

· 专题研究 ·

无损检测用驻波电子直线加速器的防护性能检测分析

马永忠, 娄云, 万玲, 王时进, 冯泽臣

(北京市疾病预防控制中心, 北京 100013)

摘要: 目的 对无损检测用驻波电子直线加速器防护性能进行检测与分析, 可以确保加速器设备的出厂质量, 并为现场作业人员的规范操作和有效防护提供指导。方法 以 13 台加速器为检测研究对象, 使用 PIW UNIDOS 型剂量仪、LF (Mg²⁺ Cu²⁺ P) 热释光剂量计 (TLD) 等仪器, 测量了加速器的主要剂量学指标, 并结合相关标准进行分析和评价。结果 13 台加速器的电子束能量与所标定的能量相符, 与辐射输出相关的剂量学指标合格率均为 100%, 加速器组装体距靶 1 m 处 312 个测量位点中, 99.0% 位点的相对辐射泄漏率低于 1.0%, 每台加速器距靶点 1 m 的球面上 24 个点的平均相对辐射泄漏率均低于 0.7%, 符合产品出厂的企业标准。结论 无损检测加速器的防护性能是与设备常规运行质量和现场人员的个人防护直接相关的, 应加强每台设备投入工业运营前的防护检测。

关键词: 无损检测用驻波电子直线加速器; 防护性能; 检测

中图分类号: R147 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-221X(2011)01-0030-04

Verification and analysis on protective property of standing-wave linear accelerator for non-destructive testing

MA Yong-zhong, LOU Yun, WAN Ling, WANG Shi-jin, FENG Ze-chen

(Beijing Municipal Center for Disease Prevention and Control, Beijing 100013, China)

Abstract: Objectives To ensure the outgoing quality and to offer the instruction in standard operation and reliable shield the quality and protective property of the "Standing-Wave Electron Linear Accelerator for non-destructive testing" should be necessary before leaving the factory. Methods Thirteen accelerators were tested. PIW UNIDOS dosimeter and LF (Mg²⁺ Cu²⁺ P) thermoluminescence dosimeters (TLDs) were used to determine the main dosimetric indexes of accelerator. Results The electron beam energy of all these accelerators accorded with its labeled value. The eligibility rate of dosimetric parameter concerned with radiation output of accelerators was 100%. On the other hand, in 312 measurement dots that were 1 m away from the targets of accelerator assembly, 99% of the relative radiation leakage rate was < 1.0%, and the average relative rate of leakage radiation from 24-dots on the spherical surface of these accelerators was < 0.7%, all satisfied the leaving factory demand of the product. Conclusion The results suggested it should be necessary to verify the protective property of the accelerator before put into industrial operation owing to its close relation with regular operation and personnel health protection on site.

Key words: standing-wave electron linear accelerator for non-destructive testing; protective property; verification

无损检测用驻波电子直线加速器 (下称“无损检测加速器”或“加速器”) 是指能将电子枪产生的电子在直线加速管内加速到高能并打靶产生 X 射线的装置。该类设备在一定能量范围内具有体积小、剂量率大、焦点小等特点, 已在石油、化工、能源、考古、海关以及大型压力容器工业等诸多领域得到了广泛应用^[1-4]。目前国内有多个该类加速器的生产部门, 为保证设备的质量标准和用户无损检测工作的要求, 在设备出厂前均需作全面的性能调试并委托防护技术部门进行设备的技术指标和防护性能检测。本文报道工业上常用的无损检测加速器的防护性能检测结果, 并对相关的问题进行讨论。

1 材料与方 法

1.1 研究对象与检测指标

从已检的工业加速器中, 抽取 2~12 MeV 不同电子束能量的加速器作为研究对象, 包括: (1) 2.6 和 12 MeV 的加速器

各 1 台; (2) 4 和 9 MeV 的加速器各 5 台。主要考查每台加速器的电子束能量 (或 X 射线最高能量)、与辐射输出相关的剂量学指标 (辐射输出剂量率、重复性偏差、线性偏差、辐射束的均整度与不对称性) 和加速器组装体的相对辐射泄漏率。

1.2 检测仪器与方法

1.2.1 主要仪器 (1) PIW UNIDOS 型剂量仪, 选用 0.6 cm³ 的电离室, 测量时针对不同能量的加速器配用 1~3 cm 的平衡帽保证电子平衡; (2) LF (Mg²⁺ Cu²⁺ P) 热释光剂量计 (TLD) 和 RGD-3B 热释光剂量计。

