

业健康监护工作。此外,应督促作业人员做好个人防护,尤其督促接尘和接噪工人佩戴好防尘口罩和防噪耳塞,减少职业危害。

参考文献

[1] 樊乃根. 某塑料制品有限公司职业病危害控制效果评价[J]. 中国城乡企业卫生, 2015, 30(5): 90-92.

[2] 梁道康, 刘仿. 某塑料制品有限公司341#涂装生产线扩建项目职业病危害控制效果评价[J]. 职业与健康, 2005, 21(1): 97-99.

[3] 贾晋阳, 王雪涛, 徐洋, 等. 北京市某桥梁厂职业病危害现状与对策[J]. 中国工业医学杂志, 2019, 32(6): 483-485.

[4] 邹立海. 工业通风评价方法[J]. 中国卫生工程学, 2019, 18(1): 155-158.

(收稿日期: 2021-02-08; 修回日期: 2021-07-09)

铜铟镓硒薄膜太阳能电池生产职业健康风险分析

Analysis of occupational health risk in copper-indium-gallium-selenium thin film solar cells production

王剑

(世纪万安科技(北京)有限公司, 北京 100029)

摘要: 采用国际采矿与金属委员会(ICMM)职业健康风险评估法的定量、定性评估模型对铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳能电池生产中的职业健康风险进行评估。结果显示, 职业病危害因素有硫化氢, 硒化氢, 铜烟, 铟、镓、镉及其化合物, 氧化锌, 铅烟, 二氧化锡, 挥发性有机化合物(VOC), 噪声等; 硫化氢、铜烟存在职业健康潜在风险, 铅烟、二氧化锡和噪声存在中、高风险危害。该行业自动化、密闭化程度较高, 危害因素种类和职业健康风险低于晶硅、非晶硅太阳能电池生产, 可能产生的纳米颗粒物的健康效应需要进一步观察。

关键词: 铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳能电池; 职业病危害; 职业健康风险评估; 国际采矿与金属委员会(ICMM)法

中图分类号: R135 **文献标识码:** B

文章编号: 1002-221X(2022)02-0173-04

DOI: 10.13631/j.cnki.zggyyx.2022.02.025

中国能源转型和光伏发展政策将使光伏发电比重逐年增加, 对太阳能电池和组件的需求大幅提升。当前太阳能电池行业呈现多元化发展, 有晶硅、非晶硅薄膜太阳能电池和化合物薄膜(如铜铟镓硒, CIGS)太阳能电池, 还有处于研发阶段的染料敏化太阳能电池、有机太阳能电池和钙钛矿太阳能电池等^[1]。晶硅和非晶硅太阳能项目的危害分析和预防控制均有研究报道^[2-5], 对化合物薄膜电池生产的职业病危害研究较少。为全面了解太阳能电池行业生产中的职业病危害, 本次对CIGS薄膜太阳能电池组件生产过程中的职业病危害进行分析, 并对其职业健康风险进行评估。

1 对象与方法

1.1 对象 以某300 MW CIGS薄膜太阳能电池生

产项目为研究对象, 产品为双玻组件和柔性组件。以北京某低碳研究所磁控溅射镀膜设备作为本行业核心设备分析的类比对象, 同时选择已运行的太阳能电池组件生产企业进行分析。以国内外各类太阳能电池行业的调查研究和技术文献作参考。

1.2 方法

1.2.1 国际采矿与金属委员会(ICMM)职业健康定性风险评估 ICMM职业健康定性风险评估^[6]是在职业病危害因素接触可能性或接触频率不同的情况下, 结合该因素的健康危害后果, 运用矩阵分析评价劳动者可能承担的健康风险, 并选择、实施与健康风险相适应的危害控制措施。定性评估矩阵见表1。

