯科的榮獲列寧勳章的B. M. 莫洛托夫動力學院和列寧格勒的M. И. 加里寧工業大學電工材料教研組審閱了原稿。作者對於這些學校中提供了一系列寶貴意見的教研組同人深表謝忱。

作者也要對擔任了本教科書繁重的校閱工作的B. T. 楞聶講師和校對原稿各章的列寧格勒電機學院電工材料教研組的同事M. B. 顧林、P. K. 馬那哥維及З. Ф. 伏羅皮諸君表示感謝。

作 者



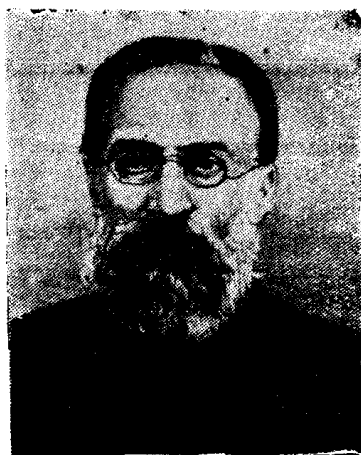
C. B. 列 別 捷 夫



M. B. 羅 蒙 諾 索 夫



H. C. 庫 爾 那 柯 夫



A. T. 斯 托 利 托 夫

目 錄

序

本書所用符號

緒 論

§1. 原子的結構	1
§2. 分子的結構	6
§3. 物質的氣體、液體及固體狀態	8

第一編 電工絕緣材料

第一章 電介質的極化

§4. 電場中的電介質	17
§5. 電介質的極化及介電係數	17
§6. 電介質極化的幾種基本形式	23
§7. 電介質按照極化形式的分類	26
§8. 氣體的介電係數	28
§9. 液體電介質的介電係數	30
§10. 固體電介質的介電係數	33
§11. 絕緣材料介電係數的測量法	38

第二章 電介質的電導

§12. 基本概念	42
§13. 氣體的電導	44

§14. 液體的電導	47
§15. 固體的電導	50
§16. 固體電介質的表面電導	56
§17. 電介質的絕緣電阻及比電阻的測量法	58

第三章 電介質中能量的損耗

§18. 基本概念	65
§19. 氣體中的介質損耗	70
§20. 液體電介質中的介質損耗	71
§21. 固體電介質中的介質損耗	74
§22. 介質損耗的測量法	80

第四章 電介質的擊穿

§23. 現象的一般特性	100
§24. 氣體的擊穿	101
§25. 液體電介質的擊穿	107
§26. 固體電介質的電擊穿	109
§27. 固體電介質的熱擊穿	112
§28. 電介質擊穿的試驗	122

第五章 電工絕緣材料的物理—機械及化學性能

§29. 電工絕緣材料的收溼性	127
§30. 電工絕緣材料的機械性能	131
§31. 電介質的熱性能	138
§32. 物理化學通性	143
§33. 電工絕緣材料按其性能及電工上的應用範圍而分類	150

第六章 有機電工絕緣材料

§34. 有機介質的結構基礎	152
----------------------	-----

§35. 液體電介質	156
§36. 蠟狀介質	166
§37. 樹脂	173
§38. 瀝青	184
§39. 乾性油	186
§40. 電工絕緣漆及化合漆	187
§41. 纖維材料	198
§42. 塑料	216
§43. 橡膠	228
§44. 矽素有機化合物	233

第七章 無機電工絕緣材料

§45. 電工陶瓷	237
§46. 玻璃	254
§47. 雲母及雲母製品	267
§48. 石類	273
§49. 石棉材料	275
§50. 氧化層絕緣	279

第八章 電纜製品

§51. 錄捲用導錄	283
§52. 電力電纜	286

第二編 導體 半導體 磁性材料

第九章 導電材料

§53. 導體的結構	293
§54. 金屬導體的基本特性	298
§55. 高電導材料	308

§56. 各種金屬·····	319
§57. 高電阻合金·····	323

第十章 半導體

§58. 基本概念·····	330
§59. 電工用碳·····	331
§60. 特殊用途的半導體·····	336

第十一章 磁性材料

§61. 磁性材料的通性·····	346
§62. 軟磁材料·····	353
§63. 含有各種特殊性能成分的合金·····	360
§64. 高頻鐵磁體·····	361
§65. 結構材料——生鐵及鋼·····	365
§66. 頑磁材料·····	368
附錄一 參考文件表·····	373
附錄二 物名索引 I (俄華對照)·····	375
附錄三 人名對照表·····	381
附錄四 物名索引 II (中文)·····	383
附錄五 新譯名詞註解表·····	390