1.2.2 加速器电子束能量的测定 用测量宽束 X 射线在铁中的半值层 ($d_{1/2}$) 或什值层 ($d_{1/10}$) 的方法来确定加速器的能量。测量时将剂量仪的探头放在 0° 方向 X 射线束中心轴上距靶 1 m 处, 在探头和靶之间先后放置不同厚度的钢板 (铁) 测量在相同剂量照射下 X 射线穿过不同钢板厚度 d 时的衰减情况, 并描绘出剂量值 D (αGy) 随不同厚度 d (mm) 的对数衰减曲线, 根据 $\lg D = f(d)$ 求出半值层 ($d_{1/2}$) 或什值层 ($d_{1/10}$)。X 射线穿过钢板时, 其衰减规律可用下式表示: $D =$

收稿日期: 2010-09-06

作者简介: 马永忠 (1968-) 男, 医学博士, 副主任医师, 主要从事辐射剂量研究与职业病危害评价工作。

$D_0 e^{-\mu d}$ 式中: d —钢板厚度, mm; D_0 — d 为 0 时测得的剂量值, cGy ; D —各个 d 值下测得的对应的剂量值, cGy ; μ —衰减系数, mm^{-1} 。在测得一系列 d 值及 D 值后, 利用最小二乘法作线性拟合求出 d_{HVL} 或 d_{TVL} 。根据 d_{HVL} 或 d_{TVL} 查相应的能量-厚度衰减曲线, 即可判定出加速器的电子束能量。

1.2.3 加速器辐射输出相关的剂量学指标测量 (1) 辐射输出量率: 将 PIW 剂量仪探头 (电离室) 置于有用线束中心轴上距靶 1 m 处, 剂量仪主机在机房外 (控制室) 远距离直接测读, 以设定的最高输出量率照射, 计算该处的空气吸收剂量率; (2) 辐射输出的重复性: 在射线束中心轴上距靶 1 m 处, 相同累积照射的空气吸收剂量条件下重复测量 10 次, 计算出测量值的相对标准偏差; (3) 辐射输出的线性: 在射线束中心轴上距靶 1 m 处, 相同剂量率下累积照射不同的空气吸收剂量 (累积剂量范围 100~3 000 cGy), 测读出相应的累积剂量值, 并求出线性回归方程和相关系数, 计算出线性偏差; (4) 辐射束的均整度: 将剂量仪探头放置在距靶 1 m 处, 在相同条件下测量中心轴线上的剂量值 D_0 和偏离中心轴线 θ 角 ($2\sim 9\text{ MeV}$ 加速器 θ 取 7.5° , 12 MeV 加速器 θ 取 6°) 的圆周上对称于靶点各点的剂量值 D_i , 如图 1 所示, 取圆周

上剂量最小值相对 0° 射线束中心轴剂量的百分数; (5) 辐射束的不对称性: 按照 (4) 的方法, 测量出距靶 1 m 处且偏离中心轴线 θ° 圆周上剂量值, 求出圆周上剂量 (最大值-最小值) / (最大值+最小值) 的百分数。

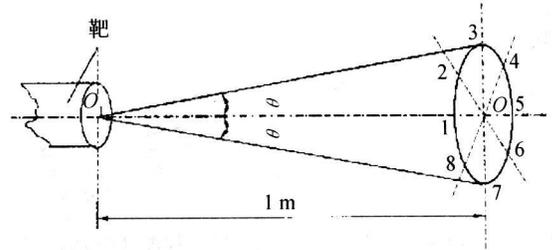


图 1 加速器辐射束均匀度与对称性测量示意图

1.2.4 加速器组装体的相对辐射泄漏率 采用热释光法 (TLD) 对加速器组装体的辐射泄漏率进行测量。现场确定加速器的靶点位置后, 将出束口用铅砖封堵, 固定 TLD 测量架, 按照图 2 将 TLD 分三层安置在测量架上, 保证每个 TLD 探测器与靶点位置的距离均为 1 m。累积出束相同剂量后, 求出各个位点 TLD 测量出的空气吸收剂量相对于有用束剂量的比率作为相应位点的相对辐射泄漏率。

