



电 纜

(結構和工藝基礎)

C. M. 布拉金著

交通大學(西安部分)絕緣教研組

電纜專門化譯

、 高等 教育 出版 社

本书系根据苏联国立动力出版社 (Государственное Энергетическое Издательство) 1955年出版的 С. М. 布拉金 (Брагин) 著“电纜”(Электрический кабель) 一书譯出。

书中簡要地叙述了电纜技术的物理基础, 电纜和电綫的典型結構, 主要生产过程的理論, 典型生产設備的工作原理和电纜产品的工业上的試驗方法。

本书經苏联高等教育部多科性及机器制造高等工业学校主管司审定为动力和电机高等学校和系用的教学参考书。本书也可以供中等技术学校相应专业的学生及电纜工业方面的工程技术人员閱讀。

本书由西安交通大学絕緣教研組电纜专门化教师集体翻譯。

С. М. Брагин

交通大学(西安部分)絕緣教研室

电纜专门化譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺7号

(北京市书刊出版业營業許可證出字第 054 号)

京华印书局印装 新华书店发行

統一書号 15010·809 开本 850×1168 1/32 印張 8
字數 188,000 印數 0001—2 890 定價(7) 1.10
1959年8月第1版 1959年8月北京第1次印刷

序

在苏联电气化工作过程中，建造强大的电站和高压傳輸綫要求发展电气工业的各个部門，其中包括制造高低压电力电纜、各种型式軟絕緣的电綫和用作为电话电报傳送以及远距离控制和操縱仪表和电器的通訊电纜的电纜工业。

用于饋送、分配网络交直流高压傳輸綫路的电纜面临着高的要求，对于通訊电纜和軟絕緣电纜的要求也在大大地提高。

在过去 25 年内解决了关于电纜技术和理論各方面很重要的課題。

在通訊电纜方面进行了不少的改革，出现了用于增密高频电流的新型电纜，同軸电纜和无綫电频率电纜。

对于这样的材料，例如电纜紙、浸漬用的油和复合剂、保护层用的材料等，我們要求大大提高。

在所有型式电綫和电纜制造工艺中，为了必須提高产品的质量 and 大大地提高基本設備的生产能力，出现了很大的改变和改善。出现了联合各生产过程的組合机，自动化机器和联合机等。

在过去一些年代里，在掌握新結構和改善生产工艺过程方面，电纜工厂和科学研究院的工作人員累积了需要总结发展的經驗和知識，它部分地作者在包括結構、工艺和各种型式电纜和电綫試驗等問題的本书中予以完成。

与多数电纜技术书籍不同，本书首次在此地将結構基本原理和規律与各种型式电纜电綫——电力电纜、橡皮和塑料絕緣电纜和电綫以及通訊电纜——的工艺过程一起叙述。

这就是將結構、工艺、电纜制品試驗問題和电纜电性热性計算

問題联合在一起的電纜理論基礎課程，它是莫斯科動力學院從 1939 年培養絕緣電纜專門化工程師的基礎。

本書屬於該課程的第一部分，而電纜的電性和熱性計算部分將準備付印。

所有對本書內容的意見，作者將以感激的心情听取，並在自己工作中利用它。

作者認為必須特別感激這些在工作中幫助了作者的同志，首先是科學技術博士 В. А. 普利汶琴切夫(Привезенцев)、電纜工業局總工程師 Д. В. 貝可夫(Быков)，科學技術副博士 П. Н. 郭爾什可夫(Горшков)，他們仔細地閱讀了本書手稿，並提出了很多寶貴的意見。

作者非常感謝以教研組主任、科學技術博士 Н. Г. 得羅茲多夫(Дроздов)為首的電氣絕緣及電纜技術教研組全體人員，他們在教研組會議上討論了本書的手稿。並且非常感謝本書的校閱者 Е. С. 內爾可夫(Ныров)研究生，他對本書手稿作了很多工作，他編纂了附錄和許多例題。

