

焊接作业环境电磁暴露的研究与进展

宋永伦^{1,2}

(1.中国焊接学会 焊接环境、健康与安全专委会,甘肃 兰州 730050;2.北京工业大学 机电学院,北京 100124)

摘要:关于焊接电磁场环境对操作人员产生影响的研究一直在不断发展,有关的概念、检测和分析方法也越来越明确,这有利于限制焊接电磁环境暴露并对已知的不利影响进行防护。对焊接电磁场的属性、暴露容限及其评价程序作了介绍,提供了一个对焊接电磁场影响的最新认识。

关键词:电磁场;暴露;焊接过程

中图分类号:TG408, TN03 **文献标识码:**C **文章编号:**1001-2303(2009)12-0012-06

Research and achievement on electromagnetic exposure from welding processes

SONG Yong-lun^{1,2}

(1.Welding Environment, Health and Safety Committee, Lanzhou 730050, China; 2.Dept. of Mechanical Engineering and Applied Electronic, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Ongoing public discussions on adverse effects of electromagnetic fields on the operator in welding environment, it requires the definition of relative concepts, measuring and analysis methods for these fields to establish guidelines for limiting EMF exposure that will also provide protection against known adverse health effects. An overview of the field properties in welding applications, permissible exposure values and possible assessment procedures are introduced and discussed. It may follow a thorough review of current scientific knowledge on the effects of EMFs and an extensive consultation exercise.

Key words: electromagnetic fields; exposure; welding processes

0 前言

电磁环境是电磁空间的一种表现形式,是指工作场所中所有电磁现象的总合,“工作场所”即“空间”,“所有电磁现象”包括了全部“时间”与全部“频谱”。电磁环境包括自然电磁环境和人为电磁环境,也指传输媒质中存在的电磁场或电信号。电磁环境(EME-Electromagnetic Environment)具体的研究对象是不断变化的,从最初的射频干扰(RFI)到电磁干扰(EMI)、电磁兼容(EMC)到电磁暴露(EMF)等问题。电磁环境效应的概念也随着电磁环境的变化而演变,先前的研究主要针对电力电子设备内部及设备间的电磁干扰问题,随着电磁场源的多样性变化,电磁环境效应的研究也扩大为电磁环境对生物特别是对人

体生理系统产生的影响,即电磁暴露问题。

随着工业用电设施越来越多的开发和应用,电磁场源的数量和多样性迅速增加。人体越来越多地暴露于电磁场中,电磁暴露问题成为电磁环境效应研究的一个重要方面,针对电磁环境对生物的影响,各个国家和地区已经进行了一系列研究,并逐渐形成了一门新的边缘学科——生物电磁学。生物电磁学是研究从直流到远红外电场、磁场和电磁场与生物系统相互作用的科学,包括生物体内源电磁场及生物组织电磁性质的测定、电磁场在生物医学中的应用,以及电磁场与人体相互作用的生物效应等。早期研究关注的是射频等高频电磁场对生物组织及其人体的影响,随着人民生活水平日益提高和对自身所处环境质量意识的增强,电场、磁场以及电磁场是否存在潜在的健康影响渐渐成为公众关注的焦点。世界卫生组织于1996年开始,启动了全球性的“国际电磁场计划”十年协同研究,到2007年,世界卫生组织(WHO)“国际电磁场计划”关于极

收稿日期:2009-12-10

基金项目:国家质检公益性行业科研专项基金资助项目(10-171)

作者简介:宋永伦(1952—),男,浙江鄞县人,教授,博士生导师,中国机械工程学会高级会员,中国焊接学会熔焊与自动化专业委员会委员,主要从事焊接物理、焊接自动化及焊接卫生与安全等方面的研究和教学工作。



低频(ELF)电场与磁场的健康风险评估已全面完成^[1]。WHO 关于极低频电场、磁场的《环境健康准则(EHC238)》、《制订以健康为基础的电磁场标准框架》等一系列最终结论性文件均已正式发布,为焊接生产环境下的电磁暴露研究提供了基本依据和导向。

