



電 纜 理 論

M. И. 曼特罗夫講

西安交通大学电气絕緣与电纜技术教研組譯

高等 教 育 出 版 社

本书是根据苏联专家曼特罗夫(M. H. Мантров)同志在交通大学对教师讲课的讲稿加以整理补充而成的。

本书叙述电力电缆的各种问题,比较全面地研究了电力电缆。书中首先叙述电力电缆的结构及其电场的计算方法,接着叙述生产中所用的材料及其性能,然后对工艺理论、工艺计算及工艺设备进行详细的探讨,特别是对其中的干燥和浸渍过程作了较详细的分析研究。这不仅对电缆制造工作者极有价值,而且对其他涉及浸渍纸绝缘(如电容器套管制造等)的工作者均很有帮助。

书中以较多的篇幅叙述了高压电缆的介电性能和热性能,对于设计中所用的公式作了详细的说明及推导,这对初学者很有帮助。

本书可供高等学校绝缘与电缆专业师生参考,同时对电缆研究、设计、制造及运行的工程技术人员也有参考价值。

本书由西安交通大学电气绝缘与电缆技术教研组张和康同志译出,由教研组集体进行校订和整理。

电 缆 理 论

M. H. 曼特罗夫讲

西安交通大学电气绝缘与电缆技术教研组译

高等教育出版社出版 北京宣武门内大街27号

(北京市书刊出版业营业许可出字第054号)

商务印书馆上海厂印刷 新华书店发行

统一书号 15010·824 开本 850×1168 1/32 印张 16 1/16 插页 1
字数 415,000 印数 1-5,000 定价(4) 2.30

1959年12月第1版 1959年12月上海第1次印刷

目 录

緒 論	1
第一章 电力电纜的主要类型和结构	3
1-1. 电力电纜的主要结构元件	3
1-2. 制造电力电纜用的材料	4
1-3. 电纜的主要类型、特性概述和应用范围	4
第二章 制造电纜用的材料	10
2-1. 材料的主要种类	10
2-2. 銅	10
2-3. 鋁和鋁合金	16
2-4. 电纜紙	21
2-5. 涂漆織物	32
2-6. 矿物油	34
2-7. 电纜用油松香浸漬剂	47
2-8. 彈性塑料	52
第三章 裸銅絲扭絞成芯綫的理論	69
3-1. 扭絞的种类	69
3-2. 簡單有規則同心式扭絞	69
3-3. 复杂有規則同心式扭絞	75
3-4. 直徑增大的圓形芯綫的扭絞	76
3-5. 圓形芯綫的不正常扭絞	77
3-6. 不規則扭絞	78
3-7. 扭絞的可撓度	78
3-8. 扭絞的节距和方向	78
3-9. 扇形芯綫和弓形芯綫的扭絞	84
第四章 电纜包紙帶理論要点	95
4-1. 絕緣厚度	95
4-2. 紙絕緣的包繞	98
4-3. 包繞参数(包繞节距,絕緣包繞角,紙帶寬度,芯綫或电纜的直徑,搭迭)	102
4-4. 絕緣芯綫的总絞	107

4-5. 扇形芯纜扭絞时的变形	110
第五章 电絕緣材料受湿和干燥时的物理过程	115
5-1. 引言	115
5-2. 电介质的收湿性和吸水性	115
5-3. 水份与材料的結合形式	118
5-4. 吸着作用和解吸作用的等溫綫	121
5-5. 毛細管型多孔性物体中水份的移动	124
5-6. 干燥过程的动力学	134
第六章 电纜絕緣的干燥和浸漬	144
6-1. 概述	144
6-2. 抽空設備	152
6-3. 凝聚柱	157
6-4. 真空鍋	158
6-5. 电纜絕緣的浸漬过程	161
6-6. 电纜浸漬后的冷却	165
6-7. 充油电纜干燥和浸漬的特点	166
第七章 电纜的鉛皮和鋁皮	170
I. 电纜的鉛皮	170
7-1. 鉛皮的性能	170
7-2. 压鉛机	181
7-3. 影响鉛皮形成的主要技术操作因素	191
7-4. 鉛皮的厚度	209
7-5. 鉛皮强化的 CPT 型电力电纜	213
II. 电纜的鋁皮	216
7-6. 引言	216
7-7. 电纜保护包皮所用的鋁	217
7-8. 鋁的防蝕性能	219
7-9. 包电纜鋁皮的技术操作特点	221
7-10. 压鋁机的生产率	223
7-11. 压鋁机装置說明	226
7-12. 压鋁机活塞杆的計算	229
7-13. 电纜鋁皮壁厚不均匀性的原因	235
7-14. 减小电纜鋁皮壁厚不均匀性的建議	238
7-15. 1000伏以下的鋁包电力电纜	239
第八章 电纜的装鍍	243
第九章 电力电纜的电場	252