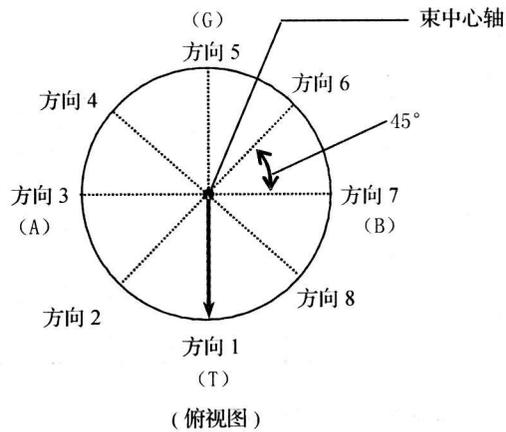
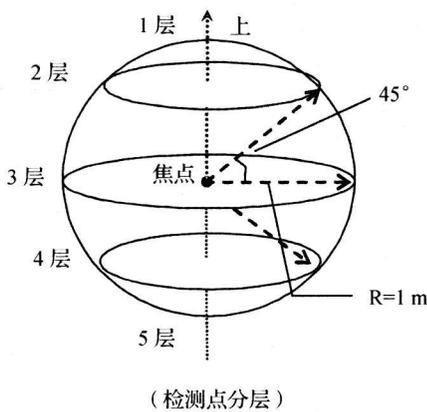


图 2 TLD 距靶 1 m 处检测点位置示意图

1.3 分析与评价依据

无损检测加速器生产厂家的出厂指标和相关的加速器性能检测规范; 粒子加速器辐射防护规定 (GB5172-85); 电离辐射防护与辐射源安全基本标准 (GB18871-2002)。

2 结果

2.1 不同加速器的电子束能量

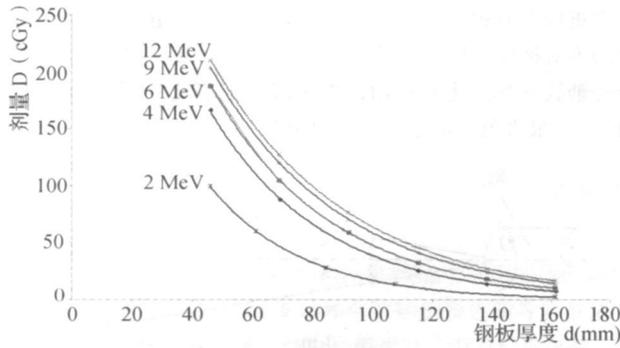
在所检的 13 台加速器中, 每台加速器所产生的均为具有连续能谱的 X 射线, 故在本文给出的加速器能量均系指被加速电子束的最终能量或具有连续能谱的 X 射线束的最大能量 (以 MeV 表示)。研究中选取了电子束能量分别标定为 2、4、6、9 和 12 MeV 的加速器进行能量鉴别。现场测量时, 将剂量仪的探头放在 0° 方向 X 射线束中心轴上距靶 1 m 处, 加速器累积出束 500 cGy 照射时测量出该处的剂量值 D_0 。然后在探头和靶之间分别放置 2.3、4.6、6.9、9.2、11.5 和 16.1 mm 厚的钢板, 每次在上述相同累积剂量出束条件下测量出 X 射线穿过不同钢板厚度 d (mm) 时的剂量值 D (cGy), 对测量值进行

绘图, 描绘出如图 3 所示的加速器 X 射线 D (cGy) 钢板厚度 d (mm) 的指数衰减曲线。

结合图 3 的曲线和相应的指数方程, 可求得 2~12 MeV 加速器 X 射线在钢板中的半值层 (d_{HVL}) 什值层 (d_{TVL}) 分别是: $d_{\text{HVL}(2\text{ MeV})} / d_{\text{TVL}(2\text{ MeV})}$ 为 21.2 mm/70.4 mm, $d_{\text{HVL}(4\text{ MeV})} / d_{\text{TVL}(4\text{ MeV})}$ 为 25.8 mm/85.7 mm, $d_{\text{HVL}(6\text{ MeV})} / d_{\text{TVL}(6\text{ MeV})}$ 为 27.3 mm/90.6 mm, $d_{\text{HVL}(9\text{ MeV})} / d_{\text{TVL}(9\text{ MeV})}$ 为 30.2 mm/100.3 mm, $d_{\text{HVL}(12\text{ MeV})} / d_{\text{TVL}(12\text{ MeV})}$ 为 31.4 mm/104.2 mm。根据 d_{TVL} 查 NCRP51 报告书附录 E 13^[5], 判定出每个 d_{HVL} 对应的加速器电子束能量与标定的能量相符。

