

焊接车间多尘源粉尘分布数学模型和验证

蒋仲安, 兰桂, 彭亚

(北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了对焊接车间粉尘进行高效治理, 对焊接车间粉尘分布规律进行了研究. 采用理论计算的方法, 运用大气紊流扩散模型, 考虑焊接车间作业点多且产生复杂的情况, 理论计算得到了实测多尘源情况下的粉尘分布. 与现场实测值进行了对比, 验证了理论计算方法的可行性. 结果表明, 单区域作业时, 粉尘主要分布在测点 13 和测点 14 附近, 两点处的粉尘浓度均为 6.297 mg/m^3 ; 相邻区域作业时, 粉尘主要分布在测点 16 附近, 此处粉尘浓度为 11.852 mg/m^3 ; 对角区域作业时, 测点 24 附近的粉尘浓度最大, 其浓度值为 9.088 mg/m^3 , 测点 14 和测点 15 附近的粉尘浓度也较大, 其粉尘浓度均为 6.284 mg/m^3 ; 多尘源共同作用区域粉尘有叠加.

关键词: 扩散模型; 多尘源; 焊接烟尘; 浓度分布

中图分类号: TG 408 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400102

0 序 言

焊接过程中产生的粉尘通常会使工人的健康受到损害, 同时还会影响设备的使用效率以及使用寿命^[1], 如果不对这些粉尘采取控制措施就排向外面, 还会对周围环境造成严重地污染^[2]. 所以为了对粉尘进行治理, 首先研究粉尘的分布规律^[3], 才能高效除尘.

近年来, 车间内的粉尘分布特性得到了较大范围研究. 在工业通风和工业除尘等领域都得到了一定程度的重视, 应用范围逐渐扩大^[4]. 卜智翔等人^[2]将焊接车间的焊接气溶胶扩散过程作为研究对象, 运用计算流体力学湍流理论, 选择包含浮力项的三维方程以及方程模式建立了焊接气溶胶扩散数学模型, 研究了焊接气溶胶扩散随时间、空间变化的规律^[5]. 付晓^[3]采用实测与数值模拟相结合的方法, 建立了车间物理模型, 运用 Fluent 模拟软件, 对车间内的风流速度场和粉尘浓度分布场进行了模拟^[6].

针对焊接车间作业点多且产尘形式多样的情况, 运用大气紊流扩散数学模型, 采用理论计算的方法对中车长春轨道客车股份有限公司的转向架制造中心焊接车间粉尘分布进行研究并与实际测得的粉尘分布进行对比.

1 数学模型的建立

研究粉尘扩散的数学模型主要是费克第一扩散定律, 该模型基于流场速度分布与离散相的存在无关的假设, 也就是说在粉尘的扩散过程中, 空气质点之间不发生粉尘质点的转移, 粉尘的扩散完全是由于带有粉尘的空气掺混的结果^[7].

建立笛卡尔 (x, y, z) 坐标系, 坐标为垂直地面方向^[8]. 在各向同性的介质中, 扩散的数学模型是基于这样一个假设: 即穿过单位截面积的扩散物质的迁移速度与该面的物质浓度成比例, 即费克第一扩散定律

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

式中: F 为在单位时间内通过单位面积的粒子的质量 ($\text{mg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$); C 为扩散物质的浓度 (mg/m^3); D 为扩散系数 (m^2/s).

