

混凝土电杆生产工艺 设计 质量控制

姚 杨 张 鸿 编著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书主要介绍混凝土电杆的生产工艺、要求及其特点和原材料质量要求、设计方法、成品的质量检验要求及其质量控制,并附有材料试验方法、设计计算用表等,是集混凝土电杆生产、施工、设计、质量检验为一体的一部综合性实用型的参考书,可供生产施工技术人员、产品质量检验人员以及设计人员参阅和使用。

本书根据混凝土材料新标准、设计新规范以及《混凝土结构工程施工及验收规范》GB50204—92 结合混凝土电杆检验、设计、生产实践特点编写,综合性较强,涉及面较广,尤其在有关设计的章节中提供了简便、可靠、实用的简化公式及其图表供读者方便、快速地采用与运算。

前 言

混凝土电杆是电力架空输变电线路上、广播、邮电、通讯以及照明线路上广泛采用的一种水泥预制构件。尤其在电力架空输变电线路上使用的混凝土电杆更是具有特殊的地位与重要性，因为它关系到整条输变电线路上以及人民生命财产的安全。

混凝土电杆的生产虽然在我国已有几十年的历史，生产技术也在不断地发展与完善，产品质量也有很大的进步与提高。但由于混凝土电杆是一种特殊的重要的工业产品，综合性强，牵涉面广，它的特殊地位使它有别于一般的水泥预制构件。随着国家有关标准、规范的修订和颁布，对电杆质量提出了更高的要求，迫使电杆在生产工艺、设备以及材料、技术、设计等诸方面不断提高与改进。

然而，由于混凝土电杆的生产、施工、设计及质量控制等技术是一个较边缘的学科，鉴于目前尚无一部完整的系统的集生产、设计、检验、质量控制为一体的多功能著作，生产一线的施工技术人员缺乏这方面的参考资料及理论指导，因此，我们着手编写本书，意图是系统实用地将电杆生产所涉及到的有关内容，加以简明扼要地阐述、汇总，以满足广大生产与施工技术人员需要。

由于编者水平有限，时间仓促，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

本书由同济大学材料科学与工程学院张冠伦教授校核，在此表示衷心感谢。

编著者

1998年5月

目 录

前 言

第一章 原材料及其质量要求	1
第一节 原材料的基本性质	1
第二节 水泥	5
第三节 钢材	17
第四节 砂和石	25
第五节 水和外加剂	31
第二章 混凝土的基本性能及配制工艺	33
第一节 混凝土的分类和组成	33
第二节 混凝土的物理力学性能	36
第三节 混凝土的配合比设计	43
第四节 混凝土的拌合工艺	48
第三章 钢材的加工工艺	57
第一节 钢筋的冷拉与冷拔	57
第二节 钢筋的配料加工	63
第三节 钢筋的镦头	66
第四节 钢筋骨架制作与成型工艺	68
第四章 预应力张拉工艺	70
第一节 张拉工艺	70
第二节 张拉设备	72
第五章 离心成型工艺	78
第一节 离心工艺过程及特点	78
第二节 离心机械	79
第三节 离心工艺制度与工艺参数	82
第六章 常压蒸养工艺	86
第一节 常压蒸养方式及其特点	86
第二节 常压蒸养工艺原理与工艺参数的控制	88
第三节 热工设备及选型计算	92
第七章 电杆成品检验与质量控制	96
第一节 电杆成品检验	96
第二节 电杆力学试验布置及计算	101
第三节 电杆的质量控制	106
第八章 输电线路电杆杆塔荷载计算	110

第一节	电杆的功能、用途及分类	110
第二节	荷载的分类和荷载代表值	115
第三节	杆塔的荷载计算	120
第九章	结构设计与计算	129
第一节	基本概念与准则	129
第二节	普通杆的结构设计与计算	133
第三节	预应力杆的结构设计与计算	139
第四节	正常使用极限状态抗裂、变形和裂缝宽度验算	146
第五节	简化设计方法及公式介绍	155
第十章	外加剂的应用技术	166
第一节	外加剂的定义、分类	166
第二节	高效减水剂的作用原理	166
第三节	掺加方法	167
第四节	高效减水剂的应用目的及注意事项	168
第五节	外加剂品种的选择	169
附录		171
附录一	砂和石的常规检验	171
附录二	混凝土的坍落度试验	181
附录三	混凝土的抗压强度试验	183
附录四	钢筋的拉伸及冷弯试验	184
附录五	混凝土强度的检验评定	186
附录六	工厂试验室设备配备要求	188
附表		190
附表 1	钢筋的计算截面面积及公称质量	190
附表 2	混凝土强度及弹性模量取值	190
附表 3	钢筋的弹性模量	191
附表 4	钢筋强度取值	191
附表 5	普通杆钢筋面积与标准检验弯矩值对照表	192
附表 6	预应力杆钢筋面积与极限弯矩值对照表	196
附表 7	部分预应力杆钢筋面积与极限弯矩值对照表	200
附表 8	等径杆(预应力)配筋与极限弯矩值对照表	202
附表 9	等径杆(普通杆)配筋与标准检验弯矩值对照表	203
附图一	钢筋混凝土电杆标准检验弯矩图	206
参考文献		207

第一章 原材料及其质量要求

第一节 原材料的基本性质

一、基本物理性质

(一) 密度、表观密度和堆积密度

1. 密度 (ρ)