目 录

序.....	iii
緒論.....	1
第一章 電纜、它的結構和制造.....	4
1-1. 定义与分类.....	4
1-2. 生产電纜、電繩和電纜所用的材料.....	6
1-3. 電纜产品的主要型式.....	17
1-4. 主要的工艺过程.....	32
第二章 圓形綫芯和非圓形綫芯的扭絞.....	35
2-1. 扭絞的一般理論.....	35
2-2. 不松扭的導綫.....	45
2-3. 复合扭絞.....	49
2-4. 空心的綫芯.....	50
2-5. 扭絞綫芯的可曲度.....	51
2-6. 扇形綫芯.....	54
2-7. 卵形綫芯.....	62
2-8. 扇形綫芯的結構.....	66
第三章 层状式包絕緣.....	69
3-1. 层状式包紙絕緣的优点.....	69
3-2. 紙帶寬度的計算.....	70
3-3. 絕緣机包紙器的型式.....	76
3-4. 電纜紙帶包繩的檢查.....	80
第四章 成纜.....	83
4-1. 成纜直徑的計算.....	83
4-2. 成纜时的变形.....	85
4-3. 不对称的扭絞成纜.....	90
4-4. 絞制机的型式.....	91
第五章 電纜絕緣的干燥.....	97
5-1. 干燥过程在電纜生产中的意义.....	97
5-2. 電纜干燥理論基础.....	99

5-3. 真空干燥排气方程式	102
5-4. 电流干燥	109
5-5. 示例性的干燥工作制度	112
5-6. 干燥的检查	116
第六章 电缆的浸渍	122
6-1. 电力电缆绝缘层所用的材料	122
6-2. 纸的主要特性	123
6-3. 浸渍剂的主要特性	127
6-4. 纸和电缆的浸渍过程	131
6-5. 浸渍后电缆的冷却	134
6-6. 实际的浸渍和冷却制度	136
6-7. 电缆制造时空穴的形成	140
6-8. 电缆绝缘内的机械过程	143
6-9. 充油电缆的干燥与浸渍	152
第七章 保护层和复盖层	157
7-1. 保护层和复盖层的作用	157
7-2. 保护层的材料	158
7-3. 铅护层的破坏	161
7-4. 护层的机械应力和计算	163
7-5. 压铅过程	168
7-6. 电缆的装铠	174
第八章 橡皮绝缘电线与电缆	182
8-1. 产品的类型和工艺要素	182
8-2. 橡皮绝缘用的材料和工艺特点	185
8-3. 主要的工艺过程	188
8-4. 橡皮绝缘的机械和电气性能	193
8-5. 橡皮绝缘的老化	200
第九章 通讯电缆	204
9-1. 通讯电缆的结构与制造特点	204
9-2. 通讯电缆的主要特性	208
9-3. 通讯线路间的相互影响	214
9-4. 高频通讯电缆的结构及主要特性	217
第十章 电缆的试验	221
10-1. 生产中的及成品的检查与试验	221
10-2. 电线和电缆的主要电性	223

10-3. 电气测量法及主要的测量线路图.....	229
10-4. 橡皮绝缘电线与电线的试验特点.....	237
10-5. 对浸渍纸绝缘电力电缆所提出的主要要求.....	239
附录.....	242
参考书刊.....	248

緒 論

沙俄时代的電纜工业几乎全部掌握在外国資本家手中。国内在電纜和导綫方面的需要主要是靠进口，只有小得可怜的一部分由俄国電纜工厂来满足，例如在第一次世界大战开始时，在俄国只有总電纜产值为每年 2500 万卢布的五个電纜工厂。

電纜技术的历史是从約在 1753 年因为研究大气中电荷[М. В. 罗蒙洛索夫(Помоносов)和 Т. В. 黎赫門(Рихман)]的需要，第一次企图制造絕緣電綫时开始的。

電纜技术发展的初期一直約延續到 19 世紀中叶。在这一时期的特点是：企图利用玻璃管、火漆等其他常用的材料来制造絕緣電綫和電纜。

在这一发展電纜技术时期水雷的发明者 П. Л. 謝林(Шиллинг)起了很重要的作用，謝林的功績在于为了絕緣電纜，他第一次应用了过了 60 年才用到電綫和電纜生产中的材料(橡皮)。