1 不同频率电磁场的生物效应

WHO 从 1998 年至今,分别以“国际电磁场计划”信息发布文件的形式,在 WHO 网站上,公布了对不同频率电磁源与公众健康关系的官方意见。分别阐述了不同频率电磁源暴露对人体的不同影响、作用机理及安全限值。WHO 强调,不同频率的电磁源对生物体作用的机理是不同的,电磁场暴露(EMF)对生物系统产生何种影响,取决于电磁源的波长(频率)及其能量的大小。

电离辐射(IR)是频率极高的电磁波(X 射线与 γ 射线),它具有足够的光子能量可把原子或分子内的电子撞出,产生带正电荷的离子及带负电荷的电子,即产生电离。对生物体,它能断开细胞遗传物质分子中的 DNA 化学键,形成健康危害。

非电离辐射(NIR)是电磁频谱中频率和能量较低的频段部分(波长大于 100 nm)。在该频段中,光子能量太微弱,不足以产生电离以断开细胞分子间的化学键。NIR 包括紫外线(UV)辐射和可见光、红外线、微波与射频电磁波,以及极低频与静止的电场和磁场。不论非电离辐射的强度有多高,都不能在生物系统中引起电离。但是,NIR 会产生其他生物效应,例如发热效应和体内感应电流效应。WHO 强调,需区别“生物效应”与“健康危害”的实质性差别:当暴露引起某种可注意到或可检测到的生物系统内变化时,就认为是出现了生物效应;而当生物效应超出了生物体正常的代偿范围时,就对健康产生了负面影响,并导致某种健康危害^[2]。

2 焊接电磁暴露环境

焊接电磁环境研究的重点在于焊接设备的电磁兼容性以及焊接设备工作时操作人员的电磁暴露问题。焊接设备的电磁兼容是指焊接设备能够正常工作不受其他电子电气设备干扰且不对环境中其他设备产生干扰的一种兼容状态,国际电工委员会标准 IEC60974-10 中对弧焊电源的电磁兼容性做了明确的规定;另一方面电磁环境的研究不仅仅

关注设备与设备之间的相互干扰,而且涉及到电磁环境对人体和生物的影响,即电磁暴露问题。焊接电磁暴露问题主要考察在短期和长期的焊接工作环境下电磁场对现场操作人员的影响。需要明确的是,电磁暴露与电磁辐射对人体的作用机理是不同的,焊接电磁暴露研究的是焊接过程电磁场的存在形式及其对生物体的影响,在研究中要与电磁辐射的内容区别开来。电磁辐射是无线通信和电磁兼容专业技术领域的一个专用工程术语,是指能量以电磁波的形式由发射源到空间的现象,或指能量以电磁波的形式在空间传播。而电磁暴露问题的研究既包括电磁波对人体的影响,又涵盖了低频电磁场对人体的作用。焊接电磁暴露环境的研究首先要确定焊接过程电磁场的频率以及焊接电磁场对人体的作用形式。

焊接电磁暴露环境的研究属于焊接环境安全问题的范畴,目的在于保护焊接作业人员的健康,研究最终应给出焊接电磁暴露环境的风险评估。焊接电磁暴露研究与电磁生物学的研究是紧密相连的,电磁暴露风险评估以及暴露阈值的确定都是基于生物学的研究,包括电磁场对生物的作用机制、生物对电磁场作用的承受能力等研究。从焊接过程电磁场的场源着手分析电磁场的特点以及人体暴露于焊接电磁场环境中所受的影响,根据相关的标准评估电磁暴露环境,避免电磁场对人体健康产生危害。

常见的焊接方法有弧焊、电阻焊和高频焊等。其中高频焊的加热机理是应用了高频电流的两大效应:集肤效应和邻近效应,使焊件待焊处的表层金属快速加热而实现各种形式的焊接(包括钎焊)。高频焊通常使用的电流频率范围为 300~450 kHz,而弧焊和电阻点焊焊接电流频率一般为几 Hz 到 60 kHz。这两个频率段的电磁场存在形式是不同的,100 kHz 的频率范围电场、磁场分别以场的形式存在;当电磁波频率达到 100 kHz 以上时,其能量以电磁波的形式传播。

电磁场标准可以是针对某装置的电磁排放限值,也可以是针对人体暴露的限值,这种暴露是由工作环境中产生电磁场的装置造成的。从暴露标准是针对人体的限值这一概念出发,国内常提及的电磁场环境质量标准应归类为暴露标准。高频焊过程中,焊接电磁暴露研究也涉及电磁辐射相关的内容。