考虑一体积微元, 假设扩散系数为常数, 式 (1) 可变为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

应用高斯模式进行扩散模型分析, 其坐标系为排放点或排放点在地面的投影点, x 轴为平均风向, y 轴在水平面上垂直于 x 轴, 正向在 x 轴的左侧, z 轴垂直于水平面 Oxy , 向上方为正向, 即为右手坐标系^[9]. 高斯模式作出了四点假设: ①污染物浓度

在 y, z 轴上的分布符合高斯分布 (正态分布); ②在全部空间中风速是均匀的、稳定的; ③源强是连续均匀的; ④在扩散过程中污染物质量是守恒的^[10]。

如果风速取为沿 x 轴方向, 且风速 u 为常量, 则扩散方程可以计算为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u \frac{\partial C}{\partial x} + D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (3)$$

式中: C 为下风侧污染物的浓度, mg/m^3 ; u 为平均风速, m/s ; D_x, D_y, D_z 分别为 x 轴、 y 轴、 z 轴方向的扩散系数, m^2/s 。

式 (3) 中右边第二项远小于第一项, 因而可以略去, 若扩散是稳定的, 等式左边为 0, 则简化后此二阶偏微分方程的一般解为

$$C = Kx^{-1} \exp \left[- \left(\frac{y^2}{D_y} + \frac{z^2}{D_z} \right) \frac{u}{4x} \right] \quad (4)$$

对地面以上高度为 H 的点源 K 值为

$$K = \frac{Q}{4\pi(D_y D_z)^{1/2}} \quad (5)$$

式中: Q 为将地面点源的 K 值代入式中, 得到水平地面上污染物的浓度为

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi(D_y D_z)^{1/2}} x^{-1} \exp \left[- \left(\frac{y^2}{D_y} + \frac{z^2}{D_z} \right) \frac{u}{4x} \right] \quad (6)$$

令 $\sigma_y^2 = \frac{2D_y x}{u}$, $\sigma_z^2 = \frac{2D_z x}{u}$, 得到地面水平点源下游的浓度关系式

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (7)$$

地面水平点源高度 H 处点源的扩散, 属于高架连续点源的扩散问题, 必须考虑地面对扩散的影响。根据前述假设④, 可以认为地面像镜面一样, 对污染物起全反射作用, 则污染物浓度看成是两部分贡献之和^[11]: 一部分是不存在地面所具有的污染物浓度; 另一部分是由于地面反射作用增加的污染物浓度。这相当于不存在地面时由位置在 $(0, 0, H)$ 的实源和在 $(0, 0, -H)$ 的虚源所造成污染物浓度之和。

实源产生的污染物浓度为

$$C(x, y, z)_{\text{实}} = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (8)$$

虚源产生的污染物浓度为

$$C(x, y, z)_{\text{虚}} = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (9)$$

实际污染物浓度应为实源和虚源作用之和, 即

$$C = C_{\text{实}} + C_{\text{虚}} \quad (10)$$

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left(- \frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right) \times \left\{ \exp \left[- \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2} \right] + \exp \left[- \frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (11)$$

式中: $C(x, y, z, H)$ 为源强 $Q(\text{mg}/\text{s})$, 高度 $H(\text{m})$ 的排放源在下风侧向空间点 (x, y, z) 处造成的浓度, mg/m^3 ; u 为大气平均风速, m/s ; σ_y, σ_z 为横向和纵向的扩散参数, m 。

由于固体粒子的运动受重力强烈影响, 在不考虑工作面反弹的影响下, 式 (11) 变形得到粉尘浓度的计算公式为

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[- \left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{\left(z + \frac{v_1 x}{u} - H \right)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right] \quad (12)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho_g)gd_p}{3\rho_g C_s}} \quad (13)$$

式中: v_1 为下沉速度 (m/s); ρ_p 为粉尘密度 (kg/m^3); ρ_g 为空气密度 (kg/m^3); d_p 为粉尘粒径 (m); g 为重力加速度 (m/s^2)。

2 现场粉尘分布测定

焊接车间长 13 m, 宽 60 m, 高 12 m, 有 24 个可能产生尘源, 以走廊交接的中心点, 即测点 3 在地面的投影为原点, 布置了 24 个测点, 尘源和测点的分布如图 1 所示, 它们所在的位置如表 1 所示。使用 CEL-712 Microdust Pro 实时粉尘监测仪对粉尘浓度进行测定。

