

2012 年上海市工作场所电焊烟尘的定量暴露评估

刘美霞, 杨凤, 丁文彬, 郭薇薇, 瞿菁, 尹艳, 贾晓东

摘要: [目的] 了解 2012 年上海市工作场所电焊烟尘总尘的暴露水平, 分析影响暴露的主要因素。[方法] 开展职业病危害因素主动监测。运用三阶段抽样法抽取 178 家各类企业 204 个车间的 534 名电焊工人作为研究对象, 个体采样器呼吸带采样, 重量法测定现场空气电焊烟尘总尘的浓度。应用调查问卷现场调查、收集可能影响暴露的因素, 运用描述性统计分析、混合效应模型及过量暴露概率对电焊烟尘总尘进行定量暴露评估。[结果] 共获得 534 份电焊烟尘样品, 浓度检测值呈对数正态分布, 几何均数为 $(1.6 \pm 3.9) \text{ mg/m}^3$, 超标率 23.2%。算术均数估算值为 4.0 mg/m^3 , 过量暴露概率为 0.273。混合效应模型显示, 造船行业和金属制造业、大中型企业和室内施焊电焊烟尘暴露水平明显增高 ($P < 0.05$); 而氩弧焊和良好通风处电焊烟尘暴露水平明显降低 ($P < 0.05$)。良好的通风可使同等焊接工艺的电焊烟尘浓度降低 34%。[结论] 上海市整体作业场所电焊烟尘暴露水平高, 可能会引起较大的健康风险, 应优先制定和开展电焊烟尘防控措施。行业、企业规模、焊接工艺种类、通风效果、作业点特征是影响电焊烟尘总尘浓度的主要因素。本研究也证实良好的通风可有效减少电焊烟尘总尘暴露。

关键词: 电焊烟尘; 总尘; 定量暴露评估; 混合效应模型; 暴露影响因素

Quantitative Exposure Assessment of Welding Fumes in Workplaces of Shanghai in 2012 LIU Mei-xia, YANG Feng, DING Wen-bin, GUO Wei-wei, QU Jing, YIN Yan, JIA Xiao-dong (Shanghai Municipal Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 200336, China). Address correspondence to JIA Xiao-dong, E-mail: xdjia@scdc.sh.cn • The authors declare they have no actual or potential competing financial interests.

Abstract: [Objective] To quantify the exposure levels of welding fumes in Shanghai's workplaces in 2012 and to explore the factors that impact the exposure levels. [Methods] An occupational hazard active surveillance program was conducted among 534 welders recruited from 204 workshops in 178 enterprises through three-stage sampling strategy. Personal sampling and gravimetric measurement were applied for total dust concentration of welding fumes. A questionnaire on site was used to collect the information about potential determinants for the welders. Descriptive statistics, mixed effect models, and probabilities of overexposure were utilized for quantitative exposure assessment. [Results] Totally 534 air samples were collected and the concentrations fit lognormal distribution. The geometric mean of dust concentration was $(1.6 \pm 3.9) \text{ mg/m}^3$. The percentage of the samples exceeding occupational exposure limit (OEL) reached 23.2%. The estimated arithmetic mean of the welding fumes samples was 4.0 mg/m^3 . The probability of overexposure reached up to 0.273. The results of mixed effect model showed that the exposure levels were significantly higher ($P < 0.05$) in shipbuilding, metal production enterprises, and large-medium sized factories, as well as factories with indoor welding, than the others in the same category, while the exposure levels in worksites using argon arc welding and with good ventilation were significantly lower ($P < 0.05$). The exposure levels in workplaces with good ventilation were decreased by 34% compared to those with bad ventilation in the same work conditions. [Conclusion] The exposure level of welding fumes in Shanghai's workplaces is very high, which might lead to increased risks of developing welder pneumoconiosis. It should set priority to formulate and implement effective interventions for workers exposed to welding fumes. Industry type, enterprise size, type of welding, location of welding activities, and effectiveness of ventilation are main determinants. This study also confirms the effectiveness of ventilation for welding fumes control.

Key Words: welding fumes; total dust; quantitative exposure assessment; mixed effect model; determinants of exposure

DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2014.0024

[基金项目] 上海市第三轮“公共卫生三年行动计划”学科人才建设项目(重点学科)劳动卫生学项目(编号: 12GWZX0502)

[作者简介] 刘美霞(1976—), 女, 硕士, 主管医师; 研究方向: 职业流行病学、职业暴露评估; E-mail: mxliu@scdc.sh.cn

[通信作者] 贾晓东, E-mail: xdjia@scdc.sh.cn

[作者单位] 上海市疾病预防控制中心职业卫生与中毒控制科, 上海 200336

电焊烟尘是焊接作业中最常见的职业危害因素, 可引起多种健康损伤, 如电焊工尘肺、金属烟尘热以及职业中毒、哮喘等。有研究表明电焊烟尘也可能是潜在职业致癌物, 可引起肺癌^[1]。

