



张书华 刘伟军 编著

高性能电缆材料 及其应用技术



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

高性能电缆材料及其应用技术

张书华 刘伟军 编著

上海交通大学出版社

内容提要

本书以电缆结构为基础,全面介绍了制造电线电缆用导体、绝缘、护套、屏蔽和填充材料的品种、规格、结构、性能、配合体系、工艺要点、技术要求及应用。

全书共八章:第1章简要介绍电缆材料的分类及基本要求;第2、3章论述金属材料的基础理论、结构和性能,着重阐述高性能金属材料和新型聚合物基复合材料作为电缆导体方面的应用;第4~7章论述高分子材料的基础理论、结构与性能和橡塑添加剂,详细介绍高性能聚合物合金、橡塑弹性体和有机无机杂化材料作为特种电缆绝缘与护套方面的应用;第8章介绍电缆用纤维、带材和光纤电缆用材料,突出新型纤维的应用。

本书具有专业、实用和新颖的特点。可供电缆行业从事电缆材料研究、生产、管理和应用的科研工作者、管理人员和技术人员参考,也可作为高等学校电气工程专业、高分子材料与工程专业(绝缘材料方向)研究生和本科生的专业课教材。

图书在版编目(CIP)数据

高性能电缆材料及其应用技术 / 张书华,刘伟军编
著. —上海:上海交通大学出版社,2015
ISBN 978-7-313-13629-9

I. ①高… II. ①张… ②刘… III. ①电缆护套料
IV. ①TM215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 245609 号

高性能电缆材料及其应用技术

编 著:张书华 刘伟军

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:常熟市梅李印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:311 千字

版 次:2015 年 11 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-13629-9/TM

定 价:48.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:14.5

印 次:2015 年 11 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-52661481

前言

电线电缆行业是伴随国民经济和科技发展而产生的基础工业。只要有电(磁)能、信息传输和电磁能转换的地方,就有电线电缆的存在,故电线电缆被誉为电力系统、信息传输系统和机械、仪表系统的“血管与神经”。其性能和使用寿命不仅取决于电缆结构的先进性和加工工艺的完善性,还取决于材料选用的合理性,电缆新产品的开发与新材料的研究和应用休戚相关。航空航天、微电子、信息科学、新能源和环境科学等技术的进步,更促进了高导电、高强度、耐高温、耐火和环保性能优异的新型电缆材料的发展。

本书以电缆组成结构——导体、绝缘、护套、屏蔽和填充为主线,以重点阐述近年来涌现的高性能电缆材料为出发点,介绍制造电线电缆用金属材料、高分子材料和先进复合材料。对耐高温、耐腐蚀和高强度新型金属材料,热塑弹性体和共混聚合物合金等新型高分子材料,碳纤维填充聚合物基复合材料,无机有机杂化新材料和功能型橡塑添加剂的结构、性能及制备工艺做了详细的介绍。突出阐述了这些新材料在制造耐火电缆,核电站电缆,航空航天用电缆,军事领域使用的特种电缆,舰、船和潜水艇用电缆,太阳能、风能等新能源领域用电缆以及环境友好型电缆方面的应用。全书由绪论,金属材料的结构与性能,高性能电缆用金属材料及应用,高分子材料的结构与性能,塑料和橡胶配合剂,电线电缆用聚合物合金,电线电缆用高性能塑料与橡皮,电线电缆用纤维、带材和光纤光缆材料共8章组成,内容涵盖了电缆材料的结构、性能、加工工艺和应用等方面的基础理论和实际加工与应用知识。

本书作者一直从事电缆材料课程教学和电缆新材料及功能助剂的研究与开发工作,并有16年企业电缆材料研发的工作经历。因此,本书内容更贴近教学和企业生产实际。全书内容深入浅出、通俗易懂,相信能使电缆行业从事科研、生产和管理的专业技术人员进一步掌握电缆材料方面的专业知识和制造技术。

本书由上海工程技术大学张书华和刘伟军编著。张书华承担了绪论和第4~8章的编写工作,刘伟军承担了第2、3章的编写工作及全书图、表的编辑等工作。编写过程中参考的文献资料列于各章之后,在此谨向文献的作者致以诚挚的谢意。

本书可供从事电缆材料研究、开发、生产、管理和应用的科研人员参考,也可作为高等院校相关专业的研究生和本科生的教材和教学参考书。限于编者水平,书中疏漏之处恳请同行批评指正,以利于不断补充和完善。