现场实测时的产生尘点有尘源四、尘源五、尘源六、尘源七、尘源八、尘源九、尘源十六、尘源十八、尘源十九、尘源二十、尘源二十一、尘源二十二。

测得的转向架制造中心多尘源耦合全尘浓度最大值为 $10.65 \text{ mg}/\text{m}^3$, 呼尘浓度最大值为 $4.79 \text{ mg}/\text{m}^3$, 均超出国家标准。测点 1, 5 全尘浓度小于测点 2, 3, 4 全尘浓度, 作业区粉尘浓度明显大于非作业区; 由焊接机械手与变位机测点对比可知, 焊接机械手粉尘浓度大于变位机, 因为焊接过程中变位机焊接点具有自动吸尘装置, 能将焊接产生的烟尘吸走一部分; 转向架制造中心抛光打磨点全尘浓度最高为 $7.12 \text{ mg}/\text{m}^3$, 明显低于焊接点粉尘浓度, 抛光打磨点产生粉尘量很大, 但是由于打磨出颗粒直径较大, 小颗粒相对较少, 故抛光打磨点粉尘浓度低于焊接

点粉尘浓度;焊接点呼尘浓度占全尘浓度比例约为 45%,抛光打磨点呼尘浓度占全尘浓度比例约为 40%.

