

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-699-07

地下制冷机房焊接施工阶段的通风系统改造 及个人防护措施研究

文力¹ 刘皎¹ 冯璐² 郭卫平²

(1. 西安工程大学城市与市政工程学院 西安 710600;

2. 陕西建工安装集团有限公司 西安 710068)

【摘要】 施工现场的地下预制加工间普遍均存在施工强度大, 作业人员密集, 不规律的气流组织导致施工环境质量恶劣等问题。对西安市某施工项目的地下制冷机房内的通风系统进行了改造, 采用全面通风系统的自然补风和机械回风形式, 并在焊接作业集中部位上方设置排烟风管, 烟尘颗粒物进入风管排出机房。经测试, 此方法有效改善了机房内的空气质量, 同时也直接保护了施工工人的健康。因此, 分别从优化通风系统设计和提高个人呼吸防护措施两个层面来分析并设计控制措施方案, 解决施工人员长期暴露在高浓度可吸入颗粒物环境下的此类问题。

【关键词】 地下机房; 焊接烟尘; 通风系统; 个人防护

中图分类号 TU741.1 文献标识码 A

Research on Ventilation System Transformation and Personal Protective Measures in the Welding Construction Phase of Underground Refrigeration Room

Wen Li¹ Liu Jiao¹ Feng Lu² Guo Weiping²

(1. Xi'an Polytechnic University, School of urban planning and municipal engineering, Xi'an, 710048;

2. Shaanxi Construction Engineering Installation Group Co., Ltd, Xi'an, 710068)

【Abstract】 The underground prefabricated processing rooms on the construction site generally have problems such as high construction intensity, dense operating personnel, and irregular airflow organization that lead to poor construction environment quality. In this paper, the ventilation system in the underground refrigeration machine room of a construction project in Xi'an has been transformed. It adopts the natural air supply and mechanical return air form of the comprehensive ventilation system, and installs the exhaust air duct above the concentrated part of the welding operation, so that the dust particles enter the wind. The pipe is discharged from the machine room. After testing, this method has effectively improved the air quality in the machine room, while also directly protecting the health of construction workers. Therefore, we analyze and design control measures from the two levels of optimizing the design of the ventilation system and improving the personal respiratory protection measures to solve the problem of long-term exposure to high concentrations of inhalable particulates.

【Keywords】 Underground machine room; Welding fume; ventilation system; personal protection

基金项目: 大学生创新创业国家级项目《焊工技能实训车间烟尘综合处理及净化技术的研究与应用》(编号: 2019107094011)

研发项目: 陕西建工集团 2019 年科技研发项目

作者(通信作者)简介: 文力(1972.12-), 女, 副教授, E-mail: wenli@xpu.edu.cn

收稿日期: 2021-03-05

0 引言

随着我国社会经济发展不断进步，建筑业发展规模也随之逐渐扩大，在建筑行业的背景下环境污染状况也越来越严重，引起了越来越多的关注，其中焊接是一种以加热、高温或者高压的方式接合金属或其他热塑性材料的制造技术，焊接工艺同时会产生有毒有害粉尘及气体，不仅影响周边环境空气质量恶化，同时严重威胁着施工工人的健康^[1]。针对此类问题，本文对西安市某商业建筑体的制冷机房在预制加工期间内提出通风净化设计原理和方法，并根据设计计算搭建通风管道，采取相应合理的排烟措施，探究此措施能否有效控制污染物扩散蔓延，以及对加工环境及焊接工人的健康得到保护。

1 调研项目概况

该项目位于西安城区商业区域建筑群，总建筑面积约 23 万 m²，地下空间共有三层，地面无可机电安装加工场地，其中地下三层设置制冷机房。制冷机房的尺寸为 23300mm（长）×21700mm（宽）×7000mm（高），在机房内设置有送风井和排风井，在施工焊接阶段的工作量较强，因此，为改善机房在施工阶段的空气质量，需对机房内部设计合理的通风系统，同时焊接人员个体呼吸防护措施也应受到重视，施工阶段焊接人员佩戴普通 KN95 防雾霾口罩，其中图 1 为制冷机房设备平面图，图 2 为制冷机房实际场景照片。