緒 論

§1. 原子的結構

在研究電氣工程上所用的材料以前，尚需對若干理論基礎加以簡短的說明。

爲了自覺地利用物質的性能，首先要正確地瞭解這些性能。爲了瞭解物質中所發生的現象，那末研究它們在固態、液態及氣體狀態時的電性便具有重大的意義。

因此之故，需要約略地認識一些關於物質結構的近世知識。

迄本世紀初期，在物理學及化學範圍內業已積聚了一系列的因素，使我們對於原子是物質分割至最後的一部分這一觀點不得不有所懷疑。稀薄氣體的光線經光譜的分析發現存在着大量的頻率不同的個別光波，這些就是光譜的線條，數目可達好幾千。這一現象早在十九世紀末葉就已經促使我們想到原子結構的複雜性。作爲原子組成部分之一的荷負電的電子發現於 1897 年。在二十世紀的第一個十年中，就已經精密地測定了它的電荷 $e = 4.8024 \times 10^{-10}$ CGSE，而以後當研究陰極射線時，也測定了電子的質量 $m_0 = 9.1060 \times 10^{-28}$ 克；陰極射線是負電荷的流束。

根據相對論，電子的質量並非恆定而與電子的速度有關係。電子的速度接近於光速 c 時，它的質量 m 應按下律而增加：

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1)$$

電子在強電場的作用下，電子的速度 v 達到與光速相接近的數值 ($c = 2.9978 \times 10^{10}$ 厘米/秒)；由於計算的結果我們知道在電壓爲 1000000 伏

時，電子速度的數值達到 $v = 2.9 \times 10^{10}$ 厘米/秒，且電子的質量也幾乎增加四倍。

原子的電子具有稱為**自轉矩** S 及**磁矩** M 的轉矩。

在包含若干電子的系統中，它們的自轉矩或彼此平行構成該系統的磁矩，大小等於這些電子的總矩；或彼此平行而相反並且每一電子的磁矩彼此全部或局部地抵銷。

在研究元素的放射性裂變時，以及在研究陽極射線時（穿過陰極小孔的正射線），已證實有荷正電的質點存在，它的電荷等於電子的電荷，而質量約和最輕的原子——氫相等。

具有氫原子的質量 (1.67×10^{-24} 克) 並荷正電的質點稱為**質子**。

此後又確定了一種質量約與質子的質量相等但不荷電的質點——**中子**。

在宇宙射線中又發現了具有電子的質量但荷有正電的質點——**正子**以及一些電荷或正或負猶如質子及電子而質量卻是介於它們中間的特殊質點。

這些質點稱為**介子**，它們的質量近似地等於 1.8×10^{-26} 克，即為電子質量的 200 倍。

近世的原子物理還證實有一種質量如電子的中性質點的存在，稱為**中微子**，這些質點可能不是不可再分的。

原子結構學說的發展得出結論，原子內部每個電荷之間的距離比其尺寸大幾萬倍。甚至在固體中，雖然原子的排列是特別緊湊，但不可透入性的物質在原子內部仍然只佔據了微不足道的一部分。

原子中的電子數等於 Д. И. 門傑雷耶夫元素週期表中所佔位置的序數。門傑雷耶夫表中第一個元素是只有一個電子的氫，第 92 個元素是有 92 個電子的鈾。

每一個原子的電性是中和的；因此若具有一定數目的荷負電的電子，那末在原子核中一定也要有同等數目的正電荷。原子核中質子的數目也等於門傑雷耶夫表中元素的序數。

中子的發現使得關於原子核結構的概念有了改變。

根據 Д. Д. 伊萬年柯的觀點，原子核應認為只是由一些重質點——質子與中子所構成的系統。原子量決定於質子數與中子數的總和，即重質點——核子的總數。核子是質子與中子的總稱，中子的數目等於或略多於質子數。

光譜的研究得出了結論，原子中不可能是一些量子數相同的電子。每一電子力圖取得能量最小的狀態。

這一結論得以確定了電子在複雜原子中的位置。電子在原子中的狀態決定於四種量子數： n, l, m_l, m_s 。

量子數 n 稱為主量子數，決定了原子中電子電荷的平均半徑分配。當 $n=1$ 時，電子絕大部分時間位在距離原子核約 r_0 的地方， r_0 等於原子最簡單的行星式模型的圓周軌道的半徑。