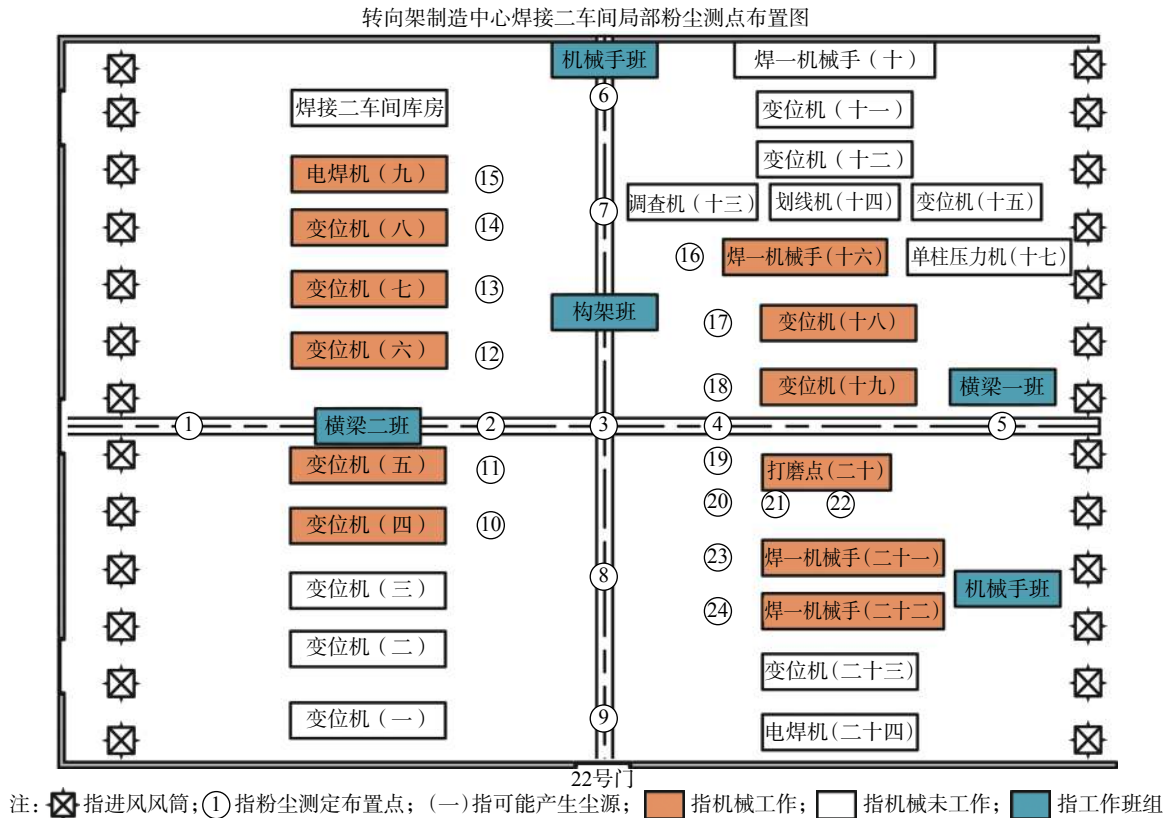


图 1 尘源和测点分布

Fig. 1 Dust sources and measuring points

表 1 尘源和测点所在位置 (x, y, z)(m)

Table 1 Dust sources and measuring points location

组号	尘源坐标/测点坐标	组号	尘源坐标/测点坐标
1	-3.6, -21.5, 1.2/-6, 0, 1.5	13	3, 16.5, 1.2/-1.8, 5.5, 1.5
2	-3.6, -11.5, 1.2/-1.8, 0, 1.5	14	4.2, 16.5, 1.2/-1.8, 8.5, 1.5
3	-3.6, -8.5, 1.2/0, 0, 1.5	15	5.5, 16.5, 1.2/-1.8, 11.5, 1.5
4	-3.6, -5.5, 1.2/1.8, 0, 1.5	16	3.6, 8.5, 1.5/1.8, 8.5, 1.5
5	-3.6, -2.5, 1.2/6, 0, 1.5	17	5.55, 11, 1.2/1.8, 5.5, 1.5
6	-3.6, 2.5, 1.2/0, 16, 1.5	18	3.6, 5.5, 1.2/1.8, 2.5, 1.5
7	-3.6, 5.5, 1.2/0, 31, 1.5	19	3.6, 2.5, 1.2/1.8, -1.8, 1.5
8	-3.6, 8.5, 1.2/0, 14, 1.5	20	3.6, -2.5, 1.2/1.8, -3.2, 1.5
9	-3.6, 11.5, 1.2/0, 27, 1.5	21	3.6, -10.5, 1.5/2.6, -3.2, 1.5
10	3.6, 25.5, 1.5/-1.8, -5.5, 1.5	22	3.6, -18.5, 1.5/4.2, -3.2, 1.5
11	3.6, 22.5, 1.2/-1.8, -2.5, 1.5	23	3.6, -21.5, 1.2/1.8, -10.5, 1.5
12	3.6, 19.5, 1.2/-1.8, 2.5, 1.5	24	3.6, -24.5, 1.2/1.8, -18.5, 1.5

3 现场与理论粉尘分布对比验证

3.1 粉尘浓度理论计算

理论上,不同的机械作业产生的粉尘粒度不一样,粉尘发散量也不一样,作业产生热量导致机械

附近温度不一样,使得空气粘度也不一样.为了简化计算,将不同机械作业的粉尘发散量、粒径和空气粘性系数统一,粉尘发散量均为 4 mg/s,粉尘粒径为 1×10^{-6} m,空气动力粘性系数为 1.8×10^{-5} Pa·s,且不考虑隔板的影响.由现场实测的其余的物理

量, 风速为 0.2 m/s, 粉尘密度为 7 850 kg/m³, 空气密度为 1.29 kg/m³, 重力加速度取 9.8 m/s², 扩散系数 D_y 为 0.040 6 m²/s, D_z 为 0.009 2 m²/s.

