

电子束辐照交联电线电缆中束下工艺的研究

刘振灏 周知明 葛宝全 张应发 张玉琴
程运祯 周震安 曹林峰 李新民

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要 将磁铁技术应用于电子束辐照交联电线电缆的束下工艺。一套传动设备配以不同型式的磁铁, 形成三种辐照方式, 适应了全规格电线电缆的要求, 芯线截面 $0.5-400 \text{ mm}^2$ 含扇形线, 线缆外径 $\phi 1 \text{ mm}-\phi 40 \text{ mm}$, 最大可达 $\phi 60 \text{ mm}$ 。给出了能量选择公式, 束流利用率和辐照均匀性的公式和分析。与实验结果相比较, 两者较为符合。

关键词 电子束, 电线电缆, 辐照交联, 磁铁, 能量, 束流利用率, 辐照均匀性

电子束辐照交联电线电缆在我国已有十多年的历史。近年来大功率(50 kW)电子加速器辐照交联电线电缆生产线相继在天水铁路电缆工厂和烟台电缆厂先后投产。为保证产品的质量, 除了加速器的性能外, 还要使辐照均匀, 并提高束流和能量的利用率, 这就成为束下工艺研究的主要课题。

在天水和烟台两条生产线的研制中, 采用了一套束下传动设备, 配以不同型式的磁铁形成三种辐照方式, 适应了全规格线缆的辐照, 即芯线截面 $0.5 \text{ mm}^2-400 \text{ mm}^2$, 含扇形线。这就是 ∞ 字型双向辐照, 跑道式双侧辐照和环形辐照。近来又在四川电缆厂的辐照交联电线电缆生产线上进行了改进。

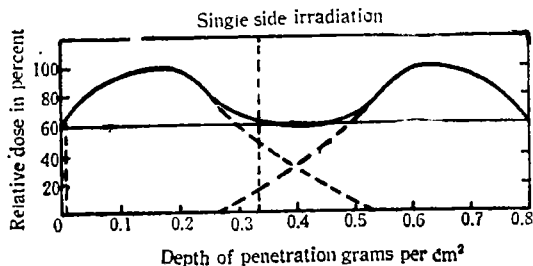


Fig 1. Depth-dose profiles in double side irradiation at 1 MV

1 剂量和透射深度

透射深度曲线如图1所示。虚线左边部分表示钛箔和空气层对电子能量的吸收, 虚线右

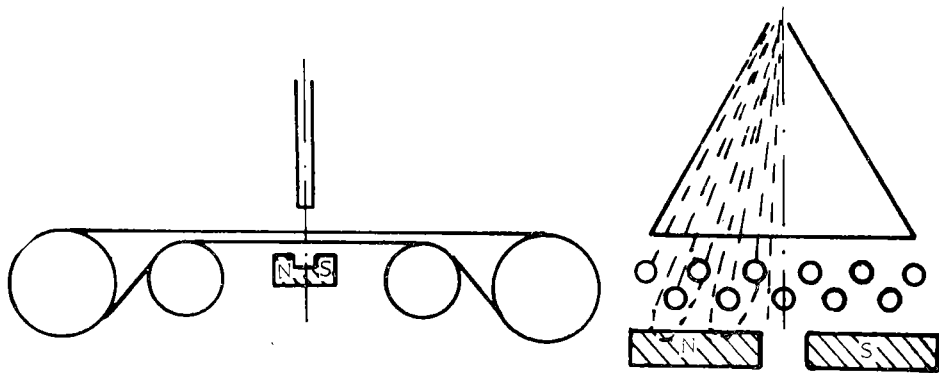


Fig 2. Wire path of figure-eight like type

收稿日期: 初稿 1993-09-14, 修改稿 1994-02-22

边部分表示电子的极限穿透能力。通常取相对剂量率为 1 的 60% 作为电子的透射深度。如果采用双向辐照，透射深度为单面辐照厚度的 2.4 倍左右。

2 ∞ 字型双向辐照

传动系统使电线在往复运动中翻转 180°，从而使电线在两次往复运动中上半面和下半面都受到辐照。该辐照方式还在电线下方放置反射磁铁，以提高束流利用率和改善辐照均匀性(见图 2)。

2.1 能量选择公式

圆形线被辐照时，电子必须穿透半弦长 t_1 (见图 3)。可以推导出

$$t_1 = \sqrt{t(D-t)}$$
 (2.1-1)

