### 紫外光交联聚乙烯技术在电线电缆制造中的应用（二）

赵以正 审核：瞿保钧

**四、紫外光交联聚乙烯技术在电线电缆制造产业化推广应用历程**

这一节通过分述紫外光交联聚乙烯电缆料产业化、紫外光辐照设备和紫外光交联聚烯烃电线电缆生产线特点及工艺实例三部份来介绍该技术的发展和应用历程。

**1、紫外光交联聚乙烯电缆料的产业化**

中国科技大学瞿保鈞教授等人把紫外光交联聚乙烯绝缘电缆料生产的专利技术于2005年6月转让给黑龙江沃尔德电缆有限公司（之后从沃尔德电缆公司独立出来成立了黑龙江省润特科技有限公司专营光交联电缆料）。尽管铁道部焦作铁路电缆工厂在国内是最早与中国科技大学进行合作，共同改进和研发了紫外光交联电缆辐照设备及工艺流程，将紫外光交联聚乙烯电缆料科研成果转为生产力的厂家，但该厂自制的紫外光交联电缆料不对外供货，只供给本厂用于生产光交联电缆新产品。黑龙江沃尔德电缆公司和之后的润特科技有限公司是当时我国第一家将生产的紫外光交联聚乙烯电缆料销往全国的唯一厂家。当年全靠该公司一己之力来开拓市场，向全国推广应用紫外光交联电缆一整套新技术，包括电缆料、辐照设备和相应的工艺流程，同时还包括推广当时可应用光交联技术的电线电缆产品。经过几年艰辛努力打开了市场，之后才被业内逐步认知，并认可该项技术的独创性和应用潜力。

中国电器工业协会电线电缆分会在2016年9月公布的中国电线电缆行业“十三五”发展指导意见中，对紫外光交联聚乙烯电缆料有着高度评价。这表明黑龙江沃尔德电缆有限公司在2005年获得了中国科技大学瞿保鈞教授的科技成果“紫外光交联电缆料”的技术转让后，开始初步形成了生产力。该报告书对“十二五（2011～2015）”期间紫外光交联聚乙烯电缆料的销售情况认为：“紫外光交联料成为行业技术发展瞩目的亮点之一。黑龙江省润特科技有限公司的紫外光交联XLPE电缆料，在“十二五”期间推出90℃、125℃、135℃耐温等级系列产品，累计总销售量达3.6万吨，用户逾三百多家，成为国内电缆料行业技术发展瞩目的亮点之一”。笔者在写本文时，阅读了一些资料并且也追忆了产业化历程，并与中国科学技术大学瞿保鈞教授、黑龙江省润特科技有限公司鲍文波总经理和哈尔滨理工大学赵洪教授核实，三位也还原了这项科研成果转化为生产力的实际过程。

从中国电线电缆行业“十三五”发展指导意见一书中可见，形成可统计的规模产量起源于2014年,统计产量共计1.46万吨。而2011年可统计数字为0[43]。该书备注为全国12家电缆料厂的统计数值。然而在当年只有黑龙江省润特科技有限公司独家生产，一家独大，累计总销售量达3.6万吨，(请注意该数据表明该公司在接受中科大科研成果转让后,也消化了几年，才逐渐形成了一定的生产能力)。

近年来已有数十家企业在生产紫外光交联聚乙烯电缆料。据估计全国约有400台套紫外光交联聚烯烃电线电缆生产线在运行。按每台套Φ90挤出机生产线每天耗料1.5吨-2吨，每年按300天计，生产利用率为1/3，则保守预估每年将耗料约6万吨。这将远远超过“十三五”对2020年的预估耗料2.5万吨。

黑龙江省润特科技有限公司鲍文波总经理和哈尔滨理工大学赵洪教授根据市场需求预测，2020年紫外光交联料耗用量大约在8-10万吨之间。

紫外光交联电缆料是我国高等院校和生产企业产学研结合，把科研成果转化为生产力的成果范例。而后，紫外光交联聚乙烯电缆料生产厂已从一家发展成二家，再后又发展成近几年的数十家。

目前该技术已成功地部分替代硅烷交联料和高能辐照交联料；也被成功应用在耐压1kV及以下等级电力电缆，产品截面最大可达400mm2。在10mm2以下的小截面电线上，不仅可作为常规绝缘料使用，同时也可作为低烟无卤阻燃电缆绝缘料使用。在电力电缆分色上要用色带。若用色母料，则推荐选用专业色母料厂的产品，用量应尽可能少，以避免对紫外光照的干扰。在小截面电线上，要注意颜料对紫外光的干扰以免影响光交联电缆的生产速度，应谨慎使用。紫外光交联法不适用于黑色架空线缆。这也是紫外光交联法应用上的局限性之一。

**2、紫外光辐照设备**

紫外光交联使用的光源经历了低功率高压汞灯、大功率中压汞灯、无极灯和LED灯几个阶段。

**低功率高压汞灯**

最早在实验室研究使用的高压汞灯是低功率，其光强度也小，从而引发光交联反应效率不高。之后也从未有人打算用于紫外光交联电缆设备中。

**大功率中压汞灯**

1987年Rånby·B、瞿保钧、陈用烈等人在采用强化交联光引发体系中，不仅是在配方体系中加入交联剂，他们还采用菲利浦中压汞灯，光强较高，功率也比较大。中压汞灯发出的光谱波长，既有近紫外光谱（200～420μm）也有些红外可见光谱的波长。他们发现被照材料内光引发剂吸收紫外光中某一段波长光谱最敏感有效。而发出的红外波长光谱对材料仅起到加热作用，使材料受热软化，材料受热软化易使紫外光深层穿透是有利于紫外光交联聚乙烯的，但温度过高在工业化生产线上就很不利了。这种热量也是需要控制的，因为聚乙烯材料在熔融状态下继续受热易导致材料中的光引发剂和交联剂挥发，甚至会导致聚乙烯绝缘材料融化脱落。中压汞灯中除对材料提供敏感易被吸收引发交联的紫外光波段外,其它紫外光的波长利用率就不高了。尽管如此，采用大功率中压汞灯作为光源的紫外光交联设备在开创性应用于光交联电缆生产线上无疑是个巨大进步。中压汞灯的优点是价格低廉，主要缺点是使用寿命较短和发热量大造成的一系列问题。