19 世紀中叶，在英国和德国开始了用馬來樹膠絕緣的海底通訊電纜。

在 19 世紀 70 年間，在俄国和国外出現了電纜工厂，这些工厂主要是制造絕緣電报電綫，同时其中許多是用馬來樹膠絕緣的海底電报電纜。最先的俄罗斯電纜厂是建立在莫斯科罗果关外和彼得堡(1880 年)下城街上。

19 世紀末叶，俄罗斯的電纜工业开始发展，它与国外在俄国的資本家的工厂很成功地竞争。强烈地受制于外国資本家的沙俄政府的政策并未鼓励自己的工业，但是俄国的電纜工业是发展起来了。

在電纜工業存在的20—30年過程中，至1911年由於發展技術和增大生產容量，電纜工業能夠完成祖國的和對國家的一些重要的定貨。

除了發展電纜生產和增加在俄國的電纜工廠的數目，那時俄國一些進步的學者進行了為了累積和進一步完善知識所必需的理論基礎的工作。在電纜方面，特別應當指出的是彼得堡電工學院教授П. Д. 伏拿羅夫斯基(Войнаровский)的著作，他在1905年編纂了架空綫和電纜裝置的教科書，而在1912年出版了自己獨創、世界第一的關於電纜理論的著作。

電纜技術和電纜工業在蘇維埃政權年代得到最大的發展。為了建造列寧電氣計劃第一項工程——伏爾荷伏水電站——電纜工業接到一系列關於設計新型電纜結構很重要的課題。結果在1923年設計出35千伏三芯高壓電纜的新結構，而隨後在1924年由北方電纜廠出產了第一批這種型式電纜，它是被敷設在列寧格勒。僅僅經過幾年以後，在國外也出現了這種型式的電纜。

在1928年敷設了由北方電纜廠製造長度為42公里獨特結構的電話電纜。這樣，便掌握了長途紙繩絕緣通訊電纜的生產。

至1932年蘇聯電纜工廠成為電氣工業中先進的企業，同時按其解決的技術問題的性質和生產組織，蘇聯在世界電纜工業中占領先地位。

在偉大衛國戰爭中，開始生產新型電纜產品——無線電頻率電纜，現在這種電纜已發展成為電纜生產的特別部門。

在戰爭結束後，為了適應國民經濟的需要，電纜工業的發展比戰前發展快得多。

一 在戰後掌握了至220千伏的充油電纜的生產。

設計並掌握了400千伏直流電纜10和35千伏充氣電纜的生產。

为了迅速地增加橡皮絕緣电綫和电纜的产量，設計了新的工艺过程，它能实现流水生产作业，同时得到高品质的电綫和电纜。

为了发展科学研究工作和掌握新式生产，在1944年建立了中央电纜試驗室，嗣后改建成为电纜科学研究院。

第一章 電纜、它的結構和製造

1-1. 定义与分类

所有電纜产品可以归納为下列三种基本类型:

- (a) 裸電纜;
- (b) 各种型式的絕緣電纜和電繩;
- (B) 各种型式的電纜。

裸電纜只有一个結構部分——整体的或者由个别导絲扭絞成的金屬芯。絕緣電纜除載流芯之外，尚有包在芯上的絕緣层和輕型的保护层，例如編綫套。電繩的特点是在公共的編綫套內具有二根或几根一起扭絞柔軟的絕緣芯。

電纜的結構特点在于它有三个結構元件：載流芯(一个或几个)、絕緣层、保护层和复盖层。

電纜的用途是輸送和分配电能。根据傳輸功率的大小，所有電纜可以分为两类:

- (1) 電力電纜，它的特点是輸送大的功率。
- (2) 通訊電纜和訊号電纜，它的特点是輸送极小的功率。

• 電纜的結構、製造電纜的材料和電纜的生产过程組成電纜技术的基础。

電纜基本性能(电、热和机械性能)的計算組成電纜的理論基础，它能預先告訴我們電纜运行特性，最經濟地选择主要部分的尺寸和工作条件。

電纜的基本結構元件:

