

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.01.001

# 受限空间焊接烟尘通风净化研究进展

王汉青<sup>1</sup>, 李铖骏<sup>2</sup>, 谢东<sup>1</sup>, 叶勇军<sup>2</sup>

(1. 南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学 环境保护与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** 简要介绍了焊接烟尘的性质及危害, 并分析了国内外科研工作者们对焊接烟尘的通风净化已有研究。焊接烟尘的机械通风净化方法主要有局部排风除尘、全面通风和置换通风3种。置换通风是一种新型的稀释通风形式, 适用于高大焊接厂房的通风, 故着重分析了置换通风在受限空间烟尘控制方面的研究与应用情况, 总结和讨论了目前焊接烟尘通风净化研究中存在的问题及未来的发展方向。

**关键词:** 受限空间; 焊接烟尘; 通风净化

**中图分类号:** TU93; P315.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1673-9833(2017)02-0001-07

## A Research Review of Welding Fume Ventilation Purification in Confined Spaces

WANG Hanqing<sup>1</sup>, LI Chengjun<sup>2</sup>, XIE Dong<sup>1</sup>, YE Yongjun<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China;  
2. College of Environmental Protection and Safety Engineering, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

**Abstract:** A brief introduction has been made to the features and hazards of the welding fume, followed by an analysis of recent studies on the ventilation purification of the welding fume. Methods concerning mechanical ventilation purification mainly include local dust precipitation, total ventilation and displacement ventilation, with the last one being a new kind of dilution ventilation suitable for spacious welding workshops. Therefore an emphatic analysis has been made of the application of displacement ventilation to welding fume control in confined spaces. Finally a summary and investigation has been made of the existing problems and future development of welding fume ventilation purification.

**Keywords:** confined space; welding fume; ventilation purification

## 0 引言

焊接是工业上使材料相互连接的一种基本工艺, 被广泛应用于土建、机械和材料加工领域, 随着我国工业化程度的不断推进, 焊接技术在未来有着广阔的应用前景。然而, 焊接作业过程中产生的有害因素制约了焊接技术的应用与发展。焊接过程中的

有害因素可分为电焊烟尘、有毒气体、高频电磁场、射线、电弧辐射和噪声等。其中, 电焊烟尘是焊接材料伴随电焊过程在高温作用下形成的细小颗粒物。据统计, 全球每年消耗的金属焊接材料约为100万t, 其中约有0.5% (约5000t) 的金属焊接材料转变为焊接烟尘<sup>[1]</sup>。

**收稿日期:** 2017-02-06

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (11475081)

**作者简介:** 王汉青 (1963-), 男, 湖南益阳人, 南华大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事建筑节能方面的研究,  
E-mail: hqwang2011@126.com

**通信作者:** 李铖骏 (1990-), 男, 湖南株洲人, 南华大学博士生, 主要研究方向为建筑通风及CFD仿真,  
E-mail: chengjun901129@126.com

广义上的焊接烟尘是一种复杂的混合物,可分为固相部分和气相部分,其固相部分包含 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}_2$ 、 $\text{Sn}$ 、 $\text{Pb}$ 等金属颗粒物,气相部分包含 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_3$ 和 $\text{HF}$ 等气体<sup>[2]</sup>;狭义上的焊接烟尘是指在焊接过程中形成的细微固体颗粒物,本研究中所论述的焊接烟尘为后者。在受限空间或密闭空间中,粒径较小的焊接烟尘悬浮在空气中,因大量聚集在作业空间内,不能自行沉降或者消除,故对焊接操作人员的身体健康和施工环境造成了极大的危害。

## 1 焊接烟尘的性质及危害

### 1.1 烟尘颗粒的粒径

烟尘颗粒形成的方式多种多样,大体而言:单体粒径小于20 nm的球状颗粒,一般是在焊接材料的蒸发和冷凝过程中形成的;单体粒径大于20 nm的颗粒,一般是由复数个小粒径颗粒碰撞聚合而成的<sup>[3]</sup>。