3 国内外的现状

近年来,对外部低频磁场在人体内产生感生电场和电流的研究已得到了社会和各专业领域的重视,事实表明,当场强达到一定值时,会导致神经和肌肉的刺激,并引起中枢神经细胞兴奋性的变化。根据国际电磁场计划的评估结论^[1],世界卫生组织明确推荐国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)《限制时变电场、磁场和电磁场(300 GHz 以下)暴露的导则(1998,简称 ICNIRP 导则)》以及电气与电子工程师学会/国际电磁安全委员会(IEEE/ICES)负责制定的《关于人体暴露到 0~3 kHz 电磁场安全水平(IEEE std C95.6-2002)》标准作为制定全球标准的基础;要求各成员国采用上述国际标准,并将其纳入国家法规体系。

世界卫生组织(WHO)一直密切关注由于暴露于电磁场下而导致的健康效应,并且开展了环境健康标准项目,整个项目由联合国环境项目(UNEP)资助,用于评估频率范围在 0~300 GHz 之间的静态以及时变电磁场暴露对健康和环境的影响。该项目的研究结果由国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)负责评估,对非电离辐射的健康防护提供建议和指导,并于 1994 年和 1998 年分别颁布了静态电磁场和时变电磁场的暴露限值导则。除此之外,该项目还包括以下几个部分:物理特征、测量方法和仪器、应用软件、现阶段生物效应文献的调研。

美国电气及电子工程师学会(IEEE)于 2002 年制定的《IEEE Standard For Safety Levels With Respect To Human Exposure To Electromagnetic Fields,0~3 kHz》针对受控环境和公众环境分别规定了人的头部和躯体最大磁场允许暴露值,这些限值的规定是为了避免短时磁场暴露对人体的有害影响。

欧洲电工标准化委员会(CENELEC)以 ICNIRP 导则为蓝本规定了焊接环境的电磁安全防护标准,已被部分欧盟国家采纳,并与 2008 年在整个欧盟成员国推行。德国是采用 ICNIRP 限值立法的第一个国家;英国国家辐射防护委员会(NRPB)2004 年建议将 ICNIRP 限值作为英国电磁防护的国家标准;澳大利亚对工频磁场的限值规定也与 ICNIRP 导则相同^[3-9]。国际电工委员会 IEC62226 系列标准计划在感应电流密度和内部电场的计算框架内重新组合一些国际标准和技術报告,并以通用标题出版,通用标题为:处于低频和中频电场或磁场—人体内感应的电流密度和内部电场的计算方法。国际标准

IEC 62226 由 IEC106 技术委员会筹备,其主要内容为人体暴露涉及的电场、磁场和电磁场的评估方法。目前 IEC62226 系列标准已经颁布了标准的总则和处于磁场、电场中的人体二维模型。IEC62226 系列标准的推出使电磁暴露的评估从检测手段到数值模拟的计算有章可循,并为各个国家制定相关标准提供了数值模拟方面的依据。

2004 年欧盟提出了工人暴露于电磁场的最低安全与健康标准《The EU directive 2004/40/EC》,该标准明确要求电气设备的生产制造商出示相关的技术参数指标,并且要求雇主对工作场所的电磁场情况进行评估,其结果要遵从欧洲低压电气指令《Low Voltage Directive 73/23/EEC》。这些标准通过限定电气设备所产生的电磁辐射允许范围来保障工人的健康和安^[6]。英国焊接研究所 TWI(The Welding Institute)于 2005 年为世界卫生组织提供了一份关于焊接过程电磁场检测与分析报告,研究人员针对焊接环境的场源、频率特征、强度范围等特点自行研制了一套电磁场测量系统,包括电磁场传感器、调制电路和评估软件^[7],同时,结合不同焊接设备和工艺也进行了测量和评估方法的研究。研究为 CENELEC 制订焊接环境电磁安全防护标准提供了理论根据和试验基础,并且有效地推动了相关标准的实施。同时,焊接行业的主要设备如弧焊、点焊等将受到以上标准的制约,如 2008 年实施的英国标准 BS EN50444,由弧焊设备导致的人体电磁暴露安全评估标准;BS EN50445,弧焊、电阻焊设备符合人体电磁暴露基本限值的相关产品标准。以上基本标准制定了评估方法(包括测量、计算过程)并且对测量设备及步骤进行了详细描述,其中数值计算方面借鉴了 IEC62226 系列标准中处于低频和中频磁场、电磁中的人体二维模型,提高了标准的可执行性。