编 者

2015年7月于上海

目录

第1章 绪论	001
1.1 电线电缆的发展历史	001
1.1.1 电线电缆的世界发展史	001
1.1.2 我国电缆工业的发展史	002
1.2 电线电缆的分类	003
1.3 电缆材料的分类、作用和基本要求	004
1.3.1 电缆材料的分类	004
1.3.2 电缆材料的作用	004
1.3.3 电缆材料的基本要求	005
参考文献	005
第2章 金属材料的结构与性能	007
2.1 金属材料的发展、分类和用途	007
2.1.1 金属材料的发展	007
2.1.2 金属材料的分类	008
2.1.3 电线电缆用金属材料的用途	008
2.2 金属键和固态电子理论	009
2.2.1 金属键与自由电子理论	009
2.2.2 固体能带理论	010
2.2.3 布里渊区与能态密度	012

2.2.4	金属的电导率	014
2.2.5	材料的超导电性	015
2.3	金属材料的结构	017
2.3.1	金属的晶体结构	017
2.3.2	合金的结构	021
2.3.3	金属复合材料	024
2.4	晶体缺陷	027
2.4.1	点缺陷	027
2.4.2	线缺陷	028
2.4.3	面缺陷	030
2.5	金属材料的性能	032
2.5.1	电性能	032
2.5.2	物理力学性能	034
2.5.3	工艺性能	037
	参考文献	037
第3章	高性能电缆用金属材料及应用	038
3.1	主要金属元素的基本性能	038
3.2	铜合金和铜金属复合材料	039
3.2.1	铜合金及其应用	039
3.2.2	铜基双金属材料及其应用	043
3.2.3	铜基复合材料	046
3.2.4	铜和铜合金制品及应用	047
3.3	铝合金和铝金属复合材料	047
3.3.1	铝合金及其应用	048
3.3.2	铝基双金属线及其应用	049
3.3.3	铝基金属复合材料	050
3.3.4	铝和铝合金制品	050
3.4	电线电缆用钢及其制品	051
3.4.1	钢丝	051
3.4.2	钢带	053
3.5	导体镀层用金属材料	055
3.5.1	锡	055

3.5.2	银	055
3.5.3	镍	056
3.5.4	锌	056
3.5.5	金	057
3.6	碳纤维复合导电线芯	057
3.6.1	碳纤维复合芯的特点	057
3.6.2	制备方法	058
3.6.3	应用	059
	参考文献	059
第4章	高分子材料的结构与性能	061
4.1	概述	061
4.2	高分子材料的结构	062
4.2.1	高聚物分子内与分子间的化学键	062
4.2.2	高分子链的近程结构(一级结构)	063
4.2.3	高分子链的远程结构(二级结构)	065
4.2.4	高分子链的聚集态结构(三级结构)	068
4.2.5	共混高分子的结构	072
4.3	高分子材料的性能	073
4.3.1	高聚物的溶解性	073
4.3.2	高聚物的力学状态及其转变	074
4.3.3	高聚物的耐热性	076
4.3.4	高聚物的力学性能	077
4.3.5	高聚物的电绝缘性能	083
4.3.6	高聚物的老化性能	087
4.3.7	高聚物的工艺性能	087
4.3.8	高聚物的物理性能	088
4.3.9	高聚物的化学性能	089
	参考文献	090
第5章	塑料和橡胶配合剂	091
5.1	概述	091
5.2	防老剂	092

5.2.1	塑料用防老剂	092
5.2.2	橡皮用防老剂	095
5.3	增塑剂与软化剂	097
5.3.1	塑料用增塑剂	097
5.3.2	橡皮用软化剂	101
5.4	阻燃剂	102
5.4.1	阻燃剂的种类	102
5.4.2	阻燃剂的阻燃机理	103
5.4.3	消烟剂和抑酸剂	103
5.4.4	PVC 及其共聚物的阻燃	103
5.5	填充剂与补强剂	104
5.5.1	填充剂的分类	104
5.5.2	填充剂的作用机理	104
5.5.3	填充剂对电缆料性能的影响	105
5.5.4	填充剂的选用	106
5.5.5	补强剂	106
5.5.6	特殊用途添加剂	107
5.6	润滑剂	108
5.7	着色剂	108
5.7.1	无机颜料	109
5.7.2	有机颜料	109
5.8	硫化剂	109
5.9	硫化促进剂	112
5.10	活化剂	114
5.11	防焦剂	115
5.12	共混改性剂	115
5.13	偶联剂	116
	参考文献	117
第 6 章	电线电缆用聚合物合金	119
6.1	概述	119
6.1.1	聚合物共混的基本原理	119
6.1.2	聚合物间的相容性	121