密度是材料在绝对密实状态下, 单位体积的质量。

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中 ρ ——密度 (g/cm^3 或 kg/m^3);

m ——材料的质量 (g 或 kg);

V ——材料在绝对密实状态下的体积 (cm^3 或 m^3)。

说明:

①在砂、石检验中材料的质量是指砂、石干燥至恒重状态下的质量。

②绝对密实状态下的体积是指不含任何孔隙的体积; 因绝大多数材料 (如砂、石等) 都含有一定的孔隙, 对于这些有孔隙的材料, 测定其密度时, 应先把材料磨成细粉 (越细越好), 经干燥至恒重后, 用比重瓶 (李氏瓶) 测量其体积, 然后按上式计算公式计算出密度值。

③“密度”与“比重”的区别: “比重”是旧的量纲, 现已不再使用; 在新的标准规范中已统一用“密度”代替。

过去比重的定义是: 材料在绝对密实状态下, 其重量与同体积的 4°C 水的重量之比。

2. 表观密度 (ρ_0)

表观密度是指材料在自然状态下, 单位体积的质量。

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0}$$

式中 ρ_0 ——表观密度 (g/cm^3 或 kg/m^3);

m ——材料的质量 (g 或 kg);

V_0 ——材料在自然状态下的体积 (cm^3 或 m^3)。

说明:

①材料在自然状态下的体积包含了材料内部孔隙的体积。当材料含水时, 它的质量和体积都会发生变化。一般测定表观密度时, 以干燥状态为准 (试验中测定的通常为烘干至恒重)。如果在含水状态下测定应注明含水情况。

②过去习惯用法为容重 (如在烘干状态下测定的容重称为“干容重”) 或视比重; 试验中尚有恒干状态与饱和面干状态之分。而材料按自然堆积体积计算, 其单位体积的质量称为“松散容重”。

③在混凝土配合比设计中, 一般以“表观密度”近似代替“密度”。

3. 堆积密度 (ρ'_0)

堆积密度是指材料在堆积状态下; 单位体积的质量。

$$\rho'_0 = \frac{m}{V'_0}$$

式中 ρ'_0 ——堆积密度 (g/cm³ 或 kg/m³);

m ——材料质量 (g 或 kg);

V'_0 ——材料的堆积体积 (cm³ 或 m³)。

说明:

①材料堆积状态的体积包含了材料的内部孔隙以及材料颗粒之间的空隙,通常用容器的容积来表示,容器的容积视材料的种类和规格而定。

②过去习惯用法为“松散容量”。

(二) 空隙率、孔隙率及密实度

1. 密实度 (D)

密实度 (亦称紧密度) 是指材料体积内被固体物质充实的程度。

$$D = \frac{V}{V_0} \text{ 或 } D = \frac{\rho_0}{\rho}$$

式中 D ——密实度; 其他符号的含义同上。

2. 孔隙率 (P)

孔隙率是指材料体积内孔隙体积所占的比例。

$$P = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% \text{ 或 } P = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \times 100\% \text{ 或 } P = 1 - D$$

密实度或孔隙率的大小直接反应了材料的致密程度。材料内部的孔隙的构造可分为连通的或封闭的两种。按孔隙尺寸的大小又可分为极微细孔隙、细小孔隙和较粗大孔隙。孔隙的大小、分布、数量及构造特征对材料的性能产生很大的影响。

3. 空隙率 (P')

空隙率是指颗粒状材料在堆积状态下单位体积的颗粒之间的空隙所占的体积。

$$P' = \frac{V'_0 - V_0}{V'_0} \times 100\% \text{ 或 } P' = \left(1 - \frac{\rho'_0}{\rho_0}\right) \times 100\%$$

与空隙率相对应的是填充率 (D'), 即材料在某堆积体积中被颗粒填充的程度。

$$\text{计算公式 } D' = \frac{V_0}{V'_0} \times 100\% = \frac{\rho'_0}{\rho_0} \times 100\% = 1 - P'$$

(三) 吸水性和吸湿性

1. 吸水性

吸水性是指材料吸收水分的性质, 吸水性的由吸水率来表示。

$$W_{\text{吸}} = \frac{m_0 - m}{m} \times 100\%$$

式中 $W_{\text{吸}}$ ——材料的吸水率 (%);

m_0 ——材料在吸水饱和状态下的质量 (g);

m ——材料在干燥状态下的质量 (g)。

上述吸水率公式是指重量吸水率, 另有体积吸水率。体积吸水率是指材料在吸水饱和状态下的体积占自然状态下的体积的百分率。材料的吸水率与材料的孔隙的大小、数量及

构造特征均有很密切的关系。如微细连通孔隙，吸水率较大；而封闭孔隙及虽是连通但较粗大的孔隙，则吸水率相对较小。

2. 吸湿性

吸湿性是指材料吸收空气中水分的性质，吸湿性的大小由含水率表示。

$$W_{\text{含}} = \frac{m_1 - m}{m} \times 100\%$$

式中 $W_{\text{含}}$ ——含水率（%）；

m_1 ——材料在含水状态下的质量（g）；

m ——材料在干燥状态下的质量（g）。

材料如砂、石中的含水率与空气的湿度变化有很大关系，而与空气湿度达到平衡时的含水率称为平衡含水率。由于材料在阴天、晴天、雨天中含水率变化幅度很大，因此在混凝土配合比计算中，应先测定砂、石的含水率。