烟尘颗粒物按其粒径大小可以分为3类:超细颗粒物( $0.01 < d \leq 0.1 \mu\text{m}$ )、细颗粒物( $0.1 < d \leq 2.5 \mu\text{m}$ )、粗颗粒物( $d > 2.5 \mu\text{m}$ )<sup>[4]</sup>。国外学者M. Oprya等<sup>[5]</sup>的研究表明,焊接烟尘一般由超细颗粒物和细颗粒物组成。国内学者施雨湘等<sup>[6]</sup>通过对焊条电弧焊的焊接气溶胶粒子谱分布特征进行分析,发现气溶胶粒子呈单峰分布和多峰分布的分布模型。饶良平<sup>[7]</sup>通过对某些焊接车间的焊接烟尘进行分析,测定了焊接烟尘粒子的直径分布范围,所得结果表明,粒子直径小于 $0.2 \mu\text{m}$ 的焊接烟尘微粒占粉尘总数的50%以上,且绝大多数烟尘微粒的粒径小于 $1 \mu\text{m}$ 。

### 1.2 烟尘颗粒的特性

焊接烟尘的特性主要包括悬浮性、凝聚性、磨损性、荷电性等方面<sup>[8]</sup>。

#### 1) 悬浮性

烟尘颗粒的悬浮性与颗粒物的粒径有关。一般情况下,处于静止的空气流场中时: $d \geq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒,在重力的作用下会加速沉降; $0.1 < d < 10 \mu\text{m}$ 的颗粒,会等速沉降;而 $d \leq 0.1 \mu\text{m}$ 的颗粒,在气体拖曳力、电荷力等作用力的影响下,基本悬浮在空气中不发生沉降。

#### 2) 凝聚性

电焊烟尘粒径越小,质量越轻,其比表面积越大,尘粒之间的结合作用越明显。当烟尘颗粒物之间的距离很小时,由于分子间的相互作用,电焊烟尘会发生凝聚现象。

#### 3) 磨损性

焊接烟尘颗粒物的磨损性是粒子在流动过程中

对器壁或者管壁的磨损效应,它是一个较为复杂的现象,对刚性壁面表现为碰撞磨损,对塑形壁面表现为切割磨损。在粒子净化或输运过程中,常会遇到对塑形材料的磨损,其磨损率与粉尘入射角、入射速度、粉尘硬度、粒径、球形度和浓度等因素有关。

#### 4) 荷电性

由于天然辐射、空气中的电离、尘粒之间的碰撞、摩擦等作用,使得焊接烟尘颗粒自身带有电荷,正负电都有可能。一般情况下,粒径小于 $3 \mu\text{m}$ 的小粒径颗粒带负电荷,大粒径颗粒带有正电荷或呈中性;带有同种电荷的颗粒会相互排斥,带有异种电荷的颗粒会相互吸引、结合。

### 1.3 焊接烟尘的危害

焊接烟尘的危害主要体现为会损害焊接作业人员的健康。已有研究发现,粒径小于 $10 \mu\text{m}$ 的微粒可以进入气管和支气管,小于 $2 \mu\text{m}$ 的微粒可以进入呼吸系统内部,并且不容易被排出体外。大部分的焊接烟尘都可以进入人体呼吸系统,其在肺部的沉积率高达50%以上,肺部烟尘沉积过多会引起呼吸系统的病变,如尘肺、锰中毒、金属热、肺气肿、慢性支气管炎,甚至肺癌等疾病。据调查,从事焊接工作的人员患有呼吸道疾病的比例大大高于其他行业从业人员,患肺癌的风险比其他人约高30%<sup>[1, 9-11]</sup>。

焊接烟尘除了会对直接从事焊接作业人员的身体健康造成伤害外,焊接烟尘在受限空间内会随着气流发生迁移,将会对整个空间内的作业人员造成威胁;且烟尘在气流流动缓慢的部位聚集,也会造成作业空间内空气质量恶化和能见度降低,给施工和生产安全带来隐患。

## 2 焊接烟尘的通风净化方法

焊接烟尘颗粒物在空间内跟随气流运动,因此可采用通风的方法进行净化。通过合理的气流组织将烟尘带离工作区间是减少室内烟尘浓度、改善空气品质的有效方法之一。通风净化可分为自然通风净化和机械通风净化两大类,焊接施工现场结构复杂、空间体积大,单纯依靠自然通风净化难以满足要求,因此主要采用机械通风净化方式,可分为局部除尘、全面通风和置换通风3种。

### 2.1 局部通风除尘

局部通风除尘是利用专业设计的特殊吸尘罩和真空吸尘系统,直接从焊接作业区吸走焊接烟尘气体,收集的含烟气体经过除尘处理后再排至大气中。局部排风除尘一般被应用于全面通风未能达到安全、卫生

要求的局部地点或者没有必要全面通风的区域<sup>[12]</sup>, 其主要组成部分包括局部排风罩或吸尘罩、风管、除尘或净化设备和风机等<sup>[13]</sup>。其结构如图1所示。