6.2	聚合物的共混改性技术	122
6.2.1	单纯共混技术	122
6.2.2	界面黏接技术	123
6.2.3	接枝反应技术	123
6.2.4	多层乳液聚合技术	123
6.2.5	增容剂技术	123
6.2.6	互穿聚合物网络(IPN)技术	123
6.2.7	动态硫化技术	124
6.2.8	反应性共混技术	124
6.2.9	分子复合技术	124
6.2.10	原位复合技术	125
6.3	电线电缆用聚合物合金	125
6.3.1	天然橡胶-丁苯橡胶共混体系	125
6.3.2	软质聚氯乙烯(PVC)的高分子增塑	126
6.3.3	聚乙烯(PE)的共混改性	126
6.4	热塑弹性体	127
6.4.1	热塑弹性体的基本性能	128
6.4.2	热塑弹性体的分类	128
6.4.3	聚合型热塑弹性体	129
6.4.4	共混型热塑弹性体	133
	参考文献	138
第7章	电线电缆用高性能塑料与橡皮	141
7.1	新型阻燃及耐火电缆材料	141
7.1.1	聚合物的燃烧过程及评价	141
7.1.2	绿色环保型高效阻燃剂	143
7.1.3	阻燃电缆料	147
7.2	交联型电缆材料	151
7.2.1	交联聚乙烯电缆料	152
7.2.2	交联聚烯烃电缆料	160
7.2.3	半导体型交联聚烯烃屏蔽料	160
7.2.4	交联聚氯乙烯	162
7.3	氟塑料	163

7.3.1	聚四氟乙烯	163
7.3.2	聚全氟乙丙烯	166
7.3.3	四氟乙烯-乙烯共聚物	167
7.3.4	四氟乙烯-全氟烷基乙烯基醚共聚物	168
7.3.5	聚偏氟乙烯	169
7.4	聚醚醚酮特种电缆材料	170
7.5	聚酰胺	171
7.5.1	聚酰胺在电线电缆中的应用	171
7.5.2	聚酰胺的性能和技术要求	172
7.5.3	挤包工艺要求	172
7.5.4	聚酰亚胺	172
7.5.5	有机硅-聚酰亚胺共聚物	173
7.6	乙丙橡胶和橡皮	174
7.6.1	分子结构、分类和特性	174
7.6.2	橡皮配方及性能	176
7.6.3	应用	178
7.6.4	辐照交联型乙丙橡胶电缆料	178
7.7	丁腈橡胶和橡皮	179
7.7.1	丁腈橡胶的分子结构、分类和特点	179
7.7.2	橡皮配方及性能	180
7.7.3	应用	181
7.8	硅橡胶和橡皮	181
7.8.1	分子结构、分类和特性	181
7.8.2	橡皮配方及性能	182
7.8.3	应用	183
7.9	氯磺化聚乙烯及其橡皮	183
7.9.1	分子结构、分类和特性	183
7.9.2	橡皮配方与性能	184
7.9.3	应用	187
7.10	氯化聚乙烯及其橡皮	187
7.10.1	分子结构、分类和特性	187
7.10.2	橡皮配方与性能	188
7.10.3	用途	189

7.11	氯醚橡胶和橡皮	189
7.11.1	分子结构、分类、特性和用途	189
7.11.2	橡皮配方及主要性能	190
7.11.3	应用	191
7.12	氟橡胶和橡皮	191
7.12.1	分子结构、分类和特性	191
7.12.2	橡皮配方	192
7.12.3	应用	192
7.13	核电站电缆用电缆材料	193
7.13.1	核电站电缆材料的种类	193
7.13.2	核电站电缆材料的特性	193
7.14	机车车辆薄壁绝缘电缆用电缆材料	194
7.14.1	机车车辆薄壁绝缘电缆的应用场所	194
7.14.2	机车车辆薄壁绝缘电缆的特性	195
7.14.3	机车车辆薄壁绝缘电缆的性能指标	195
	参考文献	196
第8章	电缆用纤维、带材及光纤光缆材料	198
8.1	纤维材料	198
8.1.1	纤维材料的种类和用途	198
8.1.2	纤维材料技术指标的常用名词及其含义	198
8.1.3	天然纤维材料	200
8.1.4	无机纤维材料	201
8.1.5	合成纤维材料	203
8.2	带材	205
8.2.1	带材的种类和用途	205
8.2.2	技术指标常用名词及含义	206
8.2.3	压敏性胶黏带	209
8.2.4	自黏性橡胶带	209
8.2.5	金属塑料复合带	211
8.2.6	防火包带及其他	212
8.3	光缆用光纤和材料	213
8.3.1	光缆用光纤和材料的种类和用途	213