砂石的含水状态见图 1-1。

图 1-1 (a) ——全干状态，不含水分；

图 1-1 (b) ——气干状态，内部核心含有部分水份；

图 1-1 (c) ——饱和面干状态，表面干燥，颗粒内部的孔隙为水饱和，此时骨料的含水率称为饱和面干含水率；

图 1-1 (d) ——湿润状态，不仅内部孔隙为水饱和，而且表面尚有部分水，由于骨料含水率不同，在拌制混凝土时，将影响混凝土的用水量和骨料用量。计算混凝土配合比时，一般以全干状态骨料为基准。

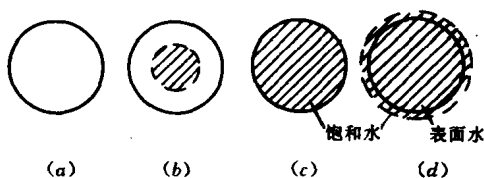


图 1-1 骨料的含水状态

(a) 全干状态；(b) 气干状态；(c) 饱和面干状态；
(d) 湿润状态

(四) 耐水性、抗渗性、抗冻性

耐水性是指材料长期在饱和水作用下而不破坏，而且其强度也不显著降低的性质。一般用软化系数表示；

抗渗性是指材料抵抗压力水渗透的性质，一般用渗透系数 K 或抗渗标号 S 来表示；

抗冻性是指材料在吸水饱和状态下，抵抗多次冻结和融化作用（冻融循环）而不破坏，同时也不严重降低强度的性质。一般用抗冻标号 D 表示。

材料的抗渗性和抗冻性与孔隙率、孔隙的大小、孔隙的构造特征等均有很大关系。孔隙率小及具有封闭孔的材料具有较高的抗渗性和抗冻性；若是细微且连通的孔，则对抗渗性和抗冻性均不利；若孔隙吸水后还有一定空间，则可缓解冻融的破坏作用。

二、力学性质

1. 强度

强度是指材料在外力（荷载）作用下抵抗破坏的能力。当材料承受外力作用时，内部产生应力。外力增大，应力也随之提高，当应力达到一定值时，材料将破坏，此时的应力值称为极限应力值，亦即材料的强度。

根据外力作用方式不同，材料强度有抗压强度、抗拉强度、抗弯强度、抗剪强度等等。

如混凝土的抗压强度、钢筋的抗拉强度。

不同种类的材料具有不同的抵抗外力的特点。即使相同种类的材料，强度也会随着孔隙率及构造特征的不同而不同。一般说来，孔隙率越大的材料强度越低，其强度与孔隙率具有近似直线的比例关系。

如混凝土其抗压强度较高，而抗拉强度较低，仅为抗压强度的 $1/10$ 左右，而钢筋的抗拉强度就很高，在建筑工程及预制构件上就是充分利用两者的长处，将它们有机地结合起来。

2. 脆性与韧性

脆性是指材料在外力作用下，当外力达到一定限度后，材料突然破坏，而破坏时并无明显的塑性变形，这种性质为脆性。

韧性是指材料在冲击、震动荷载作用下，材料能吸收较大的能量，同时也能产生一定的变形而不致破坏的性质。

砖、石材、玻璃、陶瓷等属于脆性材料，钢材属于韧性材料。

脆性材料的变形曲线见图 1-2。

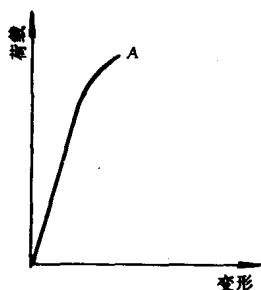


图 1-2 脆性材料的变形曲线

3. 弹性与塑性

弹性是指材料在外力作用下产生变形，当外力取消后，能够完全恢复原来形状的性质。这种完全恢复的变形称为弹性变形。

塑性是指材料在外力作用下产生变形，如果取消外力，仍保持变形后的形状和尺寸，并且不产生裂缝的性质。这种不能恢复的变形称为塑性变形。弹塑性是指材料在外力作用下产生变形，当外力取消后，部分变形能（弹性变形）恢复，部分变形（塑性变形）不能恢复，这种性质为弹塑性，如混凝土即属于弹塑性材料。材料的弹性、塑性、弹塑性变形曲线如图 1-3、图 1-4、图 1-5 所示。

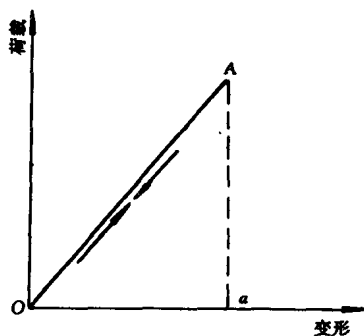


图 1-3 弹性材料变形曲线

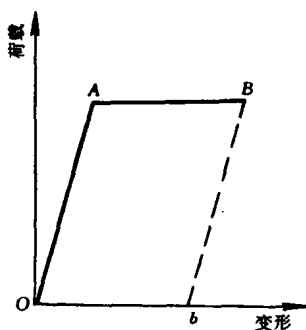


图 1-4 塑性材料变形曲线

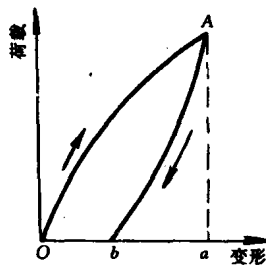


图 1-5 弹塑性材料变形曲线

三、耐久性

耐久性是指材料在长期使用过程中，除受到各种外力的作用外，还受到环境中各种自然因素的破坏作用（包括物理的、化学的、生物的），在这破坏作用下还能保持其原有性能而不破坏的性质。