9-1. 电力电缆的电容	252
9-2. 均匀介质单芯电缆的静电场	257
9-3. 双层介质单芯电缆的静电场	260
9-4. 直流和交流下温度对电力电缆绝缘中电场强度分布的影响	264
9-5. 三芯电缆中的电场	271
9-6. 芯线的多导线性对芯线表面电场强度的影响	272
9-7. 根据材料的最小消耗量的计算选择电缆	275
9-8. 高压电缆绝缘的分阶	279
9-9. 绝缘性能连续变动时电缆绝缘中的电场强度	284
9-10. 电缆绝缘所含油膜和空气膜中的电场强度	294
9-11. 圆形芯线束带绝缘三相电缆电场的近似计算	298
9-12. 扇形芯线三相电缆的电场	311
第十章 高压电缆浸渍纸绝缘的介电性能	315
I. 电缆绝缘中的介质损耗	315
10-1. 电缆绝缘中介质损耗的一般公式	315
10-2. 电缆绝缘中介质损耗的来源	317
10-3. 用双层介质理论计算电缆绝缘中的吸收电流和损耗角正切	327
II. 电缆浸渍纸绝缘的击穿电压	331
10-4. 电缆浸渍纸绝缘击穿的种类	331
10-5. 电缆浸渍纸绝缘的电击穿	333
10-6. 电缆浸渍纸绝缘的移滑(树枝状)击穿	344
10-7. 电缆浸渍纸绝缘的热击穿	353
10-8. 热击穿下电缆绝缘的击穿电压与电压作用时间的关系	372
第十一章 电缆的热特性	378
11-1. 引言	378
11-2. 电力电缆中的热源	382
11-3. 单芯电缆的热阻	383
11-4. 双芯电缆的热阻	387
11-5. 三芯绞合电缆的热阻	392
11-6. 屏蔽芯线三芯电缆的热阻	398
11-7. 分相铅包电缆的热阻	405
11-8. 电缆周围媒质的热阻	407
11-9. 单芯电缆铅皮中的热损耗	412
11-10. 电缆的容许负载	427
11-11. 断续和交变负载状态下电缆的发热和冷却	437
11-12. 电缆中的机械过程	443
第十二章 高压电缆和电缆接头匣的类型	446

目 录

12-1. 粘性浸渍电缆	446
12-2. 贫乏浸渍绝缘电缆	448
12-3. 充气电缆	450
12-4. 充油电缆	467
12-5. 油压或气压钢管中的电缆	475
12-6. 直流高压电缆	477
第十三章 电缆的试验	484
13-1. 电缆成品试验的种类	484
13-2. 电缆的尺寸和机械性能的决定	485
13-3. 电缆的电试验	488
13-4. 电缆绝缘的高压试验	495
13-5. 电缆的检查性试验和附加的工厂试验	497
13-6. 运用中的电缆的预防试验和检查	505

緒 論

“電纜理論”這門課程的目的，是研究高壓電力電纜的計算和製造的理論基礎。在這門課程中，研究電力電纜的基本類型和結構、電纜製造用的材料、電纜芯綫結構的計算、芯綫扭絞包紙的理論、電纜紙絕緣的干燥和浸漬過程、電纜的包鉛和裝鎧，也研究高壓電纜浸漬紙絕緣的介電性能、電纜的熱特性，並部份地考慮到電纜的敷設問題。

在這門課程中，我們只研究浸漬紙絕緣的電力電纜，至於橡皮絕緣電纜則在另一課程中研究。

現在，電氣絕緣和電纜技術教研組正在開始培養忠於中華人民共和國社會主義工業化事業、而又能解決人民中國經濟建設五年計劃所提出的全國電氣化方面的重要技術問題的電纜技術方面的電氣工程師。在1949—1952年中國國民經濟恢復時期，全國發電量增加了一倍多。根據中國第一個經濟建設五年計劃，全國發電量將達到1952年水平的2.6倍^①。這樣，國家在電氣化的道路上將大大地前進一步。為了完成這個巨大的任務，需要技術上有修養的、精通本行業務的幹部，包括電纜技術和絕緣技術方面的電氣工程師幹部在內。