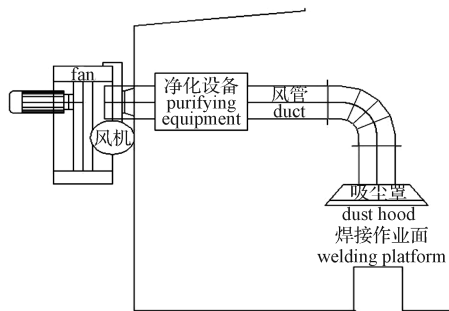


图1 局部通风除尘示意图

Fig. 1 A schematic diagram of local ventilation and dust precipitation

相较于全面通风, 局部通风除尘的效率较高<sup>[14]</sup>。一些学者对局部通风除尘方式的除尘效果进行了对比研究。如 M. R. Flynn<sup>[15]</sup> 研究了局部通风除尘系统在室内无通风、自然通风以及机械配合通风（采用风扇或者鼓风机, 目的是将新风引入工作区, 稀释污染气体, 并促使污染气体进入局部通风系统的吸风罩）条件下的除尘效率, 发现在风扇的配合下, 局部除尘系统的除尘效率最高。在其进一步研究中, M. R. Flynn 等<sup>[16]</sup> 指出在管道焊接过程中用风扇配合局部通风可以降低 21% 的焊接烟尘浓度。再如 J. D. Meeker 等<sup>[17]</sup> 采用实验和环境评估的方法对一种商用局部除尘系统进行了研究, 得出在使用局部除尘后, 管道焊接烟尘中锰浓度以及颗粒物浓度均显著下降, 其中, 锰浓度降为原有浓度的 75%, 颗粒物浓度降为原有浓度的 60%。J. D. Meeker 等<sup>[18]</sup> 在随后的研究中, 评估了局部除尘对气体保护金属焊接以及钨极氩弧焊接中六价铬离子的净化效率, 发现使用了局部除尘系统后, 六价铬离子浓度较使用前降低了 68%, 并且低于美国国家职业安全卫生研究所规定的浓度上限 ( $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。

在对影响局部通风除尘效果的研究上, H. V. R. Kromhout 等<sup>[19]</sup> 历时 20 a, 考察了 10 种焊接形式、400 余名焊接工人和 1 000 多次的焊接操作, 发现局部除尘的效率与风罩和焊接点的距离密切相关, 合理的局部除尘位置设计可以降低 40% 的污染物浓度。M. R. Flynn 等<sup>[20]</sup> 指出, 对于可移动的局部除尘系统, 目前的研究中没有明确的证据表明采用较大尺寸的除尘罩比较小尺寸的除尘罩拥有更好的除尘效果, 因为在受限空间内, 较小尺寸的除尘罩可能会有更好的灵活性和机动性。此外, 他们还指出, 使用带有吸尘功能的焊枪能有效吸收垂直方向上的热羽烟尘,

但是当焊枪和焊点位置改变时, 焊枪的烟尘吸收性能将会降低, 因而制约了吸尘焊枪在焊点非固定工程中的应用。

以上研究均表明: 局部通风除尘是一种十分有效的通风方法, 设计时一般应优先考虑, 但是对于大尺度以及发尘区域较多的受限空间, 使用局部除尘难以兼顾空间整体, 且容易导致系统过于复杂, 除尘综合效率下降。

## 2.2 全面通风

全面通风又称稀释通风, 是对整个空间进行通风换气。全面通风除尘的基本原理, 是用清洁空气稀释室内空气中的有害物浓度, 同时把被污染的空气排出室外, 以保证室内空气环境符合空气质量标准。当使用局部通风除尘仍然无法有效控制有害物扩散时, 应辅助采用全面通风的除尘方式<sup>[13]</sup>, 其除尘原理示意图见图 2。