上海市电焊烟尘接触人数众多, 了解电焊烟尘接触水平及其健康危害是当前上海市职业病防治工作面临的重要问题。为客观反映作业场所电焊烟尘的浓

度,结合上海市“以职业病防治技术机构为主导,政府提供工作经费保障”的职业病危害因素主动监测工作,本课题组拟开展全市电焊烟尘监测,并进行电焊烟尘定量暴露评估。

定量暴露评估是近二十年由 RAPPAPORT 等^[2]逐步建立和发展的一种以统计学思想为指导的暴露评估方法。定量暴露评估的提出,明确了职业与环境危害因素监测的理论基础,使人们对监测数据的变异来源和监测策略有了更深刻的认识。然而目前我国对监测数据的处理和结果的判断方法仅限于单个监测数据与职业接触限值(occupational exposure limit, OEL)直接比较以及样品合格率^[3],定量暴露评估尚鲜见报道。本研究以电焊烟尘抽样检测的样本数据为基础,对劳动者在作业过程中接触的空气中电焊烟尘浓度的总体分布进行参数估计,然后运用混合效应模型分析影响电焊烟尘暴露的因素,最后基于我国电焊烟尘的 OEL 值和小概率风险,通过过量暴露概率法进行判定。

1 对象与方法

1.1 研究对象

以 2012 年上海市所有暴露于电焊烟尘的作业工人为研究对象总体。通过三阶段抽样法分层抽样,第一阶段以有电焊作业的企业为总体,采用 SAS 软件中“proc survey select”程序按照行业、企业规模进行分层随机抽取监测企业,抽样比例为 10%,此外将既往 3 年发生过电焊工尘肺的企业也纳入监测企业;第二阶段在确定的监测企业中随机抽取监测车间;第三阶段在确定的监测车间内随机抽取监测工人。共获得 178 家企业中 204 个车间的 534 名工人,样本具有一定的代表性。

1.2 现场调查

电焊烟尘监测调查问卷为封闭式,内容包括一般情况和影响因素。一般情况包括企业所在区县、规模及所属行业;影响因素包括管理因素如作业特征(持续作业/间歇作业),作业因素如焊接类型、作业类型(固定作业/移动作业),环境因素如焊接作业地点(有限空间作业/室内作业/室外露天)以及通风效果。由采样人员在现场采样过程中对采样对象和采样环境进行询问、观察和记录。

1.3 采样与检测

2012 年 4—12 月,按照《工作场所空气中有害物质监测的采样规范》(GBZ 159—2004)和《工作场所

空气中粉尘测定》(GBZ/T 192—2007)进行电焊烟尘的个体采样和检测。采用 Gillian 个体采样器及 37 mm 过氯乙烯滤膜,流量范围为 1~5 L/min。采样夹固定在工人衣领,进气口靠近工人呼吸带。每个正常工作日、下午各采样 1 h 或 2 h。采样时记录下被采样对象姓名、采样日期、采样场所、采样流量、采样时间、采样点的温度和气压。使用感量 0.01 mg 的分析天平对采样前、后的滤膜进行称重,根据滤膜的增量和采气量,计算空气中电焊烟尘总尘的时间加权平均浓度(time weighted average concentration, TWA)。

1.4 质量控制

电焊烟尘的采样与检测均由有资质的实验室和专业人员完成。对调查人员、采样人员及实验检测人员进行统一培训,统一操作标准。所有采样和检测纳入实验室质量管理体系。每次使用仪器前均进行检查,以确保其正常工作。采样前、后均将滤膜放置在恒温恒湿条件下直至衡重后,对滤膜进行称重。

1.5 统计学分析

1.5.1 描述性统计分析 各监测点电焊烟尘 TWA 值经对数转换后,采用中位数(median, M),四分位数(P_{25} , P_{75}),几何均数(geometric mean, GM),几何标准差(geometric standard deviation, GSD),算术均数(arithmetic mean, AM),算术均数标准差(standard deviation, SD),对数均数估算值 $\hat{\mu}_y$,算术均数估算值 $\hat{\mu}_x$ 和超标率对检测值进行统计描述和单因素分析,不同组中位数的比较采用非参数分析,不同组超标率的比较采用卡方检验或精确法检验。