必須強調指出這樣一個重要情況：根據技術發達國家的經驗，電纜工廠的產品占全部電氣工業企業產品總值的30—60%。因此在中國，電纜工廠的產品也將迅速增加，從而需要大量受過良好教育的電纜技術方面的電氣工程師。

在1812年，俄國科學院通訊院士、電報發明者П. Л. 希林格(Шил-

^① 1952年全國發電72.6億度，1957年計劃發電188.6億度，實際發電190.3億度，即1952年的2.62倍——編者注。

ЛИНИ) (1786. 16. 4. —1887. 6. 8.) 首先在俄国实际应用了絕緣电纜。他用未硫化橡皮帶絕緣电纜使埋在彼得堡涅瓦河底的水雷爆炸。那时这种电纜用在通信方面, 或作为爆管用的导綫。

1885 年供連續包纏密閉鉛皮用的压鉛机的研究成功, 对于在电力电纜中应用較为便宜的紙絕緣是很大的推动, 而絕緣浸漬方法的制定, 使电纜的工作电压得以大大提高。

在革命前的俄国, 电纜工业非常不发达, 而且大多数电纜工厂是属于外国資本的。

只是在偉大十月社会主义革命以后, 苏联的电纜工业才开始在技术方面和产品数量方面迅速发展。

在 1924 年, 列宁格勒“北方电纜”厂掌握了 OCB 型 85 仟伏分相鉛包电纜的生产。采用这种电纜的第一个电力网于 1924—1925 年間敷設在列宁格勒。

同一工厂在 1931 年掌握了 110 仟伏充油电纜的生产, 又在 1932 年制造了 220 仟伏电纜的試驗样品。这一切都是以苏联专家們自己的力量来进行的。

以后不久, 在莫斯科裝設了 110 仟伏充油电纜的工业用綫路。

目前苏联正在制造工作电压为 220 仟伏的单芯充油电纜。这种电纜在运用条件下表現得很好。工作电压为 380 仟伏的交流电纜的結構也研究出来了, 而且还在研究工作电压为 450 仟伏的直流电纜的結構(載流芯綫与地之間的电压为 225 仟伏)。苏联专家們認為, 制造电压更高, 例如 800 仟伏(芯綫与地之間电压为 400 仟伏)的电纜在原理上是可能的。莫斯科电纜工业研究所(НИИРП)和它在苏联其他城市的分所正在电纜技术方面进行着緊張的科学研究工作。

第一章 电力电缆的主要类型和结构

1-1. 电力电缆的主要结构元件

电力电缆是用来传输大的电功率的。电力电缆通常敷设在地下、水底、特殊的电缆沟或管子中，还有敷设在屋内的。

单芯电力电缆通常是用浸渍电缆纸来绝缘的圆形截面载流芯线（铜或铝的）。在绝缘上面包以密封的铅、铝或塑料做成的保护包皮。这种电缆称做光皮电缆。但是最常用的办法是在铅皮或它的代用品上还包以由黄麻、铠甲、浸渍剂和其他材料制成的附加保护层。这些保护层是用来保护铅包皮（或它的代用品），使其不受机械损坏和腐蚀。电力电缆分成单芯、双芯、三芯和四芯几种。在电力工程中应用最广的是三芯电缆。单芯电力电缆主要用于直流输电，也用在特高电压的交流网络中。

按照芯线截面的形状，电缆分成圆形芯线、扇形芯线和弓形芯线几种。

多相电缆芯线间的绝缘称做相绝缘；每一绝缘芯线称做电缆的相。按照电缆中绝缘芯线的数目，电缆称做单相电缆、二相电缆和三相电缆。

除了各芯线间的相绝缘外，时常在所有相上再包以一层总的绝缘，象一条腰带那样包围着电缆的所有各相，因此这种绝缘称做束带绝缘。

在电缆的束带绝缘上包以保护层。

作为第一个保护层的通常是铅皮，以保护电缆绝缘不被水份侵入。软的铅皮又需要保护以免受到机械损坏和腐蚀。为此，在铅皮上还加上附加保护层，即用各种不同浸渍剂浸渍过的纤维性包绕层，和钢丝或