我国第一代紫外光交联电缆辐照设备采用了中压汞灯为光源。图一显示了光源反光罩的设计示意图；图二显示了紫外光辐照箱结构单元的示意图及侧视图。该设备由箱体、上盖、装有光源及反光罩的笼架、抽风装置等组成。



图一

紫外光交联电缆辐照箱单元的两个端面上分别开有供待交联电缆的进入孔1和电缆交联后的出口孔2；紫外光源3由一组或多组沿待交联电缆中心轴线4方向依次排列的紫外中压汞灯及其反光罩在围绕中心轴线360°空间圆周上均匀分布所组成；每个紫外灯管两侧分别装有两个反光罩5、6，其横截面组成椭圆形（如图一所示），靠近灯管一侧反光罩5的横截面是半个或大半个椭圆形，相应另一侧反光罩6的横截面是该椭圆的一小部分，其间留有方便通风和操作用的缝隙；紫外灯管安装在该椭圆的一个焦点处，而待交联电缆中心轴线4正好落在另一个焦点上；反光罩5的顶部开有孔或槽7；光源和反光罩固定在支架12上；紫外光照箱上的冷却空气进口8和/或出口9处分别装有至少一个用于控制冷却空气流量的活动挡板10；在箱体内靠近光照区的冷却空气通道上装有用于分配空气流量分布的开孔隔板11。出风口与活动抽风管连接，由抽风机将箱内热空气和臭氧及挥发物连续排出。

以上设计的要点是提高紫外光能的最大利用率和光照的均匀性，同时控制光交联温度在合适范围和保障紫外光源的最佳工作条件。 以中压汞灯为光源的紫外光交联电缆辐照设备最初是由中国科技大学瞿保钧等光交联技术研究团队研制开发，并于1991年应用于常熟电缆厂试生产线上，并成功研制了电视机高压电缆的绝缘线芯。1994年中国科学技术大学瞿保钧研究团队又与铁道部焦作铁路电缆工厂联合研制，对原光交联设备进行了重新设计和改进，并在国内外首次成功用于生产1kV及以下电力电缆和控制电缆的工业生产流水线上，同时还获得了中国发明专利。2008年中国科学技术大学瞿保钧等光交联技术研究团队又与合肥大成通信设备有限公司合作，对以中压汞灯为光源的第一代紫外光交联电缆辐照设备作了进一步改进，大大提升了紫外光的反射聚焦系统。这种改进型的第一代光交联设备曾提供给黑龙江沃尔德电缆有限公司推广应用。



图二

**高光强微波激发无极灯**

第二代我国紫外光交联辐照设备采用高光强微波激发的无极灯模块单元为紫外光源。



图三 紫外光无极灯模块的结构

紫外光辐照灯箱分三部分组成 ： 紫外光发生器 控制柜，冷却风机，紫外灯光源。每只灯功率可调节为 6 kW 全功率和4kW半功率二个挡次，根据产品型号规格，交联度的要求，分别设定不同的档位操作。

光源采用无极灯模块单元加主反光罩和副反光罩结构。无极灯模块单元内装有一只微波激发的无极紫外灯管和横截面为椭圆形的反光罩。无极灯模块单元的对面也安装反光罩，其横截面和无极灯模块单元内的反光罩的横截面共同组成一个椭圆形 。灯管安装在椭圆柱两焦点中靠近反射罩的焦点位置上，电缆处在另一焦点位置上。反射罩将灯管辐射的紫外光聚集在电缆的绝缘上，以达到紫外光能的最大利用效率。图三为紫外光无极灯模块的结构。

采用六个无极灯模块单元的排列顺序 ：每只灯对面增加副反光罩组成一组，六组无极灯单元在周向距离的720°，每组灯之间按距离的120°平均分配，确保每一方向紫外光照射电缆的时间相同，灯箱总长3米左右。

第二代紫外光交联电缆辐照设备采用无极灯来代替中压汞灯，椭圆形反光罩、无极灯管整合在模块单元中。无极灯模块单元在距电缆中心轴线一定距离的360°空间圆周上均匀排布。由于无极灯的紫外光强度通常是中压汞灯紫外光强的3－4倍，这极大地提高了光引发剂引发聚烯烃交联的效率和电缆绝缘材料均匀交联的深度。以无极灯为光源的光交联设备适用于生产10kV中压电缆以及无卤阻燃电缆等特种电缆，也可以用更高的生产速度生产各种低压电线电缆。

中国科学技术大学瞿保钧为首的研究团队将第二代紫外光交联电缆辐照设备的制造技术转让给合肥新华电工（神马科技）有限股份公司，国内现存的第二代无极灯紫外光交联辐照设备都是由合肥新华电工公司制造的。第一台第二代紫外光交联电缆辐照设备曾在2007年6月用于中国科技大学和黑龙江沃尔德电缆有限公司的合作项目，采用“2+1”电缆生产工艺，用进口自交联内外屏蔽料生产10KV电力电缆生产流水线上。但进口无极灯价格很高，不利推广。