1.5.2 混合效应模型^[2] 以各监测点电焊烟尘对数转化值为应变量,以相关影响因素为自变量,建立混合效应模型。运用多元线性回归模型识别混合效应模型中的固定效应,以 ΔAIC (Akaike's information criterion)的最小权重为筛选标准^[4]。主效应确定后,识别交互效应。随机效应则为不同企业。采用约束最大似然法(restricted maximum likelihood, REML)进行估算,并对模型的标准化随机效应和残差进行正态性检验,最后运用建好的混合效应模型预测不同条件下电焊烟尘组对数均数估算值 $\hat{\mu}_{y,h}$,按照公式(1)计算组算术均数估算值 $\hat{\mu}_{x,h}$,并对不同工作条件下 $\hat{\mu}_{x,h}$ 预测值进行比较。

$$\hat{\mu}_{y,h} = \exp(\hat{\mu}_{x,h} + \hat{\sigma}_{y,h}^2/2) \dots \dots \dots (1)$$

式中 $\hat{\mu}_{x,h}$ 为 h 组算术均数估算值; $\hat{\mu}_{y,h}$ 为 h 组对数均数估算值; $\hat{\sigma}_{y,h}^2$ 为 h 组总方差。

1.5.3 过量暴露概率^[2] 分别计算并比较超标概率(exceedance, γ_h)和过量暴露概率(probabilities of overexposure, θ_h)。超标概率指任何一次检测值 $X_{h(ij)}$ 超过OEL的概率。过量暴露概率是指同一相似接触组中随机选择的工人其算术平均暴露浓度 $\hat{\mu}_{X,h(i)}$ 超过OEL的概率。以过量暴露概率 $\theta_h<0.1$ 作为控制作业场所粉尘危害的标准。

根据电焊烟尘检测数据呈对数正态分布的特点,运用混合效应模型获得的组平均对数浓度算术估算值 $\hat{\mu}_Y$ 及组间方差 $\hat{\sigma}_{bY,h}^2$ 和组内方差 $\hat{\sigma}_{wY,h}^2$,分别按照公式(2)和公式(3)计算超标概率 γ_h 和过量暴露概率 θ_h 。

$$\gamma_h=P\{X_{h(ij)}>OEL\}=1-\Phi\left\{\frac{\ln(OEL)-\hat{\mu}_{Y,h}}{\sqrt{\hat{\sigma}_{bY,h}^2+\hat{\sigma}_{wY,h}^2}}\right\}\cdots\cdots\cdots(2)$$
$$\theta_h=P\{\hat{\mu}_{X,h(i)}>OEL\}=1-\Phi\left\{\frac{\ln(OEL)-\hat{\mu}_{Y,h}-\frac{\hat{\sigma}_{wY,h}^2}{2}}{\sqrt{\hat{\sigma}_{bY,h}^2}}\right\}\cdots(3)$$

式中OEL为职业接触限值,本研究取电焊烟尘时间加权容许浓度(permissible concentration-time weighted average, PC-TWA)=4 mg/m³; $X_{h(ij)}$ 表示对h组中第h组中第i人在第j个工作日的电焊烟尘检测值; $\hat{\mu}_{X,h(i)}$ 表示h组第i人电焊烟尘检测值的算术均数; $\hat{\mu}_{Y,h}$ 为h组对数均数估算值; $\hat{\sigma}_{wY,h}^2$: h组的组内方差; $\hat{\sigma}_{bY,h}^2$: h组的组间方差; $\Phi\{Z\}$: 正态分布下的Z

对应的概率,如Z=1.96时, $\Phi\{Z\}=0.05$ 。
所有统计分析均用SAS 9.2软件包完成。

2 结果

2.1 电焊烟尘检测值分布及暴露水平

534份个体采样样本的电焊烟尘检测值呈对数正态分布, $W=0.996$, $P=0.164$ 。其中, 124份样品超过国家电焊烟尘职业卫生标准(PC-TWA: 4 mg/m³), 超标率23.2%。电焊烟尘浓度中位数为1.5(P_{25} 为0.6; P_{75} 为4.0)mg/m³, 几何均数为(1.6±3.9)mg/m³。算术均数估算值 $\hat{\mu}_X$ 为4.0mg/m³。

2.2 电焊烟尘暴露水平及超标率的单因素分析

表1显示的是电焊烟尘暴露水平和超标率及其单因素分析结果,可见大、中型企业电焊烟尘的暴露水平和超标率均高于小型企业。造船行业电焊烟尘的暴露水平和超标率最高,超标率高达56.8%;其次是金属制品业。不同焊接工艺种类的暴露水平和超标率不同,二氧化碳保护焊的暴露水平和超标率最高,其后依次为手工焊;而埋弧焊、氩弧焊均未发现超标。有限空间的暴露水平最高,而室外焊接的最低。流动作业点焊接的暴露水平和超标率均高于固定作业点焊接。持续焊接作业的暴露水平和超标率均高于间歇焊接作业。通风对电焊烟尘暴露具有明显影响。通风效果差的工作场所,其电焊烟尘超标率高于通风效果好的。

表1 2012年上海市作业场所电焊烟尘暴露水平及超标率

Table 1 Exposure levels and percentages of samples exceeding occupational exposure limits of welding fumes in Shanghai's workplaces, 2012

