



煤炭港口粉尘排放问题的测算

汪大春

(国能黄骅港务有限责任公司, 河北 沧州 061110)

摘要: 国内各煤炭港口粉尘排放量和上缴排污税没有统一计算标准。针对这一问题, 通过分析影响煤炭起尘的关键因素, 对国内外主要的起尘量计算公式进行了总结分析。在港口建设项目环境影响评价规范推荐公式的基础上明确公式量纲、修正风速参数、引入一次起尘事件源强概念、将翻车机作业纳入无组织排放的核算, 最终构建了符合煤炭港口作业现状的排放总量计算公式。利用该公式对国家能源集团黄骅港粉尘排放进行测算, 得出黄骅港清洁生产洒水作业与粉尘排放的对应关系。公式对政府部门核算各港口粉尘排放量、收取合理的排污税具有重要指导意义。

关键词: 煤炭港口; 粉尘; 无组织排放; 计算公式

中图分类号: U 658.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0060-05

Calculation of dust emission in coal port

WANG Da-chun

(CHN Energy Huanghua Port Co., Ltd., Cangzhou 061110, China)

Abstract: There is no unified calculation standard for dust emission and pollution tax paid in various domestic coal ports. In response to this problem, by analyzing the key factors affecting coal dust emission, this paper summarizes and analyzes the main calculation formulas for dust emission at home and abroad. Based on the recommended formula for the environmental impact assessment of port construction projects, the formula dimension is defined, the wind speed parameters are revised, the concept of source strength of a dust-raising event is introduced, and the operation of the dumper is included in the calculation of unorganized emissions. Finally the calculation formula of total emission which accords with the current situation of coal port operation is constructed. The formula is used to calculate the dust emission in Huanghua port of the national energy group, and the corresponding relationship between the water spraying operation and the dust emission is obtained. The formula has an important guiding significance for government departments to calculate the amount of dust emission from ports and to collect reasonable discharge tax.

Keywords: coal port; dust; unorganized emission; calculation formula

无组织排放量总量核算一直是散货港口及码头行业所面临的重点和难点问题之一, 目前国内或行业内并未形成较为规范的排放量核算技术方法和核算细则, 国家环保总局 2004 年发布的《排污申报登记实用手册》中给出了炉、窑、灶煤炭作业排污系数, 其中动态装卸排放量为 $3.53‰ \sim 6.41‰$ 、静态堆存的排放量为 $1.48‰ \sim 2.02‰$ ^[1]。

由于该系数发布时间较早, 随着国家经济快速发展、行业技术水平提高和国家环境管控政策不断加严, 干散货码头作业工艺持续改进和新型环保设施的广泛应用, 港口煤炭作业工艺、环保措施及企业环境管理等都有了大幅度提升, 上述系数法确定排放量存在一定的不适用性。另一方面, 新政策的实施也势必将企业由原来的刚性被动管

收稿日期: 2020-10-12

作者简介: 汪大春(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事机械工程和清洁生产等方面研究。

理逐步转变为自身主动提高^[2]，对于散货港口来说，如何掌握自身粉尘污染排放现状、识别重点粉尘排放区域、提高企业环境管理水平，成为煤炭港口企业面临的新课题。

1 国内外研究现状及分析

1.1 煤炭起尘关键因素

从 20 世纪 50~60 年代开始，科研人员对于颗粒物在大气中起尘污染问题的机理开展了较为详尽的研究^[3]，对于颗粒物起尘的规律也进行了现场实测和风洞试验研究，积累了一定的资料，推算出一系列的公式，并形成一定的共识，主要有以下几点共识：

1)起尘影响因素。散货物料堆起尘的影响因素众多，与堆垛自身条件、气候、周围地形建筑物以及附近堆垛的相对位置等都存在一定的关系^[4]，其中堆垛表层含水率、风速、物料特性是影响起尘量大小的关键因素。

2)风速与起尘量的关系。在含水率为定值的前提下，当风速大于起动风速时，起尘量随风速成指数级增长^[5]。

3)含水率与起尘量的关系。在风速为定值的前提下，起尘量随含水率的增加成负指数减少。

4)物料特性与起尘量的关系。对于不同种类的煤炭，其氧化程度和煤化程度一定程度影响起尘量的大小^[6]。在相同条件下，随着煤化程度的提高煤堆的起尘量减少，随着氧化程度的上升而增多；对于不同的物料而言，主要体现在密度上，在其他条件相同的情况下，密度小的物料起尘量相对较大。