2009年8月黑龙江沃尔德电缆有限公司董事长贾洪修和总工程师鲍文波（之后成为专营光交联电缆料而独立出来的黑龙江省润特科技有限公司总经理）在第一代改进型中压汞灯紫外光交联设备的基础上开始和哈尔滨理工大学赵洪教授的团队合作，发展和进一步改进第一代中压汞灯紫外光交联电缆设备。

哈尔滨理工大学和哈普电气技术有限责任公司团队深入研究了汞灯特性，利用光学系统仿真设计技术指导设计了光学系统、引入气流冷却系统仿真技术，开发了冷却系统基于多输入参量测控技术完成了系统构建，对原中压汞灯辐紫外光交联辐照设备进行了深度改进设计和制造。2010年，中压汞灯新设备一次试车使生产效率提高1倍以上，转年又将设备效率提高70%。新开发的新型中压汞灯辐照设备获得多项专利成果，哈尔滨理工大学、哈普公司和黑龙江省润特科技公司共享了由此装置获得的2012年黑龙江省科技进步二等奖。

由于技术的进步，紫外光交联聚乙烯电缆制造技术推广又掀起一波热潮。但是，尽管如此，生产效率仍然不尽如人意，例如生产240mm2 铜线芯低压电缆的生产速度只能从5m/min 提升到20mm/min, 而设备的功耗达到了70kW，每500小时要更换一遍中压汞灯灯管，很不方便。另外，反光罩极易被污染，操作者若不能保证及时清理，就会丧失光照交联功能。管理跟不上，该技术的能源利用效率也会达不到设计水平。在推广应用过程中确实存在时起时落的应用热潮。只有在西北电价相对便宜的地区和其他地区之前对硅烷交联掌握不好的部分企业坚持应用此技术。

从2009年开始直到2018年这期间，赵洪教授和他的团队十年磨一剑，先后对国产中压汞灯进行了升级改造，提高了使用效率。之后于2017年开发了LED新光源。2018年批量生产了以LED为紫外光源的光交联电缆设备。这才使得紫外光辐照设备上的光源瓶颈得到较为满意的解决，使产业化推广应用进一步扩大并得到行业普遍认同。

我国第三代紫外光交联辐照设备采用发光二极管LED作为紫外光源是在2017年由赵洪教授和他的团队开发成功。在鲍文波总经理团队的合作配合下，2018年开始由哈普电气技术有限责任公司批量生产，光源寿命在万小时级别，深受用户好评。这是由LED基板、集成电路和LED灯珠构成一个LED紫外发光单元，若干个发光单元沿LED基板长度方向集成一列LED发光单元，1-2列发光单元与相应的发光曲面或准直透镜和冷却座组成了一个LED发光组件，多个LED发光组件在距电缆中心轴线一定距离的360°空间圆周上均匀排布。LED灯珠发出的紫外光经准直透镜折射或特殊形状的反光曲面反射后实现准直或聚焦，在辐照箱轴线处交汇形成光照区。LED的光谱范围窄，选择合适的LED可以使LED灯发出的紫外光中用于光交联的那部分光占用的功率达到输入功率的30%以上，同时由于LED光源没有红外线发出所引起的环境温度升高问题，因而与第一代紫外光辐照设备相比，以LED为光源的辐照设备具有紫外光强高、能耗低、寿命长的优点，工作时还减少了臭氧的排放，降低了对环境的污染。

紫外光辐照箱安放在挤出机和冷却水槽之间，从挤出机熔融挤出包覆在导体线芯上的光交联电缆绝缘层立即进入紫外光辐照箱内进行熔融态在线连续的紫外光辐照，使聚烯烃电线电缆绝缘层瞬间可完成交联，达到所要求的交联度。采用上述均匀配置和特殊设计的椭圆面反射聚焦的紫外光源，由控制系统来确保光照箱内的紫外光强、辐照温度、光照时间等条件参数的最佳化；在高效的光引发体系配合下，被光照的熔融态聚烯烃料吸收紫外光能而快速引发交联反应，从而使每台光交联电缆设备能达到每分钟数米到一百多米的连续生产速度。

紫外光交联电缆辐照设备的制造随着新的光源的不断发现有一个不断完善改进的过程。其最终目的是使紫外光交联电缆材料配方所需要的敏感紫外光波长部分的吸收达到最佳化。光交联电缆的辐照箱的设计应使光源发出的紫外光能聚焦在待交联电缆中心轴线圆周区域上且达到均匀分布，光照强度尽可能大，使线缆在挤出速度下，特别是小截面高速150m/min【也即在1米长的光照区域内，0.4秒完成交联】挤出条件下完成交联。从电线电缆生产厂使用角度出发，当然希望挤出速度再提升，所以光源的研究仍有提升需求。目前我国大部分地区都在使用以LED为紫外光源的交联电缆辐照设备，据了解，上海起帆、湖北航天、广东电缆厂以及远东电缆等大型企业都在用LED光源的紫外光交联电缆设备，生产都很正常；但在电价较低的沧州会友、辽宁中兴、烟台鑫泰、吉林通利等企业还在继续使用中压汞灯，生产也很正常。

**3、紫外光交联聚乙烯电线电缆生产线特点及工艺实例**

紫外光交联聚烯烃电线电缆生产线的特点：

1）交联反应速度快：在挤出机挤出待交联电缆绝缘层后进入紫外光辐照箱进行光交联，根据线径不同，一般在零点几秒-几秒内即可完成光化学交联反应，是传统的几种交联料中反应最快的一种；

2）投资少：可利用普通生产线上现有的生产设备，仅需加一套紫外光辐照设备；

3）产品加工周期短、生产效率高：从挤出到辐照，再到冷却成型，收线缆，一步连续完成，比其它三种交联方法交货时间短。这是因为该生产工艺没有化学交联法的排气工序；高能辐照法的去剩余电荷的工序；硅烷交联法的水煮（或蒸汽桑拿）工序那样费时的过程；