分类 Classification		n	超标数(率) n>OEL(%)	中位数(四分位数) M($P_{25}\sim P_{75}$)(mg/m ³)	几何均数(几何标准差) GM(GSD)(mg/m ³)	算术均数(标准差) AM(SD)(mg/m ³)
全市(Total)	—	534	124(23.2)	1.5(0.6~4.0)	1.6(3.9)	3.8(6.7)
企业规模*** Enterprise size	小(Small-sized)	300	54(18.0)	1.0(0.4~3.2)	1.1(4.2)	3.1(6.1)
	中(Medium-sized)	162	46(28.4)	2.2(1.0~4.6)	2.2(3.2)	3.2(4.5)
	大(Large-sized)	72	24(33.3)	3.1(1.4~6.7)	3.1(2.7)	2.7(5.1)
行业**** Industry	金属制品业(Metal production)	169	45(26.6)	2.0(0.7~5.2)	1.9(3.9)	3.9(4.6)
	造船业(Shipbuilding)	44	25(56.8)	4.3(1.7~7.3)	3.6(2.9)	2.9(5.5)
	其他制造业(Other manufacturing)	200	36(18.0)	1.2(0.6~3.6)	1.3(4.0)	4.0(2.9)
	其他(Else)	121	18(14.9)	1.2(0.4~2.8)	1.2(3.8)	3.4(7.7)
焊接作业地点**** Location of welding activities	室外露天(Outdoor)	29	3(10.3)	1.1(0.3~1.9)	0.7(5.5)	5.5(1.6)
	车间内(Indoor)	480	105(21.9)	1.4(0.6~3.9)	1.6(3.8)	3.8(3.9)
	有限空间(Confined spaces)	24	16(66.7)	4.9(3.5~6.7)	4.6(1.6)	1.6(5.1)
作业特点* Task characteristics	连续作业(Continuous)	188	56(29.8)	2.0(0.6~4.8)	1.8(3.5)	3.5(3.5)
	间歇作业(Intermittent)	345	68(19.7)	1.4(0.6~3.7)	1.5(4.2)	3.9(7.6)
作业点特征*** Workplace characteristics	固定作业点(Fixed workplace)	350	70(20.0)	1.3(0.5~3.4)	1.4(3.8)	3.6(7.3)
	流动作业点(Unfixed workplace)	183	54(29.5)	2.1(0.9~5.6)	1.9(4.1)	4.1(4.2)

续表 1

分类 Classification		<i>n</i>	超标数(率) <i>n</i> >OEL(%)	中位数(四分位数) <i>M</i> (<i>P</i> ₂₅ ~ <i>P</i> ₇₅)(mg/m ³)	几何均数(几何标准差) <i>GM</i> (<i>GSD</i>)(mg/m ³)	算术均数(标准差) <i>AM</i> (<i>SD</i>)(mg/m ³)
通风效果** Effectiveness of ventilation	好(Good)	209	32(15.3)	1.3(0.5~.4)	1.3(4.1)	4.1(3.3)
	中(Medium)	282	81(28.7)	1.7(0.7~4.8)	1.7(3.7)	3.7(3.8)
	差(Bad)	43	11(25.6)	1.8(0.6~0.0)	2.0(4.1)	4.1(6.2)
焊接工艺种类*** Type of welding	手工焊(Manual metal arc welding, MMA)	191	42(22.0)	1.0(0.4~4.0)	1.1(4.7)	3.6(7.1)
	CO ₂ 气体保护焊(Gas shielded arc welding, GSAW)	306	82(26.8)	2.1(1.0~5.1)	2.2(3.3)	4.3(6.7)
	氩弧焊(Argon arc welding, AAW)	24	0(0.0)	0.5(0.2~0.8)	0.4(2.6)	0.6(0.7)
	气爆焊(Explosive welding, EW)	5	0(0.0)	0.6(0.4~0.6)	0.5(2.2)	0.7(0.5)
	埋弧焊(Submerged arc welding, SAW)	6	0(0.0)	1.6(1.2~1.7)	1.6(1.4)	1.7(0.7)
	其他(Other welding)	1	0(0.0)	0.6	0.6	0.6

[注]电焊烟尘的职业接触限值(OEL)为PC-TWA=4mg/m³。一检测点缺失焊接作业地点、作业特点、作业点特征、焊接工艺种类4个变量。卡方检验比较不同组的超标率,*:*P*<0.05;**:*P*<0.01。非参数检验比较不同组的浓度中位数,#:*P*<0.05;##:*P*<0.01。职工总数<300人,为小型企业;300~1999人,为中型企业;≥2000人,为大型企业。通风效果好:自然通风的气流组织合理;或机械通风排毒设施完善,新风量和换气次数始终能达到设计要求,作业场所电焊烟尘浓度不超过卫生标准。通风效果中:自然通风的气流组织基本合理;或具备机械通风排毒设施,新风量和换气次数略低于设计要求,作业场所电焊烟尘浓度接近卫生标准。通风效果差:自然通风的气流组织不合理;或机械通风排毒设施不完善,新风量和换气次数不能达到设计要求,作业场所电焊烟尘浓度超过卫生标准。