- (a) 各种大小和形状的載流芯。載流芯的任务是引导在電纜

內的電能的流向。載流芯截面的大小決定綫芯電流發熱損耗的大小。為了使綫芯有較大的可曲度，假若這是必要的話，綫芯不是由單根導絲而由多根較細的導絲扭絞在一起而組成的。

(6) 絕緣材料層(絕緣)。它將載流芯與載流芯，載流芯與外面金屬層(假若有的話)分開。絕緣層的任务是抗御綫芯與護層間的電場力，這種電場力會引起漏電流(在通訊電纜內)和在高壓電纜內引起放電(击穿)。電纜絕緣應足夠柔軟，以便電纜在製造過程中 and 敷設使用時有足夠的彎曲性。高壓電力電纜的絕緣，首先必須具有高的击穿強度，以保證電纜可靠的運行，但是對於所有電纜絕緣，並非一概都要求它有高的击穿強度，例如通訊電纜通常都在低壓下工作，此時具有決定意義的是漏電流引起的損耗。所以對於通訊電纜的絕緣我們用漏電流小的，也即是絕緣電阻大， $\text{tg}\delta$ 值小的絕緣材料。

(b) 保護層和復蓋層。它保護電纜絕緣層免受外界媒質的作用和機械損傷。其中應包括用以保護電纜保護層和其他復蓋層不受周圍媒質腐蝕的各種防腐蝕復蓋層。各種保護層(鉛的、橡皮的等等)一般按照它們的機械強度，耐腐蝕的本領以及主要地按照不

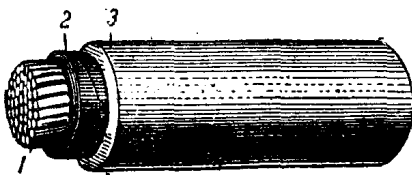


圖 1-1. 電力電纜。

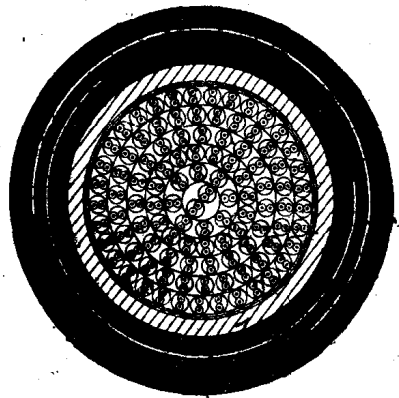


圖 1-2. 通訊電纜截面圖。

透水性加以區別。因為在受潮情況下，大多數用於電纜的絕緣材料的絕緣性能都會劇烈地變壞。

在圖 1-1 可以很清楚地看到單芯電力電纜的主要結構元件：一根直徑很大的銅綫芯 1，浸漬紙絕緣層 2 和鉛護層 3。鉛護層上面還可能包纏鎧甲和其他保護層（它在圖 1-1 中沒有畫出）。圖 1-2 給出了一個通訊電纜的截面，它與前者不同之處，在於它的絕緣綫芯的數目很多和它具有所謂空氣紙絕緣。

應用在電力和電訊工程方面的電纜產品（電纜、導綫、電繩）一般根據下列特征加以區別（OCT 7885）：

- (a) 絕緣的種類；
- (б) 載流芯的材料；
- (B) 載流芯的形狀和結構；
- (Г) 保護層的類型；
- (Д) 製造結構上的特征；
- (e) 用途；

(Ж) 電力電纜產品亦常根據電壓來區別。

根據製造結構上的特征，所有形式的電纜產品一般按照載流芯的數目，截面或直徑；二綫組或四綫組的組數；綫芯的可曲度，扭絞方式，外形（圓的、三角形的及別的形狀的）；外護層的型式等等加以區別。

1-2. 生產電纜、電繩和電纜所用的材料

生產電纜、電繩和電纜用的材料，通常分為製造載流芯的，製造絕緣層的和製造保護復蓋層的。但更方便的是下列分類法：(1) 金屬；(2) 纖維材料；(3) 液體絕緣材料；(4) 天然樹脂基和合成樹脂基的固體絕緣材料；(5) 漆、復合物和瀝青。

電纜生產中所採用的金屬有：銅及其合金、鋁、鉛和鋼。銅和

鋁主要地用来制造电綫、电繩和电纜的載流芯、而鉛和鋼主要是用来制造保护层和鎧甲。这些材料适用于制造电綫和电纜主要是由它們的电气性能(电阻)和机械性能(抗張强度及伸长率)来决定的。