4）操作方维护方便：挤出机挤出工作时间长，和高能辐照法相似，配方材料在挤出过程中没有化学反应发生；化学交联料含DCP，挤出温度都设在120°C以下，因为超过此温度就会发生交联反应。事实上在低于此温度也在发生化学交联反应，只不过反应缓慢，特别在挤出螺杆的压缩段和计量段间，不到一周就会有一层发黄的交联产物产生，定期清理螺杆已是电缆料生产厂和电缆厂的惯例了。否则会影响产品质量。这种情况也发生在硅烷交联法，特别是一步法中。因为一步法生产中，混和，塑化，接枝化学反应都在电缆厂的挤出机内完成。这种接枝物就会粘附在螺杆的压缩段和计量段间，过几天就必需清理一次。这可是费时费力的操作，特别在夏季，清理螺杆周期要长许多。在硅烷交联法中，定期进行清理螺杆是规定的工艺规程制度。但紫外光交联料的挤出工序则没有这种严重的预交联现象发生；

5）光交联法对环境无污染，安全防护要求不苛刻：该法不会像硅烷交联法要排出含甲醇的有害污水，也不像高能辐照法那样需要严格的安全防护，虽然光交联法有微量低分子挥发物，但不会造成环境污染问题。硅烷交联法使用的硅烷是一种易燃易爆的危险品，腐蚀性很强。在许多电缆料生产厂都不同程度发生过火情，爆炸险情。化学交联使用的DCP也有类似问题。在工厂设计中，在硅烷区，在DCP区，所有的电气装置都要求防爆设计，并加强排风。设有加热的水温机都要远离该区，以防接触器开关工作时出现电火花引起爆炸；

6）成本及能耗低：相比温水交联以及委托电子束辐照加工，紫外光辐照交联电缆料价格低，生产过程中减少了很多复杂工艺，如半成品线缆的运输成本、相应的操作人员费用等。LED 紫外光辐照聚烯烃交联设备装机功率相当于原有中压汞灯紫外辐照设备的1/4，电子加速器的1/30，而水或者水蒸气需要长期加热，并且加热水的能耗非常高。

表1 紫外光交联方式和温水交联方式的对比表【湖北航天电缆有限公司于灏程师提供】

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 材料种类 | 线芯规格 mm2 | 120挤出机电机功率 | | 蒸汽发生器功率 | | 紫外光辐照设备总功率 | | 实际功率 合计 |
|
| 额定功率 | 实际功率 | 额定功率 | 实际功率（1） | 额定总功率 | 实际总功率 |
| 紫外光交联聚乙烯绝缘料 | 150 | 132kW | 57.456kW | - | - | 22kW | 10kW | 67.456kW |
| 硅烷交联聚乙烯绝缘料 | 150 | 132kW | 68.4kW | 48kW\*2台 | 25.46kW\*2台 | - | - | 119.32kW |
| 注：（1）表示的实际功率为蒸汽交联房（升温时功率\*升温时间+恒温时功率\*恒温时时间）/（升温时间+恒温时间） | | | | | | | | |
|

虽然紫外光交联聚烯烃电线电缆生产线有以上种种的优点，但它也有其局限性。

1）不能生产黑色的架空电缆。这是众所周知的原因：炭黑能吸收紫外光能量並迅速转化成热能，不会发生交联；

2）目前还不适合在三层共挤工艺生产线上生产高压电缆。虽然在2+1生产线上生产过10kV电力电缆，但毕竟三层共挤生产线更先进，高压电缆对界面要求更高；

3）目前电力电缆多用色带分色，即使用色母料也要求向专业生产厂购买，用量也尽可能少加，以免干扰紫外光照交联，这一点在小线生产时也要注意。技术人员对着色一般都持谨慎态度。

综上所述，紫外光交联聚烯烃电线电缆生产技术在生产1kV及以下的电力电缆和控制电缆上还是有较大的竟争优势。在小线生产方面部分替代硅烷交联料和高能辐照交联料也在实施中。正如中国科学院和铁道部组建的、对紫外光交联电缆的科学技术鉴定委员会专家意见所言：“紫外光辐照交联聚乙烯绝缘电力电缆生产技术是一项我国自主开发，具有自主知识产权的创新成果，为交联电缆生产技术开拓了一个新途径，处于国际领先水平。”目前在全国约有400余条生产线在运行，产生了很大的经济效益和社会效益。