[Note]The Occupational exposure limit(OEL)of welding fumes is PC-TWA of 4mg/m³. One record is missing in the covariates including location of welding activities, task characteristic, workplace characteristic and type of welding. Chi-square tests and nonparametric tests were performed to compare the percentages of measurements exceeding OEL and the median of concentration, separately, between or among groups, with *: *P*<0.05, **: *P*<0.01 in Chi-square tests and #: *P*<0.05, ##: *P*<0.01 in nonparametric tests. An entity with <300 employees is classified as a Small-Sized enterprise; ≥300 and <2000 employers as Medium-Sized enterprise; ≥2000 employers as large-Sized enterprise. Natural ventilation with reasonable air distribution or mechanical ventilation with completed facilities, good compliance with the design requirements of fresh air volume and air change rate, and welding fume concentration less than OEL is regarded as good ventilation. Natural ventilation with general air distribution or mechanical ventilation with basic facilities, the compliance with the design requirements of fresh air volume and air change rate, and welding fume concentration closed to the OEL is regarded as good ventilation. Natural ventilation with unreasonable air distribution or mechanical ventilation with incomplete facilities, the noncompliance with the design requirements of fresh air volume and air change rate, and welding fume concentration over the OEL is regarded as poor ventilation.

2.3 混合效应模型中影响暴露水平的因素

混合效应模型中固定效应的β值见表2。从表2可以看出,固定其他暴露因素后,行业、规模、焊接工艺种类、通风效果和焊接作业地点等5个变量保留在最后的模型中。造船业(*P*=0.0272)和金属制品业(*P*=0.0101)的电焊烟尘暴露浓度显著高于其他制造业。大型(*P*=0.0116)、中型(*P*<0.0001)企业电焊烟尘暴露浓度显著高于小型企业。与手工焊相比,氩弧焊的电焊烟尘暴露浓度降低(*P*=0.0007);但CO₂气体保护焊、其他焊接与手工焊相比无差异。通风效果好的电焊烟尘暴露浓度低于通风效果差的(*P*=0.0251)。室内施焊的电焊烟尘暴露浓度高于室外露天施焊的(*P*=0.0103)。

同时应用混合效应模型预测不同工况条件下电焊烟尘的组算术均数估算浓度(表3)。从表3可以看出,在同一条件下,与通风条件差者相比,良好的通风可使电焊烟尘组算术均数估算值降低34%。同样,与室内施焊相比,室外施焊可使电焊烟尘组算术均数估算值降低52%。

表2 混合效应模型中确定的电焊烟尘暴露的影响因素
(固定效应)

Table 2 Factors influencing the levels of exposure to welding fumes in mixed effect model(fixed effects)

因素(Factors)	分类(Sort)	<i>β</i>	<i>P</i>
截距(Intercept)	—	-1.0841	0.0025
行业(Industry)	金属制品业(Metal production)	0.5723	0.0101
	造船业(Shipbuilding)	1.0082	0.0272
	其他行业(Else)	0.3476	0.1217
	其他制造业(Other manufacturing)	—	—
规模(Size)	大型企业(Large-sized)	1.0109	0.0116
	中型企业(Medium-sized)	0.9091	<0.0001
	小型企业(Small-sized)	—	—
焊接工艺种类 Type of welding	CO ₂ 气体保护焊 Gas shielded arc welding, GSAW	0.1346	0.3869
	氩弧焊(Argon arc welding, AAW)	-1.0781	0.0007
	其他焊接(Other)	-0.2407	0.4435
	手工焊 Manual metal arc welding, MMA	—	—
通风效果 Effectiveness of ventilation	通风好(Good)	-0.4177	0.0251
	通风差(Poor)	—	—
焊接作业地点 Location of welding activities	室内(Indoor)	0.8133	0.0103
	室外露天(Outdoor)	—	—