首先求雷诺数, 可计算为

$$Re = \frac{\rho_g d_p u}{\mu_g} = \frac{1.29 \times 1 \times 10^{-6} \times 0.2}{1.8 \times 10^{-5}} = 0.014 \quad (14)$$

则空气阻力系数可按下式计算, 即

$$C_s = \frac{24}{Re} = \frac{24}{0.014} = 1\,714.29 \quad (15)$$

将式 (14) 和式 (15) 代入式 (13) 可得

$$\begin{aligned} v_1 &= \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho_g)gd_p}{3\rho_g C_s}} \\ &= \sqrt{\frac{4(7\,850 - 1.29) \times 9.8 \times 1 \times 10^{-6}}{3 \times 1.29 \times 1\,714.29}} \\ &= 6.8 \times 10^{-3} \frac{v_1}{u} = \frac{6.8 \times 10^{-3}}{0.2} = 0.03 \end{aligned} \quad (16)$$

运用 MATLAB 软件, 按照之前得到的粉尘浓度计算公式, 计算出在现场实测时的产生尘源作用下, 整个车间的粉尘浓度, 并绘出粉尘分布如图 2 所示.

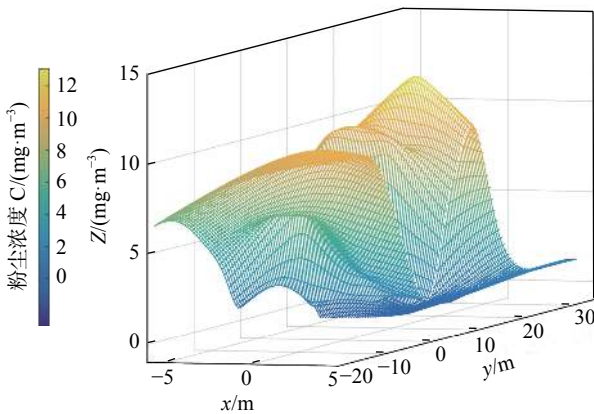


图 2 实测作业情况下理论计算所得粉尘浓度分布

Fig. 2 Dust distribution of theory calculation under actual condition

由图 2 可以看出以下 3 点.

(1) 尘源附近的粉尘浓度比较高, 焊-机械手附近的粉尘浓度要高于其它作业附近的粉尘浓度.

(2) 在尘源共同作用区域的粉尘浓度要比同等距离下单独作用区域的粉尘浓度要高.

(3) 在实测工作条件下, 有两个粉尘浓度较高的区域, 粉尘浓度的分布有起有伏.

3.2 现场与理论对比

将每个测点所得的计算粉尘浓度与实测粉尘浓度填入表 2, 然后作出计算粉尘浓度与实测粉尘

浓度的变化曲线, 比较它们的差值.

由表 2 和图 3 可以看出以下 3 点.

表 2 理论与实测粉尘浓度 ($C/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$)

Table 2 Theory and measured dust concentration

测点	理论	实测	偏差	测点	理论	实测	偏差
1	1.295	0.722	-0.573	13	9.457	9.683	0.226
2	1.360	1.834	0.474	14	9.586	8.786	-0.800
3	1.679	2.453	0.774	15	6.666	7.892	1.226
4	1.363	2.122	0.76	16	12.182	10.265	-1.917
5	1.731	0.988	-0.743	17	9.398	8.655	-0.743
6	0.003	0.643	0.640	18	9.071	8.342	-0.729
7	0.000	1.982	1.982	19	7.090	6.534	-0.556
8	0.072	2.112	2.040	20	7.684	7.126	-0.558
9	0.000	0.795	0.795	21	7.660	6.383	-1.277
10	6.610	8.464	1.854	22	6.513	6.898	0.385
11	8.754	8.323	-0.431	23	9.083	10.652	1.569
12	9.071	9.534	0.463	24	9.074	10.324	1.250

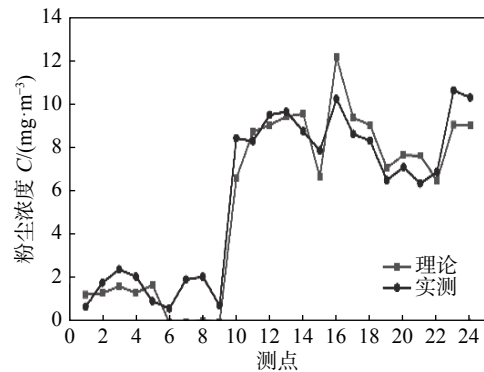


图 3 理论与实测粉尘浓度对比曲线

Fig. 3 Comparison of theory and measured dust concentration

(1) 就粉尘浓度分布规律而言, 理论数据与实测数据基本接近, 变化趋势也是大致相似的, 但存在一定的偏差. 其中测点 7, 8, 10, 16 的偏差接近于 2 mg/m³, 测点 15, 21, 23, 24 的偏差超过 1 mg/m³, 其余测点的偏差均在 1 mg/m³ 以内.

