

基于埋地式高压电力电缆用氯化聚氯乙烯套管的加工工艺优化研究

姚文琴¹, 张文学^{2*}, 张浩¹, 刘元戎², 屈智财¹, 张斌山¹, 景云天¹

(1. 金川集团化工新材料有限责任公司, 甘肃 金昌 737100;

2. 金川集团化工有限责任公司, 甘肃 金昌 737100)

摘要:研究了加工工艺条件包括混料工艺中混料顺序, 挤出工艺中螺杆主机转矩、喂料转速、加工温度、牵引速度、冷却水温、料筒真空度及定径真空压力等对埋地式高压电力电缆用氯化聚氯乙烯套管的性能影响, 从生产工艺方面入手以提升产品的质量。

关键词: 氯化聚氯乙烯; 工艺条件; 塑化程度; 产品性能

中图分类号: TQ325.3

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2024)11-0033-06

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2024.11.007

目前高低压电力线路的需求量随城市现代化建设的加快与日俱增, 一般将水泥石棉管等材料作为其保护套管, 但在使用过程中存在施工困难、路线检修繁琐等问题, 对交通正常运行产生不利影响。在部分发达国家现已普遍采用氯化聚氯乙烯(CPVC)管作为电力线路保护套管。我国于1999年首次使用CPVC管道, 现在CPVC管道市场主要集中在印度、中东等国家和地区。CPVC树脂作为一种新型工程塑料, 由聚氯乙烯(PVC)树脂氯化所制备所得, 其氯含量提高至61%~75%, CPVC与PVC的指标对比如表1。CPVC树脂因具有良好的耐化学腐蚀性、耐热变形性、可溶性、耐老化性、阻燃性等特点, CPVC电力保护套管成为建设部和电力部在21世纪推进城市电力电缆从架空走下地埋地的一项重大标志性工程, 符合国家宏观调控方向, 需要数量巨大。

表1 CPVC与PVC的关键指标对比

	单位	CPVC	PVC
氯含量	%	63~75	56~59
密度	g/cm ³	1.5	1.45
抗冲击强度	J/m	150	150
拉伸强度	MPa	53~55	50~53
拉伸弹性模量	MPa	2 650	2550
热变形温度	°C	110	75
热膨胀系数	1/°C	5×10 ⁻⁵	5×10 ⁻⁵

但是, 因为CPVC较高的氯含量使分子间的作用力加大, 极性增强, 影响CPVC的加工黏度, 其加工

过程中的塑化温度不易控制, 极易造成分解, 导致管材成型困难, 制备出的管材质量不能满足指标要求。为解决该问题首先需要加入各类助剂与CPVC进行共混改性, 在保持耐热性能的前提下, 改善材料的抗冲击性能和加工性能。此外, CPVC管材加工工艺中关键指标的合理控制对管材的成型和性能将产生重要影响。本文的目的是研究管材加工工艺对高压电力电缆用CPVC套管的物理力学性能影响, 以获得具有耐高温、抗冲击、耐压、易于成型加工和安装方便的高压电力电缆护套管材。

1 实验过程

1.1 主要实验原料

CPVC树脂(江苏理文化工有限公司), PVC树脂(金川集团化工有限责任公司), 改性CaCO₃(四川广源化工有限公司), 钙锌稳定剂(广东鑫达新材料科技有限公司), 硬脂酸(广州高越化工有限公司), 硬脂酸钙(淄博博皓石油化工科技有限公司), 聚乙烯蜡(东莞市星原化工有限公司), 石蜡(中国石油天然气股份有限公司), 氧化聚乙烯蜡(上海凯茵化工有限公司), 氯化聚乙烯(山东三义集团股份有限公司),

作者简介: 姚文琴(1994-), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事塑料共混与改性方面的研究工作。

收稿日期: 2023-06-28

MBS (山东东临新材料股份有限公司), ACR (淄博华星助剂有限公司)

1.2 主要仪器与设备

高速旋转热冷混料机, SRL-Z 型, 青岛睿杰塑料机械有限公司;

挤管造粒一体机, PS-75/28 型, 上海巨远塑料机械有限公司;