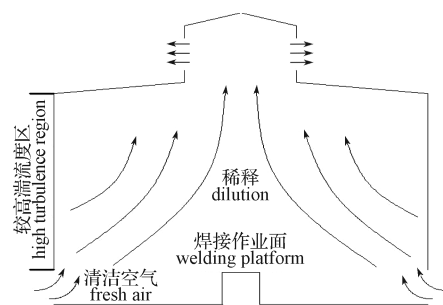


图2 稀释通风示意图

Fig. 2 A schematic diagram of dilution ventilation

全面通风作为高大空间通风的重要组成部分受到了人们的广泛关注。如 C. E. Feigley 等<sup>[21]</sup> 对计算稀释通风风量公式中的安全系数  $K$  进行了研究和讨论, 并基于实验测量值提出了更为客观的混合系数  $K_m$ ; 蔡文源<sup>[22]</sup> 对全面通风上下部排风量分配的问题进行了研究, 认为由于空气混合前后的气体密度相差很小, 因此没有必要在室内上下部分别以不同的比例排风; 何俊等<sup>[23]</sup> 对电焊车间一种全面通风除尘设备的除尘效率进行了研究, 发现在设备开启前后, 电焊区平均粉尘浓度降低了 59.2%, 表明粉尘得到了有效控制。此外, 林文敏等<sup>[24]</sup> 以某汽车厂喷漆房为例, 讨论了其全面通风换气量的计算; 而杜雅兰等<sup>[25]</sup> 对全面通风的设计原则和适用范围进行了分析和讨论。

## 2.3 置换通风

置换通风是一种新的稀释通风形式, 相较于传统稀释通风采用较大送风速度将气流射入空间中, 通过新鲜空气与室内空气的混合降低烟气浓度的原理, 置换通风是通过把较低风速的新鲜空气送入人员工作区, 送入的新风在室内热源附近被加热, 导致空气



密度减小,在浮力的作用下携带有害烟气上升,以一种类似活塞流的形式将烟气挤压至上部空间排出。置换通风的气流在人员工作区气流掺混性较小,气流稳定性较高,气流在工作区上部空间才转为湍流度较大的流体,置换通风示意图见图3。

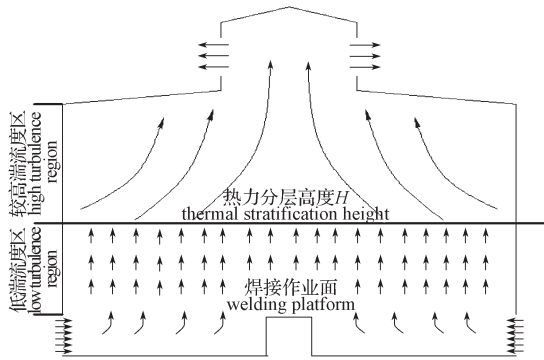


图3 置换通风示意图

Fig. 3 A schematic diagram of displacement ventilation

由于置换通风只需处理工作空间内的污染物和余热,因而只需采用低动量送风,可见,置换通风除尘方式不仅节约了能耗,且具有较高的净化效率<sup>[13, 26]</sup>。游国祥等<sup>[27]</sup>对于需要使用焊接作业的某高大车间,通过数值模拟,证明了置换通风是这类焊接厂房通风除尘的较佳气流组织形式。

### 3 置换通风控制焊接烟尘

#### 3.1 置换通风研究现状

国外学者对置换通风的研究起步较早,如Yuan X.等<sup>[28]</sup>在1988年即研究分析了置换通风室内热污染源位置对污染物浓度分布和通风效率的影响。H. J. Park等<sup>[29]</sup>于2001年利用计算机数值仿真技术,模拟研究了置换通风在垂直热源方向上气流的运动特征和污染物浓度的分布情况。P. V. Nielsen<sup>[30]</sup>考察了室内人员对空间温度分布以及气流组织的影响,研究结果表明,人员活动不会使室内垂直温度分布和污染物分层特性发生明显改变。

国内学者对置换通风的研究起步相对较晚,但进展迅速,尤其是利用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)数值仿真对置换通风的流场分布、热湿控制效果和通风效率的研究成为新的热点领域。如吴暄等<sup>[31]</sup>在不同工况下,对采用置换通风的多热源室内的温度场、速度场进行了数值模拟研究,分析了热源参数、房间围护结构特性及室外环境温度等对置换通风系统及室内人员热舒适性的影响。张俊梅等<sup>[32]</sup>利用数值仿真,通过对室内单一热污染源置换通风系统的研究,提出了增强通风房间空气品质以

及热舒适性的置换通风系统设计参数。许婕等<sup>[33]</sup>利用CFD方法分析了置换通风室内5种典型颗粒物在不同污染源释放位置下的浓度分布情况,发现污染源释放位置、污染物粒径均对室内空气品质产生影响。陈玖玖等<sup>[34]</sup>研究了在有颗粒源的室内,置换通风送风量对室内颗粒物运动的影响,发现送风量对颗粒物的分布影响显著。