表 3 运用混合效应模型预测不同工况条件下电焊烟尘暴露水平

工况条件组合 (Combination of covariates)			造船业 (Shipbuilding)		其他制造业 (Other manufacturing)	
规模 Size	焊接工艺种类 Type of welding	焊接作业地点 Location of welding activities	通风好 (mg/m³) Good ventilation	通风差 (mg/m³) Bad ventilation	通风好 (mg/m³) Good ventilation	通风差 (mg/m³) Bad ventilation
大型 Large-sized	CO ₂ 气体保护焊 Gas Shielded Arc Welding, GSAW	室内 (Indoor)	5.1	8.3	3.7	6.0
		室外露天 (Outdoor)	2.4	4.0	1.7	2.8
	手工焊 Manual metal arc welding	室内 (Indoor)	4.4	7.2	3.2	5.2
		室外露天 (Outdoor)	2.1	3.4	1.5	2.5
	氩弧焊 Argon arc welding	室内 (Indoor)	1.5	2.4	1.1	1.7
		室外露天 (Outdoor)	0.7	1.2	0.5	0.8
中型 Medium-sized	CO ₂ 气体保护焊 Gas Shielded Arc Welding, GSAW	室内 (Indoor)	4.4	7.2	3.2	5.2
		室外露天 (Outdoor)	2.1	3.4	1.5	2.5
	手工焊 Manual metal arc welding	室内 (Indoor)	3.8	6.2	2.8	4.5
		室外露天 (Outdoor)	1.8	3.0	1.3	2.1
	氩弧焊 Argon arc welding	室内 (Indoor)	1.3	2.1	0.9	1.5
		室外露天 (Outdoor)	0.6	1.0	0.4	0.7
小型 Small-sized	CO ₂ 气体保护焊 Gas Shielded Arc Welding, GSAW	室内 (Indoor)	1.8	2.9	1.3	2.1
		室外露天 (Outdoor)	0.9	1.4	0.6	1.0
	手工焊 Manual metal arc welding	室内 (Indoor)	1.6	2.5	1.1	1.8
		室外露天 (Outdoor)	0.7	1.2	0.5	0.9
	氩弧焊 Argon arc welding	室内 (Indoor)	0.5	0.9	0.4	0.6
		室外露天 (Outdoor)	0.2	0.4	0.2	0.3

2.4 上海企业电焊烟尘的过量暴露概率

上海市不同行业、不同企业规模电焊烟尘的超标概率和过量暴露概率如表 4 所示, 可见上海市电焊烟尘的超标概率和过量暴露概率分别为 0.238 和 0.273。无论何种行业、何种规模, 过量暴露概率均超过超标

概率。所有行业、所有企业规模的过量暴露概率均大于 0.1。其中, 按行业分类以造船业过量暴露概率最高, 达 0.385, 按规模分类以大型企业过量暴露概率最高, 达 0.438。

表 4 2012 年上海市作业场所电焊烟尘超标概率和过量暴露概率

协变量 Covariates		组平均浓度对数估算值 Group mean (logged data)	组平均浓度算术估算值 Group mean (natural scale data)	组间方差 Between-group variance component	组内方差 Within-group variance component	超标概率 Exceedance	过量暴露概率 Probability of overexposure
全市 (Total)		0.452	4.019	1.539	0.573	0.238	0.273
行业 Industry	金属制品业 (Metal production)	0.263	3.683	1.510	0.571	0.218	0.248
	造船业 (Shipbuilding)	0.741	5.941	1.510	0.571	0.327	0.385
	制造业 (Other manufacturing)	-0.214	2.286	1.510	0.571	0.134	0.142
	其他 (Other industry)	0.010	2.859	1.510	0.571	0.170	0.187
企业规模 Size	大 (Large-sized)	0.917	6.686	1.394	0.573	0.369	0.438
	中 (Medium-sized)	0.598	4.859	1.394	0.573	0.287	0.335
	小 (Small-sized)	-0.204	2.181	1.394	0.573	0.128	0.135

3 讨论

本研究为职业病危害因素主动监测, 监测工作所需经费全部由疾病预防控制中心承担, 避免了以往日常监测受用人单位制约等影响因素, 同时在掌握总体的基础上, 通过分层随机抽样策略确定监测对象, 有效克服既往被动监测(企业职业病危害因素委托监测)中存在的严重的选择偏倚。事实证明, 本研究代表性好, 样本量大, 研究结果能合理的解释上海电焊

工尘肺高发^[5]的原因。此外, 本研究采用个体采样法进行采样, 相对于定点采样, 更真实地反映了劳动者电焊烟尘暴露情况。胡浩等^[6]的研究证实, 电焊烟尘的个体采样浓度明显高于定点采样浓度, 定点采样严重低估了劳动者电焊烟尘暴露水平, 可能由于定点采样器距离电焊烟尘发生源相对较远, 而个体采样器在工作呼吸带, 更接近电焊烟尘发生源。