1.2 主要起尘量计算公式特点与应用分析

固体粒子被风吹起的过程极为复杂，迄今对其机理的掌握仍然不足。在大气现场直接测定起尘量难度较大，通过风洞模拟试验，可以确定影响该过程的一些因子，如平均风速、湿度、粒子的直径等，并总结了一些经验规律。然而，计算实际地面起尘因子时，须使用标准的气象学和固体颗粒学数据，与实验室情况有很大的区别^[7]。

现在应用较为广泛的是 JTS 105-1—2011《港口建设项目环境影响评价规范》（简称《规范》）、美国 EPA（美国环保局）排放量计算公式、《扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南（试行）》^[8]（简称《指南》）推荐的估算公式。

EPA 排放量计算公式中，摩擦风速和阈值摩擦风速的计算是排放量计算中的关键和敏感因子之一。地面粗糙度和阈值摩擦风速的选取与物料特性有关，该技术资料中仅给出有限的几种物料的取值范围，适用条件有限。因此应用 EPA 计算公式估算港口粉尘实际排放量存在较大局限性。

《指南》所推荐的公式在基础理论和表现形式上与 EPA 1995 年发布的大气污染源强汇编资料中提出的源强计算公式接近，该计算模型更多强调一次起尘事件的源强，且从微观层面对颗粒物受风力作用启动、漂移的现象进行解释和推导。受限于实际环境物料和气象条件的复杂情况，公式中涉及到的地面粗糙度、不同高度处风速换算、粒度乘数等众多参数较难给出适宜的取值范围，同时上述参数对于起尘量的估计又极为敏感，因此仍然存在一定的问题。

《规范》给出了煤炭、矿石堆场和装卸起尘量计算公式，该公式在分析研究粉尘启动和扬尘机理的基础上，依托风洞试验数据，分别构建了静态堆存和动态作业条件下的起尘量计算公式^[9]。公式中存在以下问题：静态起尘量 Q_1 的量纲不明确、实时风速未按照高度进行科学修正、堆垛表面积未考虑倒垛等因素影响。

除上述公式以外，国内外学者也提出过其他起尘量计算公式，大部分适用性较差、应用范围较小，此处不再一一赘述。

2 煤炭港口粉尘排放总量核算方法研究

2.1 原型计算公式选取与应用问题识别

静态堆存作业与颗粒粒径、风速、含水率、堆存总面积有关，动态作业起尘与作业量、风速、装卸高度落差、颗粒粒径、含水率有关。考虑到港口现场作业和气象因素的复杂性，将环境风速、

含水率、物料特性等因素直接作为粉尘排放量计算参数,建立上述因素与排放量的直接关系,此种排放量估算模型较为可靠且容易计算。

《指南》推荐公式是依据理论和统计的结果,与 EPA 公式类似,更多强调一次起尘事件的源强,其中的参数涵盖了大部分《规范》公式中的参数,相对而言更全面地体现了风蚀扬尘的内在规律以及与风场的关系,较接近实际情况。《指南》中的公式与 EPA 公式为同源公式,提出了摩擦风速,摩擦风速作为风力作用在颗粒物上的等效作用参数,是判断颗粒物开始移动的关键依据。摩擦风速的提出是以粉尘颗粒微观运动为基础,一般气象资料中给出的风速是 10 m 高度的风速,也就是宏观意义上的风速。摩擦风速的计算依赖于不同高度处风速修正,而风速的修正取决于地面粗糙度的取值。不同高度处的风速修正公式借鉴了类似于《建筑结构荷载规范》中风压高度变化系数的概念,但是由于该概念基于高层建筑荷载计算而提出,而干散货堆场的高度一般不超过 17 m,因此该风速修正公式不完全适用于堆场粉尘排放量计算。

本研究在《规范》推荐的起尘量计算公式的基础上,吸取其他各个排放量计算公式的优点和优势,结合风洞试验和现场实测研究成果,对《规范》公式进行补充和完善,推导得出新的煤炭粉尘排放量计算方法。本研究针对《规范》推荐公式进行了完善和优化,主要包括:1)明确公式量纲;2)风速 U 按照高度进行修正;3)引入《指南》公式中的一次起尘事件源强概念;4)翻车机房纳入无组织排放的核算。