鋼帶鎧甲电力电缆。保护包皮和外保护层的数量决定于运用条件。在鉛皮不可能受到机械损坏的情况下（在电缆敷设在特殊的混凝土管道中时），可以不用鎧甲。

1-2. 制造电力电缆用的材料

电缆芯线通常用銅制成，有时也用鋁制，但是比较少。电缆应具有足够的挠性，以便容易地绕在线盘上，以及从线盘上容易地退下来。这在贮存、运输和敷设电缆时都是必要的。因此，电缆芯线（除了截面非常小的芯线以外）是由若干根足够细的导线绞合而成的。

通常用来制造电缆绝缘的是厚 0.12 毫米、宽 6—34 毫米的带状电缆纸。电缆的纸绝缘在真空下干燥，然后或者用油松香浸渍剂，或者用矿物油，或者用压缩空气浸渍。

鉛或鋁被用作不透水的保护包皮，包在各别芯线的绝缘上面，或包在电缆所有各相外面。

在鉛皮或鋁皮外面，用黄麻包绕层和鋼絲或鋼帶层互相交替包扎，作为外保护层。加上这些保护层时，将它们放在熔化的瀝青中进行浸渍。电缆成品表面应涂以白堊粉，以免绕在线盘上时各层电缆粘住。

应用的材料将在以后较详细地讨论。

1-3. 电缆的主要类型、特性概述和应用范围

苏联制造的浸渍纸绝缘电力电缆的额定电压是 1、3、6、10、20、35 千伏。根据特定的技术条件，也可以制造 110 千伏的充油电缆，以及 110 和 220 千伏的油压电缆（静油电缆）。110 千伏充油电缆通常制成单芯电缆。110 和 220 千伏的静油电缆制成三芯结构。也有应用浸渍纸绝缘充气电缆和具有压缩惰性气体的充气电缆的。

应用最广的是 1—10 千伏的三芯电缆。

在 1—10 千伏多芯电缆中，在每一芯线周围有所谓相绝缘，而在

絞合起来的芯綫周圍則有束帶絕緣,在束帶絕緣上再包以鉛皮和外保护层(图 1-1)。

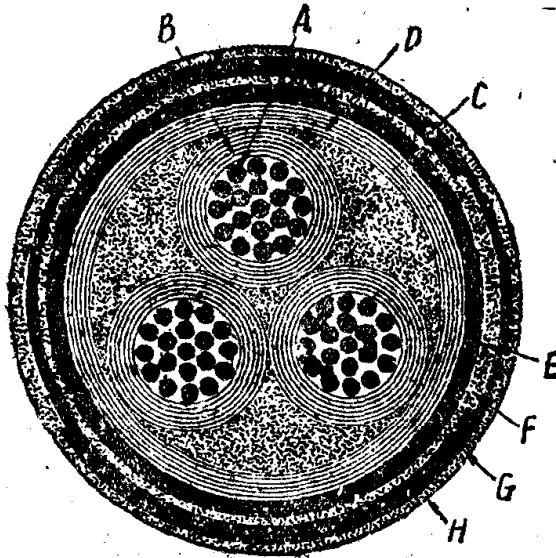


图 1-1. 多导絲圓形芯三相綫束帶絕緣電纜的橫截面:

A—芯綫銅絲; B—相絕緣; C—相間填料; D—束帶絕緣;
E—鉛皮; F, H—黃麻; G—鎧甲。

20 和 85 仟伏電纜以及鉛直敷設用的 10 仟伏電纜是分相包鉛的(图 1-2)。

芯綫截面在 16 毫米² 以下的单芯和多芯電纜用单根实心的圓形导絲制成。較大截面的单芯電纜采用圓形多导絲芯綫,为了提高電纜的品質和降低電纜的成本(即为了减低芯綫表面的最大電場强度,减小電纜的重量和尺寸),这种多导絲芯綫在扭絞后最好立即用特种設備紧压。