物理作用主要有干湿交替、温度变化、冻融循环等。这些作用会使材料产生体积的膨胀或收缩，或导致内部裂缝的扩展，长久作用后会使材料产生破坏。

化学作用主要指材料受到酸、碱、盐等物质的水溶液或有害气体的侵蚀作用，使材料的组成成分发生质的变化，而引起材料的破坏。如混凝土发生碱集料反应、碳化反应以及钢材的锈蚀等。

总之，耐久性是一项综合性质，在设计过程中，原材料准备、材料的选择、混凝土的配合比设计以及施工等环节都要考虑到混凝土及其所处环境的要求。混凝土的抗冻性、抗渗性及气候条件都与耐久性有着密切的关系。

第二节 水 泥

一、水泥的分类

通常，在电杆生产中较为常用的水泥主要有以下几种：硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥（又称普通水泥）、矿渣硅酸盐水泥（又称矿渣水泥）等。它们均是以硅酸盐水泥熟料为主要成分的一类水泥。

由于生产上一些特殊要求，还采用特种水泥，如抗硫酸盐硅酸盐水泥（又称抗硫酸盐水泥）、快硬硅酸盐水泥（又称快硬水泥）以及快硬硫铝酸盐水泥、快硬铁铝酸盐水泥等等，但这些水泥较少使用，在生产工艺上也有一定的要求。

根据电杆国标要求：宜选用不低于标号 525 的硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、抗硫酸盐硅酸盐水泥或不低于标号 425 的快硬硅酸盐水泥。

二、水泥的定义

1. 硅酸盐水泥

由硅酸盐水泥熟料、0%~5%石灰石或粒化高炉矿渣、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料。

可分为：Ⅰ型硅酸盐水泥（不掺混合材料），代号 P·I；Ⅱ型硅酸盐水泥（掺混合材料），代号 P·II。

2. 普通硅酸盐水泥

由硅酸盐水泥熟料、6%~15%混合材料、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料，代号 P·O。

掺活性混合材料时，最大掺量应 $\leq 15\%$ ，其中允许用不超过水泥质量 5%的窑灰或不超过水泥质量 10%的非活性混合材料来代替。

掺非活性混合材时最大掺量应 $\leq 10\%$ 。

3. 矿渣硅酸盐水泥

由硅酸盐水泥熟料、20%~70%的粒化高炉矿渣、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料；代号 P·S。

允许用石灰石、窑灰、火山灰质混合材中的一种来代替矿渣，代替数量不得超过水泥质量的 8%，替代后水泥中粒化高炉矿渣不得少于 20%。

上述各种水泥的组成见表 1-1。

表 1-1

常用水泥品种与组成

水 泥 品 种	水泥 代号	水 泥 组 成		
		熟 料	石 膏	混 合 材 料
I 型硅酸盐水泥	P · I	硅酸盐水泥熟料 95%~98%	天然石膏或工业副产石膏 适量(控制 $SO_3 < 3.5\%$)	不掺任何混合材料
II 型硅酸盐水泥	P · II	硅酸盐水泥熟料 90%~97%	天然石膏或工业副产石膏 适量(控制 $SO_3 < 3.5\%$)	掺加不超过水泥质量 5% 的石灰或粒化高炉矿渣
普通硅酸盐水泥 (简称普通水泥)	P · O	硅酸盐水泥熟料 80%~92%	天然石膏或工业副产石膏 适量(控制 $SO_3 < 3.5\%$)	掺 6%~15% 混合材料
矿渣硅酸盐水泥 (简称矿渣水泥)	P · S	硅酸盐水泥熟料 25%~78%	天然石膏或工业副产石膏 适量(控制 $SO_3 < 4.0\%$)	掺 20%~70% 的粒化高炉矿渣

注 一般水泥中石膏掺量为 2%~5%。

三、特种水泥及其技术要求

改变生料中的某些化学成分,烧制出具有特定性能的特种硅酸盐水泥,如快硬硅酸盐水泥、抗硫酸盐硅酸盐水泥等。此外,还有一些以非硅酸盐类为水泥熟料的特种水泥,如硫铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥等。

1. 硫铝酸盐水泥

将铝质原料(如矾土)、石灰质原料(如石灰石)和石膏适当配合,煅烧成以无水硫铝酸钙矿物为主的熟料,该熟料掺适量石膏共同磨细,即可制得硫铝酸盐水泥。

硫铝酸盐水泥矿物组成波动范围大,其矿物组成为:

C_4A_3S 36%~44%, C_2S 23%~34%

C_2F 10%~17%, $CaSO_4$ 12%~17%

硫铝酸盐水泥凝结时间较快,初凝一般在 8~60 min,终凝在 10~90 min,初凝与终凝的间隔较短,一般约相差半小时。

该水泥早期强度高,后期强度发展缓慢,但不倒缩。5℃时能正常硬化,由于不含 C_3A 矿物,并且水泥石致密度高,所以抗硫酸盐性好。水泥石在空气中收缩小,抗冻和抗渗性能良好。