在表 1-1 中列举了这些金属的主要特性:

电纜生产中我們利用有机纖維材料如棉紗、絲、电纜紙、合成纖維和无机纖維材料如石棉、玻璃絲。

棉紗广泛地应用于制造繞包銅和各种电磁綫。

一般应用由双根或三根扭絞的綫和单根的紗。棉紗支数决定綫的粗細。支数等于 1 千克紗卷內紗长度的千米数, 紗愈粗、其支数愈小。制造电磁綫一般采用支数为 $\frac{200}{1}, \frac{170}{1}, \frac{133}{1}, \frac{100}{1}, \frac{85}{1}, \frac{54}{1}, \frac{40}{1}$, 的单根紗, 而編織套一般采用支数为 $\frac{100}{2}, \frac{85}{2}, \frac{54}{2}, \frac{34}{2}, \frac{20}{1}$ 及 $\frac{5}{1}$ ① 的綫。单根紗綫的抗張强度随支数而异, 在标准中有所規定。紗有本色与染色的, 在正常状态下(空气相对湿度 65%) 紗的最高含水量規定为 7%。

以棉紗絕緣的电綫, 在受潮情况下, 其电性就大大降低。这种电綫的工作温度不应当超过 105°C , 因为在更高的温度下, 由于棉紗的老化, 其机械强度大大地减低。

天然絲适合于制造直徑較小的电磁綫, 特別当我們希望获得絕緣厚度較棉紗繞包来得薄的时候。例如对棉紗而言, 单层繞包的最小絕緣厚度是 0.1 毫米, 而絲却只有 0.06 毫米, 采用特別細支的絲, 絕緣厚度可以减小到 0.04—0.05 毫米(直徑)。

絲的粗細亦由支数表示, 也有以特定称为“細度”的数值来表示。絲的細度用絲长 9000 米絲卷重量的克数来表示, 或者是长度

① 号碼中分母上的数目指示綫內的紗的根数。

表 1-1. 用于電纜生產的金屬的主要性質

金 屬	純 度 (純金屬含量) %	比 重	20°C時的 導電系數 米/歐· 毫米 ²	機 械 特 點	
				抗張強度 千克力/毫米 ²	拉斷後的伸 長不小於%
銅, 型號 M1					
銅絲:					
硬拉的 MT	99.9	8.89	55	39—34	0.5—2.5
軟軔煉的 MM			57	28—25	18—35
鋁, 型號 A1					
鋁絲:					
硬拉的 AT	99.5	2.7	34	16.5—15	1.0—2.0
軟軔煉的 AM				7.5	10—18
鉛	99.9	11.4	4.5	1.3—1.8	30—40
鋼(鐵)		7.8	7.6	35—50*	8—12
				120—150**	4—5
				170—250***	—

* 直徑 0.3—8.0 毫米的鎧甲鋼絲

** 用于鋼芯鋁綫的鍍鋅鋼絲

*** 直徑 0.2—0.5 毫米的高強度鍍鋅和鍍錫鋼絲

附注: (1) 決定于斷後的伸長試樣的長度是 200 毫米

(2) 前面的數字屬於直徑較小的金屬絲

為 450 米的标准絲卷的達尼 $\left(=\frac{1}{20}\text{克}\right)$ 數來表示。采用于電磁綫方面的絲大都是支數為 300—500 染色的(綠的、藍的)單根絲。本色(白)的用得較少。

絲絕緣的電氣性能比棉紗的高。

電纜紙用于電力電纜(電纜紙)和通訊電纜(電話紙)綫芯的絕緣。

電纜紙(ГОСТ 645-41)指定用于電壓達 35 千伏電力電纜的絕緣, 亦用于控制和訊號電纜, 電磁綫, 有時也用于通訊電纜的製造。電纜紙由原色的硫酸鹽纖維制成三種型號: K-08, K-12 及 K-17, 它的厚度分別為 0.08, 0.12 及 0.17 毫米。紙的顏色主要是