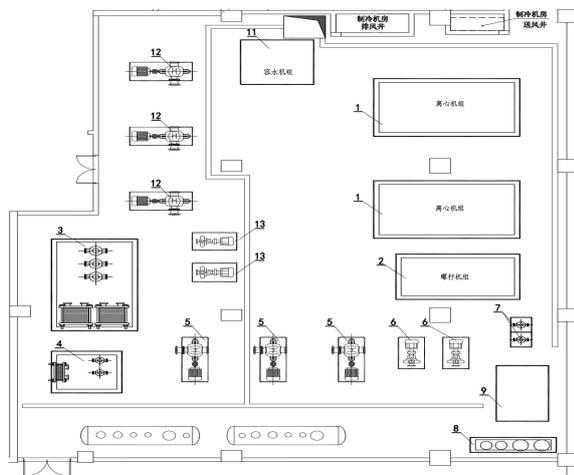


图 1 制冷机房设备平面图

Fig.1 Layout of the refrigeration equipment room



图 2 制冷机房实际场景照片

Fig.2 The actual scene photo of the refrigeration room

2 焊接烟尘产生机理及特性

2.1 焊接烟尘产生机理

制冷机房内放置有离心机组、螺杆机组、容水机组以及不同型号的水泵，各设备通过不同直径大小的钢制水管连接，连接方式采用焊接技术，在焊接过程中，电弧可瞬间使焊接部分加热到约 4000-5000℃ 的高温，焊条下端部和焊接工件在高温作用下产生部分蒸气和熔渣，在弧吹力的作用下，这种高温蒸气从电弧区吹出后形成涡流，迅速被氧化与冷凝变为细小的固态粒子，形成气溶胶状态弥散在电弧周围，形成了焊接烟尘^[2]。

烟尘的发生过程实质上是一个过热—蒸发—氧化—凝聚的物理过程^[3]，焊接烟尘的化学成分取决于焊接材料和焊接工件成分，不同成分的焊接材料和工件，在焊接时将产生不同成分的焊接烟尘。在通常情况下，焊接烟尘主要含有二氧化锰、氧化铁、氧化硅以及钙、钠、钛、铬、镍等的化合物等^[4]。

2.2 焊接烟尘特性

制冷机房在施工阶段主要应用焊接连接机组与水泵相应的金属水管，焊接作业过程中会产生大量的焊接烟尘和有害气体等，严重影响了焊接工人的健康，它们已成为污染环境的公害之一。电焊烟尘粒子受到各个方向空气分子的撞击做不规则运动，分子在每次撞击后，运动方向及速度的改变是无规律的，它的运动轨迹是由很多段直线构成。因为粒子质量远远大于空气分子的质量，因此粒子每次受到分子撞击后速度的改变量甚小，小到可以忽略不计，但是多次撞击后粒子的运动速度及方向会

发生明显变化达到一种平衡,可以近似认定电焊烟尘粒子的运动路径为平滑曲线,就是电焊烟尘粒子的运动特性^[5]。

3 制冷机房通风系统设计

通风除尘措施是治理焊接烟尘和有害气体的主要手段,结合该制冷机房内部现有未封闭的吊装口和送、排风井,再对比局部通风、置换通风和全面通风的各类通风方式,最终选择全面通风作为该机房的通风方式。该方式借助于送、排风机与自然风压,使空气在室内有组织的流动,从而降低车间的烟尘浓度^[6]。采用全面通风系统的自然补风和机械回风方式的气流组织形式,其中未封闭的吊装口用于自然补风,补风口位于地下二层地面且与外界连通,直通向地下三层,全高为7m。再者考虑在施工阶段的工作强度较高,产尘速率及产尘量极大,因此,将送风井和排风井同时排风,使施工现场的机房内达到负压状态,有效将焊接烟尘排出室外,再经净化设备净化后排放至大气,在以不污染空气环境的前提下,保护施工工人的健康不受到威胁。

3.1 制冷机房概况

制冷机房高度包含地下二层和三层共两层高度,制冷机房的通风基础设施有预吊装口、送风井和排烟井,其中预吊装口直通室外,送风井和排风井分别通过一层屋面和四层屋面排出室外。由于地下施工的机房空间较大、施工强度较高、作业人员密集,现对制冷机房做相应的改造方案,解决作业人员在施工过程中暴露在高浓度可吸入颗粒物环境下的问题。