(2) 尘源二十附近测点的理论计算粉尘浓度和实测粉尘浓度都是相接近的, 这与常识相符, 说明理论计算和实测都有一定的准确性. 理论计算粉尘浓度与实测粉尘浓度存在一定的差异, 这是由于一方面理论的数学模型是简化了的, 没有考虑到实际中很多的变化因素, 比如将所有尘源看作是一样的, 实际上不同的作业产生的尘源量和粉尘粒径等

都是不同的. 另一方面在实际粉尘测量中, 也难免由于操作或仪器存在误差. 但二者的差值相对较小, 是满足要求的.

(3) 通过对比分析, 说明用理论数学模型计算去研究转向架制造车间密集多尘源粉尘分布规律是可行的.

4 不同工作情况理论粉尘分布

实际工作中每个尘源点(工作点)产尘与否是不一定的^[12], 导致焊接车间尘源分布情况不一样, 使得粉尘分布规律也就不一样. 因此, 为了探究不同尘源分布下的粉尘分布规律, 为高效除尘提供依据, 理论计算出不同尘源分布情况下的粉尘浓度.

4.1 单区域作业

只有一个区域作业时, 即产尘点为尘源六、尘源七、尘源八、尘源九, 理论计算得到的粉尘浓度分布等值线图如图4所示.

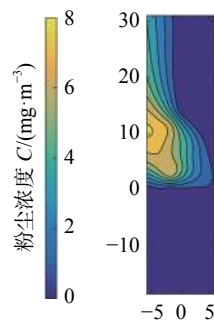


图4 单区域作业理论粉尘分布
Fig. 4 Single area theory dust distribution

由图4可以看出以下3点.

(1) 只有一个粉尘浓度较高的区域, 粉尘分布主要集中在尘源附近, 远离尘源的区域粉尘浓度基本接近于零, 粉尘浓度由尘源处逐渐向外递减.

(2) 测点13和测点14附近的粉尘浓度最大, 两点处粉尘浓度均为 6.297 mg/m^3 . 这也是尘源共同作用区域, 说明尘源共同作用使得粉尘浓度增加, 尘源共同作用区域粉尘浓度最大.

(3) 受到墙壁的影响, 粉尘呈半圆状向非墙壁一侧逐渐扩散.

4.2 相邻区域作业

相邻区域同时作业时, 即产尘点为尘源八、尘源九、尘源十二、尘源十四、尘源十六, 理论计算得

到的粉尘浓度分布等值线图如图5所示.

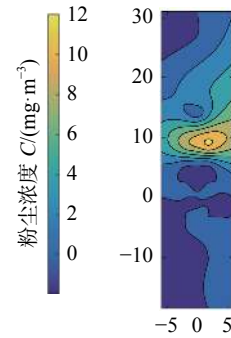


图5 相邻区域作业理论粉尘分布
Fig. 5 Adjacent area theory dust distribution

由图5可以得出以下3点.

(1) 只有一个粉尘集中区域, 位于尘源附近, 粉尘浓度由尘源向外逐渐递减并趋近于零.

(2) 测点16附近的粉尘浓度最大, 此处粉尘浓度为 11.852 mg/m^3 . 说明尘源共同作用使得粉尘浓度增加, 尘源共同作用区域粉尘浓度最大.

(3) 粉尘呈椭圆状从相邻区域共同作用处向四周逐渐扩散.