在置换通风的送风参数、特征以及气流组织的研究上,陈可<sup>[35]</sup>研究了置换通风系统中,对称性结构与非对称性结构、排风口布置方式、送风口纵横比等房间几何形状和送风特征对室内悬浮颗粒污染物及相应流场、温度场分布的影响情况。刘猛等<sup>[36]</sup>根据置换通风系统的工作原理,定性研究并分析了送风温度、速度等因素对置换通风热力分层高度的影响。马国彬等<sup>[37-38]</sup>研究了热源的大小以及所处位置、送回风口相对位置等因素对置换通风气流组织的影响;马仁民等<sup>[39]</sup>探讨了单热源置换通风系统中送风参数及热力分层高度等问题。

以上通过对置换通风气流组织形式、送风参数、室内空气品质以及通风效率的研究,分析了影响置换通风效果的各种因素,为置换通风的优化设计提供了理论参考依据。

#### 3.2 置换通风在焊接烟尘控制上的应用

利用置换通风理论,一些学者讨论了置换通风在焊接车间烟尘控制方面的应用效果。R. Nienelä等<sup>[40]</sup>研究了高大焊接厂房的置换通风系统,通过研究焊接过程中形成的颗粒物在空间内的分布情况,指出在厂房下部人员活动区域的颗粒物浓度远小于厂房上部的颗粒物浓度,论证了置换通风对排出焊接厂房内颗粒物的高效性。李强民等<sup>[41-42]</sup>对焊接厂房置换通风系统的室内人员热舒适性、通风效率、排风净化能力等进行了分析与评价。贾雪峰等<sup>[43]</sup>利用CFD方法研究了高大封闭焊接车间置换通风送风量对通风效果的影响,得到了车间内焊接烟尘的浓度分布,确定了能够满足国家标准要求下的较为经济的通风换气次数。Wang H. Q.等<sup>[44]</sup>对高大焊接车间的空气流动、热流动和污染物的扩散进行了数值模拟研究,认为置换通风能够有效解决高大焊接车间的粉尘污染问题。杨珂等<sup>[45]</sup>采用实验研究法,指出焊接厂房置换通风系统在夏季和过渡季节烟尘控制效果较传统系统具有十分明显的优势,并提倡在厂房烟尘浓度高的区域采用局部排风系统和置换通风系统相结合的通风方式以进一步提高烟尘净化效率。马相雪等<sup>[46]</sup>利用示踪气体法对多个高大工业厂房的置换通风系统通风效果开展了实验研究,根据得出的气流组织运

动情况,为研究焊接厂房气流组织提供了实验依据。

以上论述表明,针对置换通风在高大焊接厂房的应用方面,国内外已进行了相当多的理论分析、数值模拟与实验测量研究,研究结果表明相较于采用传统稀释通风,高大厂房选用置换通风方式时工作区的空气质量较好,室内通风效率较高。

## 4 挑战与展望

### 4.1 焊接烟尘通风净化存在的不足

焊接烟尘问题现今已经成为我国职业卫生领域亟需解决的问题,国内外的相关学者专家针对这一问题做了大量研究工作,不管是理论研究还是实证分析,所有的研究成果都证明,长期接触超标的焊接烟尘会对作业工人的身体健康造成较大危害。目前,在焊接烟尘通风净化研究方面主要存在的问题有:

1)传统的焊接烟尘通风净化系统设计一般仅针对焊接工位,污染源位置固定,作业人员也在同一高度范围内进行作业的情况。但在实际工程上,特别是一些预制式建筑的施工过程中,焊接点可能分布于施工空间的各个角落和各个高程,具有流动性强、焊点之间交叉影响大的特点,因此采用传统的烟尘控制系统难以满足工作现场焊接烟气的控制要求。

2)我国在焊接烟尘运动机理以及置换通风控尘方面的研究起步较晚,对受限空间控尘气流组织的研究还未能形成系统的理论,导致在工程实际通风中,为降低和排除工作空间内的焊接烟尘浓度,往往盲目地加大风量或增加设备数量,并未合理考虑空间内的流场分布,造成能耗和投资的增加,但控尘效果却没有得到相应提高。此外,置换通风效率受季节限制较大,如何提高其在冬季工况下的运行效果,使之应用于全气候条件仍然尚未解决。

### 4.2 发展方向

今后,焊接烟尘通风净化的发展趋势主要有以下3个方面:

1)置换通风作为受限空间烟尘通风净化的有效手段将得到越来越广泛的应用,寻求将置换通风与局部通风、自然通风等多种通风净化形式相结合,将会是增强系统的气候适用性、提高除尘效率、降低除尘运行成本和能源消耗的必然要求。

2)在受限空间焊接烟尘通风净化系统设计中,特别是对于高大空间的控尘系统,应强调气流组织的重要性,而不是简单地调节送风速度或者风量以及增加设备数量。CFD数值模拟将成为受限空间焊接烟尘通风净化系统设计不可缺少的一个环节。

3)通风净化系统将向着便捷化、高效化和专业化方向发展,目前已经出现的自吸式焊枪就有设备灵活性好、除尘效率高的特点。以后将会出现越来越多的适用于不同生产过程、生产环境专用通风净化系统。

### 参考文献:

- [1] POPOVIĆO, PROKČ-CVETKOVIĆ R, BURZIĆ M, et al. Fume and Gas Emission During Arc Welding: Hazards and Recommendation[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 37(3): 509-516.
- [2] 王先良. 电焊对作业工人健康的影响[J]. *环境卫生学杂志*, 2003, 30(1): 4-8.  
WANG Xianliang. The Welding Hazard for Worker Health[J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2003, 30(1): 4-8.
- [3] GRAY C N, HEWITT P J, DARE P R. New Approach Would Help Control Weld Fumes at Source. Part Three: MMA Fumes[M]. *Highway Capacity Manual, Sixth Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*, 1983: 20.
- [4] JENKINS N T, EAGAR T W. Fume Formation from Spatter Oxidation During Arc Welding[J]. *Science & Technology of Welding & Joining*, 2013, 10(10): 537-543.
- [5] OPRYA M, KIRO S, WOROBIEC A, et al. Size Distribution and Chemical Properties of Welding Fumes of Inhalable Particles[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2011, 45(3): 50-57.
- [6] 施雨湘, 乔亚霞, 酆贞雅宏. 焊接气溶胶粒子谱分布特征[J]. *焊接学报*, 2003, 24(1): 31-34.  
SHI Yuxiang, QIAO Yaxia, TOYOSADA Masahiro. Distribution Feature of Welding Aerosol Particle Size[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, 24(1): 31-34.
- [7] 饶良平. 置换通风在高大空间中的应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.  
RAO Liangping. Study on Application of Displacement Ventilation in Large Space[D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [8] 崔腾. 连跨大空间厂房电焊烟尘控制技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.  
CUI Teng. Research on Control Technology of Welding Fume in Multi-Span Large Space Factory Building[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016.
- [9] ANTONINI J M, LEWIS A B, ROBERTS J R, et al. Pulmonary Effects of Welding Fumes: Review of Worker and Experimental Animal Studies[J]. *American Journal of Industrial Medicine*, 2003, 43(4): 350-360.