3.2 通风系统的选择

该制冷机房具有高大空间特征,焊接强度较大且焊点空间分布较分散,设置局部通风显然不合理,因为置换通风的热分离层易与烟云重叠,致使室内污染物浓度不断加大,因此不利于控制。而全面通风虽所需风量较大,但实现了对整个机房进行通风换气,向机房送入新鲜洁净的空气,再把污浊空气直接或通过净化处理后排出,此类通风系统净化效果最为明显,适用于本次改造的地下制冷机房。

3.3 通风系统改造方案

根据选用的全面通风系统的自然补风和机械排风方案,未封闭的吊装口实现自然补风,原本机房内的送、排风井在施工阶段均用于排风通道,两

个排风井处分别引出排风风管,在排风风机的动力下实现机械排风。机房按照前期设计均已配置送风机和排风机,结合成本与人工方面因素,本次改造应用现有风机设备。

根据常见的焊接工艺要求作业面风速值,如手工电弧焊工艺对于焊接作业面的风速限值为 $\leq 8-10\text{m/s}$, CO_2 气体保护焊工艺对于焊接作业面的风速限值要求 $\leq 2\text{m/s}$ 。不同焊接工艺的工作面风速有所区别,由于本机房的焊接工艺为手工电弧焊,因此工作面风速限值应 $\leq 8-10\text{m/s}$,风速要求对风机和风管尺寸有所限值。由于现机房的风机按照设计规范已经确定风机大小,现以风机大小来确定风管尺寸,两个排烟井配置风机分别为 $24436\text{m}^3/\text{h}$ 、 $30690\text{m}^3/\text{h}$,根据工作面风速限值和风机风量大小,确定排烟风管大小尺寸为 $1600\text{mm}\times 500\text{mm}$ 、 $1250\text{mm}\times 500\text{mm}$ 、 $1000\text{mm}\times 400\text{mm}$ 共三节风管变径组成。

送风井和排风井分别选用两台消音型送风风机和排风风机,送风风机送风量 $L=24436\text{m}^3/\text{h}$, $N=5.5\text{kW}$,排风风机为双速风机,由于现场电缆承受能力限值,选用双速风机的低速挡,排风量 $L=30690\text{m}^3/\text{h}$, $N=6.5\text{kW}$ 。安装方式是在原本送风井处用风管连接风机,仅在进风机处设置单一送风口;同理,在排风井处连接排风风机,再接一段排风管道,并且在管道下端均匀布置大小一致的排风口。此类通风系统利用送、排风的机械通风,改善地下机房的空气质量。

4 机房改造后验证性试验

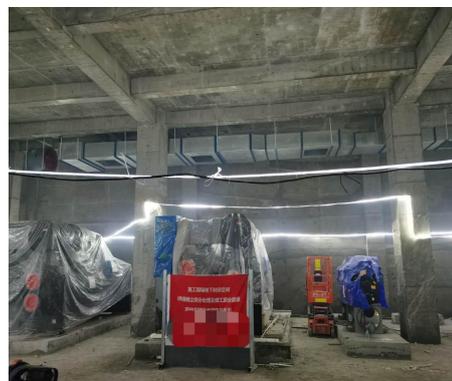


图3 制冷机房通风改造过程实景图

Fig.3 Real view of the ventilation transformation process of the refrigeration room

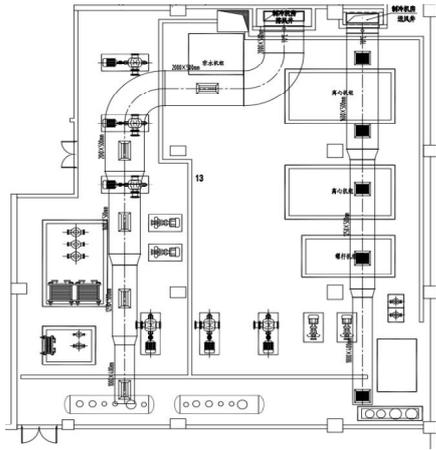


图4 制冷机房通风改造原理图

Fig.4 Schematic diagram of ventilation transformation of refrigeration room

根据上述制冷机房改造方案，现对机房按照方案实施改造，并通过对改造后的制冷机房前后测试对比，机房的改造过程实景图 and 原理图分别如图3和图4所示。测试内容是对机房改造前后的空气质量进行实时监测，探究改造后的制冷机房空气质量改善效果。