我国目前使用的电磁场暴露标准有卫生部颁布的《环境电磁场卫生标准》(GB917521988)、《作业场所微波辐射卫生标准》(GB1043621989)、《作业场所高频电磁场职业接触限值》(GB1855522001),以及国家环境保护局发布的《电磁辐射防护规定》(GB870221988)等。这些限值主要是依据流行病学的调查结果,并辅以动物实验和理论推算结果确定的,与大部分西方国家的标准有很大差别。这些标准在降低作业场所和环境中的电磁场暴露水平方面起到了很好的作用,但由于国家环保局和卫生部规定的限值不一,在一定程度上造成国内相关机构、企业和

用户的无所适从,特别是加入 WTO 后,面临与国际主要组织的电磁场暴露限值协调统一的问题;另一方面随着经济社会的发展,信息发射设施、电磁能利用设备、高压输变电设施和电牵引交通设施的建设和应用越来越广泛,由于我国人口众多,人口密集,上述产生电磁能的设施(设备)在建设或安装时往往与周围电磁敏感建筑和敏感设施距离很近(如移动通信基站、电牵引交通设施由于功能需要,必须安装在人口密集区)。因受土地及资金的限制,这些敏感建筑又不能安置到距离足够远的合理位置。特别是 20 世纪 90 年代开始,我国城市化建设如火如荼,城市的扩张使新建的敏感建筑和设施“主动”向电磁源靠拢。由此可见,必要在吸收各类研究成果的基础上对现行标准进行修订,对空间环境日趋增长的电磁场强度设定一个科学的、可操作的暴露限值,为贯彻《中华人民共和国环境保护法》,满足电磁环境管理需要,完善国家环保标准体系,防止电场、磁场、电磁场污染,保障公众健康,环境保护部门已经着手修订国家环境保护标准《电磁辐射防护规

定》(GB8702-88),于 2008 年 11 月发布了《电场、磁场、电磁场防护规定》的征求意见稿。在焊接电磁暴露问题方面,国家标准委员已开展制定适合我国国情的焊接电磁环境标准。焊接电磁暴露的研究是在国际电磁场计划的指导下进行,从低频电磁暴露可能引起的效应出发,基本完成了焊接电磁场防护标准的两个文件的讨论稿^[10]。

世界卫生组织把电磁场标准分为三类,即:暴露标准、排放标准和测量标准。综合分析国内外的研究现状,涉及到人体暴露于电磁场的相关标准概况如表 1 所示。从表中可以看出,在国际电磁场计划的指导下,电磁场相关标准的制定,在世界范围内逐渐形成共识,焊接电磁暴露标准的制定也应该在国际电磁场颁布的文件《制订以健康为基础的电磁场标准框架》指导下进行。近年来,我国有关单位和研究人员进行了大量的检测已表明,焊接过程中某些场合的磁场强度远远超出 ICNIRP 导则规定的限值,因此,研究焊接过程电磁暴露问题,采取适当的防护措施来减少焊接过程电磁暴露的危害是十分必要的。

表 1 国内外对人体暴露于电磁场的相关标准

Tab.1 Relevant standards of human exposure to electromagnetic fields

标准名称	颁布机构	颁布时间	标准类型	备注
限制时变电场、磁场和电磁场暴露(300 GHz 以下)导则	ICNIRP	1998	暴露标准	WHO 推荐标准
关于人体暴露于 0~3 kHz 电磁场的安全水平标准 (IEEE std.C95.6-2002)	IEEE	2002	暴露标准	WHO 推荐标准
IEC62226 处于低频和中频电场或磁场—人体内感应的电流密度和内部电场的计算方法	IEC	2007	测量标准	—
IEC61786 关于人体暴露的低频电场和磁场的测量、仪表的特殊要求和测量指南	IEC	1998	测量标准	—
BS EN50444 评估人体暴露于电弧焊及相关工艺设备产生的电磁场的基本标准	英国	2008	测量标准	参考 IEC62226 标准
BS EN50445 弧焊、电阻焊设备符合人体电磁暴露基本限值的相关产品标准	英国	2008	暴露标准	依照 ICNIRP 导则制定
电场、磁场、电磁场防护规定	中国	2008	暴露标准	依照 ICNIRP 导则制定