- [10] 魏康, 何立. 焊接及其相关工艺过程中的有害物质[J]. 电焊机, 2004, 34(12): 60-64.  
WEI Kang, HE Li. Hazardous Substances in Welding and Allied Processes[J]. Electric Welding Machine, 2004, 34(12): 60-64.
- [11] 杨珂, 李强民. 封闭式焊接车间的节能型通风方式[J]. 上海节能, 2008(1): 43-46.  
YANG Ke, LI Qiangmin. Energy-Saving Ventilation Method for Enclosed Welding Workshop[J]. Shanghai Energy Conservation, 2008(1): 43-46.
- [12] 马中飞. 工业通风与防尘[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 139-147.  
MA Zhongfei. Industrial Ventilation and Dust Prevention[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 139-147.
- [13] 王汉青. 通风工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 66-67.  
WANG Hangqing. Ventilation Engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2013: 66-67.
- [14] SERVICE A G P. National Occupational Health and Safety Commission: Annual Report 1989-90[R]. Australian: Australian Government Publishing Service, 1990.
- [15] FLYNN M R. On the Inertial Range of Particles Under the Influence of Local Exhaust Hoods[J]. Annals of Occupational Hygiene, 2003, 47(2): 151-156.
- [16] FLYNN M R, SUSI P. Manganese, Iron, and Total Particulate Exposures to Welders[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2009, 7(2): 115-126.
- [17] MEEKER J D, SUSI P, FLYNN M R. Manganese and Welding Fume Exposure and Control in Construction[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2007, 4(12): 943-951.
- [18] MEEKER J D, SUSI P, FLYNN M R. Hexavalent Chromium Exposure and Control in Welding Tasks[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2010, 7(11): 607.
- [19] KROMHOUT H V R, KNOLL B. Determinants of Exposure to Welding Fumes: Lessons Learned from a Database Covering a 20-Year Period[C]//Exposure Assessment in a Changing Environment. Utrecht: The Netherlands, 2004.
- [20] FLYNN M R, SUSI P. Local Exhaust Ventilation for the Control of Welding Fumes in the Construction Industry: A Literature Review[J]. Annals of Occupational Hygiene, 2012, 56(7): 764-776.
- [21] FEIGLEY C E, BENNETT J S, LEE E, et al. Improving the Use of Mixing Factors for Dilution Ventilation Design[J]. Applied Occupational & Environmental Hygiene, 2002, 17(5): 333-343.
- [22] 蔡文源. 关于全面通风上下部排风量分配问题[J]. 建筑热能通风空调, 2001, 21(2): 59.  
CAI Wenyuan. A Discussion About Distribution of Exhausting Air from Top and Bottom in General Ventilation Systems[J]. Building Energy & Environment, 2001, 21(2): 59.
- [23] 何俊, 彭言群, 胡平成. 某全面通风除尘设备除尘效果评价[J]. 中国卫生工程学, 2014, 13(2): 98-99, 103.  
HE Jun, PENG Yanqun, HU Pingcheng. Effect Evaluation of a General Ventilation and Dust Control Equipment[J]. Chinese Journal of Public Health Engineering, 2014, 13(2): 98-99, 103.
- [24] 林文敏, 王志勇, 蔡健峰, 等. 作业车间全面通风换气量的计算[J]. 海峡预防医学杂志, 2002, 8(5): 66.  
LIN Wenmin, WANG Zhiyong, CAI Jianfeng, et al. Dilution Ventilation Calculation in Workshop[J]. Strait Journal of Preventive Medicine, 2002, 8(5): 66.
- [25] 杜雅兰, 黄明娟, 周丽铭. 全面通风与局部通风的应用分析[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2014, 4(3): 143-147.  
DU Yalan, HUANG Mingjuan, ZHOU Liming. Analysis and Application of General Ventilation and Local Ventilation[J]. Railway Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health, 2014, 4(3): 143-147.
- [26] 孙海波. 高大工业整体厂房焊接烟尘控制与置换通风空调技术研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2010.  
SUN Haibo. The Study of Welding Fume Control and Displacement Ventilation in Large Integral Industrial Workshops[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2010.
- [27] 游国祥, 刘春菊, 葛风华. 焊接厂房通风系统应用分析[J]. 中国资源综合利用, 2008, 26(4): 29-32.  
YOU Guoxiang, LIU Chunju, GE Fenghua. Application Analysis of Ventilation System in Welding Workshop[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2008, 26(4): 29-32.
- [28] YUAN X, CHEN Q, GLICKSMAN L. A Critical Review of Displacement Ventilation[J]. ASHRAE Transactions, 1998, 4101: 78-90.
- [29] PARK H J, HOLLAND D. The Effect of Location of a Convective Heat Source on Displacement Ventilation: CFD Study[J]. Building & Environment, 2001, 36(7): 883-889.
- [30] NIELSEN P V. Air Distribution Systems: Room Air Movement and Ventilation Effectiveness[R]. Dept. of Building Technology and Structural Engineering, 1992.
- [31] 吴暄, 武文斐, 高靖芳. 多热源置换通风温度分布及影响因素模拟分析[J]. 建筑热能通风空调, 2007, 26(2): 1-5.