4.1 现场实测方法

本次测试使用的仪器为汉王 N2 型号的空气颗粒物测试仪，主要测试参数 PM 1.0、PM 2.5、PM 10、甲醛、温度和相对湿度，该测试仪的颗粒物测试量程为 0-999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，可精准分辨 0.3 μm 尺寸的颗粒物，温度精度可达 0.3 $^{\circ}\text{C}$ ，湿度精度可达 3%。本次测试选择西安市某商业建筑的制冷机房的施工阶段，测试该阶段中的 PM 1.0、PM 2.5、PM 10 三种粒径在改造前后可吸入颗粒物浓度对比。机房空间通风方式为全面通风，其中送风由吊装口自然补风，排风由双风井同时运行排出机房，机房内部布置各种机组设备及不同型号水泵，各设备通过不同规格的钢制水管通过焊接技术连接，由于焊接位置并非固定，因此为探究机房的颗粒物浓度变化情况，需在机房内布置合理测点。

制冷机房内的测点布置遵循均匀分布的原则，通过施工强度以及密集程度等因素决定测点分布，其中将焊接区域按照分区原则，将工人施工工作区域分为两个监测区域，I 区域为施工前期密集区，II 区域为施工末期较密集区。I 区域在施工前期的管段的连接预制加工均在地面加工，再将焊接连接完整的水管吊装上支架放置，以及 I、II 区域分别

有接口处法兰焊接连接等工序，各工序的产尘速率均不相同。因此在两区域分别布置均匀测点，其中设备放置区域由于无人员活动，因此设备区不布置测点，同时，制冷机房内水管连接存在垂直方向的加工任务，故垂直梯度的颗粒物浓度也应考虑在内，因此分别在高度为 1.5m、3m、4.5m、6m 处布置测点。共在水平方向布置 15 个测点，其中 I 区有 10 个测点、II 区有 3 个测点，其余两个测点分别布置在西面门外侧和吊装口中心，且除 11 号测点外，其余 14 个测点分别监测高度为 1.5m 的水平

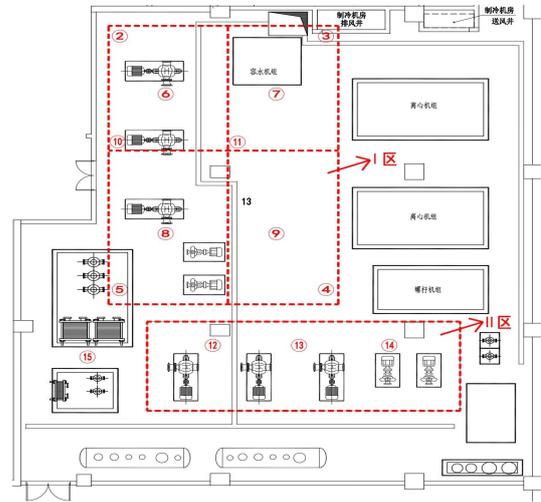


图5 制冷机房空间测点分布图

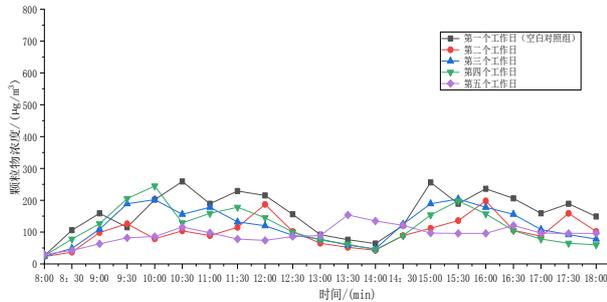
Fig.5 Spatial measurement point distribution diagram of refrigeration machine room