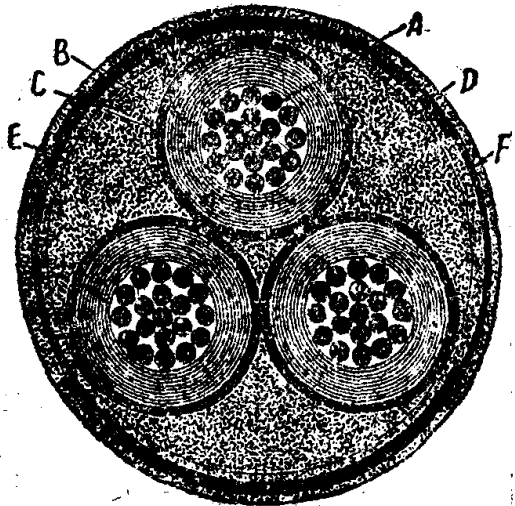


图 1-2. OCB 型分相鉛包三相鎧裝電纜的橫截面:

A—載流芯綫; B—絕緣; C—相的鉛皮;
D—相間填料; E—中間纏帶; F—具有內外黃麻衬墊的兩條鋼帶鎧甲。

截面 25 毫米² 以上, 具有束带绝缘的多芯电缆采用紧压的扇形芯线 (图 1-3)。

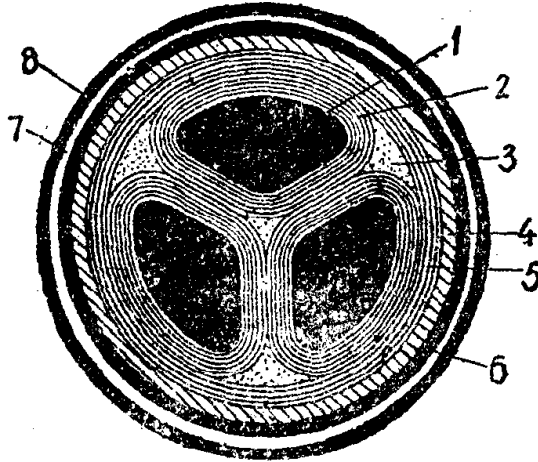


图 1-3. 扇形芯线束带绝缘三相铅装电缆 (CB 型):

1—载流芯线; 2—相绝缘; 3—相间填料; 4—束带绝缘; 5—铅皮;
6—内黄麻衬垫; 7—钢带铠甲; 8—外黄麻衬垫。

根据 ГОСТ 340-53, 几种类型的电力电缆的型号和应用范围列在表中:

表 1-1

电缆型号	名称	应用范围
CT	光皮铅包电缆, 单芯的或多芯具有束带绝缘的	敷设在屋内、隧道中等等, 在安装和运用时应没有机械损坏的可能, 没有对铅皮起破坏作用的蒸汽、气体和酸类, 并且应没有爆炸的危险
CA	铅包沥青浸渍电缆, 单芯的或多芯具有束带绝缘的	敷设条件与 CT 型电缆相同, 但是存在着对铅皮有破坏作用, 而对外保护层不起作用的蒸汽、气体和酸类
CB	双层钢带铠装铅包电缆, 单芯的或多芯具有束带绝缘的 (图 1-3)	敷设在地下 (在电缆沟中), 在屋外墙上, 安装和运用时有机械损坏的可能, 同时电缆并不受到很大的拉应力

СП	鍍鋅扁鋼絲鎧裝鉛包電纜，單芯的，或多芯具有束帶絕緣的	敷設條件與СВ型電纜相同，但是電纜受到很大的拉應力
СК	鍍鋅圓鋼絲鎧裝鉛包電纜，單芯的或多芯具有束帶絕緣的 (圖 1-4)	敷設在水底
ОСВ	雙層鋼帶鎧裝分相鉛包電纜	25—35 仟伏電纜的敷設條件與СВ型電纜相同，還有特殊結構的 6—10 仟伏垂直敷設電纜
ОСК	鍍鋅圓鋼絲鎧裝分相鉛包電纜 (圖 1-5)	20—35 仟伏電纜，敷設在水底，還有特殊結構的 6—10 仟伏垂直敷設電纜
上列僅是幾種型號的浸漬紙絕緣電力電纜，還有許多橡皮絕緣電力電纜，其中幾種型號列在表 2 中		