- WU Xuan, WU Wenfei, Gao Jingfang. Numerical Simulation on Temperature Distribution and Influence Factors of Displacement Ventilation System with Many Heat Sources[J]. Building Energy & Environment, 2007, 26(2): 1-5.
- [32] 张俊梅, 沈国民, 谢军龙, 等. 应用CFD方法确定置换通风系统的设计参数[J]. 建筑热能通风空调, 2001, 21(2): 17-19.  
ZHANG Junmei, SHEN Guomin, XIE Junlong, et al. Application of CFD in the Study of Replacement Ventilation[J]. Building Energy & Environment, 2001, 21(2): 17-19.
- [33] 许 婕, 亢燕铭, 钟 珂. 不同污染源位置对颗粒物浓度影响的数值模拟[J]. 洁净与空调技术, 2008 (1): 12-16.  
XU Jie, KANG Yanming, ZHONG Ke. Numerical Simulation of the Concentration Variation Under Different Pollutant Sources in a Displacement Ventilating Room[J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2008 (1): 12-16.
- [34] 陈玖玖, 赵 彬, 李先庭. 置换通风不同风量下颗粒分布的数值研究[C]//全国暖通空调制冷2004年学术年会资料摘要集(2). 兰州: 中国建筑学会暖通空调专业委员会, 2004: 118-122.  
CHEN Jiujiu, ZHAO Bin, LI Xianting. Simulation of Particle Distribution Under Displacement Ventilation with Variable Air Quantity[C]//Summary of the National Conference on Heating, Air Conditioning and Refrigeration in 2004 (2). Lanzhou: China Committee of Heating, Ventilation & Air-Conditioning, 2004: 118-122.
- [35] 陈 可. 置换通风对悬浮颗粒分布影响的数值模拟[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.  
CHEN Ke. A Numerical Simulation of Influence of Displacement Ventilation on Distribution of Suspended Particulate Matter[D]. Changsha: Hunan University, 2005.
- [36] 刘 猛, 龙惟定, 刘卫华. 置换通风热力分层高度的数值研究[J]. 暖通空调, 2009, 39(8): 112-115.  
LIU Meng, LONG Weiding, LIU Weihua. Numerical Research on Thermal Stratification Height of Displacement Ventilation Systems[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2009, 39(8): 112-115.
- [37] 马国彬, 茅清希, 陈 滨. 热源分布对置换通风气流组织的影响[J]. 洁净与空调技术, 2005 (3): 21-24.  
MA Guobin, MAO Qingxi, CHEN Bin. Effects of Heat Source Distributing on Airflow Organization of Displacement Ventilation[J]. Contamination Control & Air-Conditioning Technology, 2005 (3): 21-24.
- [38] 马国彬, 魏学孟. 置换通风气流组织及其影响因素分析研究[J]. 建筑热能通风空调, 2002, 21(3): 5-8, 13.  
MA Guobin, WEI Xuemeng. Air Flow Organization of Displacement Ventilation and Analytic Study of Influential Factors[J]. Building Energy & Environment, 2002, 21(3): 5-8, 13.
- [39] 马仁民, 连之伟. 置换通风几个问题的讨论[J]. 暖通空调, 2000, 30(4): 18-22.  
MA Renmin, LIAN Zhiwei. Some Questions in Displacement Ventilation[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2000, 30(4): 18-22.
- [40] NIEMELÄ R, KOSKELA H, ENGSTRÖM K. Stratification of Welding Fumes and Grinding Particles in a Large Factory Hall Equipped with Displacement Ventilation[J]. Annals of Occupational Hygiene, 2001, 45(6): 467-471.
- [41] 李强民. 置换通风原理、设计及应用[J]. 暖通空调, 2000, 30(5): 41-46.  
LI Qiangmin. Displacement Ventilation: Principles, Design and Applications[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2000, 30(5): 41-46.
- [42] 孟广田, 李强民. 置换通风的热舒适分析与评价[J]. 建筑热能通风空调, 2000, 19(1): 21-22, 20.  
MENG Guangtian, LI Qiangmin. Analysis and Evaluation on Thermal Comfort of Replacement Ventilation[J]. Building Energy & Environment, 2000, 19(1): 21-22, 20.
- [43] 贾雪峰, 刘 东, 刘传聚. 某封闭焊接车间的置换通风模拟研究[J]. 暖通空调, 2010, 40(2): 76-80.  
JIA Xuefeng, LIU Dong, LIU Chuanju. Simulation of Displacement Ventilation in a Large-Space Closed Welding[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2010, 40(2): 76-80.
- [44] WANG H Q, HUANG C H, LIU D, et al. Fume Transports in a High Rise Industrial Welding Hall with Displacement Ventilation System and Individual Ventilation Units[J]. Building & Environment, 2012, 52(6): 119-128.
- [45] 杨 珂, 李强民. 封闭式焊接车间通风方式的解决方案[J]. 暖通空调, 2008, 38(5): 5-9.  
YANG Ke, LI Qiangmin. Ventilation Mode for a Closed Welding Workshop[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2008, 38(5): 5-9.
- [46] 马相雪, 李 灿, 刘 华, 等. 大空间焊接厂房置换通风效果试验[J]. 电焊机, 2011, 41(2): 48-51.  
MA Xiangxue, LI Can, LIU Hua, et al. Test on Effects of Displacement Ventilation in Welding Plants with Adequate Space[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(2): 48-51.

(责任编辑: 廖友媛)