4 焊接电磁暴露环境的研究与实施方法

电磁暴露的研究目的在于防止电磁暴露危害人体健康,因此电磁暴露研究的是电磁场的生物效应及对人体的影响。焊接电磁暴露研究遵循国际电磁场计划推荐的指导方针,主要考察焊接电磁暴露引起的人体感应电流密度是否超出国际电磁场计划推荐的 ICNIRP 国际导则和 IEEE/ICES 标准规

定的暴露基本限值。在上述文件中,由于基本限值通常难以测量,因此把其他一些量引入到实际暴露评估中,用以确定是否超出基本限值。相关的物理量包括电场强度、磁场强度、磁通密度等。超过参考水平并不表示就一定超出的基本限值,在这样的情况下,必须检测与相关基本限值的相符性,并且确定是否需要附加的保护措施。为了慎重考虑,电磁环境的研究通常采用 4 种方法同时进行,只有各种方式

研究成果相互吻合时才能定为标准^[1]。

第一种方法是进行计算电磁学研究。目前主要用时域有限差分法(FDTD)或有限元法进行计算机模拟。分区越细,尺寸越接近真实,模拟的人体结构越细致得到的结果就越真实,就越具有参考价值。在进行 FDTD 模拟时,关键在于处理好电磁场源建模、吸收边界条件、计算机内存、数值色散和误差等问题。基于计算电磁学研究的电磁环境仿真有两种方法,一种是功能仿真,另一种是信号仿真。二者的区别是:功能仿真对电磁环境的功能、特性参数进行模拟,并不对具体信号的频率、相位进行模拟,所以它建立的是统计模型;信号仿真建立的是精确的数学模型,对具体信号的频率、相位进行仿真。

第二种方法是进行模型测试研究。测试对生物模型进行,特别是人体模型。在精确的人体模型中充满与人体实际生物组织相同的导电材料和绝缘材料,糖和盐是常用的原料。有的研究还在相应部位填充动物器官,如猪血、牛脑浆等等,力求接近真实。此外,对路试手段要求也很高,要在完全没有电磁干扰的环境中进行,测试设备和传感器的精度和尺寸都应该适应测试要求,通常需要特殊制作。

第三种方法是进行动物活体测试。最常用的动物是老鼠和兔子,测试要有对照组,要有足够的数

量和较精确的放养环境。显然,测试结果用于人体时需要进行适当的修正,其结果只能作为参考。

第四种方法是进行流行病学调查研究。针对不同生活和工作环境的人群进行主述式问答和定期身体检查,找出生理和病理变化与电磁环境的相关性。流行病学调查研究必须针对大量的人群,采取统计分析方法反复研究,尽量采取各种科学的客观的方法,以便得到分散性小的可靠结论。

综上所述,电磁环境的研究方法及特点如表 2 所示。从表中可以看出研究方法 with 电磁暴露标准建立的关系,焊接电磁暴露环境的建模与仿真采用计算电磁学的方法,为电磁暴露的评估提供数据。在焊接电磁暴露研究中,关注的参考限值一般是磁场强度或磁通量密度。目前,焊接电磁暴露的研究一般采用测量与数值模拟相结合的方法如见表 3 所示。在研究中采用低频电磁场测量装置测量得到磁场的场强值,对于超过参考限值的暴露情况,一般采用数值模拟计算的方法考察是否超过基本限值。在焊接电磁暴露研究中,数值模拟计算的方法不仅用于计算基本限值,还用于辅助考察磁场场强,这是由于焊接电磁环境较为复杂,而测量装置和测量方法都具有一定的局限性,如低频磁场测量装置一般为定点测量,测量方法对环境边界条件的描述具有较大误差,使系统研究受到一定局限。

表 2 电磁环境的研究方法及特点

Tab.2 Research methodology and the characteristics of electromagnetic environment