4.3 对角区域作业

对角区域同时作业时, 即产尘点为尘源八、尘源九、尘源二十二、尘源二十三, 理论计算得到的粉尘浓度分布等值线图如图6所示.

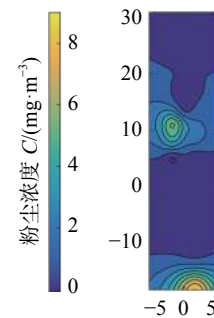


图6 对角区域作业理论粉尘分布
Fig. 6 Diagonal area theory dust distribution

由图6可以得出以下3点.

(1) 有两个粉尘浓度较高的区域, 粉尘分布主要集中在对角两个区域的尘源附近, 远离尘源的区域粉尘浓度基本接近于零, 粉尘浓度由尘源处逐渐向外递减.

(2) 测点24附近的粉尘浓度最大, 此处粉尘浓度为 9.088 mg/m^3 . 测点14和测点15附近的粉尘浓度也较大, 此两点处粉尘浓度均为 6.284 mg/m^3 .

可以看出尘源共同作用使得粉尘浓度增加,尘源共同作用区域粉尘浓度最大,焊—机械手作业附近的粉尘浓度会更大。

(3) 两个尘源集中区域的粉尘向外扩散均受到了墙壁的影响,粉尘浓度向远离墙壁侧逐渐递减。

5 结 论

(1) 运用大气紊流扩散模型,理论计算了实测情况下的粉尘分布,与现场实测结果对比,数据基本接近,变化趋势也是大致相似的,说明理论计算有准确性。

(2) 尘源共同作用区域的粉尘浓度要比同等距离下单独作用区域的粉尘浓度高,说明多尘源共同作用粉尘有叠加。

(3) 单区域作业时,只有一个粉尘集中区域,粉尘主要分布在测点 13 和测点 14 附近,此两点处粉尘浓度均为 6.297 mg/m^3 。

(4) 相邻区域作业时,只有一个粉尘集中区域,粉尘主要分布在测点 16 附近,此处粉尘浓度为 11.852 mg/m^3 。

(5) 对角区域作业时,有两个粉尘集中区域,测点 24 附近的粉尘浓度最大,此处粉尘浓度为 9.088 mg/m^3 ,测点 14 和测点 15 附近的粉尘浓度也较大,此两点处粉尘浓度均为 6.284 mg/m^3 。

(6) 理论计算得到了不同尘源分布情况下的粉尘集中区域,为粉尘高效治理提供了依据。

参考文献:

- [1] 夏雄博. 多目标优化焊接厂房置换通风的气流组织 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015.
- [2] 陈 娟. 建材生产厂房粉尘治理研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2014.
- [3] 马辉猛. 纺织厂粉尘分布的数值模拟与检测方法的研究 [D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2014.
- [4] 王汉青. 通风工程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] 卜智翔, 彭志方, 施雨湘. 焊接结构车间焊接气溶胶扩散的数值模拟 [J]. 武汉交通科技大学学报, 2007, 28(2): 43 - 47.
Bu Zhixiang, Peng Zhifang, Shi Yuxiang. Numerical simulation of welding aerosol diffusion in welding structure workshop[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 28(2): 43 - 47.
- [6] 付 晓. 面粉车间的粉尘浓度分布及其控制措施研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- [7] 张 婕. 水泥包装车间转载点粉尘分布与控制研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [8] 杨 桐. 储煤仓下给料机煤尘污染机理和控制技术 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012.
- [9] 王 伟. 马鞍山市道路清扫对空气悬浮颗粒物浓度影响的调查研究 [D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2012.
- [10] 孙忠强. 公路隧道钻爆法施工粉尘运移规律及控制技术研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [11] 蒋仲安. 工业通风与除尘 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [12] 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]. 赣州: 江西理工大学, 2015.

第一作者简介: 蒋仲安, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师. 主要从事粉尘治理与职业卫生方面的研究工作.
Email: jza1963@263.net