4.2 实测数据分析

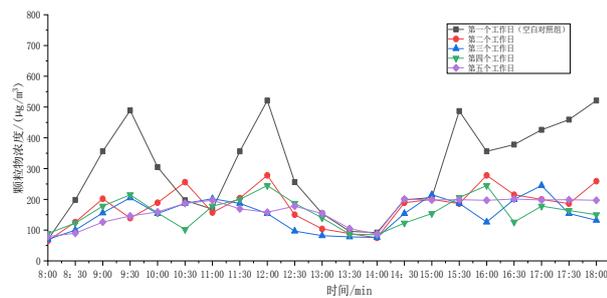
制冷机房焊接施工阶段时长约一个月，每个工作日的焊接强度会随工作需要作相应调整，因此焊接强度也有所不同，现选择施工中期的五个连续工作日工时测试施工机房的焊接烟尘颗粒物浓度，其中第一个工作日测试未开启送、排风机的机房颗粒物分布特点，该组设置为空白对照组，其余四个工作日测试同时开启送、排风机用于排风，吊装口用于补风的颗粒物分布特点，该组设置为实验对照组，通过对比可以直观看到采取通风措施前后的机房颗粒物浓度特点。

通过实地考察机房的焊接作业基本情况，焊接工艺是手工电弧焊，基材为钢管，焊条型号为 J422 实心焊丝，焊接电流 100-110A，其中会根据焊接

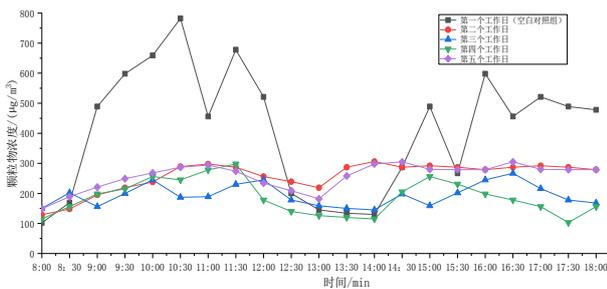
强度开启不同数量的焊机, 因此烟尘颗粒物浓度会随工作强度而变化, 现遵从上述的测点布置原则, 对各测点在不同时刻下的颗粒物浓度数值计算出各点平均值, 再将每一时刻的平均数值绘制图像, 如图 6 所示。



(a) 制冷机房连续 5 个工作日的
PM 1.0 颗粒物浓度散点图



(b) 制冷机房连续 5 个工作日的
PM 2.5 颗粒物浓度散点图



(c) 制冷机房连续 5 个工作日的 PM 10 颗粒物浓度散点图
图 6 制冷机房在 5 个工作日工作时间的三类颗粒物浓度变化情况

Fig.6 Changes in the concentration of three types of particulate matter in the refrigerating machine room during the working hours of 5 working days

通过实测制冷机房在施工阶段的颗粒物浓度变化情况, 分别对五个连续工作日的 PM 1.0、PM 2.5、PM 10 三类颗粒物浓度值测试并记录, 将五个工作日的颗粒物浓度值数据分析, 分别用散点图

的形式直观表示, 依据呼吸区域参考标准《环境空气质量标准》GB 3095-2012 二级浓度限值 PM 10 24 小时平均浓度 $<150\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 2.5 24 小时平均浓度 $<75\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[7], 以下分别对三类颗粒物浓度变化情况分别分析说明。

分析通风系统改造前后图 6 (a) 的 PM 1.0 颗粒物浓度值散点图, 由图表可以直观看到, 改造前后的 PM1.0 浓度值并无明显的变化, 数值基本维持在小于 $300\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的范围内, 变化幅度并不大, 且改造前后效果并不明显, 由此可以得到, PM 1.0 由于粒径极小而悬浮在空气中, 不会因重力作用自主下沉, 也不会因气流组织流向而带动, 因此 PM 1.0 的颗粒物并没有因为通风系统的改变而改变。

分析通风系统改造前后图 6 (b) 的 PM 2.5 颗粒物浓度值散点图, 由图表看出改造前后的颗粒物浓度值差距较大, 改造前浓度值基本维持在小于 $600\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的范围内, 改造后的浓度值均不高于 $300\mu\text{g}/\text{m}^3$, 改造前后浓度差最大值 $\Delta C_{\text{max}}\approx 300\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。比较 PM 1.0 和 PM 2.5 两者的浓度值可得, 由于颗粒物粒径较小的 PM 1.0 沉降能力差, 悬浮在空气中, 故无法通过通风净化的方式有效去除, 而 PM 2.5 颗粒物沉降能力较 PM 1.0 强, 通过同样的方式下降幅度较大。