1.2.2 ICMM定量评估模型^[6]

$$RR = C \times PrE \times PeE \times U$$

式中: RR —职业健康风险等级值, ≥ 400 —不可容忍的风险、 $200 \sim 399$ —非常高的风险、 $70 \sim 199$ —高风险、 $20 \sim 69$ —潜在的风险、 < 20 —可容忍的风险。 C —职业健康后果, 按健康后果严重程度进行赋值, 健康风险等级1~4级对应的赋值分别为1、15、50、100。 PrE —暴露概率, 指超过职业接触限值的可能性, 3—低、6—中、10—高。 PeE —暴露时间, 按劳动者职业病危害因素接触时间不同进行赋值, 0.5—每年暴露1次、1—每年暴露几次、2—每月暴露几次、6—每班连续暴露2~4 h、10—每班连续暴露8 h。 U —不确定性, 指 C 、 PrE 、 PeE 的综合不确定性赋值, 1—确定、2—不确定、3—非常不确定。对被评价岗位的各项参数赋值并计算健康风险, 对照风险等级划分标准确定风险等级。

作者简介: 王剑(1970—), 男, 工程师, 主管医师, 长期从事职业健康与职业病危害评价工作。

表1 定性评估矩阵

健康风险等级	健康危害描述	控制措施有效性等级		
		低(0%~50% OEL)	中(50%~100% OEL)	高(>OEL)
1	在此接触水平暴露因素不太可能对健康造成影响	无/风险非常低	低风险	中风险
2	不危及生命的可逆健康影响	无/风险非常低	低风险	中风险
3	永久性不良健康影响,但不会显著影响生命质量和寿命;健康影响可能是导致职业和生活方式变化的轻度功能受限或残疾	低风险	中风险	高风险
4	永久性不良健康影响,并可能导致生活质量和/或寿命的显著下降;持续接触可能导致永久性的生理或精神障碍,或长期功能障碍性疾病	低风险	中风险	高风险

2 结果

2.1 工艺分析 以柔性不锈钢薄板作为衬底,采用集成一站式磁控溅射工艺,在线沉积太阳能电池薄膜各层,生产出太阳能电池片后组装成电池组件,包括柔性电池组件和双玻基电池组件。太阳能电池片工艺流程:不锈钢卷清洗→CIGS 薄膜沉积→电池片切割

→层压封装带+金属线装配→电池带切割→电池带封装。玻璃基/柔性电池组件生产线将小面积电池片通过金属线连接,铺设于玻璃/柔性衬底上,层压封装成双玻/柔性组件,安装接线盒。主要岗位采用设备巡检,层压和封装采用自动化生产,接线盒封装为焊接工操作。采用四班三运转工作制度,每班8 h。

2.2 原辅材料 本项目生产使用的主要原辅料见表2。

表2 各生产工序使用的主要原辅料

车间	生产工序	原料及辅料
电池片生产线	清洗	不锈钢卷、水
	物理沉积	CIG 靶材、AZO 靶材、CdS 靶材、Mo 靶材、Ti 靶材、硒球氙气、氮气、氧气、氢气
双玻组件生产线	层压封装	光伏背板玻璃、面板玻璃、密封胶
	接线盒焊接	焊锡丝、灌封胶
柔性组件生产线	层压封装	柔性前板、铝箔复合膜背板、丁基热熔胶
	接线盒焊接	焊锡丝、灌封胶

2.3 职业病危害因素分析 电池片和组件生产采用自动化流水线,除生产流水线运行产生噪声外,切割、层压设备以及气动仪表和厂房内设置的通风设施均可产生噪声。电池金属线连接和接线盒焊接产生铅烟和二氧化锡,磁控溅射镀膜和电池片切割可产生金属和非金属有毒粉尘。封装和密封使用灌封胶和丁基热熔胶可逸散出挥发性有机化合物废气。磁控溅射设备频率20 MHz,运行中产生高频电磁场。见表3。