表 1-2

電纜型號	名 稱	應 用 范 圍
СРТ	光皮鉛包橡皮絕緣電纜 (圖 1-6)	敷設在屋內、隧道中等等，應沒有機械損壞的可能，應不存在對鉛皮有破壞作用的蒸汽、氣體和酸類，並且應沒有爆炸的危險
СРА	鉛包瀝青浸漬橡皮絕緣電纜	敷設條件與 СРТ 型電纜相同，但是存在着對鉛皮有破壞作用而對外保護層不起作用的蒸汽、氣體和酸類
СРВ	雙層鋼帶鎧裝鉛包橡皮絕緣電纜 (圖 1-7)	敷設在地下和屋外，在安裝和運用時有機機械損壞的可能，同時電纜並不受到很大的拉應力
СРН	鋼絲鎧裝鉛包橡皮絕緣電纜	敷設條件與 СРВ 型電纜相同，但是電纜受到的拉應力，大於 50 米長的電纜的重量
СРБТ	沒有電纜紗外層的雙層鋼帶鎧裝鉛包橡皮絕緣電纜	敷設在屋內(包括有火災危險的屋內)和隧道中
СРПТ	沒有電纜紗外層的鋼絲鎧裝鉛包橡皮絕緣電纜	敷設在屋內(包括有火災危險的屋內)和電纜地下室中，敷設條件與 СРБТ 型電纜相同

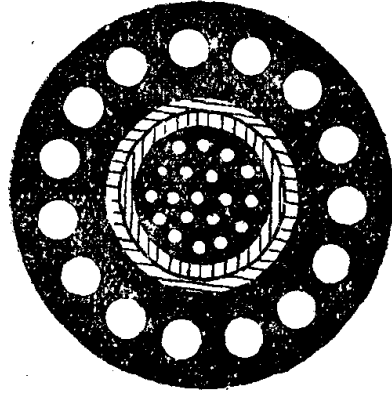


图 1-4. 圆钢丝铠装单相水底电缆(CK型)。

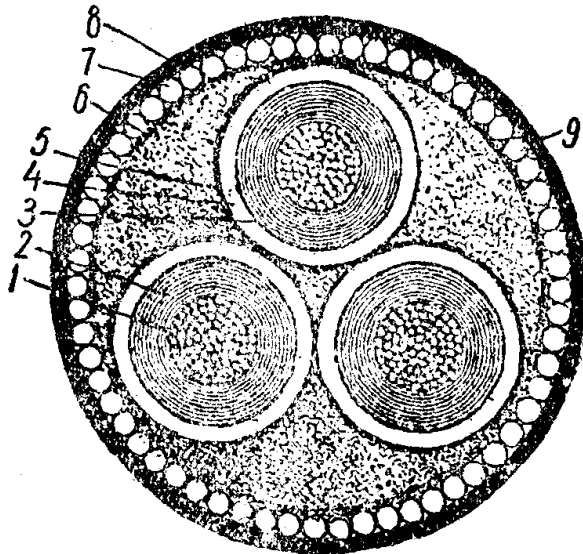


图 1-5. 圆钢丝铠装分相铅包三相水底电缆(OCK型):

1—载流芯线; 2—绝缘; 3—用来消除纸与铅间偶然形成的间隙中的电位差的金属屏蔽; 4—相内铅皮; 5, 6—黄麻编织层; 7—圆钢丝铠甲; 8—外黄麻衬垫; 9—相间填料。

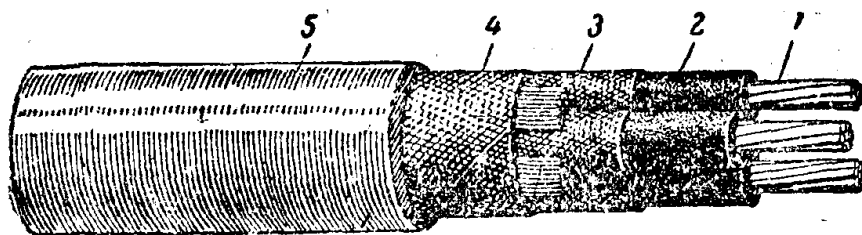


图 1-6. CPI 型電纜:

1—H 型載流芯綫; 2—PI-2 或 PPI-2 型硫化橡皮; 3—膠布帶(用于截面 10 毫米² 以上)芯綫扭絞(双芯的平行放置); 4—膠布帶; 5—鉛皮。