通过调节外掺石膏量,又可制成不同类型水泥,随着石膏掺量的增多,水泥由早强变为微胀、膨胀及自应力水泥,以供不同使用要求。

如快硬硫铝酸盐水泥,执行标准为 ZBQ11005—87。

(1) 适用范围:配制早强、抗渗和抗硫酸盐侵蚀腐蚀等混凝土。

(2) 定义:凡以适当成分的生料,经煅烧所得以无水硫铝酸钙和硅酸二钙为主要矿物成分的熟料,加入适量石膏磨细制成的早期强度高的水硬性胶凝材料。

(3) 标号:以 3 d 抗压强度表示,分 425、525、625 三个标号。

(4) 品质指标^①:

① 必要时应进行水泥的 28 d 龄期强度检验,其数值不低于 3 d 龄期强度指标。

1) 游离氧化钙: 水泥中不允许出现游离氧化钙;

2) 表面积: $\geq 380 \text{ m}^2/\text{kg}$;

3) 凝结时间^①: 初凝 $\geq 25 \text{ min}$

终凝 $\leq 3 \text{ h}$

凡游离氧化钙不符合要求或强度低于该品种水泥最低标号规定的指标时, 该水泥均为废品。

除游离氧化钙以外其余指标中任何一项不符合标准规定或强度低商品标号的指标时, 该水泥为不合格品。

2. 快硬硅酸盐水泥, 执行标准 GB199—90

主要矿物成分: 铝酸三钙 (8%~14%), 硅酸三钙 (含量 50%~60%), 两者总量不少于 60%~65%; 为了加快硬化速度, 可适当增加石膏的掺量 (达 8%) 和提高水泥的细度, 通常比表面积为 $300\sim 400 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。由于含有较多的高活性矿物, 故早期强度增进率较大, 适用于紧急抢修工程和需要早期强度高的工程及预制构件。

3. 抗硫酸盐硅酸盐水泥, 执行标准 GB748—92

技术要求: 抗硫酸盐水泥使用的水泥熟料中含 $C_3A \leq 5\%$, $C_3S \leq 50\%$, $C_3A + C_4AF \leq 22\%$, 允许掺入 10%~15% 的火山灰质混合材。

熟料中 $fCaO < 1.0\%$

烧失量 $< 1.5\%$

水泥中 $SO_3 < 2.5\%$

熟料中 $MgO < 5.0\%$

它具有良好的抗硫酸盐侵蚀和抗冻融及干湿循环破坏能力, 适用于有硫酸盐侵蚀、经常遭受冻融和干湿循环的工程以及构件。

4. 快硬铁铝酸盐水泥, 执行标准 JC435—91

(1) 适用范围: 适用于快硬早强、耐腐蚀、负温施工、海工、道路等特殊工程及一般建筑工程用快硬铁铝酸盐水泥。

(2) 定义: 以适当成分的生料, 经煅烧所得的铁相、无水硫铝酸钙和硅酸二钙为主要矿物成分的熟料, 加入适量石灰石^② 和石膏, 磨细制成的早期强度高的水硬性胶凝材料。

(3) 标号: 以 3 d 抗压强度表示, 分 425、525 两个标号。

(4) 技术要求:

1) 比表面积 $\geq 380 \text{ m}^2/\text{kg}$

2) 凝结时间^③初凝 $\geq 25 \text{ min}$

终凝 $\leq 3 \text{ h}$

3) 游离氧化钙 $\leq 0.4\%$

凡品质指标中比表面积、凝结时间中任何一项不符合以上要求或强度低于商品标号规

① 用户要求变动时, 可与生产厂协商。

② 石灰石掺量不得超过 20%。

③ 用户要求凝结时间变动时, 可与生产厂协商。

定的指标时，该水泥为不合格品。

水泥中游离氧化钙不符合要求时为废品。

在采用快硬水泥生产电杆时，应注意凝结时间的影响，由于快硬水泥凝结快，因此要保证混凝土的拌合、浇注、离心在初凝前完成，必须在工艺上采取一定的措施，否则，易产生质量问题。

采用快硬水泥生产的电杆，由于水泥的快速硬化，在保证同等强度条件下，蒸养时间大大缩短，且蒸养温度降低，可节省大量能源，加快钢模周转，提高产量。

四、常用水泥的技术要求

(一) 水泥的各项技术要求

水泥的各项技术要求详见表 1-2 所示。

表 1-2 各种水泥的技术要求

水 泥 品 种	代 号	SO ₃	MgO	烧 失 量	安 定 性
硅酸盐水泥	P · I P · II	≤3.5%	水泥中 MgO ≤5%	P · I ≤3% P · II ≤3.5%	沸煮法检验合格
普通硅酸盐水泥	P · O	≤3.5%	水泥中 MgO ≤5%	≤5%	沸煮法检验合格
矿渣硅酸盐水泥	P · S	≤4.0%	熟料中 MgO ≤5%		沸煮法检验合格
快硬硅酸盐水泥		≤4.0%	熟料中 MgO ≤5%		沸煮法检验合格
抗硫酸盐硅酸盐水泥		≤2.5%	水泥中 MgO ≤5%	≤1.5%	沸煮法检验合格
水 泥 品 种	凝 结 时 间		细 度	其 他	标 准
	初 凝	终 凝			
硅酸盐水泥	≥45 min	≤6.5 h	比表面积 > 300 m ² /kg	不溶物含量 P · I ≤0.75% P · II ≤1.5%	GB175—92
普通硅酸盐水泥	≥45 min	≤10 h	80 μm 方孔筛筛余 ≤10%		GB175—92
矿渣硅酸盐水泥	≥45 min	≤10 h	80 μm 方孔筛筛余 ≤10%		GB1344—92
快硬硅酸盐水泥	≥45 min	≤10 h	80 μm 方孔筛筛余 ≤10%		GB199—90
抗硫酸盐硅酸盐水泥	≥45 min	≤12 h	80 μm 方孔筛筛余 ≤10%	熟料中 f—CaO ≤1%	GB748—92