维卡软化点温度测定试验机, XRW-300H-32, 石家庄中实检测设备有限公司;

落锤冲击试验机, XJD-300D-400, 石家庄中实检测设备有限公司。

1.3 高压电力电缆用 CPVC 套管的工艺流程

首先按生产工艺配方 (如图 1), 准确称取原料和

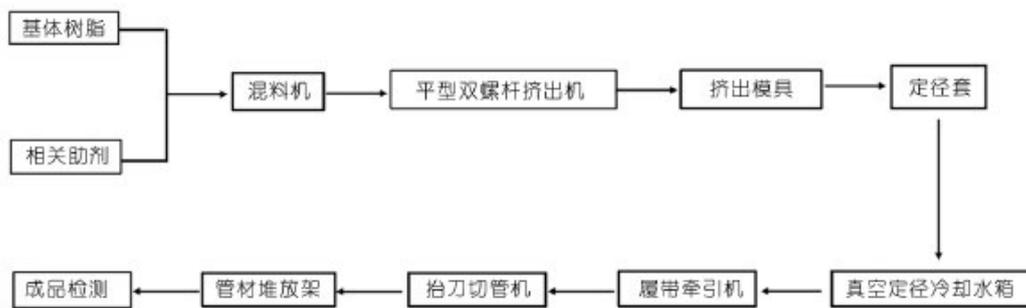


图 1 高压电力电缆用 CPVC 套管生产工艺流程图

1.4 性能测试方法

维卡软化温度 (VST) 按 GB/T 1633—2000 进行测试;

落锤冲击试验按 GB/T 14152—2001 进行测试。

2 结果与讨论

2.1 混料顺序对管材加工工艺的影响

原料在混料工艺中合理的投放顺序将保证各种助剂充分发挥作用以及助剂之间形成协同效应, 进而为后期挤管试验的稳定运行创造条件。CPVC 电力管道套管混料采用高低混混料机。在高速混合机中, 通过快转速搅拌, 各物料与混合机器壁以及物料之间互相摩擦, 快速升温。在混料的过程中, 除了保证混合均匀外, 一部分助剂要完成在基体树脂中的吸收。

采用“一锅法”混料方式图 2(a), 即将 CPVC 树脂与所有助剂同时加入到高混机中, 高速搅拌升温至 110 °C 后放料进入到低速混合机中, 冷却至 40 °C 出料后进行管材挤出加工。按照该方法出料后发现混配料中有大小不一的块状物, 在保证其他加工工艺条件不

变的前提下, 挤出的管材表面出现明显黑点, 这可能是低熔点的助剂在混料温度升高的过程中发生分解结块, 在挤出机中该助剂并未发挥作用进而出现黑点杂质, 如图 2(b)。

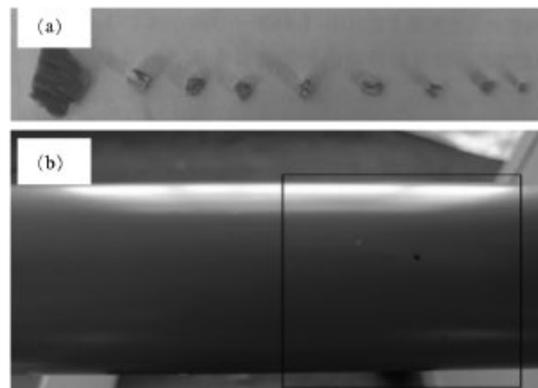


图 2 “一锅法”混料挤出图

为解决上述问题, 采用“分步法”进行混料 (如图 3), 即将助剂按不同顺序进行投料, 首先在高速混料机内加入 CPVC, PVC, 钙锌稳定剂, 增韧剂氯化

聚乙烯和 MBS, 加工助剂 ACR, 高速混合升温至 60 °C 后保温 6 min, 该过程中钙锌稳定剂充分发挥对基体树脂的稳定作用, 同时使增韧剂、加工助剂与树脂充分混合分散; 保温结束后加入碳酸钙、外润滑剂石蜡和聚乙烯蜡, 高速混合至 80 °C, 然后加入内润滑剂硬脂酸、氧化聚乙烯蜡、硬脂酸钙、颜料, 高速混合至 120 °C 后出料至低混机中, 逐步冷却至 40 °C 后放料作为生产实验料。这样的目的是随着温度的升高, 树脂