2.2 加速器辐射输出相关的剂量学指标

表 1 中给出了典型 2、4、6、9 和 12 MeV 不同能量加速器 X 射线辐射输出的剂量学指标测量结果。另外, 为了解同一能量加速器剂量学指标的整体质量, 分别调查并检测了 5 台 4 MeV 加速器和 5 台 9 MeV 加速器 X 射线辐射输出相关的剂量学指标, 测量结果见表 2、表 3。



注: (1) 图中每一条曲线均从第 2 个钢板厚度 (46 mm) 剂量值至第 6 个钢板厚度 (161 mm) 剂量值绘制而成;
 (2) 图中各曲线的函数方程分别为: 2 MeV: $Y=446.64e^{-0.027x}$; 4 MeV: $Y=570.01e^{-0.0269x}$; 6 MeV: $Y=608.66e^{-0.0254x}$; 9 MeV: $Y=590.59e^{-0.0231x}$; 12 MeV: $Y=584.78e^{-0.0221x}$

图 3 加速器 X 射线穿过不同厚度钢板时的衰减曲线

结合 GB/T 20129-2006《无损检测用驻波电子直线加速器》^[6]和每台设备的出厂指标分析表明, 所检 13 台加速器辐

表 2 5 台 4 MeV 和 5 台 9 MeV 加速器辐射输出量率、重复性偏差和线性偏差测量结果比较

加速器 (MeV)	辐射输出量率 (cGy/min)		输出量合格率 (%)	重复性偏差 (%)		重复性偏差合格率 (%)	线性偏差 (%)		线性偏差合格率 (%)
	平均值	范围值		平均值	范围值		平均值	范围值	
4	520	515~525	100	0.10	0.08~0.12	100	0.43	0.14~0.89	100
9	3 095	3 040~3 238	100	0.17	0.09~0.30	100	0.25	0.07~0.60	100

表 3 5 台 4 MeV 和 5 台 9 MeV 加速器辐射束的均整度和不对称性测量结果比较

加速器 (MeV)	辐射束的均整度 (%)				均整度合格率 (%)	辐射束的不对称性 (%)				不对称性合格率 (%)
	X 方向		Y 方向			X 方向		Y 方向		
	平均值	范围值	平均值	范围值		平均值	范围值	平均值	范围值	
4	78.6	76.1~83.0	79.9	77.1~85.0	100	1.8	1.3~2.3	1.5	0.8~1.9	100
9	57.0	53.6~66.4	54.8	44.5~64.7	100	1.5	1.2~2.1	1.5	0.3~3.0	100

2.3 加速器组装体的相对辐射泄漏率 (表 4)

表 4 13 台加速器组装体的相对辐射泄漏率测量结果

检测点	距靶 1 m 处的相对辐射泄漏率 (%) $\geq 1.0\%$ 的点数			检测点	距靶 1 m 处的相对辐射泄漏率 (%) $\geq 1.0\%$ 的点数		
	范围值	平均值	0		范围值	平均值	0
2-1	0.02~0.77	0.39	0	3-5	0.02~0.33	0.18	0
2-2	0.10~0.73	0.44	0	3-6	0.11~0.80	0.34	0
2-3	0.39~0.92	0.69	0	3-7	0.13~1.01	0.39	1
2-4	0.24~0.83	0.48	0	3-8	0.04~0.78	0.32	0
2-5	0.08~0.75	0.42	0	4-1	0.03~0.87	0.28	0
2-6	0.12~0.70	0.38	0	4-2	0.05~0.33	0.18	0
2-7	0.27~0.93	0.55	0	4-3	0.15~0.36	0.22	0
2-8	0.07~0.80	0.37	0	4-4	0.09~0.30	0.17	0
3-1	0.11~1.68	0.49	1	4-5	0.08~0.43	0.26	0
3-2	0.07~0.83	0.40	0	4-6	0.04~0.18	0.15	0
3-3	0.17~0.88	0.51	0	4-7	0.08~0.30	0.16	0
3-4	0.17~1.09	0.54	1	4-8	0.04~0.42	0.21	0

表 4 中, 13 台加速器组装体距靶 1 m 处 312 个测量位点中, 99.0% 位点的相对辐射泄漏率低于 1.0%, 仅有 3 个位点的相对辐射泄漏率略高于 1.0% 的泄漏率指标, 它们分别出现

射输出相关的剂量学指标合格率均为 100%。在 GB/T20129-2006 中, 没有给出该类工业加速器重复性偏差和线性偏差的评价指标, 表 1 和表 2 中给出的这两项测量值均是参照 GB 15213-94《医用电子加速器性能和试验方法》进行检测和分析的, 能更严格地反映出工业加速器的剂量学性能。