式中 t 为绝缘层厚度(mm)， D 为电线外径(mm)。根据经验，采用的能量选择公式为

$$E = \frac{1}{K_{\infty}} \rho t_1$$
 (2.1-2)

式中 E 为电子能量(MeV)， ρ 为材料密度(g/cm³)， t_1 为半弦长(cm)， K_{∞} 为单位能量的透射深度($\frac{g}{cm^2 \cdot MeV}$)，取 $K_{\infty} = 0.4$ 。

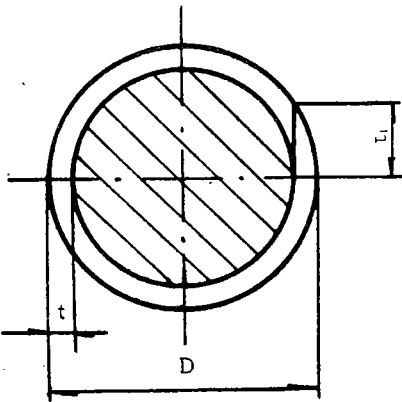


Fig 3. Penetration path for double side irradiation

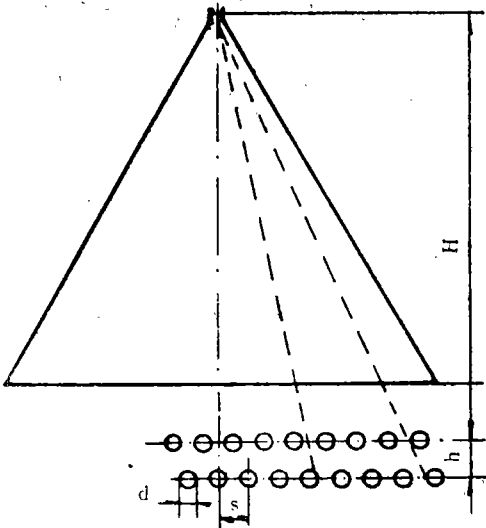


Fig 4. The up-wire cast its shadow on the low-wire

2.2 束流利用率

2.2.1 几何屏蔽 图 4 表示 ∞ 字型辐照时，上排线的阴影会遮挡电子对下排线的辐照。令

- u_r 表示上排线右侧在下排线上的投影，
- u_l 表示上排线左侧在下排线上的投影，
- L_r 表示下排线的右侧位置，
- L_l 表示下排线的左侧位置。

对于 u_r 可推导出(见图 4)

$$\begin{aligned}
 n=1, \quad u_r &= \left(\frac{S}{2} + \frac{D}{2} \right) (1+\delta) \\
 n=2, \quad u_r &= \left(\frac{3S}{2} + \frac{D}{2} \right) (1+\delta) \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 n=n, \quad u_r &= \left[\frac{1}{2} (2n-1) S + \frac{D}{2} \right] (1+\delta)
 \end{aligned} \tag{2.2.1-1}$$

同理推出,

$$u_l = \left[\frac{1}{2} (2n-1) S - \frac{D}{2} \right] (1+\delta) \tag{2.2.1-2}$$

$$L_r = ns + \frac{D}{2} \tag{2.2.1-3}$$

$$L_l = ns - \frac{D}{2} \tag{2.2.1-4}$$

上列式中 S 为相邻线的中心距, D 为线径, $\delta = \frac{h}{H}$, 为排线和扫描位置的空间参数。

当 $u_r \leq L_l$ 时无屏蔽发生。在 $u_r > L_l$ 的情况下, 屏蔽发生。即

1) $u_l < L_l$ 时, $\xi_{10} = u_r - L_l$, 将公式(2.2.1-1)和(2.2.1-4)式代入, 整理后得

$$\xi_1 = (n-1)\delta s' + \left(1 + \frac{\delta}{2} \right) + \frac{S'}{2} (\delta-1) \tag{2.2.1-5}$$

式中 $\xi_1 = \frac{\xi_{10}}{D}$, $S' = \frac{S}{D}$ 。即以线径 D 为单位。

当 $u_l = L_l$ 时, 这种屏蔽现象终止, 可求出

$$n_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{S'} + 1 \right) \tag{2.2.1-6}$$

2) $u_l > L_l$ 时, $\xi_{20} = D - (u_l - L_l)$, 代入(2.2.1-2)和(2.2.1-4)式, 整理后得

$$\xi_2 = - (n-1)\delta s' + \left(1 + \frac{\delta}{2} \right) - \frac{S'}{2} (\delta-1) \tag{2.2.1-7}$$