**工艺实例表【表2-4均由航天电缆有限公司于灏工程师提供】**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 表2 生产过程记录表 | | | | | | | |
| 设备型号 | 生产范围 mm2 | 挤出温度范围 ℃ | 举例产品规格 mm2 | 最高线速度 m/min | 紫外光设备 能量输出设定值  % | 热延伸数据 | |
| 负荷下 最大伸长率% | 冷却后 最大永久伸长率% |
| 90挤出机 | 10~240 | 190~240 | 10 | 100 | 100 | 55 | 0 |
| 120挤出机 | 35~400 | 185~230 | 240 | 45 | 100 | 60 | 0 |
| |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | 表3 紫外光交联聚乙烯绝缘生产能量设定值 | | | | | | | | | | | 序号 | 规格 | 绝缘 标称厚度 | 分色 | 最小 能量值 | 最小 线速度 | 最大 能量值 | 最大 线速度 | 主机 电流 | 螺杆  转速 | | mm2 | mm | / | % | m/min | % | m/min | A | r/min | | 1 | 35 | 0.9 | 色带 | 30 | ≥25 | 80 | ≤80 | 80~110 | 10~28 | | 着色 | 70 | ≥20 | 100 | ≤60 | 80~110 | 10~28 | | 2 | 50 | 1 | 色带 | 35 | ≥25 | 85 | ≤80 | 80~110 | 10~30 | | 着色 | 70 | ≥20 | 100 | ≤60 | 80~110 | 10~30 | | 3 | 70 | 1.1 | 色带 | 45 | ≥20 | 85 | ≤70 | 85~120 | 12~32 | | 着色 | 70 | ≥20 | 100 | ≤60 | 85~120 | 12~30 | | 4 | 95 | 1.1 | 色带 | 50 | ≥20 | 90 | ≤70 | 85~140 | 12~38 | | 着色 | 70 | ≥18 | 100 | ≤50 | 85~140 | 12~35 | | 5 | 120 | 1.2 | 色带 | 60 | ≥18 | 95 | ≤70 | 95~150 | 14~45 | | 着色 | 75 | ≥18 | 100 | ≤50 | 95~150 | 14~40 | | 6 | 150 | 1.4 | 色带 | 70 | ≥15 | 100 | ≤60 | 95~170 | 14~50 | | 着色 | 80 | ≥10 | 100 | ≤45 | 95~150 | 14~45 | | 7 | 185 | 1.6 | 色带 | 70 | ≥10 | 100 | ≤50 | 100~190 | 20~55 | | 着色 | 80 | ≥10 | 100 | ≤40 | 100~160 | 20~50 | | 8 | 240 | 1.7 | 色带 | 80 | ≥5 | 100 | ≤45 | 100~200 | 20~60 | | 着色 | 85 | ≥5 | 100 | ≤35 | 100~160 | 20~50 | | 9 | 300 | 1.8 | 色带 | 85 | ≥5 | 100 | ≤45 | 100~190 | 20~50 | | 着色 | 90 | ≥5 | 100 | ≤30 | 100~160 | 20~45 |   注: 1）上述生产产品为3kV及以下电力电缆绝缘挤出；  2）绝缘采用紫外光交联聚乙烯；  3）上表生产范围内的规格型号全部进行生产验证  4）挤出速度及紫外光能量设定的依据是紫外光聚乙烯绝缘的热延伸指标，根据指标负荷下最大伸长率控制范围为50~80%，冷却后最大永久伸长率0~5%。  5）上述120挤出机生产240mm2线芯，绝缘进行环形热延伸检测（体现环形交联均匀度），负荷下最大伸长率波动范围为5%，冷却后最大永久伸长率波动为1~2%。 | | | | | | | |

采用色母分色时，添加比例为300:1~500：1；实际分色情况如下：黄色、蓝色色母添加比例（350:1），红色、绿色色母添加比例（450：1） 。

采用色母混色挤出在经过紫外光交联前后会发生颜色变化，颜色会变浅。

热延伸控制范围：负荷下最大伸长率50~80%，冷却后最大永久伸长率0~5%。

从上述表格可以看出：对挤出设定了最小线速度和最大线速度，原因是紫外光交联设备的功率设定有范围，区间是30%~100%，以30%为基准速度太慢时也会造成热延伸负荷下最大伸长率＜50%，甚至达到15%这样的数据，冷却后最大永久伸长率甚至会变成负数。这样的数据虽然符合该项国标的要求，但是会影响到其它性能指标，造成其它指标的不合格。

表4 紫外光能量与速度不匹配时的现象

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 生产规格 | 绝缘厚度 | 起车速度 | 能量值 | 热延伸 | 最高线速 | 螺杆转速 | 能量值 | 热延伸 |
| mm2 | mm | m/min | % | （负荷下伸长率%） | m/min | r/min | % | （负荷下伸长率%） |
| 240 | 1.7 | 1.5 | 100 | 25 | 33~35 | 60 | 100 | 50 |
| 240 | 1.7 | 1.5 | 90 | 25 | 33 | 59.7 | 90 | 55 |
| 120 | 1.2 | 22 | 60 | 30 | 56 | 50 | 90 | 40 |
| 120 | 1.2 | 22 | 50 | 35 | 56 | 50 | 90 | 40 |
| 35 | 0.9 | 10 | 30 | 25 | 45 | 50 | 60 | 30 |

表5 120挤出机温度设定（温度公差±10℃ ）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 紫外光交联 | 1区 | 2区 | 3区 | 4区 | 5区 |
| 聚乙烯绝缘料 | 185 | 195 | 210 | 215 | 225 |
|  | 6区 | 7区 | 8区 | 9区 | 10区 |
|  | 230 | 240 | 235 | 230 | 230 |

上述挤出温度要比材料厂家以及紫外光交联设备厂家给出的温度要高20℃，采用这样高的温度是为了更好地提高挤出生产速度，紫外光交联电缆材料在塑化好的情况下挤出时是清澈透明的，当挤出速度提高时，挤出表面就会发雾、产生塑化不良的颗粒等，所以根据实际情况可适当提升挤出温度。

紫外光交联电缆生产过程中关键控制点：

1）校中：紫外光交联过程是电缆通过环形分布的LED灯管从而发生交联，虽然LED型的紫外光交联设备是冷光源，但通过灯管的聚焦会使聚焦位置的温度达到350℃左右，而有效的光照直径根据不同设备型号是不同的。当线芯通过并非在中心时会影响交联效果。

2）排烟：挤出过程中会产生微量低分子挥发物，这时需保证烟道畅通且抽吸效果有效，防止挥发物附着在灯管上，影响光源辐射出来的紫外光强度。同时根据生产情况应间隔0.5小时至2小时对灯管进行擦拭清理。