表 1 不同典型能量加速器 X 射线辐射输出相关的剂量学指标测量结果

加速器 X 射线束 (MeV)	辐射输出量率 (cGy/min)	重复性偏差 (%)	线性偏差 (%)	辐射束的均整度 (%)		辐射束的不对称性 (%)	
				X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
2	210	0.10	1.78	90.5	91.2	1.3	1.5
4	520	0.11	0.89	76.1	77.1	1.3	1.2
6	917	0.08	0.22	71.2	71.3	0.5	0.6
9	3 060	0.30	0.20	66.4	64.7	2.1	3.0
12	5 506	0.19	0.24	55.9	54.7	3.6	3.0

在 1 台 4 MeV 加速器和 2 台 9 MeV 加速器中, 即 4 MeV-1 加速器的 3-1 位点为 1.68%, 9 MeV-1 加速器的 3-4 位点为 1.0%, 9 MeV-2 加速器的 3-7 位点为 1.01%。为进一步掌握和评价每台加速器组装体的整体辐射泄漏率水平, 图 4 中列出了所检 13 台加速器中, 每台加速器以靶点为球心、半径 1 m 的球面上 24 个测量位点群的最低辐射泄漏率、最高辐射泄漏率和平均辐射泄漏率。

3 讨论

无损检测加速器的能量系指被加速电子束的最终能量或具有连续能谱的 X 射线束的最大能量。因该类型加速器目前用的是全密封型加速管, 靶封闭在加速管内, 无法直接测量电子束能量, 而用测定 X 射线在钢板中的半值层的方法来确定装置电子束能量是一种比较普遍实用的方法。现场能量检测中, 机房内的散射辐射、钢板添加时的放置不当、设备辐射输出的重复性偏差和线性偏差等因素均可能影响能量测量的准确性。从图 3 可见, 2~12 MeV 的 5 条不同能量加速器的 X 射线穿过不同厚度钢板时的指数衰减曲线中, 在相同的剂量透过率条件下, 显然是能量高者需要更厚的钢板; 而在相

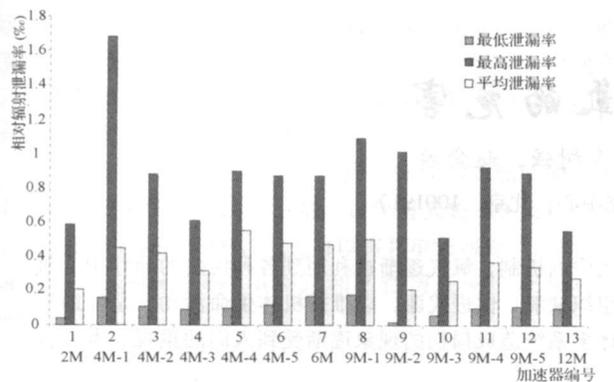


图 4 13台加速器组装体的相对辐射泄漏率分布

同钢板厚度时, 高能的剂量透过率明显大于低能, 但在 9 MeV 以上不同能量加速器 X射线的剂量透过率的差别越来越小, 同时也说明它们在钢板中的 d_{TVL} 或 d_{TVL} 的差别存在变小的趋势。图 3 的曲线分析表明, $d_{TVL(4 MeV)}$ 与 $d_{TVL(2 MeV)}$ 之差为 15.3 mm 而 $d_{TVL(12 MeV)}$ 与 $d_{TVL(9 MeV)}$ 之差仅 3.9 mm。由 NCRP51 报告中附录 E.13 的电子束能量 钢板厚度 TVL 的关系曲线可明显判定并区分出标定为 2 MeV 和 4 MeV 加速器的能量, 而由所求得的 $d_{TVL(12 MeV)}$ 和 $d_{TVL(9 MeV)}$ 判定 12 MeV 和 9 MeV 加速器能量时, 因 $d_{TVL(12 MeV)}$ 和 $d_{TVL(9 MeV)}$ 差别很小, 几乎可认为两者具有相同的能量值。