颗粒逐渐变软膨胀, 并产生一定程度的预塑化, 熔点较低的润滑剂熔化附着或渗入于树脂表面, 使得基体树脂颗粒粒径逐渐增大, 进而形成较好的初步凝胶化作用与分散效果, 同时使干混料具有较大的表观密度, 提高物料的流动性, 利于干混料在螺杆内的输送, 挤出速率提高。按照该方法混料后, 混配料中的块状物消失, 挤出的管材表面光滑, 无明显黑色杂质, 如图 4 所示。



图 3 “分步法”混料工艺流程图

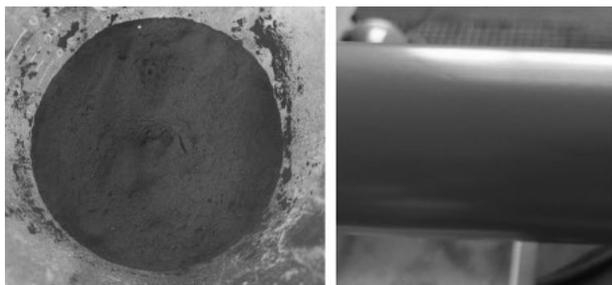


图 4 “分步法”混好的共混料及挤出管材表面图

2.2 挤出工艺

CPVC 共混体系的挤出成型过程可分为三个阶段:

(1) 挤出机的机筒温度与螺杆的连续旋转使物料被逐渐压实与混合, 物料由粉末状变为黏流态。

(2) 黏流态的塑料熔体在挤出机螺杆旋转力的推动作用下, 通过具有特定形状的机头口模, 得到截面与口模形状一致连续管材。

(3) 通过真空冷却定型处理, 使已挤出的管材固化, 在冷却的同时, 由牵引装置连续均匀地对管材进行牵引, 之后管材按照规定的长度由切管机完成切割, 经过翻管得到管材产品。

2.2.1 螺杆主机转矩对制品性能的影响

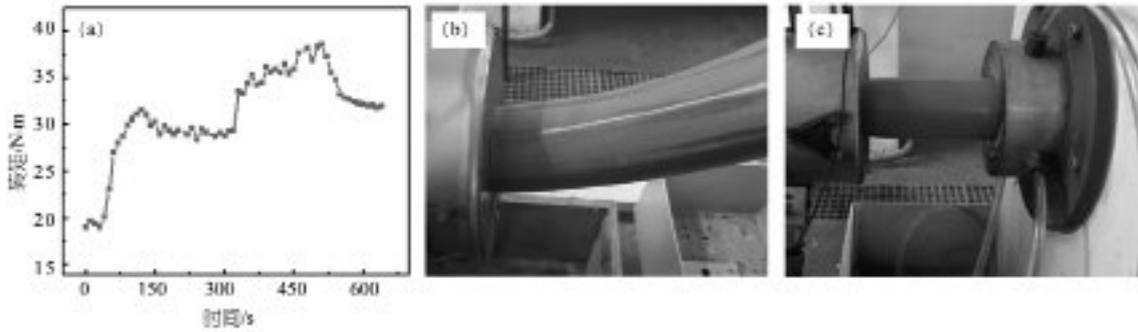
在 CPVC 开停机时, 需要用以 PVC 料为主, 配制具有一定稳定性的停机料, 用于清洗螺杆挤出机内残留的 CPVC 料。CPVC 树脂在挤出机内的流动情