8.3.2	制造光纤预制棒材料	213
8.3.3	石英系列光纤	214
8.3.4	光纤被覆材料	215
8.3.5	光缆用加强件材料	216
8.3.6	光缆用填充材料	217
8.3.7	光缆用护层材料	217
	参考文献	218

第1章 绪 论

电线电缆行业是伴随社会进步和科学技术发展而产生的基础性行业,在高耸入云的铁塔上,在波涛汹涌的大海底,在现代化城市的地面下,在崇山峻岭的山峰里,在遨游太空的航天器电器、仪表的“心脏”里,在手掌心的手机里,只要有电(磁)能、信息传输和电磁能转换的地方,就有电线电缆的存在,故电线电缆被誉为电力系统、信息传输系统和机械、仪表系统的“血管与神经”。电线电缆是用以传输电(磁)能、信息和实现电磁能转换的电工产品。习惯上把有些产品称之为电线,有些产品称之为电缆,但并没有严格的区别。一般说来把结构简单、截面积较小且芯数较少的产品称为电线,反之称为电缆,广义而言,可统称为电缆。

1.1 电线电缆的发展历史

1.1.1 电线电缆的世界发展史

电线电缆伴随电的产生而发展及应用。1729年,英国人格雷发现“电”可沿金属线传输,提出了“导体”的概念。1740年,法国人德扎里埃进一步规定了导体和绝缘体的概念。1744年,德国人温克勒用裸电线把电火花传输到远距离点标志着电线的诞生。1752年,美国人富兰克林发明了避雷针,并用电线接地,标志着电线已实用化。1821年,俄国人用未经硫化的橡胶包覆在铜线上,制成了第一根绝缘电线,后来出现了各种天然材料作为绝缘的电线。1879年,美国人爱迪生发明了白炽电灯,同时制成黄麻沥青绝缘电力电缆,敷设于纽约。同年,瑞士博雷尔发明压铅机,可制造铅包电缆。1887年,英国的 Farranti 发明了 10 kV 油浸纸铅包电力电缆,标志着复杂结构电缆的诞生。1744—1920 年被称为电线电缆的启蒙阶段,这一阶段发明的电缆适合用于低压、低频率、近距离传输电能,使用天然材料为绝缘的初级产品。

20 世纪 20 年代以后,科学技术的进步和有机高分子等合成材料的涌现,迅速推动电线电缆工业走向成熟。在此期间,很多科技成果和新材料应用于电线电缆的制造。例如,1925 年塑料开始应用于电线电缆行业,1927 年美国的 Semon 发明了聚氯乙烯绝缘电缆。1957 年美国通用电气公司(GE)发明了过氧化物交联聚乙烯,20 世纪 60 年代初,日本研制出交联聚乙烯绝缘电缆。如今,交联聚乙烯绝缘电缆已经几乎遍及所有电压等级。近年来,伴随硅工业的发展,20 世纪 70 年代,由道康宁公司的 Kapron、Keck 和 Maurer 等人

率先研制成功衰减率为 20 dB/km 的光纤,并应用于制造光纤通信电缆,从而使光纤通信进入了一个大发展时代。碳纤维、Kevlar 纤维等高性能纤维的涌现,使满足航空航天、核电站、风能和海洋等高科技领域需求的高性能、绿色环保型电缆迅速发展,成为新一代线缆产品。

国外知名电缆料生产企业供应的高分子电缆料主要是各类环保型聚烯烃电缆料,如高压和超高压电缆、低压电缆、阻燃电缆、通信电缆、光缆等产品用各类聚烯烃树脂,包括低烟低卤电缆绝缘及护套料、无卤低烟阻燃电缆料;硅烷交联 PE 电缆料;符合各类 UL 标准的 PVC 电缆料;ADSS 光缆耐电痕护套料;全新低成本共聚法硅烷交联 PE 电缆料系列树脂;耐火电缆料等。