当 $u_l = L_r$ 时, 这种屏蔽现象终止, 可求出

$$n_2 = n_1 + \frac{1}{\delta S'} \tag{2.2.1-8}$$

此后, 上述屏蔽现象循环出现, 只是上排第 i 根线屏蔽下排第 $i+1$ 根线而已。同样可求出,

$$\begin{aligned}
 \xi_{30} &= u_{r,i} - L_{l,i+1} \\
 \xi_3 &= (n-1)\delta s' + \left(1 + \frac{\delta}{2} \right) + \frac{S'}{2} (\delta-3) \\
 n_3 &= \frac{1}{2} \left(\frac{3}{\delta} + \frac{1}{S'} + 1 \right) \\
 \xi_{40} &= D - (u_{l,i} - L_{l,i+1}) \\
 \xi_4 &= - (n-1)\delta s' + \left(1 + \frac{\delta}{2} \right) - \frac{S'}{2} (\delta-3) \\
 n_4 &= n_3 + \frac{1}{\delta S'}
 \end{aligned}$$

余类推。同样图的左半边也有同样的屏蔽公式。

2.2.2) 库仑散射 当电子穿过物质时, 它受到原子核的库仑场作用而发生没有能量损耗的偏转, 即弹性库仑散射。求散射截面可应用著名的卢瑟福公式。

散射角为 θ 的每单位立体角的散射截面为

$$\frac{d\sigma}{d\omega}(\theta) = \frac{Z^2 r_0^2}{4 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \frac{1}{\varepsilon^2 \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^2}\right)^2} \quad (2.2.2-1)$$

式中 $r_0 = \frac{e^2}{mc^2} = 2.8 \times 10^{-13} \text{ cm}$, 是经典电子半径。

$$\varepsilon = \frac{E + mc^2}{mc^2}$$

从公式(2.2.2—1)可知, 散射截面随 θ 的增大而迅速减小, 也就是对大角度散射, 由于物质厚度 $d \ll \frac{1}{\sigma N}$ (σ 是散射截面, N 是每立方厘米散射原子数), 实际上只发生单次散射。被物质散射出来的电子数为

$$N \int_{\pi/2}^{\pi} \sigma(\theta) \sin\theta d\theta = NZ^2 r_0^2 / 2 \varepsilon^2 \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^2}\right)^2 \quad (2.2.2-2)$$

对于上排线的上表面, 库仑散射使其接受的辐照剂量减小; 对于下排线的上表面散射的电子将大部分打在上排线的下表面。由于 ∞ 字式的运动, 上排线的下表面经翻转后即下排线的上表面。所以电线绝缘层的库仑散射使一部分束流损失, 但对辐照的均匀性略有改善。

如果电线下面放置 Z 值较大的金属板(不锈钢板), 则可以将从线间隙下来的电子反弹上去, 从下面辐照电线。

2.3 反射磁铁和实验结果

测试棒是在电线外包一层铝皮(见图5), 实验中上下排各排放16根测量棒, 参数为: $D=15 \text{ mm}$, $S=36 \text{ mm}$, $h=60 \text{ mm}$, $H=950 \text{ mm}$, 实验结果列于表1。将两排测量棒各自上下半层(1, 2, 3, 4)上接受的电子流归一化到上排线的上半层所接受的束流。

从表1可知, 屏蔽效应随 h 的减小而减小, 当 $h=0$ 时, 即上、下排线处于同一平面而无屏蔽。被辐照电线下置反射板可提高电子束利用率并改善辐照均匀性。但采用反射磁铁效果更好, 能提高束流利用率 $\sim 15\%$ 。

将实验参数代入公式(2.2.1—6)和(2.2.1—5)

可求出: $n_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{S'} + 1 \right) = 8$ (取整数), $\xi_1' = \frac{1}{2} \left(\xi_{1\pm} + \xi_{1\mp} - \frac{1}{n} \right) = 0.3129$ 。计