表3 CIGS 薄膜太阳能电池生产主要职业病危害因素分析

生产线	工序	职业病危害因素
电池片	清洗	噪声
	磁控溅射	金属及化合物烟尘(铜、钢、镉、氧化锌等),硫化氢,窒息性气体(氙气、氮气、氢气),噪声,高频电磁场
	电池片切割	金属及化合物粉尘(铜、钢、硫化镉、氧化锌等),噪声
双玻组件	层压封装	VOC、噪声
	接线盒焊接	铅烟、二氧化锡、VOC
柔性组件	层压封装	VOC、噪声
	接线盒焊接	铅烟、二氧化锡、VOC

2.4 防护措施

2.4.1 防毒 对磁控溅射和层压等设备配套设计一体化排风及尾气吸附设施;于切割设备和焊接作业设计局部排风设施并配套废气吸附净化装置,有组织地收集产生的金属烟尘和封装过程逸散的有机废气;生产厂房设置全面通风系统,并进行空气调节。

2.4.2 防噪 合理布置噪声源,对空压机、电机、水泵、空调机组等噪声设备设置动力设备间与生产厂房分离,采用集中控制、人机分离操作方式;噪声源设备间密闭并采用隔声板、吸声材料;动力设备基础采用减振材料。空调净化排风系统的主排风管和通风机的进出管口安装消声器,管道进出口加柔性连接。

2.4.3 防非电离辐射 磁控溅射设备在运行过程中可能产生高频电磁场,设备配备金属外壳,设置独立接地装置。

2.5 职业健康风险评估 应用 ICMM 评估方法定量评估模型对 CIGS 太阳能薄膜电池生产各主要岗位进行评价,电池片生产巡检作业可能接触的金属和非金属烟尘、硫化氢存在潜在风险,噪声风险评估结果属

于非常高的风险；电池组件的接线盒焊接中接触铅烟和二氧化锡，存在不可容忍的风险；电池组件巡检岗位的噪声风险评估结果属于非常高的风险。应用定性风险评估矩阵法评估生产中存在的噪声为职业健康中

等风险，电池片巡检作业可能接触的金属和非金属烟尘为低风险，接线盒焊接中接触铅烟和二氧化锡为中等风险。见表 4。

表 4 CIGS 太阳能薄膜电池生产岗位职业健康定量及定性评估结果

岗位	职业病危害因素	危害后果	定量评估					定性评估			
			C	PrE	PeE	U	RR	风险等级	危害等级	防护有效性等级	风险等级
电池片巡检	硫化氢	黏膜刺激	1	3	6	1	18	可以容忍	1	低	无
		中毒死亡	1	3	6	2	36	潜在	4	低	低
	硒及其化合物	黏膜刺激	1	3	6	1	18	可以容忍	1	低	无
		慢性中毒	1	3	6	2	36	潜在	2	低	无
	铜烟	黏膜刺激	1	3	6	1	18	可以容忍	1	低	无
		金属烟热	1	3	6	2	36	潜在	3	低	低
	铜及其化合物	肺部炎症	1	3	6	1	18	可以容忍	1	低	无
		慢性中毒	1	3	6	2	18	潜在	2	低	无
	镉及其化合物	肺部炎症	1	3	6	1	18	可以容忍	1	低	无
		慢性中毒	1	3	6	2	36	潜在	4	低	低
	氧化锌	黏膜刺激	1	3	6	1	18	可以容忍	2	低	无
		金属烟热	1	3	6	2	36	潜在	1	低	无
噪声	听力损伤	1	3	6	1	18	可以容忍	1	中	低	
	噪声聋	15	3	6	1	270	非常高	3	中	中	
双玻/柔性组件巡检	噪声	听力损伤	1	3	6	1	18	可以容忍	1	中	低
		噪声聋	15	3	6	1	270	非常高	3	中	中
接线盒焊接	铅烟	呼吸道刺激	1	10	6	1	60	高风险	3	中	中
		慢性中毒	15	10	6	1	900	不可容忍	3	中	中
	二氧化锡	呼吸道刺激	1	10	6	1	60	高风险	3	中	中
		慢性中毒	15	10	6	1	900	不可容忍	3	中	中