次量子數 l 表示電子在其圍繞原子核運動時的轉矩（軌矩），以下式表示：

$$S_l = l \frac{h}{2\pi}, \quad (2)$$

式中

l ——可為 0, 1, 2, 3 ……等值；

h ——量子常數—— 6.624×10^{-27} 爾格·秒。

第三量子數 m_l 稱為“磁的”，決定電子雲伸展的方位。第四個量子數 m_s 與電子的轉矩——自轉矩有關。

根據量子力學中的定律，每一電子只能為自由量子狀態中的一種，原子中的電子壳只有根據原子核電荷增加的次序才能——加以安插。這次序完全和 Д. И. 門傑雷耶夫週期表中元素分配的次序相重合，週期表列於表 1。

把原子結合在分子裏的化學力，把分子結合在整個物體中的分子力，磁性及電性——所有這些都決定於最外層的電子。這些具有同一能級的外層電子的重新分配至另一層去，或完全從原子的成分中脫除需要花費 2 至 25 電子伏的能量。

需知電子的電荷是恆量，外層電子從一個能級至另一能級的能量

表 1

門 傑 雷 耶 夫 的

週期	列	元 素				
		I	II	III	IV	V
I	1	氫 1. H 1.0078				
II	2	鋰 3. Li 6.940	鈹 4. Be 9.02	硼 5. B 10.82	碳 6. C 12.010	氮 7. N 14.008
III	3	鈉 11. Na 22.997	鎂 12. Mg 24.32	鋁 13. Al 26.97	矽 14. Si 28.05	磷 15. P 30.98
IV	4	鉀 19. K 39.096	鈣 20. Ca 40.08	鈦 21. Sc 45.10	鈦 22. Ti 47.90	釩 23. V 50.95
	5	銅 29. Cu 63.57	鋅 30. Zn 65.38	鎳 31. Ga 69.72	銻 32. Ge 72.60	砷 33. As 74.91
V	6	銣 37. Rb 85.48	銣 38. Sr 87.63	鉕 39. Y 88.92	銻 40. Zr 91.22	鈮 41. Nb 92.91
	7	銀 47. Ag 107.88	鎘 48. Cd 112.41	銦 49. In 114.76	錫 50. Sn 118.70	銻 51. Sb 121.76
VI	8	銻 55. Cs 132.91	銣 56. Ba 137.36	釷 57. La 138.92	鈳 72. Hf 178.6	鉭 73. Ta 180.88
	9	金 79. Au 197.2	汞 80. Hg 200.61	銩 81. Tl 204.39	鉛 82. Pb 207.21	鉍 83. Bi 209.00
VII	10	釷 87. Fr 223	鐳 88. Ra 226.05	錒 89. Ac 227	釷 90. Th 232.12	

稀 土

銻 58. Ce 140.13	鐳 59. Pr 140.92	釷 60. Nd 144.27	銣 61. Pm 147	釷 62. Sm 150.43	銻 63. Eu 152.0	銣 64. Gd 156.9
--------------------	--------------------	--------------------	-----------------	--------------------	-------------------	-------------------

放 射

釷 90. Th 232.12	鐳 91. Pa 231	銣 92. U 238.07
--------------------	-----------------	-------------------

元 素 週 期 表

族						
VI	VII	VIII			0	
					氦 2. He 4.003	
氧 8. O 16.000	氟 9. F 19.00				氖 10. Ne 20.183	
硫 16. S 32.06	氯 17. Cl 35.457				氩 18. Ar 39.944	
鉻 24. Cr 52.01	錳 25. Mn 54.93	鐵 26. Fe 55.85	鈷 27. Co 58.94	鎳 28. Ni 58.69		
硒 34. Se 78.96	溴 35. Br 79.916				氪 36. Kr 83.7	
鉬 42. Mo 95.95	錒 43. Tc 99	鈳 44. Ru 101.7	銦 45. Rh 102.91	鈀 46. Pd 106.7		
碲 52. Te 127.61	碘 53. I 126.92				氙 54. Xe 131.3	
鎢 74. W 183.92	銻 75. Re 186.31	銱 76. Os 190.2	銲 77. Ir 193.1	鉑 78. Pt 195.23		
鉈 84. Po 210	釷 85. At 211				氡 86. Rn 222	

金 屬

銩 65. Tb 159.2	鐳 66. Dy 162.46	銩 67. Ho 163.5	銩 68. Er 187.2	銩 69. Tm 169.4	鐳 70. Yb 173.04	鐳 71. Lu 174.99
-------------------	--------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------