算表明下排线上半面接受到的束流为上排线上半面的0.6871。从表1中, 实验值为0.675。两者相当一致。

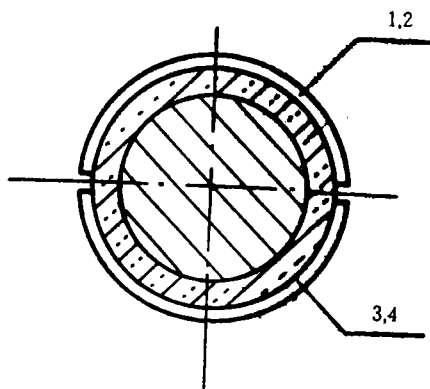


Fig 5. Cross section of measured rod

Tab 1. Electron intensity varies with reflecting models

h/mm	Site				Radiation uniformity	Total
	1	2	3	4	(2+3)/(1+4)	electron intensity
85(reflecting stainless steel plane)	1.0	0.227	0.639	0.176	0.736	2.042
75(reflecting stainless steel plane)	1.0	0.242	0.658	0.175	0.766	2.075
60(reflecting stainless steel plane)	1.0	0.276	0.675	0.167	0.807	2.109
60 (reflecting magnet)	1.0	0.322	0.777	0.314	0.836	2.413

3 跑道式双侧辐照

图 6 表示这种辐照方式。电线的这种运动形式可使扇形线的圆弧面始终在滚筒上。扇形线的上部直接受到电子束的辐照，扇形线的下圆弧面受到两侧电子束经磁铁偏转过来的辐照，实现了整个扇形截面上同时受到电子束的辐照。

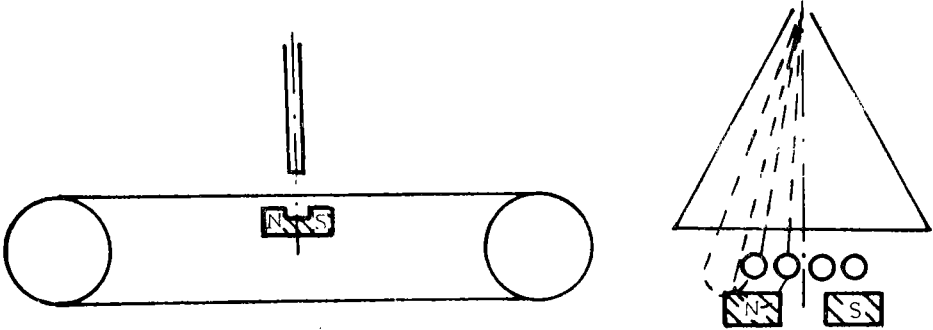


Fig 6. Wire path of running track type

3.1 能量选择公式

扇形线被电子射线照射时穿透绝缘层的情况如图 7 所示。 t_1 为电子的等效透射深度， t 为绝缘层厚度， α_1 为扇形角， α_2 为束流最大选择扫描角，即电子辐照两侧电线所需的扫描角之半。

$$t_1 = t / \sin\left(\frac{\alpha_1}{2} - \alpha_2\right)$$

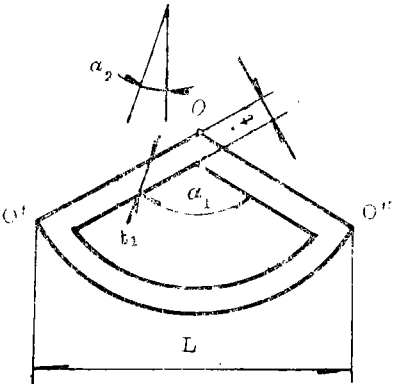


Fig 7. Cross-section of sector wire

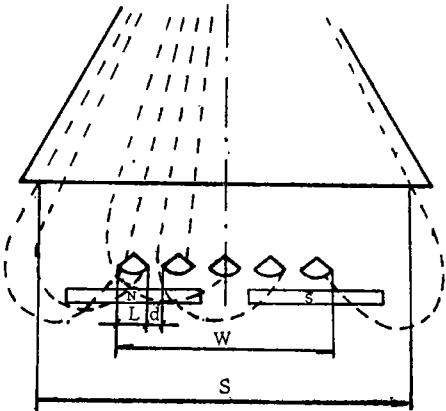


Fig 8. Sector wire in both sides irradiation of running track type

$$E = \frac{1}{K_r} \rho t_1$$

(3.1—1)

式中， ρ 为材料密度(g/cm^3)， E 为电子能量(MeV)， t_1 为等效透射深度(cm)， K_r 为单位能量的透射深度($\frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \cdot \text{MeV}}$)，取 $K_r = 0.3$ 。

3.2 束流利用率的一级近似

图 8 示出跑道型双侧辐照时电线各部分接受的束流照射。

斜边 OO' 上接受的束流强度 i_u ，

$$i_u = \frac{W}{2S} \cdot \frac{L}{L+d}$$

(3.2—1)