注 1. 上表中 MgO 含量要求若经水泥压蒸安定性试验合格后允许放宽。

①对硅酸盐水泥及普通硅酸盐水泥：水泥中 MgO 允许放宽到 ≤6.0%；

②对矿渣硅酸盐水泥：熟料中 MgO 允许放宽到 ≤7%。

2. 碱含量要求详见标准要求。

1. 细度

细度是指水泥颗粒的磨细程度。

水泥颗粒的细度对水泥的安定性、需水量、凝结时间及强度有较大影响。水泥颗粒粒径愈细，与水起反应的表面积愈大，因而水化较快而且较完全，其早期强度和后期强度都

较高，但在空气中的硬化收缩性也较大，而且粉磨能量消耗大，成本高。如果水泥颗粒过粗则不利于水泥活性的发挥。一般认为水泥颗粒粒径小于 $40\text{ }\mu\text{m}$ 时，才具有较高的活性。硅酸盐水泥细度采用透气式比表面积仪检验，要求比表面积 $\geq 300\text{ m}^2/\text{kg}$ ，其他水泥采用筛析法检验，要求在 $80\text{ }\mu\text{m}$ 标准筛上筛余量 $\leq 10\%$ 。

2. 凝结时间

凝结时间分初凝和终凝，初凝为从水泥加水拌合至标准稠度净浆开始失去可塑性所经历的时间；终凝为从水泥加水拌合至水泥浆完全失去可塑性并开始产生强度的时间。

水泥的凝结时间与水泥的品种、混合材料掺量有关；高强快硬水泥的凝结时间短，而混合材料掺量大的水泥凝结时间长。为了使混凝土搅拌后，有充分的时间进行运输、浇捣、合模、张拉、离心等工序，并要求在初凝前完成，因此，水泥初凝时间不能过短。而这些工序完成后，则要求尽快硬化，产生强度，故要求终凝时间不能太长。

由于电杆生产与工程施工不同，从混凝土搅拌开始至完成离心过程，中间时间较长，而离心完成之后又要马上进行蒸养，可见，水泥的凝结时间对电杆生产意义重大。根据电杆生产工艺特点及要求，选择水泥初凝时间大于 1 h ，终凝时间在 $2\sim 3\text{ h}$ 比较合适。水泥的凝结时间与水泥品种、混合材料掺量大小有关；一般说来，掺混合材料的水泥凝结时间较长，此外，细度小（即颗粒粒径大）的水泥凝结时间也较长。温度升高，水泥水化加速，凝结时间缩短，所以在炎热季节或高温条件进行生产时，须注意水泥的凝结时间，尤其是初凝时间要更长一些较合适。

3. 体积安定性

体积安定性不良是指已硬化的水泥石产生不均匀的体积变化现象，它会使电杆产生膨胀裂缝，使电杆变成废品。

引起体积安定性不良主要是由于熟料中所含的游离氧化钙（ $f\text{-CaO}$ ）、游离氧化镁（ $f\text{-MgO}$ ）或掺入的石膏过多等原因造成的。

由于熟料烧成工艺上的原因， $f\text{-CaO}$ 是显过烧状态，水化活性降低，其水化反应是在水泥硬化后才进行的；该水化反应固相体积膨胀 97% ，引起不均匀的体积变化导致水泥石开裂。而 $f\text{-MgO}$ 形成结晶方镁石，其结晶结构致密，水化比 $f\text{-CaO}$ 更为缓慢，要几个月甚至几年才明显水化，因此，它在后期水化反应后形成氢氧化镁也产生体积膨胀，导致混凝土开裂。石膏是作为调凝剂或作为混合材料的活性激发剂，而石膏掺量过多时，在水泥硬化后还会继续与固态水化铝酸钙反应生成高硫型硫铝酸钙，体积约增大 1.5 倍，也会引起水泥石开裂。

国家标准规定用沸煮法检验水泥体积安定性（其原理是沸煮加速 $f\text{-CaO}$ 水化），并且对 $f\text{-MgO}$ 、 SO_3 含量作出了限制，（因 $f\text{-MgO}$ 比 $f\text{-CaO}$ 水化更加缓慢，若经压蒸试验安定性合格后其含量可允许放宽）。当水泥安定性不合格时，应作为废品处理，不能用于电杆生产中。

此外，生产中应尽量采用回转窑生产的水泥，立窑生产的水泥因设备及煅烧上的原因，如生料、熟料均化不充分，煅烧不均匀等，水泥质量波动性较大，且安定性较难保证。

4. 标号、强度

水泥强度是决定能否在电杆生产上使用的一项重要技术指标，必须根据生产要求选择

合适的强度（水泥标号）。水泥强度取决于水泥品种及其熟料中的矿物成份和细度。

5. 其他各项技术要求

其他各项技术要求还有如水化热、烧失量、氧化镁、三氧化硫（ SO_3 ）、碱含量、不溶物（指硅酸盐水泥）等等。

（1）水化热。水泥水化反应过程放出的热，对大体积混凝土是有害的，因热量积蓄在内部，造成内外温差，形成不均匀应力导致开裂，而对冬季混凝土施工则是有利的，因水化热促进水泥水化进程。水泥的水化放热量、放热速率与水泥矿物组成、细度、混合材料种类、掺量等有关，水泥各种组成矿物的水化热及放热速率比较如下：

$$\text{C}_3\text{A} > \text{C}_3\text{S} > \text{C}_4\text{AF} > \text{C}_2\text{S}$$