3 讨论

CIGS 薄膜太阳能电池为第三代太阳能电池，使用的原辅料和生产工艺与晶硅、非晶硅太阳能电池项目不同，在电池片生产环节避免使用酸碱和有毒特殊气体。晶硅太阳能电池项目的化学毒物有硫酸、硝酸、氢氟酸、盐酸、氢氧化钠、氢氧化钾、三氯氧磷、四氟化碳、硅烷、氨气、五氧化二磷、偏磷酸等，可能造成严重职业病危害^[2,4]。非晶硅太阳能电池项目存在氢氧化钠、氢氧化钾、磷化氢、乙硼烷、硅烷、矽尘等化学性有害因素^[3,5]。CIGS 太阳能薄膜电池生产使用金属靶材和氩气、氮气、氢气等，产生的化学有害因素有金属及非金属的粉尘（铜、铜、硒、镉等），产生的职业病危害主要集中在电池片生产工序；接线盒焊接工艺相同，职业病危害因素均为锡焊产生的铅烟和二氧化锡。CIGS 薄膜太阳能的电池生产过程中的职业病危害因素危害和种类均有所降

低；同时企业不断改进和完善生产工艺，采用一体化卷轴磁控溅射工艺，禁用化学水浴法（CBD）进行硫化镉镀膜，生产流水线密闭化程度更高，不但消除了氨水的危害，也降低了镉及其化合物的直接接触机会。

我国职业卫生人员采用 ICM 职业健康风险评估模型在采矿业和机械制造业等领域职业危害风险评估的应用中取得了较好的评价效果^[7,8]。本次采用定量和定性评价模型进行综合分析发现，焊接作业接触的铅烟、二氧化锡和巡检过程中接触噪声存在的职业健康风险较高，电池片生产中接触的金属和非金属烟尘存在潜在健康风险。评价结果有助于生产企业对上述岗位有针对性地制定工程措施，控制职业病危害。定量模型和定性模型的评估结果存在一定差异，定性评估矩阵法对低风险岗位的职业健康风险评估较为准确，但可低估实际为高风险岗位的职业健康风险等级；而定量评估法对高风险岗位的职业健康风险评估

准确,但可高估实际为低风险岗位的职业健康风险^[7]。本次在接线盒焊接岗位出现了两种模型评价结果不一致的情况,可通过结合两种模型的应用进行综合判定。定性评估中健康危害等级赋值为3和4的高风险岗位采用定量评估法的结果,赋值为1和2的低风险岗位采用定性评估矩阵法的结果。电池片生产中使用的靶材为纳米材料,采用磁控溅射镀膜工艺可能产生粒径微小的纳米颗粒,国内外对纳米颗粒物的职业病危害研究仍处于动物实验研究阶段,缺少统一的监测手段和人员危害的资料。由于纳米颗粒物具有较大的比表面积,危害性可能更强^[9-11],因而使评价指标取值具有一定的不确定性,将 U 取值为2。故采用本方法时需要评价人员在全面了解和分析危害途径、健康影响后果等因素的基础上谨慎使用。本方法对评价人员的专业要求较高,评价人员的专业水平也可能造成评价结果存在差异。

本次分析显示,太阳能电池行业的职业病危害会随着技术进步和更新而发生变化,在国家尚未制定相应健康监护手段和统一的环境监测方法的条件下,需要进一步对该生产行业人群职业健康危害进行密切的动态观察,积极推进监测方法的研究,定期开展生产项目职业健康风险评估,对预防和控制职业病危害具有重要意义。

(上接第161页)