对于圆形线上半面不可能受到经磁铁偏转过来的电子的辐照。对于扇形线，磁铁偏转的电子打在斜边上所占份额很小，特别是排线较密时，在一级近似中可忽略不计。圆弧面上接受的束流强度

$$i_1 = i_{ub} + i_{ab} = \frac{S-W}{S} \cdot \frac{L}{L+d} \beta_1 + \frac{S-W}{S} \cdot \frac{d}{L+d} \cdot \frac{L}{L+d} \beta_1 \beta_2$$

(3.2—2)

式中 i_{ub} 为束流从左右两侧偏转过来打在圆弧面； i_{ab} 为线间隙穿透的束流偏转后打在圆弧面； β_1 为束流经磁铁偏转后的效率，取 50%； β_2 为钛窗中心处下方的磁场，是极性相反的交界区，磁场很弱， β_2 取 85%； W 为排线宽度； S 为扫描宽度； d 为线间隙； L 为电线宽度。

4 实 验 结 果

4.1 扇形线

在水辐照交联电线电缆生产线上成功地辐照了 120 mm^2 扇形线，其扇形角 $\alpha_1 = 100^\circ$ ，其它参数为 $W = 318\text{ mm}$ ， $S = 600\text{ mm}$ ， $L = 21\text{ mm}$ ， $d = 12\text{ mm}$ 。测得热延伸值和从剂量—热延伸曲线上查得对应的剂量值列于表 2。采样点为扇形线的三个尖角（图 7 中的 O 、 O' 和 O'' 点）和斜边 OO' 、 OO'' 及圆弧 $\widehat{O'O''}$ 的中点，从 O 点开始依顺时针方向表示的采样值记为 1、2、3、4、5 和 6。

Tab 2. Dose distribution in wire of sector section

	Measuring site					
	1	2	3	4	5	6
Hot set/%	50	60	65	95	45	70
Dose/kGy	178.9	169.7	163.7	119.3	182.0	162.5

将辐照参数代入公式(3.2—1)和(3.2—2)得 $i_u = 0.1686$ ， $i_1 = 0.1958$ 。考虑到圆弧面上的线度较斜边 OO' 长，即 $\widehat{O'O''} = \frac{\alpha}{180} \pi \cdot OO' = 1.7453 OO'$ ，可求出斜边上单位长度上的束流强度与圆弧面上单位长度上的束流强度的不均匀度。

$$\Delta I = \frac{i_u/OO' - i_1/\widehat{O'O''}}{i_u/OO' + i_1/\widehat{O'O''}} = 20.1\%$$

从表 2，可得到剂量不均匀性

$$\Delta D = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} = 20.8\%$$

4.2 圆形线

辐照 70 mm² 芯线的 1 kV 绝缘架空线。参数为 W = 276 mm, S = 600 mm, L = 13.5 mm, d = 19.5 mm, 代入(3.2—1)式和(3.2—2)式, $\Delta I = \frac{2 i_u - i_l}{2 i_u + i_l} = 6.30\%$ 。实验测得热延伸和对应的剂量值列于表 3。

Tab 3. Dose distribution in wire circle section

	Sampling site											
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
Hot set/%	60	50	60	55	45	45	45	45	45	45	45	60
Dose/kGy	92.7	102.3	92.7	97.0	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7	114.7	92.7

剂量不均匀性 $\Delta D = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} = 10.6\%$

4.3 圆形线均匀辐照的条件 令公式(3.2—1)和公式(3.2—2)相等, 即上半面和下半面接受的束流强度相等

$$2 i_u = i_l$$
$$\frac{W}{S - W} = \beta_1 \left(1 + \frac{d}{L + d} \beta_2 \right)$$

(4.3—1)

令 $W' = \frac{W}{S}$, 即排线宽度占扫描宽度的百分数。

则

$$\frac{W'}{1 - W'} = \beta_1 \left(1 + \frac{d}{L + d} \beta_2 \right)$$

(4.3—2)

由上式可知, $W' < \frac{1}{2}$

5 环 形 辐 照

对于进行大直径电线或电缆护套辐照, 如果采用∞字型双向辐照或者跑道型双侧辐照, 都会使滚筒直径太大。对于辐照 $\phi 25\text{ mm} - \phi 50\text{ mm}$ 的束下传动设备, 滚筒直径要 $\phi 1500\text{ mm}$, 长度仍要 700 mm 左右。为适应 $\phi 1\text{ mm} - \phi 50\text{ mm}$ 的辐照要求, 需要两套束下传动设备, 使辐照室内设备过于庞大。