本研究采用以混合效应模型为核心的定量暴露

评估方法。混合效应模型是一种对相关数据尤其是重复测量数据分析建模的方法。最早由 SYMANSKI 等^[7]应用混合效应模型进行职业暴露的长期趋势研究。与以往的暴露评估相比,定量暴露评估法具有以下优点:(1)开展了统计推断及统计预测,使结果更具有可推广性;(2)充分利用了监测信息,同时考虑了固定效应和随机效应,避免了信息损失;(3)混合效应模型充分考虑应用条件,适用于解决含有随机缺失数据的分析、观察单位重复测量次数不完全相同的情况,有效控制了以往数据分析中的偏倚,从而使研究结论更可靠。PERETZ 等^[8]比较了混合线性效应模型与多元线性模型,发现混合效应模型不仅能识别变量的影响因素,且能同时分析各因素对组内方差及组间方差的影响。由于组内方差及组间方差的分析有助于改善相似接触组的划分,有助于制定更有效的危害控制策略,可预测不同固定效应下的暴露水平,还可计算过量暴露概率,因此,混合效应模型在环境与职业危害的监督监测、暴露评估^[9-10]、危险度估计^[11]及环境与职业流行病学^[12-15]等领域得到越来越广泛的应用。本研究也证实,运用混合效应模型可分析电焊烟尘暴露的影响因素,并预测不同工况条件下电焊烟尘暴露水平,可为今后电焊烟尘的控制,电焊工尘肺的职业健康风险评估及预警预测提供依据。

本研究表明,整体上 2012 年上海市作业场所电焊烟尘暴露现状不容乐观。电焊烟尘总尘超标率为 23.2%。电焊烟尘算术均数估算值 $\hat{\mu}_x$ 为 4.0 mg/m³。有报道显示,英国、加拿大、美国、芬兰作业场所电焊烟尘浓度算术均数估算值($\hat{\mu}_x$)分别为 1.9、3.2、6.5、15.4 mg/m³^[4]。此外,本研究中随机选择的焊接作业工人其算术平均暴露浓度超过 OEL 的概率为 0.273,提示如果长期暴露于此浓度,可能会引起较大的健康风险。

既往研究报道显示,作业场所电焊烟尘暴露受工作负荷^[16]、焊接工艺^[4]、作业环境特征^[16]、通风^[17]等多方面因素的影响。本研究应用混合效应模型分析表明,行业、企业规模、焊接工艺种类、通风效果、作业点特征是影响上海市电焊烟尘总尘浓度的主要因素。其中,大中型企业电焊烟尘总尘浓度高于小型企业,与一般职业危害多集中在中小企业不一致,可能与大中型企业任务饱满、焊接作业负荷大有关。造船业电焊烟尘总尘浓度高于其他行业,LIU 等^[4]的调研结果与本研究一致,可能与造船业多在船体内或狭窄舱室内施焊,工作强度大,作业时间长,通风效果不

良等有关^[18]。2010 年上海市职业健康状况调查数据显示,上海市仅三大造船企业焊接作业工人就近万人,本研究发现,造船业的超标率高达 56.8%,造船业的过量暴露概率为 0.385,因此,对造船行业的电焊烟尘暴露必须给予高度重视,否则,可能造成电焊工尘肺病的群发。焊接工艺种类是影响电焊烟尘暴露浓度的重要因素^[4],可能与不同焊接工艺发烟率^[19-20]不同有关。本研究发现,CO₂ 气体保护焊和手工焊电焊烟尘暴露浓度相对高,而氩弧焊电焊烟尘暴露浓度相对低。作业环境特点影响电焊烟尘浓度,多数研究表明,有限空间内焊接电焊烟尘浓度最高,而室外露天作业相对较低^[21-22]。本研究结果与之基本一致,但本研究有限空间样品数较少,仅 24 份。通风尤其是局部通风是电焊烟尘控制的最重要的措施^[17]。本研究表明,良好的通风可使电焊烟尘总尘暴露减少 34%。

基于上述结果,本研究提出如下建议:首先,上海应优先开展电焊烟尘暴露控制,将电焊烟尘的防治工作纳入上海市职业病防治规划。其次,应加强对焊接作业的卫生监督,以造船业、金属制品业为重点行业,以大中型企业为重点企业,开展专项治理。再次,开展作业场所电焊烟尘干预,加强作业场所电焊烟尘通风效果的评价。最后,对焊接作业工人开展焊接作业职业卫生健康教育,如选择健康危害相对小的焊接工艺;通风不可行时,尽量在室外焊接;作业场所浓度超标时,需加强个体防护等。

本研究仅为 2012 年一次性的定量暴露评估,未能充分研究监测数据的个体内变异以及季节间变异。建议今后通过连续数天(一般不少于 3 d)采样监测,更精确地估算暴露水平,并结合接触时间和工龄,估算总的暴露剂量。同时通过长期监测,分析作业场所电焊烟尘暴露的时间趋势,从而评估作业场所电焊烟尘控制效果。本研究未考虑工人的个体防护,估算平均暴露浓度时可能会高估,今后需进一步研究个体防护装备下的工人个体采样方法。现场调查中判断通风效果时可能存在误分类偏倚,建议开展通风效果的评价,更精确地评价不同通风方式下电焊烟尘控制的效果。鉴于焊接材料对电焊烟尘的作用重大,今后应加以研究。此外,电焊烟尘中含有多种有毒物质,如锰、六价铬、镍等重金属以及氟化物等,今后应适时开展包括重金属在内的全面的暴露评估及健康风险评估。