2.4 职业健康知识需求 接触噪声人员职业健康知识的类别按占比依次为作业场所防护设备及个人防护用品(24.65%)、职业病危害因素种类及健康危害(22.34%)、职业病及工作相关疾病(20.45%)、职业心理健康(11.42%)、职业病防治法律法规(9.20%)、职业中毒及应急救援(6.68%)、安全生产(5.26%)。

3 讨论

本次调查显示,该电子企业接触噪声人员职业健康知识的总体知晓率偏低(36.98%),文化程度、工作岗位、接噪工龄、年龄及职业卫生培训是影响员工职业健康认知水平的主要因素。接触噪声人员获取职业健康知识的主要途径为宣传板报、企业培训和网络查询,前两者主要是企业对员工实施教育培训,而网络查询则反映员工本人对职业卫生知识的关注和渴求。从职业卫生知识需求情况来看,需求较高的为作业场所防护设备及个人防护用

参考文献

- [1] 梁传志,王朝霞,郭梁雨.铜钢镓硒(CIGS)薄膜太阳能电池发展概述[J].建设科技,2015(18):50-57.
- [2] 张林林,于雷.锦州市5家单晶硅太阳能电池生产企业职业危害调查[J].工业卫生与职业病,2020,46(1):56-58.
- [3] 王粤,刘云鹤,梁栋.薄膜太阳能电池典型工艺职业危害研究[J].科技通报,2018,34(10):245-248.
- [4] 龚伟,倪金玲,朱宝立.硅太阳能电池企业生产性毒物职业危害分析[J].中国工业医学杂志,2013,26(2):124-126.
- [5] 周伟,何家禧,黄红英,等.非晶硅薄膜太阳能电池行业职业病危害及其防护效果[J].职业与健康,2013,29(4):413-415.
- [6] 王忠旭,李涛.职业健康风险评估与实践[M].北京:中国环境出版社,2017:215-222.
- [7] 冷朋波,王群利,王爱红,等.基于ICMM风险评估技术的某电镀企业职业健康风险的定量定性评估研究[J].中国卫生工程学,2016,15(6):544-549.
- [8] 苗超,叶虹,胡向前.ICMM评估方法在某铸造企业职业健康风险评估中的应用[J].工业卫生与职业病,2020,46(2):129-133.
- [9] Yavorovskiy O, Omelchuk S, Sokurenko L, et al. Environmental and occupational hazards of metal nanocompounds production and application: Hygienic, clinical and toxicological aspects [J]. Wiad Lek, 2019, 72 (8): 1504-1511.
- [10] 曾繁华,王易,何俊燃,等.纳米颗粒物毒性效应研究进展[J].广东化工,2019,46(13):79-80,84.
- [11] 邹华.工作场所纳米颗粒暴露评估方法[J].预防医学,2018,30(9):911-916,920.

(收稿日期:2021-08-16;修回日期:2021-11-16)

品、职业病危害因素种类及健康危害、职业病及工作相关疾病和职业心理健康,体现了劳动者对职业卫生知识需求的多元化,同时也反映了传统媒体(电视、广播、报纸等)在职业健康知识传播过程中影响力的弱化。政府职业病防治部门应重视网络等新兴媒体在职业健康教育工作中的作用^[3],注重寓教于乐。在提高产业员工职业卫生知识知晓水平方面,应发挥政府、用人单位和个人三方面力量,结合企业文化,针对员工的文化层次和岗位采取相应的综合干预措施,并与各种职业卫生培训教育活动有机结合,从而达到预期效果。

参考文献

- [1] 李琦,邹建芳,李翎,等.外来务工人员的职业卫生问题与对策[J].职业与健康,2011,27(2):209-211.
- [2] 王祖兵,顾明华,张蓓蕾.上海市外来务工人员职业健康现状调查报告[J].职业卫生与应急救援,2010,28(4):180-182.
- [3] 阮少伟.铁路企业员工职业卫生知识知晓率调查[A].2019年铁路卫生防疫学术年会论文集[C].2019:139.

(收稿日期:2021-04-07;修回日期:2021-09-08)