分析通风系统改造前后图 6 (c) 的 PM 10 颗粒物浓度值散点图, 由图表看出改造前后的颗粒物浓度值差距极大, 改造前浓度值基本维持在小于 $800\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的范围内, 改造后的浓度值均不高于 $300\mu\text{g}/\text{m}^3$, 改造前后浓度差最大值 $\Delta C_{\text{max}}\approx 500\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。比较三类粒径大小的颗粒物浓度, PM 10 的颗粒物浓度处理前后差值最大, PM 2.5 次之, PM 1.0 最小, 由此得到结论, 通过通风系统改善机房空气质量的措施, 此类方法对粒径较大的颗粒物影响较大, 而对粒径较小的颗粒物影响轻微, 所以, 针对机房空气质量恶劣的此类问题, 通风系统改善程度有限。因此, 针对此类问题, 不仅需要通风系统的改造, 还需要焊工增加个人防护措施。

5 个体防护措施

通过上述的试验数据可以得到, 通过对机房内通风系统改造后, 在焊接作业时机房空间内的空气质量虽大幅度降低, 但颗粒物浓度值仍高于标准浓度限值, 焊接工人长时间暴露在高浓度含尘环境下

会对身体健康造成严重影响, 现结合焊接车间的空气质量以及焊工的工作强度要求, 以在保证工期正常进行的前提下, 对焊工的个人防护采取相应措施, 从根源上保护焊工的身体健康, 以下对自吸式焊接面罩和电动式焊接面罩两类防尘口罩做对比实验。

5.1 焊接面罩工作原理

本次实验采用的第一种焊接面罩是型号为康保仕 6280 的自吸过滤式焊接面罩, 该面罩仅由头戴式焊接面罩组成, 焊接面罩的两端分别设置有两个过滤片, 中间部位设置有过滤毒气装置, 分别用于过滤含尘颗粒物及有毒气体, 以及用于过滤颗粒物及气体的过滤片均可替换。该面罩组成结构较为简单, 主要是通过人为呼吸来实现, 所以在劳动强度较高且焊接温度较高时, 可能会出现呼吸阻力较大而导致佩戴较不舒适。



(a) 自吸过滤式焊接面罩



(b) 高效过滤自动送风焊接面罩

图 7 自吸式和电动式焊接面罩外观图

Fig.7 Appearance of self-priming and electric welding mask

本次实验采用的第二种焊接面罩是型号为安德利 PARP-3/EH-9851 的高效过滤自动送风焊接面罩, 该面罩由头戴式焊接面罩、连接软管、纳米过滤网和净化空气送风呼吸器组成, 工作原理是由焊工佩戴在背面的送风呼吸器将焊接后方较洁净空

气, 经呼吸器内的纳米过滤网经过滤后的洁净空气通过连接软管送到面罩内部, 将洁净空气提供给焊接工人呼吸, 在该工作的全过程中该装置可以有效的过滤掉焊接时造成空气中的有毒、有害气体, 保护人体的呼吸系统。该类型的电动式焊接面罩佩戴舒适性较高, 焊工呼吸较为顺畅, 图 7 分别是两类口罩外观图。

5.2 两类焊接面罩综合处理对比实验

上述对自吸式和电动式两类焊接面罩的组成部分及工作原理做了简要描述, 现分别对两类焊接面罩在相同焊接环境下做综合对比实验, 现对同一焊接工人在做单一焊接作业时, 分别佩戴两类焊接面罩, 对其处理效果进行对比。图 8 和图 9 分别是自吸式、电动式焊接面罩的处理效果对比图。

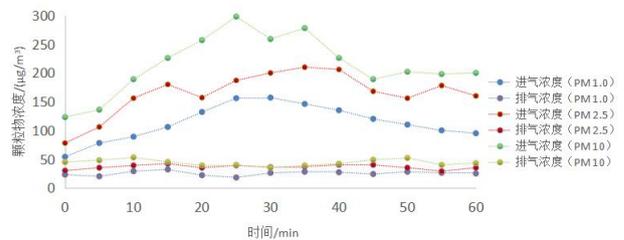


图 8 自吸式焊接面罩三类粒径颗粒物浓度处理前后对比散点图

Fig.8 The comparison of the concentration of the three types of particles of the self-priming welding mask before and after treatment