况可以通过螺杆的主机转矩来判断。螺杆主机转矩随时间的变化曲线如图 5(a) 所示, 在 0~120 s 内, 螺杆的转矩随着时间的增加而变大, 表明停机料在螺杆内逐渐向模具方向流动; 在 120~320 s 内主机转矩的变化波动较为平缓, 表明停机料占据于螺杆内部, 处于全充满状态, 在 320~520 s 内, 主机转矩随着时间的增加继续增加, 这是由于 CPVC 的黏度较 PVC 更大, 在螺杆内塑化流动的停机料逐渐被 CPVC 所代替, 主机转矩增大, 在 520 s 以后, 螺杆内部全为塑化的 CPVC 黏流态, 主机转矩趋于稳定, 停机料及 CPVC 挤出如图 5(b) 所示。

2.2.2 喂料转速和转矩对制品性能的影响

在管材生产过程中, 保持挤出量的稳定极为重要。挤出量出现波动轻则导致产品质量下降, 重则引起生产中断而需重新牵引管坯, 需耗费较长的时间和较多的物料才能使挤出量重新稳定下来。挤出量波动的常见原因是喂料量不稳定, 使主机的转矩变化较大, 进而影响挤出量。选取 3 种条件下的喂料及主机的转速、转矩对熔体压力的影响进行研究。

从表 2 可以看出, 喂料的大小通过转速来控制, 当喂料的转速增大时, 更多的物料进入螺杆内部, 为保证其在螺杆内更好流动, 需相应增加主机的转速, 这样导致熔体压力增大, 更有利于 CPVC 树脂表层的皮膜破裂, 将初级粒子释放出来, 在温度和更快剪切



(a) 主机转矩随时间的变化曲线图

(b) 停机料及

(c) CPVC 管材挤出图

图 5 螺杆主机转矩对制品性能影响

的共同作用下，初级粒子破碎，裸露出更多的一次粒子，晶体熔化边界模糊或消失，再结晶形成 CPVC 大分子链缠结或穿过初级粒子连接边界形成一体的三维网络结构，该三维网络的形成过程称为塑化过程。适当增加喂料和主机的转速更有利于物料的塑化，产品的维卡软化温度由 95.9 °C 增加至 96.8 °C，落锤冲击

试验中管材由开始的破裂到后续的无裂缝，表明增加喂料和主机的转速后，物料的热稳定性和抗冲击性能均得到极大的改善。但是，喂料和主机的转速也不能过大，过大将使得熔体压力过高，物料在螺杆内停留时间过长，流动减慢，有可能发生分解，进而影响制品的力学性能和外观。

表 2 喂料及主机的转速、转矩对熔体压力和产品性能的影响

序号		转速 / (r·min ⁻¹)	转矩 / (N·m)	熔体压力 / MPa	产品性能 (维卡软化温度、落锤冲击试验)
1	喂料	16	17.5	21.4	95.9 °C；冲击一次后管材破裂
	主机	14	41.9		
2	喂料	17	18.0	22.6	96.8 °C；冲击一次后管材未破裂，无裂缝
	主机	15	47.0		
3	喂料	19	18.7	25.6	95.3 °C；冲击一次后管材未破裂，但有裂缝
	主机	15	52.0		

2.2.3 加工工艺温度对制品性能的影响

对于温度变化敏感的 CPVC 物料，若螺杆温度设置过高，会导致 CPVC 物料在螺杆内发生分解，释放出 HCl 气体，一些相对低分子量的助剂也会因高温而分解，挤出的管材表面出现如图 6(a) 所示的气泡。当螺杆温度设置较低时，挤出管材的表面灰暗无光泽，有云纹等缺陷，如图 6(b) 所示，制品发脆，一摔即破，这是由于螺杆温度太低，物料达不到熔融状态，料较为粗散，流动性较差，导致螺杆对物料的剪切力减小，物料难以塑化。因此要想获得性能较好的产品，需严格控制好料筒及模具各段温度。