如果使被辐照电线自身旋转, 则设备复杂, 束流利用率也低。为了提高束流利用率采用一维扫描并使束径变小, 则对钛窗的冷却和寿命也带来问题。采用了环形磁铁, 其产生磁场的等位线如图 9 所示。这种场形将使束流沿径向辐照电线。辐照厅内只有一个大直径的反向导

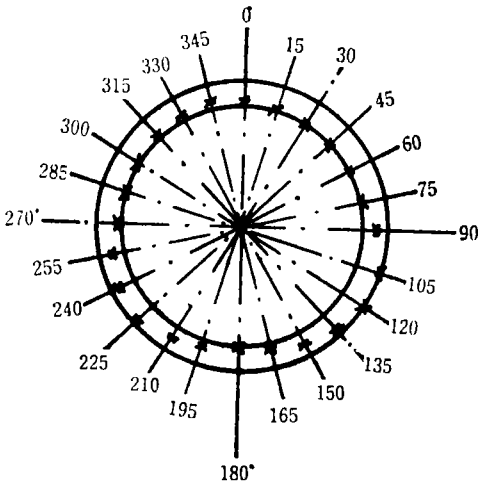


Fig 9. Angle distribution of electron beam in ring type irradiation

轮。

5.1 能量选择公式

由于束流沿圆周径向辐照电线, 其电子透射的深度就是绝缘层厚度。所以电子能量

$$E = \frac{1}{K_0} \rho t$$

(5.1—1)

式中 t 为绝缘层厚度(cm)， ρ 为材料密度(g/cm^3)， K_0 为单位能量的透射深度 $\left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^2 \cdot \text{MeV}}\right)$ ，取 $K_0 = 0.3$

5.2 束流利用率，均匀性和实验结果

图 9 示出沿圆周 24 个槽的束流强度的角分布，将各部分束流强度求和，得到束流利用率为 50%，不均匀性为

$$\Delta I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \pm 11\%$$

在天水铁路电缆工厂用环形磁铁，在 25 mA 束流下辐照了 300 mm² 和 400 mm² 芯线截面的电缆，它们的外径分别为 25 mm 和 29 mm。热延伸和对应剂量值列于表 4，采样点为同一圆周上四等分处。

Tab 4. Dose distribution in ring radiation (400 mm²)

	Sampling site			
	1	2	3	4
Hot set/%	105	75	75	105
Dose/kGy	118.6	151.0	151.0	118.6

$$\Delta D = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} = \pm 12\%$$

6 讨 论

采用磁铁技术提高了束流利用率和改善了辐照均匀性，并解决了扇形线和大直径电缆的辐照。实践经验表明，束流强度 25 mA 下连续长期运行，加速器和其它设备工作正常。改进磁极形状，提高束流利用率和辐照均匀性，仍是待研究的课题。

在束下工艺研究中，得到了天水铁路电缆工厂的密切配合，在此表示感谢。

参 考 文 献

1 Zhou Zhiming, Liu Zhenhao, Teng Renrui et al. Radiat. Phys. Chem., 1993, 42: 113
2 Uehara. Radiat. Phys. Chem., 1977, 9, 593
3 梅镇岳. β 和 γ 放射性, 1964 年

UNDER BEAM TECHNOLOGY IN EB IRRADIATION CROSSLINKING WIRE AND CABLE

Liu Zhenhao Zhou Zhiming Ge Baoquan Zhang Yingfa Zhang Yuqin

Cheng Yunzheng Zhou Zhenan Chao Linfeng Li Xinmin

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

ABSTRACT We have applied magnet in under beam technology of EB irradiation crosslinking wire and cable. The facility composed of a under beam fixture with various magnets has the function of three irradiation models so that it reaches the requirement of all kinds of wire and cable from 0.5 mm^2 to 400 mm^2 in the core section including sector cross-section or from $\phi 1 \text{ mm}$ to $\phi 40 \text{ mm}$ in diameter and maxium diameter up to $\phi 60 \text{ mm}$ is available. This article describes these three radiation models and their formulas about demanded energy, beam efficiency, radiation uniformity. Experimental data are corresponding to these formulas.

KEYWORDS Electron beam, Wire and cable, Irradiation crosslinking, Magnet, Beam efficiency, Radiated uniformity