(志谢:本文为上海现场流行病学二期培训时完成,得到康来仪教授、庄宇老师以及多位导师的指导

和帮助;上海各区、县疾病预防控制中心职业卫生工作人员参与本研究现场调查采样及实验室检测,特此一并致谢。)

·作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

参考文献:

- [1] International Agency for Research on Cancer. IARC Monograph on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 49: Chromium, Nickel and Welding [G]. Lyon, France: World Health Organization, 1990.
- [2] RAPPAPORT SM, KUPPER LL. Quantitative exposure assessment [M]. CA: El Cerrito, 2008.
- [3] 车望军, 张亮, 雷钊普, 等. 采用EASC-IHSTAT软件处理职业病危害因素监测数据的方法介绍及探讨 [J]. 环境与职业医学, 2013, 30(8): 631-633.
- [4] LIU S, HAMMOND SK, RAPPAPORT SM. Statistical modeling to determine sources of variability in exposures to welding fumes [J]. Ann Occup Hyg, 2011, 55(3): 305-318.
- [5] 彭娟娟, 吴世达, 江伟良. 上海市1949—2004年尘肺病发病情况研究 [J]. 环境与职业医学, 2006(3): 220-223.
- [6] 胡浩, 范衍琼, 谭剑明, 等. 定点采样和个体采样方法检测电焊烟尘(总尘)浓度差异分析 [J]. 职业卫生与应急救援, 2009, 26(4): 207-208.
- [7] SYMANSKI E, KUPPER LL, KROMHOUT H, et al. An investigation of systematic changes in occupational exposure [J]. Am Ind Hyg Assoc J, 1996, 57(8): 724-735.
- [8] PERETZ C, GOREN A, SMID T, et al. Application of mixed-effects models for exposure assessment [J]. Ann Occup Hyg, 2002, 46(1): 69-77.
- [9] WHITEHEAD TP, METAYER C, PETREAS M, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in residential dust: sources of variability [J]. Environ Health Perspect, 2013, 121(5): 543-550.
- [10] RICHMOND-BRYANT J, MENG Q, DAVIS JA, et al. A multi-level model of blood lead as a function of air lead [J]. Sci Total Environ, 2013(9): 461-462.
- [11] 王璐. 危险度评估中的多阶段混合效应模型 [D]. 南京: 南京医科大学, 2007.
- [12] SHIELDS KN, CAVALLARI JM, HUNT MJ, et al. Traffic-related air pollution exposures and changes in heart rate variability in Mexico City: a panel study [J]. Environ Health, 2013, 12: 7.
- [13] WITTKOPP S, STAIMER N, TJOA T, et al. Mitochondrial genetic background modifies the relationship between traffic-related air pollution exposure and systemic biomarkers of inflammation [J]. PLoS One, 2013, 8(5): e64444.
- [14] CHEN BY, CHAN CC, LEE CT, et al. The association of ambient air pollution with airway inflammation in schoolchildren [J]. Am J Epidemiol, 2012, 175(8): 764-774.
- [15] 何永华, 苗丽壮, 傅华. 混合效应模型在研究接触-效应关系中的应用 [J]. 工业卫生与职业病, 2007, 33(4): 193-196.
- [16] 桂杨茹, 吕同辉, 云霞, 等. 焊接烟尘的影响因素及其防护措施 [J]. 焊接, 2002(7): 35-36.
- [17] FLYNN MR, SUSI P. Local exhaust ventilation for the control of welding fumes in the construction industry—a literature review [J]. Ann Occup Hyg, 2012, 56(7): 764-776.
- [18] 杨文涛. 造船厂职业病危害因素识别与分析 [J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(6): 178-182.
- [19] 蒋建敏, 李现兵, 王智慧, 等. 焊接烟尘发生机理及其影响因素 [J]. 焊接, 2006(1): 7-11.
- [20] 闫红. 气体保护焊参数与焊接烟尘产生的关系 [J]. 焊接技术, 2009, 38(9): 25-27.
- [21] HOBSON A, SEIXAS N, STERLING D, et al. Estimation of particulate mass and manganese exposure levels among welders [J]. Ann Occup Hyg, 2011, 55(1): 113-125.
- [22] 彭凉, 毛革诗, 陆明, 等. 造船厂受限空间对作业工人焊尘接触水平的影响 [J]. 环境与职业医学, 2007, 24(5): 514-515; 518.

(收稿日期: 2013-08-06)

(英文编辑: 汪源; 编辑: 汪源; 校对: 丁瑾瑜)