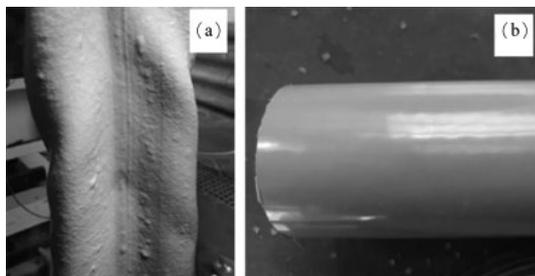


图 6 螺杆温度设置过高及过低对管材表面的影响

一般原则是螺杆供料段的温度设定高一些，通常为 210~215 °C。这是因为物料刚加入挤出机时温度较低，需要快速补充热量，而此时物料之间尚无摩擦热，只能靠外加热源。螺杆压缩段的温度设定居中，一般为 200~210 °C，此时物料之间开始摩擦生热，螺杆剪切也产生热量，对外部热量的需求减少。螺杆计量段温度设定偏低，一般为 165~175 °C，此时物料处于黏流态，物料之间、物料与料筒、螺杆间产生大量的摩擦热，此时物料的温度往往会高于设定温度，因而温度自控系统经常处于关闭状态，有时还要开风扇进行风冷，甚至进行水冷。机头的设定温度基本上与螺杆计量段的温度保持一致，而成型口模的设定温度最好比机头高一些，以保证管坯表面光滑平整。

2.2.4 牵引速度对制品性能的影响

在挤出管材过程中，可通过调节牵引速度的大小实现管材的管径和壁厚均匀性控制。管材的牵引装置由滚轮式和履带式牵引两部分组成。滚轮式牵引位于真空冷却定径水箱内，主要用于水箱内逐步冷却的管坯的向前移动。履带式牵引位于真空冷却定径水箱之

后，一般由多条单独可调的履带沿管材周向均匀分布，以产生不同的牵引力来适应不同直径管材的需要。当料筒喂料转速和主机的转速一定时，可以通过调整真空冷却定径水箱控制面板上的牵引速度，实现对管材的壁厚调控。例如当料筒喂料转速为 18.0 r/min，主机转速为 15.0 r/min 时，壁厚与牵引速度如图 7(c) 所示，可以看出随着牵引速度的增加，管材的壁厚逐渐降低。根据《DL/T802.1-2007 电力电缆用导管技术条件的要求 第 1 部分总则》要求：当公称壁厚 < 6

mm，公称壁厚允许偏差在 0~+0.6 mm 之间。当牵引速度为 1.42 m/min 时，壁厚为 2.98 mm，公称壁厚为 3 mm，公称壁厚允许偏差为 -0.02 mm，不在偏差允许范围内，不能满足标准要求，表明当牵引过大时，管材沿取向方向的拉伸强度过大，管材的壁厚因牵引速度过大，不能满足要求。因此，当料筒喂料转速为 18.0 r/min，主机转速为 15.0 r/min，公称壁厚为 3 mm 时，最佳的牵引速度为 1.38 m/min。