方法	焊接暴露研究内容	与电磁暴露标准的关系	备注
计算电磁学	电磁场场源的建模仿真对人体影响的计算	通过计算提供与参考限值、基本限值进行比较的数据	IEC62226
模型测试	对电磁场环境下人体模型进行测试	通过测量提供与基本限值进行比较的数据	参见标准 IEC 62209
动物活体测试	对电磁场环境下动物活体进行测量及观察	提供生物学数据,提高标准建立的可靠性	标准制定的技术支持
流行病学调查研究	对焊接环境下的操作人员进行主述式的问答和定期身体检查	提供标准制定的调查依据,提高标准制定的科学性	标准制定的技术支持

表 3 焊接电磁暴露标准主要内容

Tab.3 Standards content of human exposure to welding electromagnetic field

标准名称	主要参数	限值	建议评估方案	备注
焊接设备电磁场检测与评估准则	电磁场的时域特征	电场限值	测量评估方案	限值标准参考 ICNIRP 导则
	电磁场的频域特征	磁场限值	数值评估方案	
焊接设备电磁场对操作人员影响程度的评价准则	暴露于电磁场的感生电场和感生电流密度	参考限值 基本限值	特定焊接电磁暴露环境下的数值评估方案	限值标准参考 ICNIRP 导则

5 关于焊接电磁场防护的一般信息

在焊接设备的操作手册上应提供以下关于电磁场防护的一般信息:

(1)当电流通过任何导体时将会产生局部电磁场(EMF),且分布在焊接设备及其回路的周围。

(2)电磁场对某些医学植入装置产生干扰,如心脏起搏器等。为此要采取相应的防护措施,例如,设置专用人员通道或对操作人员做出专门评估。

(3)所有焊接人员必须遵从以下操作方法以便减少操作人员在焊接回路电磁场中的暴露:

- a. 在可能情况下,把焊接电缆扎在一起走线。
- b. 在焊接作业中使身体和头部尽可能远离焊接回路。
- c. 不要把焊接电缆盘绕在身体上。
- d. 避免在焊接电缆之间进行焊接作业,将焊接电缆置于操作人员的同一侧。
- e. 将与工件连接的地线尽可能靠近焊接实施的区域。
- f. 在焊接作业中不可坐、靠或贴近焊接电源。
- g. 在焊接作业中不可同时手提焊接电源或送丝机。

6 结论

对焊接电磁暴露环境的研究及其标准的建立,对于构建和谐社会、坚持以人为本、保障劳动者的切实利益、推动我国国民经济又好又快地可持续发展具有重要的现实意义。同时,也需要得到广大焊接工作者的支持与共同努力,促进和推动有关标准

的顺利实施。

参考文献:

- [1] WHO. 极低频环境健康准则 2007[S].
- [2] 张军,王世莹,宋永伦,等.不同直流弧焊电源输出电缆周围的低频磁场的研究[J].电焊机,2009,39(3):80-82.
- [3] ICNIRP guidelines: Guidelines for Limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields[J].In: Health Physics, 1998, 74(4):494.
- [4] BGV B11 (VBG 25) Regulations for the prevention of industrial accidents, Electromagnetic Fields, 2001. Edited by the GERMAN PROFESSIONAL Association OF PRECISION MECHANICS AND ELECTRICAL ENGINEERING(BGFE)[S].
- [5] Maximum Exposure Levels to Radiofrequency Fields -3 kHz to 300 GHz[S].Standards Australia, 2002.
- [6] International workshop organized by VITO. Electromagnetic Fields of Welding Equipment in the Framework of the DIRECTIVE 2004/40/EC[S].Workshop Handbook, 2006.
- [7] Research report 338 for HSE[S].Measurement and analysis of magnetic fields from welding processes, TWI, 2005
- [8] BS_EN50444-2008, Basic standard for the evaluation of human exposure to electromagnetic fields from equipment for arc welding and allied processes[S].
- [9] BS_EN50445-2008, Product family standard to demonstrate compliance of equipment for resistance welding, arc welding and allied processes with the basic restrictions related to human exposure to electromagnetic fields (0 Hz-300 GHz)[S].
- [10] 彭亚萍,宋永伦.中国焊接环境与健康安全现状思考[J].电焊机,2006,36(5):1-6.
- [11] 王世莹,张军,宋永伦,等.电阻点焊电磁环境的仿真[J].电焊机,2009,39(6):63-65.