水泥细度愈细，水化反应越快，水化放热速率亦增大。掺混合材料会降低水化热和放热速率。对硅酸盐水泥，水化 3 d 龄期内水化放热量大约为总放热量的 50%，7 d 龄期内为 75%，3 个月可达 90%。因此，水泥的水化放热量大部分在 3 d~7 d 内放出，以后逐渐减少。

（2）不溶物。水泥中的不溶物来自熟料中未参与矿物形成反应的粘土和结晶 SiO_2 ，是煅烧不均匀、化学反应不完全的标志。对回转窑 $< 0.5\%$ ，立窑 $< 1.0\%$ 。

（3）烧失量。其大小在一定程度上反映熟料烧成质量，同时也反映了混合材料掺量是否适当，以及水泥风化的情况。而矿渣水泥中的烧失量则反应上述情况，故标准中不作规定。

（4）氧化镁。熟料中氧化镁含量偏高是导致水泥长期安定性不良的因素之一。但熟料中氧化镁以两种形式存在：一种是固溶于各种熟料矿物和玻璃体中（不引起安定性不良）；一种是以结晶方镁石形式存在（对安定性有害）。

（5）三氧化硫。水泥中的 SO_3 主要来自石膏，过量将造成水泥体积安定性不良。国标通过限制 SO_3 含量控制石膏掺量。

（6）碱含量。若水泥中碱含量高，当选用含有活性 SiO_2 的骨料配制混凝土时，会产生碱骨料反应，严重时会导致混凝土不均匀膨胀破坏。标准规定：水泥中碱含量按 $\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$ 计算值表示，若使用活性骨料，用户要求提供低碱水泥时，则水泥中碱含量应不大于 0.60% 或由双方商定。

（二）关于废品与不合格品的规定

1. 废品水泥

凡氧化镁、三氧化硫、初凝时间、安定性中任一项不符合标准规定的水泥均为废品水泥。

2. 不合格品水泥

凡细度、终凝时间（硅酸盐水泥还包括不溶物和烧失量，普硅水泥包括烧失量）中的任一项不符合标准规定或混合材料掺加量超过最大限量以及强度低于商品标号规定的指标时的水泥称为不合格品水泥，水泥包装标志中水泥品种、标号、工厂名称和出厂编号不全的也属于不合格品水泥。

五、硅酸盐水泥的生产工艺流程

硅酸盐水泥的生产工艺流程见图 1-6。

生料在煅烧过程中，分解出氧化钙、氧化硅、氧化铝、氧化铁，在更高温度下，氧化钙与氧化硅、氧化铝、氧化铁相结合，形成以硅酸钙为主要成份的熟料矿物。整个水泥生产工艺过程可概括为“两磨一烧”，硅酸盐水泥熟料主要矿物成分见表 1-3。

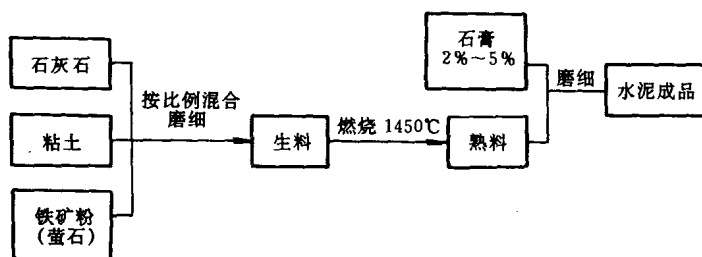


图 1-6 硅酸盐水泥的生产工艺流程

六、熟料矿物在水泥石强度发展过程中所起的作用

水泥是几种熟料矿物的混合物，改变熟料矿物成分间的比例，水泥的性质即发生相应的变化，例如，提高 C_3S 的含量，可以制得高强度水泥；降低 C_3A 、 C_3S 的含量，提高 C_2S 的含量，可制得水化热低的水泥。

表 1-3 硅酸盐水泥熟料矿物成分

矿物分子式	简 写	含 量	矿物名称
$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S	37%~60%	硅酸三钙
$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S	15%~37%	硅酸二钙
$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	7%~15%	铝酸三钙
$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF	10%~18%	铁铝酸四钙

硅酸盐水泥中主要矿物成份及含量见表 1-3 所示。其中 C_3S 、 C_2S 含量较大，强度也主要与 C_3S 、 C_2S 有关， C_3S 在 28 d 以内对水泥石强度起决定性作用。 C_2S 在 28 d 以后才发挥其强度作用，大约经过一年，与 C_3S 对水泥石强度发挥相等的作用；而 C_3A 、 C_4AF 含量较少，它们除了对水泥早期强度有一些有利影响外，还可能对水泥最终强度有负的影响。 C_3A 在 1~3 d 或稍长的时间内，对水泥石强度起有益的作用，但以后可能使水泥石强度降低。 C_3S 含量高，早期强度高，反之，早期强度低，但 C_2S 含量高的水泥，强度会随龄期不断增长而增长。