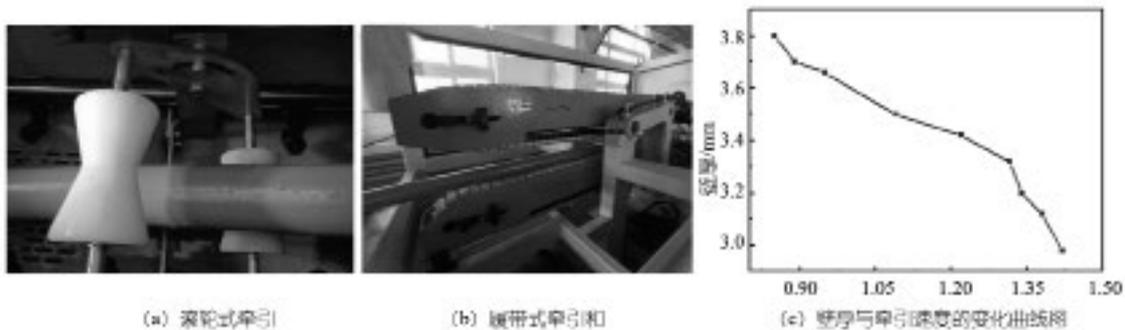


图 7 壁厚与牵引速度

2.2.5 冷却水温对制品性能的影响

冷却水的作用是对管材的大分子链及时冷却和塑造，以达到后期使用的目的。缓慢冷却使分子链延伸足够的时间以促进成形。而快速冷却，则水温和挤出管坯之间的温差太大，不利于产品的低温性能的改善。从聚合物物理学的解释来看，CPVC 大分子链在温度和外力的作用下经历卷曲和拉伸。当没有温度和外力时，大分子链不会在自由状态下及时恢复并且处于玻璃态之外。链的无序排列导致宏观产品的低温冲击性能降低。另外，在 CPVC 管材从挤出机口模挤出后，存在应力松弛过程。合适的冷却水温度有利于该过程发生。当冷却水温度过低时，管材中的应力不会消失，导致产品性能下降。因此，管材轮廓冷却是缓慢冷却的，这样可以防止产品的弯曲和收缩，也可防止产品的冲击强度由于内应力而降低。当冷却水温为 20℃ 时，管材进行落锤冲击试验冲击一次后，管材发生破裂【如图 8(b) 所示】，而当冷却水温度为 31℃ 时，在相同落锤冲击条件下，管材表面完好无损。因此一般要求冷却水温保持在 30℃，而且逐步冷却为好，否则易造成材料表面结晶加快内应力释放缓慢后期力学性能不稳定。实验过程中通过控制冷却水进水量来调节水温。



图 8 冷却水温对管材落锤冲击性能的影响

2.2.6 料筒真空度及定径真空压力对制品性能的影响

挤出机的料筒需保持必要的真空度，如若真空度不够，物料中的挥发物和水分除不去，会导致管材表面缺乏光泽，如图 9 所示，对管材内在质量也有影响。另外物料塑化不足，在真空部位的物料未达到半凝胶化，物料仍保持粉料，则粉料会堵塞真空装置，应多加注意。



图 9 挤出机料筒真空度对管材外壁的影响

挤出生产定型箱的真空压力大小影响管材几何尺寸。真空压力偏大,会造成管材外径超标,影响管材施工安装质量,甚至会造成插口插不进承口。如果定型箱真空压力偏低就会造成外径偏小,管材椭圆,也

会造成管道黏接质量不好甚至无法黏接,影响施工质量。对于外径为 63 mm CPVC 电力套管,一般需保持真空定径水箱的真空压力在 -30 kPa 左右,管材的外径才可满足要求。



图 10 真空定径水箱压力对管材外壁的影响

3 结语

埋地式高压电力电缆用 CPVC 套管质量在其加工过程中受到各种生产因素的制约,在生产加工过程中必须要做好相应的准备检查工作,确保生产出质量合格的管材产品。

参考文献:

- [1] 汪晓鹏, 连钦, 贺建梅, 等. 无机粉体材料改性 CPVC 高压电力电缆护套管的研究 [J]. 聚氯乙烯, 2009,37(7):14-16.
- [2] 连锦杰, 王宁. 探究影响 CPVC 电缆保护管纵向回缩率的影响因素 [J]. 塑料工业, 2021,49,(S1):136-138.
- [3] 李飞. 氯化聚氯乙烯生产工艺与市场分析 [J]. 上海化工, 2015,40(2):29-31.
- [4] 高卫杰, 王鹏程, 武海涛, 等. 氯化聚氯乙烯后处理工艺优化 [J]. 山西化工, 2018,2(38):67-70.

Optimization research on processing technology of chlorinated polyvinyl chloride sleeve for buried high-voltage cables

Yao Wenqin¹, Zhang Wenxue^{2*}, Zhang Hao¹, Liu Yuanrong², Qu Zhicai¹, Zhang Binshan¹, Jing Yuntian¹

(1. Jinchuan Group Chemical New Materials Co. LTD., Jinchang 737100, Gansu, China;
2. Jinchuan Group Chemical Co. LTD., Jinchang 737100, Gansu, China)

Abstract: This article studies the effects of processing conditions, including the mixing sequence in the mixing process, the screw host torque, feeding speed, processing temperature, traction speed, cooling water temperature, barrel vacuum degree, and sizing vacuum pressure in the extrusion process, on the performance of chlorinated polyvinyl chloride sleeves for buried high-voltage power cables. This article aims to improve the quality of products by starting from the production process.

Key words: chlorinated polyvinyl chloride; process conditions; degree of plasticization; product performance

(R-03)