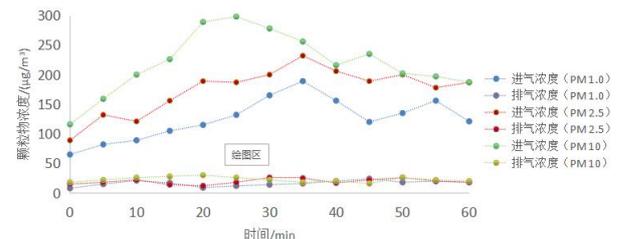


图 9 电动式焊接面罩三类粒径颗粒物浓度处理前后对比散点图

Fig.9 The comparison scatter diagram of the concentration of the three types of particles of the electric welding mask before and after treatment

经以上测试数据绘制出的颗粒物浓度散点图可以看到, 自吸式和电动式面罩的处理效果均较显著, 在开启排烟风管的前提下, 机房环境的颗粒物浓度大约维持在 $100\sim 300\mu\text{g}/\text{m}^3$, 经自吸过滤式面罩处理后, 颗粒物浓度降至约 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$, 处理效率约 85%, 通过对焊接工人的舒适度感受调查, 焊工

反映该自吸式焊接面罩会因焊接温度过高和焊接位置不断更换导致焊接过程中呼吸受阻,不舒适感受较为明显,因此,通过第一类的自吸式焊接面罩可以得到过滤效率较高,焊工呼吸的空气较洁净,较好的保护了焊工的身体健康,但佩戴舒适性欠佳,可以完成短时间的焊接作业,长时间仍存在呼吸受阻的困难。

再经电动式面罩处理后,颗粒物浓度降至 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$,处理效率高达93%,可以得到电动式较自吸式的处理效率高,焊接工人反映电动式口罩佩戴舒适,呼吸舒畅,没有任何的不适感,但由于电动式体积较大,需要将净化空气送风呼吸器通过皮带放置在腰间,可能在身体方面有轻微不适,由此可以得到,自吸式和电动式焊接面罩对比来说,电动式的处理效果较自吸式强,两者在舒适感上均存在不同的缺点,但考虑对焊接工人的身体健康的考虑,佩戴过滤式焊接面罩从根本上解决了此问题。

6 结论

(1) 制冷机房采用全面通风系统的自然补风和机械回风方式进行有规律的气流组织形式,在焊接作业集中部位上方合理布置排烟风管,使烟尘颗粒物形成负压进入管道排出机房,再通过对机房空间内部根据焊接位置的密集程度布置测点,根据测点对通风系统改造前后做对比实验,最终通过测试数据绘制出的图表得到,通过通风系统的改造后,三类粒径大小的颗粒物浓度均呈大幅度下降,但机房环境的烟尘颗粒物浓度仍未达到标准水平,接着,再从个人防护的手段对焊接工人的呼吸健康做相应的措施,不仅需要改善机房的空气质量,同时

也要对焊接工人的身体健康进行有效保护。

(2) 通过对焊接工人佩戴自吸式和电动式两类焊接面罩的处理效率和舒适性两个方面研究,就从处理效率来说,两类焊接面罩的过滤效果均达到颗粒物标准要求及处理效率较高,且电动式的处理效率更佳;就舒适性来说,通过询问焊工的舒适性体验得到,两者均在不同程度有着不舒适性体验,自吸式主要存在佩戴时长较长导致的呼吸阻力困难的问题,而电动式主要存在装置体积较大导致的影响行动不便的问题,虽然两者均在舒适性未达到绝对程度的舒适,但面对空气质量严重超标的焊接机房,对长期工作在该场所内的焊接工人应当配置合理的个人防护措施。

参考文献:

- [1] 郑怀江.焊接车间控制烟气技术措施[J].机械工程师,2007,(9):153-155.
- [2] 中国机械工程学会焊接学会第八专业委员会编著.焊接卫生与安全[M].北京:机械工业出版社,1987.
- [3] McMillan G. Concerns for the health and safety of welders in 2005[J]. Welding in the World, 2006,50(3-4): 38-44.
- [4] 沈晓勤,蒙继龙,宋永伦.焊接过程中有害物质问题的研究及其进展[J].焊接,2005,(7):5-8.
- [5] 费振玲.密集焊接作业电焊烟尘扩散特性与控制数值模拟[D].江西:江西理工大学,2015.
- [6] 桑丽群.焊接污染及其防治措施的研究进展[J].环境保护,2008,(1):18-20.
- [7] GB 3095-2012,环境空气质量标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.