含混合材料的硅酸盐水泥，它们早期强度比硅酸盐水泥低，但在潮湿环境中后期强度的增长较大，它们抗硫酸盐侵蚀和抗水浸析性能均优于硅酸盐水泥。

七、硅酸盐水泥熟料主要矿物特性

硅酸盐水泥熟料主要矿物特性见表 1-4 所示：

(1) C_3S 是熟料主要矿物，通常含量为 50% 左右，水化较快，粒径为 40~50 μm 的 C_3S 颗粒水化 28 d，其水化程度可达 70% 左右，所以强度发展快，早期强度高，且强度增进率大，28 d 强度可达 1 年强度的 70%~80%。就 28 d 或一年的强度来说，在四种矿物中最高， C_3S 水化凝结时间正常，水化热较高。

(2) C_2S 在熟料中主要以 $\beta-C_2S$ 存在，其含量一般为 20% 左右。 $\beta-C_2S$ 水化较慢，28 d 仅水化 20% 左右，凝结硬化缓慢，早期强度较低，但 28 d 以后强度仍能较快增长，在一年后可以超过 C_3S ，水化热较小。

(3) C_3A 含量在 7%~15% 之间，水化迅速，放热量大，凝结很快，如不加石膏作缓凝剂，易使水泥急凝。硬化快，强度在 3 d 之内就已大部分发挥，故早期强度较高，以后

表 1-4 熟料矿物的基本特性

矿物	强度		28 d 水化热	耐化学侵蚀性	干缩	凝结硬化速度
	早期	后期				
C_3S	高	高	多	中	中	快
C_2S	低	高	少	良	小	慢
C_3A	高	低	最多	差	大	最快
C_4AF	低	低	中	优	小	快

几乎不再增长，甚至倒缩。 C_3A 含量高的水泥浆体干缩变形大，抗硫酸盐侵蚀性能差。

(4) C_4AF 含量在 10%~18% 之间，水化速度在早期介于 C_3A 和 C_3S 之间，但随后的发展不如 C_3S 。它的强度类似 C_3A ，但后期还能不断增长，类似于 C_2S 。 C_4AF 的抗硫酸盐侵蚀性能较好，水化热较 C_3A 低。

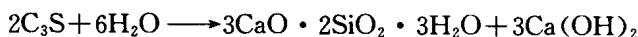
八、水泥的水化硬化

水泥与水接触时，水泥中的各成分与水起反应的过程称为水化，水泥的水化反应受水泥的组成、细度、加水量、湿度、混合材料等一系列因素的影响。水泥水化过程是一个凝结和硬化的过程。

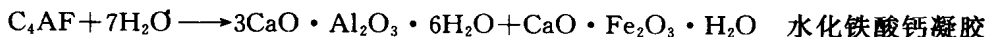
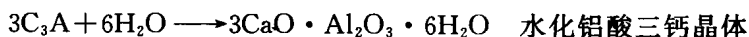
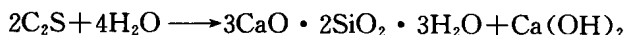
凝结：水泥加水拌合后，成为可塑性的水泥浆，随着水化反应的进行水泥浆逐渐变稠失去塑性，但尚不具有强度的过程。

硬化：产生明显的强度并逐渐发展而成为坚硬的人造石（水泥石）的过程。

（一）硅酸盐水泥的水化硬化



水化硅酸钙凝胶 氢氧化钙晶体



二水石膏 + $C_3A \longrightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ (AFt) 高硫型水化硫铝酸钙针状晶体（钙矾石）



硅酸盐水泥与水作用后，生成的主要水化物有：水化硅酸钙、水化铁酸钙凝胶、氢氧化钙、水化铝酸钙、水化硫铝酸钙晶体，在完全水化的水泥石中，水化硅酸钙凝胶（C—S—H）占 70%，氢氧化钙占 20%，钙矾石和单硫型水化硫铝酸钙约占 7%。水泥石结构是由未水化的水泥颗粒、水化产物以及孔隙组成，水化产物晶体共生和交错，形成结晶网络结构，在水泥石中起重要的骨架作用，水化硅酸钙凝胶填充于其中。水化硅酸钙凝胶比表面积很大，表面能高，相互间受到分子间的引力作用，相互接触而发展了水泥石的强度。因此，随着水化龄期的推移，水化硅酸钙生成量增加，有助于水泥石强度增长。

水泥石的强度与其他多孔材料一样，取决于内部孔隙的数量，这类影响强度的孔隙，是指拌合水泥浆时形成的气孔及不参与水化反应的自由水所形成的毛细孔，但不包括极为微小的凝胶孔。一般水泥浆的孔隙率与其水灰比成正比，并随水化龄期推移而降低。因此，降低水灰比，可提高水泥石强度，并且水泥石强度随水化龄期推移而增强。

硅酸盐水泥比普通水泥标号较高，可用于配制高强混凝土和预应力混凝土。因为水泥凝结硬化较快，抗冻性好，适用于早期强度高、凝结快以及有抗冻融要求和冬季施工的工程或构件，由于水泥石中 $Ca(OH)_2$ 含量较高，因此，抗淡水、海水侵蚀和抗硫酸盐侵蚀能力差。

（二）矿渣水泥的水化硬化

矿渣水泥水化过程与硅酸盐水泥基本上是一致的，所不同的是，粒化高炉矿渣在 $Ca(OH)_2$ 存在条件下，能激发其潜在的水硬性能，由于 $Ca(OH)_2$ 使矿渣玻璃体中的活性 SiO_2 和活性 Al_2O_3 进入溶液，并与之形成水化硅酸钙、水化铝酸钙。水泥中所含的石膏则