原色；有色紙仅少量应用作为辨色之用(用来为安装时辨别二綫組、四綫組的絕緣芯)。对于市内电话电纜芯綫的絕緣采用型号KT 厚度为0.05毫米的电话紙。

电纜紙与电话紙的主要特性引录在表1-2内。图1-3是电纜紙K-12的机械性質与湿度的关系曲綫，紙的毛細性能是用紙条在20°C下吸入粘度为0.25泊的油的速度来表示的。电纜紙的吸油速度应当在10到30毫米/小时的范圍内(图1-4)。

为了制造电压达110千伏和更高电压的电纜采用厚度为0.03到0.075毫米，密度为1.05到1.2克/厘米³的高密度紙。

表1-2. 电纜紙与电话紙的机械性能

紙的 标号	厚 度 毫 米	比 重	拉断力不小于 千 克		拉断后的相对 伸长不小于%		横向与纵 向的双折 数不小于	透气度不 大于 厘米 ³ /分
			纵向	横向	纵向	横向		
K-08	0.08±0.005	不小于0.7	9.0	4.5	2	6	2000	25
K-12	0.12±0.007	不小于0.7	16.0	7.0	2	6	2000	25
K-17	0.17±0.01	不小于0.7	22.0	11.0	2	6	2000	25
KT	0.05±0.0025	不大于0.82	5.5	2.4	2	4.0	500	—

附注：1 拉断力是在闊15长180毫米的标准紙条上决定的。

2 透气度是指紙試样的面积为10厘米²、空气压力为100毫米水柱，在1分钟内透过試样的，按立方厘米計的空气容积。

电气性能用介質損耗角正切的大小表示，在100°C干燥后的紙在电場梯度为1.5千伏/毫米，频率为50赫下所量得的 $\text{tg}\delta$ 应約为0.003，而对于浸漬紙应約为0.004。

图1-5表示未浸漬紙的介电系数与紙的密度的关系。

干紙的电阻系数很高(約为 10^{17} 欧·厘米)，但是在受潮的情况下剧烈地下降。

金属化紙用来屏蔽高压电纜絕緣层的表面和鉛层間的空气間隙。它也用来均匀由多导絲扭絞的綫芯表面上的梯度(多絲效应)。

金属化紙是由厚度为 0.12 毫米的電纜紙在一边貼以厚度为 0.014 毫米薄鋁箔所制成。为了浸漬时浸漬剂能透过金属化紙，金属化紙都打有每 100 厘米² 不少于 500 个均匀分布的小孔。

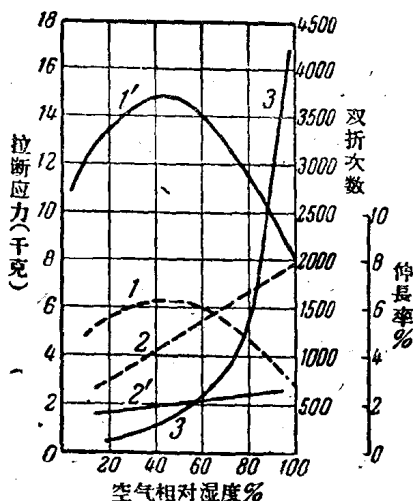


图 1-3. 電纜紙的机械性能与湿度的关系:

1—橫方向的抗張强度; 1'—縱方向的抗張强度

2—橫方向的伸长率; 2'—縱方向的伸长率;

3—双折次数。

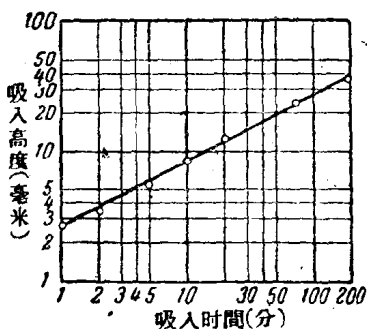


图 1-4. 紙吸入油的高度和时间的关系。

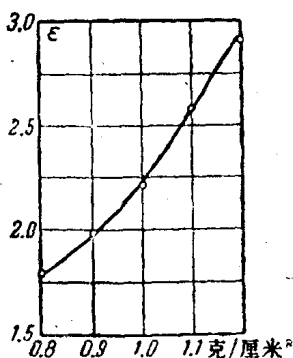


图 1-5. 未浸漬紙的介电系数与密度的关系。