**五、紫外光交联聚乙烯电线电缆新技术及其应用前景展望**

随着聚乙烯光交联基础理论和应用研究的深入, 聚乙烯本体光交联技术首先在薄壁电线电缆上获得了重要突破, 创建了国内外第一条光交联聚乙烯电线电缆试生产线[19,20] , 在国际上首次使用紫外光交联法研制成功生产了20～50 kV 电视高压线聚乙烯绝缘线芯。以后利用光交联法又研制成功了电力电缆和控制电缆新产品[40,41]。

交联聚乙烯正成为日益重要而又广泛应用的聚合物材料。在电线电缆绝缘材料, 特别是在家用电器、通讯器件、汽车用线等领域使用的小线径、薄绝缘层中都有开发应用空间。

在低压电线电缆中的应用迅速增长，聚乙烯光交联技术很适合生产这类低压电线电缆。因此, 聚乙烯光交联技术在电线电缆行业中的应用前景十分广阔。

交联聚乙烯材料还广泛应用于热收缩材料、热水管和泡沫材料等, 同样光交联技术在这些领域中也大有用武之地。

紫外光交联技术作为继化学交联、硅烷交联和高能辐射交联之后发展起来的又一种交联新技术, 对三种传统技术互为补充，起着取长补短的作用。

紫外光交联聚乙烯新技术目前仍处在发展和完善的过程中, 工业应用刚起步, 应用领域需要进一步拓宽, 应用基础研究需要进一步加强, 特别是在研制与聚乙烯有更好相容性和高效的光引发剂、交联剂以及在完善光交联设备、工艺技术等方面还有许多的工作要做。

笔者学习了四篇研究生关于紫外光交联聚烯烃的论文，发现他们做了大量有意义的基础研究，对提高产品质量，很有说服力。愿电线电缆行业能摆脱低价竟争中标的现象，让更多优质优价的产品有进入市场的机会。

由于该技术成果的种种优越性，采用紫外光交联电缆料、紫外光辐照设备及工艺流程和生产制造的紫外光交联聚乙烯绝缘电线电缆产品的优秀性能都被业内普遍认可。近几年来发展势头十分迅猛，除北方地区外，现在广东地区，江浙沪地区都得到很快发展。目前除了生产1kV及以下电力电缆外，还部分替代硅烷交联法和高能辐照交联法生产一些小截面的电线用在电气装备上。

紫外光交联电缆料和紫外光交联聚乙烯电线电缆生产线，虽然已在我国实践了多年，但毕竟还是一件新生事物。更坦率地说:正是当年常熟电缆厂，焦作铁路电缆工厂，黑龙江沃尔德电缆有限公司，黑龙江省润特科技有限公司，哈尔滨理工大学，哈普电气技术有限责任公司通力合作才使这一成果得到广泛的应用。实属不易。

反观曾经走过的路，在电缆业界内已认可该技术用于生产1kV及以下电力电缆或代替硅烷交联料、高能辐照交联料生产小截面电线，包括无卤阻燃聚烯烃绝缘电线。对于新开辟在其它电线电缆产品上的使用，特别在生产10kV及以上电力电缆，一般持谨慎态度。由于前述内外屏蔽料需进口外，紫外光交联法采用2+1挤出工艺方法与现用的三层共挤工艺比较还有不少差距，故推广有困难。在2005年中国科技大学与黑龙江沃尔德电缆有限公司合作，采用2+1工艺建成了10kV紫外光辐照交联聚乙烯电缆生产线并生产出合格的产品一事，通过他们的工作证明了，紫外光交联法在一定条件下是可以生产10kV聚乙烯绝缘电力电缆的，也为紫外光交联法开辟了一项储备技术。

不必讳言，对绝缘材料的介电性能，特别是介质损耗因数和介电常数与化学法的XLPE相比，显然化学法XLPE料性能更佳，因为化学交联料用的LDPE，在其聚合后进入造粒工序时用户厂家都对树脂生产单位提出要求：不添加任何添加剂以求纯净度。而生产XLPE料时添加DCP，在完成交联电缆产品后，分解产物为苯甲酮、a-甲基苯乙烯、水、甲烷等这些产物经过热处理，会逐渐排出电缆绝缘层，生产超高压电缆时还要经过特殊处理，以达到排净的目的。添加的抗氧化剂也是微少量。LDPE本身经过精过滤非常纯净。XLPE电缆绝缘料从上世纪60年代问世以来，虽在北美经过一段大面积的水树化事故后[45]，国外采用抗水树化改进已有半个多世纪的化学交联中压电缆的运行历史。高压、超高压电缆又对电缆料纯净度和电缆结构进行了完善，以保证其安全、可靠、稳定工作运行。

紫外光交联聚乙烯相对于化学法XLPE的添加物要多一些，这样势必带来绝缘材料的纯净度问题，而添加剂往往又是极性物质，无疑会对材料在交流高压条件下的介电性能带来不利影响。

另外，在电线产品中若添加颜料务必谨慎，因为颜色对紫外光交联可能会有干扰。目前市场上紫外光交联料多为第一代产品，为争夺市场，价格战是常见的事，这样导致的结果也是众所周知的。

虽然在小截面电线的生产上，实践已证明紫外光交联料可部分替代硅烷交联料和高能辐照交联料来生产同类产品，但目前2.5m/m2硅烷交联料挤出速度可达300m/min。同样规格2.5m/m2高能辐照交联料挤出速度可达550m/min。而紫外光交联料在小截面电线的生产以规格2.5m/m2电线，现挤出速度虽也可达150m/min，但差距还是有的。

紫外光交联法的明显优势是在线连续挤出-光照交联“一步到位”的工艺流程，如同化学交联法那样。但化学交联的“挤出-交联”速度较慢，还要有排气后工序，它不能完成电缆成型。