在加速器的无损检测工业中, 主要使用射线直接作用于物体而获得相关的辐照信息, 所以电子加速器辐射输出相关的剂量学指标是加速器技术性能的核心指标, 也是反映加速器无损检测功能的基础参数, 并与设备的各项防护性能指标密切相关。掌握加速器的防护性能指标, 有助于设备现场作业人员进行规范的操作和有效的防护。表 1 和表 2 中给出的加速器辐射输出量率、均整度和不对称性指标与产品出厂前调试后给出的企业指标相符, 也满足 GB/T 20129—2006《无损检测用驻波电子直线加速器》的要求, 其中涉及到的辐射输出重复性和线性偏差虽然在加速器的专项企业标准中没有作出明确的规定, 但这两项指标既是工业加速器剂量学性能的指针, 同时在大量相似工件的检测中也是非常实用的考量参数。

由于无损检测加速器在常规运行中产生高强度的辐射, 故在我国辐射防护相关法规^[7] 中将其归入严重职业病危害因素的类别。加速器本身的相对辐射泄漏率一方面是影响加速器 X射线照相检测灵敏度的重要因素, 同时也能直接反映加

速器本身的基本防护性能, 操作人员通过该指标可基本了解加速器运行时机房内的辐射剂量水平, 同时对于加速器工程设计和评价人员进行机房的防护屏蔽设计和优化也有一定的指导意义。表 4 和图 4 中描述的 13 台加速器的相对辐射泄漏率水平中, 虽然有 3 台加速器个别位点的指标略高于 1.0%, 最高的为 1.7%, 但所测每台加速器距靶点 1 m 的球面上 24 个点的平均相对辐射泄漏率均低于 0.7%, 满足了产品出厂的企业标准。不可忽视的是, 个别点的泄漏率偏高可能与机房内的散射辐射和现场的测量条件有关, 因为在现场测量中, 由于加速器本身结构等原因, 对束口的封堵不可能完全严密, 难免造成局部的泄漏辐射相对较高, 同时也可能会产生更多泄漏辐射的散射辐射而影响测量结果。

总之, 无损检测加速器的电子束能量、与辐射输出相关的一系列剂量学指标、相对辐射泄漏率等既是设备防护性能的基本参数, 也是与设备常规运行质量和现场人员防护直接相关的, 加强每台加速器投入工业运营前的防护检测是非常必要的。当然, 实际上每台加速器出厂前整个系统的性能鉴定和防护验收, 还包括了加速器出束焦斑的大小、剂量稳定性以及照相检测灵敏度等其他多项技术指标的测量与分析。而且对于加速器无损检测工作场所的防护及其安全设施状况, 都须按照有关标准进行严格的核查, 以保证其满足相应的辐射防护要求。

参考文献:

[1] 阎立强, 郭伟. DZ9/3000型工业无损检测用驻波电子直线加速器的应用 [A]. 首届中国大型铸锻件制造技术发展论坛论文集 [C]. 2006 46-48

[2] Audiere L, Bana R Ç, Emanuele U et al. X-ray tomography system for industrial applications [J]. Nucl Instr and Meth B 2008 266 (10): 2138-2141.

[3] Mehnert R. Review of industrial applications of electron accelerators [J]. Nucl Instr and Meth B 1996 113 (1/4): 81-87.

[4] 王非, 郭伟, 征立刚. 驻波电子直线加速器在铸造无损检测中的应用 [A]. 首届中国大型铸锻件制造技术发展论坛论文集 [C]. 2006 322-325.

[5] NCRP Report No 51. Radiation Protection Design Guidelines for 0.1—100 MeV Particle Accelerator Facilities [Z]. 1977.

[6] GB/T 20129—2006 无损检测用电子直线加速器 [S].

[7] 卫生部令第 49 号, 建设项目职业病危害分类管理办法 [S].

(上接第 15 页)

[15] 陆新华, 刘卓宝. 自由基与铅中毒机制的研究进展 [J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 1998 16 (3): 189

[16] Morisi G, Menditto A, Spagnolo A et al. Association of selected social, environmental and constitutional factors to blood lead levels in men aged 55—75 years [J]. Sci Total Environ 1992 126 (3): 209-229

[17] 郝凤桐, 杜旭芹, 牛颖梅, 等. 铅中毒研究进展 [J]. 中国工业医学志, 2008 21 (3): 200-203.

[18] Mehra R, Juneja M. Fingernails as biological indices of metal exposure [J]. J Biosci 2005 30 (2): 253-257.

[19] 孙东红, 林瑾葆, 周宏东. 铅作业工人卫生行为干预措施研究及效果评价 [J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2002 20 (5): 336-339

[20] Lomphongs S, Moritaka J, M'ya N et al. Occupational health education and collaboration for reducing the risk of lead poisoning of workers in a battery manufacturing plant in Thailand [J]. Ind Health 2004 42 (4): 440-445.