性

鐳 93. Np 237	銩 94. Pu 239	銩 95. Am 241	銩 96. Cm 242
-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

變換可以伏表示。對大多數物理及化學現象來說，這些功不超過10伏。

§2. 分子的結構

現代的科學不但確定了原子的結構，並且在分子的結構方面也有必要的瞭解。

物理學上，以原子及分子結構理論為基礎，對物質的機械性、熱性、電性及其他性能均得到了足夠完整的解釋。

根據物質的折光指數，根據吸收、發射及擴散等光譜便有可能得到關於分子結構的必要知識。

分子結構的詳情及與電子直接有關的性能只能在量子物理的基礎上去理解。但在一定範圍內古典物理學對於分子的基本特性也完全能給以足夠清晰的概念。

原子在分子中的特性決定於原子的電子結構。原子與電子結合後便獲得負電荷而變為負離子；失去電子後，它具有正電荷而形成正離子。正及負離子彼此以鍵相聯，其吸引力與它們電量的乘積成正比而與它們距離的平方成反比。這種離子鍵稱為極性的，異極性的以及電價的。關於固體中離子鍵的堅固性可以根據離子式結構晶體巨大的機械強度及熔化溫度很高來證實。離子式晶體的熱膨脹係數較小，又因為其中所有的電子都牢牢地固定在每一個離子的原子軌道上，故是電介質。它們在熔化狀態時則呈現頗大的電導，這是直接由離子的運動所引起的。這便是離子式結構的特性。岩鹽(NaCl)可作為離子式結構物的例子。

研究了 H_2 , O_2 , N_2 , Cl_2 , 甲烷 CH_4 , 氨 NH_3 及一系列的類似分子的結構以後，決不能以離子鍵間的靜電力去說明參加在分子中原子間所呈現的鍵。此處的鍵不是離子而是原子本身內即結合在分子中的原子所共有的電子。這種形式的鍵稱為類極性鍵或共價鍵。

考察 Cl_2 的分子，我們應得出結論，這一分子中的兩個氯原子（外層各有七個電子），以結合兩個公共電子的方法而成穩定的形式（圖 1）。這種結合的結果，每一個原子在其價層中的電子數都增加了一個。因

爲這層達到了穩定，便不可能再發生繼續的結合。

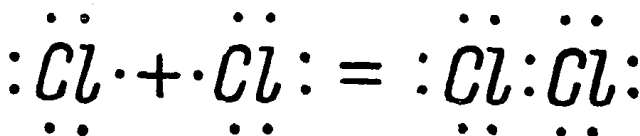


圖 1 氯分子中的類極性鍵

類極性鍵的另一顯著特點是它的鍵可以排成空間的形狀。例如碳原子四個類極性鍵按正四面體頂點的排列。金剛石的結構是類極性結構的理想例子；其中每一個碳原子的周圍只有四組其他的碳原子，並且它們全都對稱地排列在正四面體的頂點。所有的碳原子都有同一種座標。類極性結合物的物理性能如熔點、剛性等變化的範圍很大。類極性結合物無論在固態或熔化狀態時都是電介質。

具有類極性鍵的分子隨其分子結構的對稱性的區別而可爲中性或極性(電偶性)。凡分子中正電荷及負電荷的重力中心相重合者是中性。如果在每一分子中，兩種符號的電荷的重力中心不相重合而彼此有若干距離的，則這些分子將是極性或電偶性的。極性分子具有特性的電偶矩，它決定於電荷和正負電荷重力中心間距離的乘積：

$$\mu = q \cdot l. \quad (3)$$

分子的電荷 q 的量約 10^{-10} CGSE；距離 l 是 $(1 \rightarrow 3) \times 10^{-8}$ 厘米。因此分子的電偶矩 μ 的量常爲 10^{-18} CGSE。

表 2 列舉了一些分子的電偶矩的數值。

表 2 分子的電偶矩

物 質	化 學 式	CGSE 單位中的電偶矩 μ
二硫化碳	CS ₂	0
四氯化碳	CCl ₄	0
苯	C ₆ H ₆	0
水	H ₂ O	1.87×10^{-18}
乙醇	C ₂ H ₅ OH	1.70×10^{-18}
脲	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N} \diagup \\ \text{H}_2\text{N} \diagdown \end{array} \text{C} = \text{O}$	4.53×10^{-18}