而硅烷交联和高能辐照交联法是不连续的间隙式的工艺流程。这对于没有高能辐照条件和温水硅烷交联条件的企业，也许采用紫外光交联法是个投资少见效快的选择。如果比较生产效率的话，投入产出比，生产品种多样化，无疑给紫外光法带来新的挑战，这些挑战包括材料配方的研发改进、辐照光源进一步的改进，还有在快速挤出条件下，线束的防止抖动的设备问题等等。

综上叙述，像任何新生事物的成长都会有一个发展过程一样，我们老一辈的科学家、学者，特别是中国的科学家和学者以及工程技术人员为中国首创的紫外光交联电缆新技术作出了杰出贡献。然而进一步的完善和提升还有待于业内学者和科研人员的努力。

需要强调补充的是必需尽快建立产品标准。目前执行的JB/T10437-2004不包括紫外光交联聚乙烯电缆料，与之相应的是紫外光辐照交联检测试验设备的尽快研发。这样可提升材料研发水平和生产产品质量控制水平。紫外光辐照交联电缆技术是四种交联法中，唯一的由中国科学家和科技人员、工程技术人员产学研结合，把科研成果转化为世界上首创的紫外光辐照交联聚烯烃绝缘电线电缆生产力共同努力的结晶。

**参考文献【见第一部分】**

瞿保钧有关已发表的紫外光交联聚烯烃电缆项目论文或专著目录

**一、 研究论文 (43篇，以发表论文先后次序)**

• QU, BJ; Shi, WF; Rånby, B.Photocrosslinking of LDPE and Its Application for Wires and Cables ,

J Photopolym Sci Technol2, 269 (1989).

• 瞿保钧, 施文芳, Rånby, B.“聚乙烯熔融态光交联的研究”，高分子材料科学与工程,

6, 37(1990).

• 瞿保钧, 施文芳, Rånby, B.“光交联低密度聚乙烯绝缘材料研究 I．光交联特征，反应条件和某些性能”,辐射研究与辐射工艺学报, 8, 129 (1990).

• 瞿保钧, 徐云华, 施文芳, 徐广智,低密度聚乙烯光引发交联机理. I. ND自旋捕捉ESR研究,波谱学杂志, 7,359 (1990).

• QU, BJ;Xu, Y.H; Shi, WF; Rånby, B. Mechanism of Photoinitiated Crosslinking of Low Density Polyethylene. 7. Initial Radicals Reactions with Model Compounds Studied by Spin–Trapping ESR Spectroscopy, Macromolecules25, 5220 (1992).

• QU, BJ;Xu, Y.H; Shi, WF; Rånby, B. Mechanism of Photoinitiated Crosslinking of Low Density Polyethylene. 6. Spin-Trapping ESR Studies on Radical Intermediates, Macromolecules25, 5215 (1992).

• 瞿保钧, 徐云华, 施文芳, 低密度聚乙烯光引发交联机理 II．BNB自旋捕捉ESR研究, 波谱学杂志,10,1 (1993).

• QU, BJ; Rånby, B. Photocrosslinking of Low Density Polyethylene. III. Supermolecular Structure Studied by SALS, J Appli Polym Sci49, 1779 (1993).

• QU, BJ; Rånby, B. Photocrosslinking of Low Density Polyethylene. II. Structure and Morphology, J Appli Polym Sci48, 711 (1993).

• QU, BJ\*; Rånby, B. Photocrosslinking of Low Density Polyethylene. I. Kinetics and Reaction Parameters, J Appli Polym Sci48, 701 (1993).

• QU, BJ\*; Rånby, B. Radiation Crosslinking of Polyethylene With Electron Beam at Different Temperatures,Polym Eng Sci 35, 1161 (1995).

• QU, BJ\*; Shi, WF; Liang, RY; Jin, S Z; Xu, YH; Wang, ZH; Rånby, B. Photocrosslinking of Polyethylene for the Production of Thin Wall Insulated Wire, Polym Eng Sci35, 1005 (1995).

• 瞿保钧\*, 鲁非, 徐云华, 瞿欣, 低密度聚乙烯光引发交联机理. III. 模型化合物 C24H50的13C NMR 研究，波谱学杂志, 12, 299 (1995).

• 瞿保钧\*, 徐云华, 瞿欣,低密度聚乙烯光引发交联机理. IV. 交联点结构的13C NMR 研究,波谱学杂志, 12,581 (1995).

• 瞿保钧\*, 瞿欣, 徐云华,低密度聚乙烯光引发交联结构的13C NMR 研究，科学通报, 40, 1862 (1995).

• 徐云华, 瞿保钧\*, 施文芳, 张裕恒,光敏剂二苯甲酮在聚乙烯及其模型化合物光引发交联过程中的光解产物的荧光研究，化学物理学报,9,119 (1996).

• 徐云华, 瞿保钧\*, 鲁非, 张裕恒,低密度聚乙烯光引发交联机理 V．二苯甲酮光解产物的 NMR 研究, 波谱学杂志, 13,19 (1996).

• 徐云华, 瞿保钧\*, 沈海根, 刘琴, 张裕恒,高秀香,低密度聚乙烯光引发交联机理 VI．LDPE模型化合物交联点的13C NMR 研究,波谱学杂志,13,321 (1996).

• Xu, YH; Qu, BJ\*; Zhang, YH; Rånby, B. Photolysis Products of Benzophenone in the Photo Crosslinking of Polyethylene and its Model Compounds,J Photopolym Sci Techno9, 165 (1996).