随着“动态全硫化”等新工艺的出现,电缆企业对生产工艺简化的要求,以及核电、风能、太阳能等新兴能源工业发展的需求,新型的共混聚合物和热塑弹性体等新材料成为电缆材料发展的新趋势。如新型的嵌段共聚物、聚氨酯、聚醚酯等。在导体材料方面则主要发展耐高温合金、新型双金属材料、高温超导体、轻质高强碳纤维复合导线芯等特种金属材料。以稀土铝合金替代铜是未来电缆导体的发展趋势,导电高分子等新材料也将在电缆行业中发挥应有的作用。

1.1.2 我国电缆工业的发展史

我国电缆工业的发展可追溯到 20 世纪 30 年代。1936 年,国民政府成立了“电工器材厂筹委会”负责电线厂的筹建,于 1938 年在昆明建立电线电缆厂,1939 年 7 月 1 日正式投产。1938 年 5 月在沦陷的沈阳,由日本的古河、藤仓、住友等几个会社共同建立的“满洲电线株式会社”正式投产。在此期间,在上海、天津也有几家规模很小的电线电缆厂。至 1945 年 8 月日本投降后,这些工厂还只能生产一些裸铜线、橡皮绝缘线、丝包线等简单的电线。直至 1948 年昆明电线厂才生产出 6.6 kV 橡皮绝缘铅包电缆。新中国成立时,全国电线电缆厂家仅 30 余家,职工 2 000 余人,设备 500 余台,年用铜总量 6 500 吨。

新中国成立以后,我国电线电缆工业进入快速发展期。被列入“一五”全国 156 项重点工程之一、由苏联援建的沈阳电缆厂,于 1956 年 3 月 12 日国家验收合格正式投产。同时,我国自主扩建了上海电缆厂。这两个厂在当时都是规模很大的综合性电缆厂,其产品水平与世界先进水平相差无几。随着国民经济发展的需要,又涌现出哈尔滨电缆厂、郑州电缆厂等。

改革开放以后,电线电缆工业也如同其他工业一样,通过引进吸收国外先进设备和技术,发展非常迅速。据统计,至 2011 年,行业总产值将近 30 000 亿元;2 000 万元规模以上企业 3 646 家;从业人员 80 多万人;铜导体用量 484 万吨,占全国用铜量 64%,占全世界电线电缆行业用铜量 1/4 左右;铝导体用量 250 万吨,占全国用铝量 15%;光纤用量约 13 800 万公里,占全球用量 60%左右。从规模上看,在国内机械制造行业,电线电缆行业已成为仅次于汽车制造行业的第二大行业;中国已成为世界第一大电线电缆生产国。

1.2 电线电缆的分类

电线电缆用途广泛、种类繁多、品种复杂。据统计目前我国约有五大类、1 200 多个品种、20 000 多个规格,在机电行业中它是品种和门类最多的几大类产品之一。因此,分类方法很多。为便于选用及确定产品的适用性,我国的电线电缆产品按用途可分为下列五大类。

1. 裸电线与裸导体制品

裸电线与裸导体制品是指仅有导体,而无绝缘的产品,其中包括铜、铝等多种金属和复合金属圆单线、各种结构的输电用裸绞线、电力机车接触线及各种用途的软接线、型线和型材等。制备这类产品使用的材料是金属、合金及金属复合材料。

2. 电力电缆

电力电缆是指电力系统的主干线路中用以传输和分配大功率电能的电缆产品,其中包括 1~500 kV 及以上各种电压等级、各种绝缘的电缆。这类产品由导电线芯、屏蔽层、绝缘层、护套层和填充材料五部分组成,使用材料包括金属及其合金、高分子材料、无机非金属材料 and 复合材料。

3. 通信电缆和通信光缆

通信电缆是指传输电话、电报、电视、广播、传真、数据和其他电信信号的电缆,其中包括短途通信电缆、长途对称和同轴电缆,传输频率为声频~几十兆赫。要求采用电导率很高的金属材料做导体,绝缘电阻高、介电系数很小和对电磁场屏蔽效应好的高分子材料做绝缘材料。