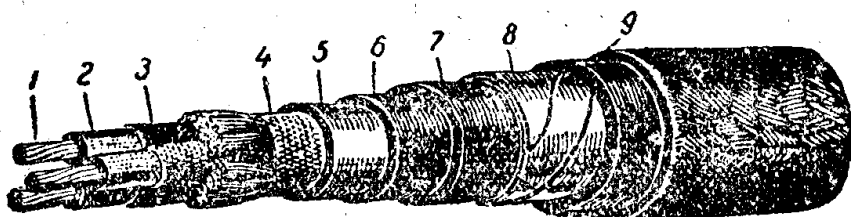


图 1-7. CPB 型電纜:

1—H 型載流芯綫; 2—PI-2 或 PPI-2 型硫化橡皮; 3—膠布帶(用于截面 10 毫米² 以上)芯綫扭絞(双芯的平行放置); 4—膠布帶; 5—鉛皮; 6—防蝕层(a—粘性瀝青浸漬剂层; b—两条紙帶繞层; c—粘度小的浸漬剂层); 7—電纜紗, 粘性浸漬剂层; 8—两条鋼帶鎧甲(CPI 型電纜用圓鋼絲); 9—外保护层(a—粘度小的浸漬剂层; b—電纜紗; c—粘性浸漬剂层; d—白堊溶液层)。

第二章 制造电纜用的材料

2-1. 材料的主要种类

制造电力电纜时应用下列几类材料：

- (a) 导电材料, 用来制造电纜的載流芯綫——銅、鋁；
- (b) 絕緣材料, 属于这一类的有电纜紙、矿物油、松香和浸漬剂；
- (B) 保护材料, 用来保护电纜制品免受水份、腐蝕、机械损坏等的作用, 属于这一类的有鉛、鋁、包繞用黃麻、装鎧用鋼絲、装鎧用鋼帶和瀝青等；
- (r) 彈性塑料, 用作絕緣材料, 也用作保护材料(聚氯乙炔捏和橡皮等)。

我們将在下面对各种材料作更詳細的研究。

2-2. 銅

銅是应用得很广泛的高电导材料。在外表上, 銅有不同于其他金屬的特具的紫紅色。銅的晶体点陣是面心立方体, 参数是 $a=3.6$ 埃。銅的密度是 8.9 仟克/分米³; 膨脹温度系数 $\alpha=17 \times 10^{-6}$ 度⁻¹; 热容量在 20°C 时是 0.0985 仟卡/仟克·度, 在 100°C 时是 0.0942 仟卡/仟克·度; 熔点是 1083°C ; 熔化热是 50.6 仟卡/仟克; 沸点是 2810°C 。

标准純銅的电导率

$$\gamma = 58 \text{ 米/欧} \cdot \text{毫米}^2,$$

即电阻率 $\rho = 0.017241$ 欧·毫米²/米。

金屬和合金軋炼后在 20°C 时的电导就是用銅的电导的百分数来

表示的。

銅的广泛应用是由于它具备許多技术上的优点,例如:电阻小,机械强度相当高;耐蝕性也令人滿意;有良好的机械可加工性——銅易于压延成銅片和銅帶,易于冷拉成絲;銅又易于焊接和熔接。

根据ГОСТ 859-41,工业用銅按純度分成五种型号:

M0 (99.95% Cu)

M1 (99.9 % Cu)

M2 (99.7 % Cu)

M3 (99.5 % Cu)

M4 (99.0 % Cu)

只有經過电解淨化,含量不少于99.9%的M1号銅才能用作导电材料。

电解后所得的阴极銅板再熔成重80—90千克的銅块,在電纜厂中受到压延和拉伸而成为一定截面的銅制品。

在制造銅絲时,銅块首先热压成直徑6.5—7.2毫米的所謂盘条;而后盘条在弱的硫酸溶液內酸洗,以便从它表面上除去受热时所形成的暗灰色的氧化銅CuO,以后就冷拉成所需直徑——达0.08—0.02毫米——的銅絲。

含氧不超过0.02%,其他杂质不超过0.03%的M0号銅具有高度的可塑性。得到这种銅的方法是在一氧化碳气体中将銅澆鑄成立式錠模。从这种慣常称做无氧的銅,可以得到直徑达0.015毫米的細銅絲。

用来制造电力電纜的銅主要是圓形截面的銅絲。

電纜、電綫和軟綫所用的圓銅絲应具有ГОСТ 2112-46所規定的性能,并分成两种型号:

1. MT 硬銅綫(未軋炼的);

2. MM 軟銅絲(軋炼的)。

用于絕緣電纜制品的銅絲,应具有完全平坦而光滑的表面,沒有斑