• Xu, YH; Qu, BJ\*; Zhang, YH; Rånby, B. 13C NMR Studies on Photoinitiated Crosslinks of LDPE Model Compounds, J Photopolym Sci Technol9, 157 (1996).

• 徐云华, 瞿保钧\*, 张裕恒,光交联聚乙烯相结构的拉曼光谱研究, 化学物理学报,10,140 (1997).

• 瞿保钧\*, 徐云华, 瞿欣,低密度聚乙烯交联点的结构及其形成机理,高等学校化学学报,18,317 (1997).

• QU, BJ\*; Qu, X. Effects of Crystallization Temperature on Crystallinity and Melting Behavior of Photocrosslinked Polyethylene,J Photopolym Sci Technol, 10, 353 (1997).

• QU, BJ\*;Qu, X;Xu, YH;Jacobsson, U; Rånby, B; Russell, KE; Baker, WE.13C NMR Studies of Photoinitiated Cross-Linking of Low Density Polyethylene, Macromolecules, 30, 1408 (1997).

• 徐云华, 施文芳, 李雯, 孙树森, 瞿保钧\*,光交联聚乙烯表面氧化的光电子能谱研究,化学物理学报,11,161 (1998).

• 瞿保钧\*,吴强华,聚乙烯光引发交联及其工业应用研究的新进展,高等学校化学学报,21,1318 (2000).

• Qianghua Wu, Baojun Qu\*, Yunhua Xu, Qiang Wu. Surface Photo-oxidation and photostabilization of photocross-linked polyethylene, Polym Degra Stab68, 97 (2000).

• Qu, BJ\*;Chen, SM; Dai, LM. Simulation Analysis of ESR Spectrum of Polymer Alkyl-C60 Radicals Formed By Photoinitiated Reactions of LDPE, Appl Magn Reson19, 59-67 (2000).

• Baojun Qu\*,Yunhua Xu and Lunhan Ding. ANew Mechanism of Benzophenone Photoreduction in Photoinitiated Cross-Linking of Polyethylene and Its Model Compounds, J Polym Sci: Polym Chem, 38, 999(2000).

• Qu BJ, Recent developments in photoinitiated crosslinking of polyethylene and its industrial applications,Chinese J Polym Sci 19 (2): 189-207 (2001).

• Qu BJ\*, Hawthorn G, Mau AWH, et al.Photochemical generation of polymeric alkyl-C-60 radicals: ESR detection and identification, J Phys Chem B 105 (11): 2129-2134 (2001).

• Wu QH, Qu BJ\*. Photoinitiating characteristics of benzophenone derivatives as new initiators in the photocrosslinking of polyethylene,Polym Eng Sci 41 (7): 1220-1226 (2001).

• Wu Q, Qu BJ\*. Wu QH, Surface photo-oxidation and photostabilization in photoinitiated crosslinking of polyethylene,Chem J Chinese U 22 (9): 1610-1613 (2001).

• Wu QH, Qu BJ\*. Synthesis of Di (4-hydroxyl benzophenone) sebacate and its usage as initiator in the photocrosslinking of polyethylene,J Appl Polym Sci 85 (7): 1581-1586 (2002).

• Qu BJ. Reaction mechanism of benzophenone-photoinitiated crosslinking of olyethylene,

Chinese J Polym Sci 20 (4): 291-307 (2002).

• Wang Weizhi, Wu Qianghua Qu Baojun\*. Mechanical properties and structural characteristics of dynamically photocrosslinked PP/EPDM blends,Polym Eng Sci 43 (11), 1798-1805 (2003).

• Yao Dahong, Zhang Ming, Qu Baojun, Wu Qianghua.Photinitiated crosslinking of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymers and Characterization of Related Properties,Polymer Engineering and Science,Polym Eng Sci, 47(11), 1761-1767 (2007).

• Longxiang Tang, Manqing Yan, Chunhua Liu, Pinghua Wang, Baojun Qu\*,Effect of UV-photocrosslinking on the nonisothermal crystallization kinetics of polyethylene，J Appl Polym Sci，108(1), 174-180 (2008).

• Zhang Guobing, Wu Qianghua, Qu Baojun\*. Effects of Organic Colorants on Photo-Initiated Crosslinking and Photo-Oxidation Degradation of Polyethylene and Related Mechanism. Chinese J Polym Sci26(3),311-319 (2008).

• Wu QH\*,Qu BJ, Sun M. Photocrosslinking of Halogen-Free Flame-Retarded Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer by Phosphorous-Nitrogen Compound NP28 J Appl Polym Sci,114, 562-569 (2009).

• Xupeng Song, Qianghua Wu, Baojun Qu\*,Photoinitiated crosslinking of EPDM/inorganic filler blends and characterization of related properties,Chinese journal of polymer science,28(1),119-127 (2010)).

• Yuewen Hu, Qianghua Wu, Baojun Qu\*,Photocrosslinking of EVA/inorganic filler blends and characteristics of related properties. Polymers for advanced technologies, 21 177–182 (2010).

• Lei Ye, Qianghua Wu, Baojun Qu\*,Synergistic effects of fumed silica on intumescent flame retardant polypropylene, J Appl Polym Sci, , 115:3508-3515 (2010).

**二、著作 (2篇)**

1. QU, BJ\*.New developmentsin the photoinitiated crosslinking mechanism of polyethylene and its industrial applications, in Trends in Photochemistry & Photobiology, Vol.7, 107-129 (2001).（《光化学和光生物学中的发展趋势》书籍专章）

2. Rånby, B; QU, BJ\*; Shi, WF. Capter “Photocrosslinking”（“光交联”） in Polymeric Materials Encyclopedia（《高分子材料百科全书》专章）(Ed: JC Salamone), CRC Press Boca Raton, USA, pp5155-5169 (1996).