通信光缆是以光导纤维(光纤)作为光波传输介质进行信息传输的电缆。由于其传输衰减小、频带宽、重量轻、外径小,又不受电磁场的干扰,因此通信光缆已在很多方面逐渐替代了通信电缆。光纤是该类产品实现传输光信号的核心部件,可分为石英光纤、石英-塑料光纤、塑料光纤三大系列。

4. 电气装备用电线电缆

电气装备用电线电缆是指从电力系统的配电点把电能直接传送到各种用电设备和器具的连接线路用电线电缆,以及各种装备内部的测量和控制信号传输的电线电缆。这类产品的使用面最广、品种最多,品种约占电线电缆总量的 60%。要结合所用装备的特性和使用环境来确定产品的结构和性能,除大量的通用产品外,还有许多专用和特殊产品。制备这类电缆的材料要根据产品的使用特性确定,使用材料的品种繁多,性能各异。

5. 绕组线(电磁线)

绕组线是指以绕组的形式在磁场中切割磁力线产生感应电流或通以电流产生磁场所用的电线,即实现电磁能转换用电线电缆,故也称电磁线,其中包括漆包线、绕包线和特种绕组线。制备这类产品使用金属作为导体,漆、薄膜、纸和纤维作为绝缘。

电线电缆发展至今,一根电线电缆也可能具有多种用途,即复合电缆,如光电复合电

缆;用于不同系统中的电线电缆在结构和性能上也可能基本相同,例如个别的电力电缆和电气装备用电线电缆基本相同。

1.3 电缆材料的分类、作用和基本要求

1.3.1 电缆材料的分类

电线电缆产品发展的关键元素是材料,电线电缆技术和产品的更新及发展必须以材料为基础。很多品种的电缆材料,其中橡胶和塑料是电线电缆护套和绝缘用的主要材料。占电缆材料总用量 65%的是塑料材料,橡胶材料占 25%,不断开发的新材料中,广泛应用的是橡塑共混材料,占 10%的用量。

电缆材料种类繁多,按来源可分为天然材料和合成材料。按属性可分为金属材料、纤维材料、漆料、涂料、油料、橡胶、塑料、无机材料、有机材料及气体材料。按用途可分为导体材料、绝缘材料和护层材料。每一种材料所包含的内容如图 1-1 所示。

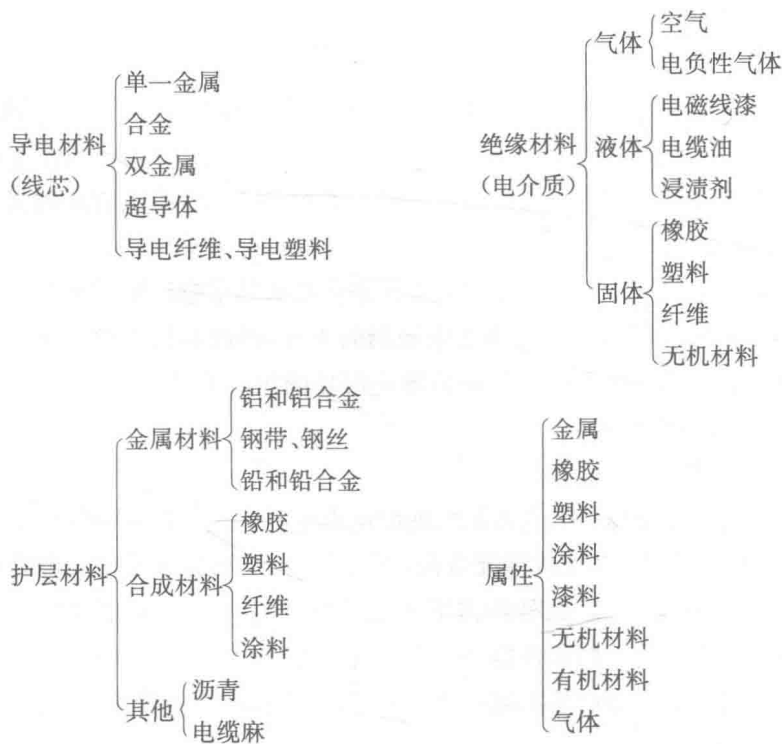


图 1-1 电缆材料的分类

1.3.2 电缆材料的作用

电缆材料占电缆产品总成本的 85%以上,是电缆生产的关键,它决定电缆产品的种