2.2 计算公式参数修正

2.2.1 量纲的修正

通过风洞试验模拟,利用风洞实际起尘数据和风洞来流风速数据,拟合建立了静态起尘量与风速之间的计算公式:

$$Q_{\text{峰}}=0.014\,3\,(U-3.40)^3\tag{1}$$

式中: $Q_{\text{峰}}$ 为起尘量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); U 为风洞试验风速(m/s)。

在风洞试验中,风速单位是 m/s ,堆垛面积的单位是 m^2 ,吹蚀质量的单位是 g ,式(1)中起尘量的单位为 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;计算现场实际静态起尘量时,将单位时间、单位面积的起尘量乘以现场堆垛表面积和年作业时间,则得到现场起尘量单位为 g/a ,为便于计算将单位调整为 kg/a 。通过上述过程明确了完善后公式计算所得静态起尘量的量纲,避免了原规范公式应用时量纲不明确所带来的计算结果差别。

2.2.2 风速的修正

《规范》推荐静态公式中堆场风速并未明确风速 U 的监测高度,也没有说明是否需要依据不同高度对风速进行调整,因此造成不同人员计算所得起尘量结果存在差别。公式应用过程中风速多以 10 m 处的风速作为 U 的数值,未考虑选用的风速与堆场高度的关系。

通过现场试验测量,当堆场堆高过高($>15\text{ m}$)或过低($<5\text{ m}$)时,采用以下公式对风速 U 进行修正:

$$U(Z)=U_{10}\left[\ln(Z/Z_0)/\ln(10/Z_0)\right]\tag{2}$$

式中: $U(Z)$ 为高度 Z 处的风速(m/s); U_{10} 为 10 m 高处的风速(m/s); Z_0 为地面的粗糙度(m)。

煤炭港口最大堆垛高度通常为 17 m,用式(2)对不同堆垛高度条件下的 10 m 风速进行修正,对比修正前后起尘量的变化,见表 1,此处假定港口为 B 类粗糙度。

表 1 随高度修正风速对堆场静态起尘量的影响

堆垛高度/ m	风速修正后起尘量 未修正风速的起尘量/ $\%$			
	$U_{10}=5\text{ m/s}$	$U_{10}=6\text{ m/s}$	$U_{10}=8\text{ m/s}$	$U_{10}=10\text{ m/s}$
5	2.0	11.3	20.7	25.8
6	48.6	52.5	56.0	58.1
7	51.9	55.6	58.8	60.9
9	57.3	60.6	63.5	65.3
11	61.5	64.5	67.1	68.7
13	64.9	67.6	69.9	71.4
14	66.3	68.9	71.2	72.6
15	67.6	70.1	72.3	73.7
16	116.2	102.6	95.2	93.2
17	131.7	112.8	102.3	99.1

由表 1 可知,随高度修正风速对静态起尘量的影响,不仅和堆垛的高度有关,也和 10 m 高度

处的参考风速有关。总体来看，当堆垛高度达到 16、17 m 时，10 m 高度处风速为 5、6 m/s 条件下，修正风速计算所得起尘量略大于未修正风速的起尘量；当 10 m 高度处风速为 8 m/s 时，两种方法计算所得起尘量相近，且修正风速所得起尘量略低。另一方面，当堆垛高度小于或等于 15 m 时，修正风速后得到的起尘量小于未修正风速的起尘量，且随着堆垛高度的降低，两起尘量之间的差距也逐渐拉大。

经以上数据对比分析可知，堆垛高度达到或接近 17 m 高的专业化堆场，在计算静态起尘量时可以对风速进行高度修正，而当计算高度不足 15 m 堆垛的静态起尘量时，则需要考虑利用修正后的风速计算静态起尘量。

2.2.3 起尘面积的修正

堆垛表面积不发生变化，经过一段时间的风蚀，起尘总量是一定的。所以静态起尘不仅与堆垛表面积有关，同时与堆场的年堆存总量密切相关。年静态起尘量直接相关的是“年堆存总量累计形成堆垛面积总和”，而不是堆场满载时的最大堆存面积。

本研究拟合的堆垛总表面积计算公式中，明确堆垛表面积 $S_{总}$ 为堆场年堆存量累计堆垛表面积之和，根据下式进行计算：

$$S_{总} = \frac{A}{M} \cdot S_{单} \tag{3}$$

式中： $S_{总}$ 为堆场年堆存堆垛的总表面积 (m^2)； $S_{单}$ 为单个堆垛的表面积 (m^2)； A 为堆场年堆存总量 (包括倒垛质量) (kg)； M 为单个堆垛质量 (kg)。

2.2.4 翻车机房起尘量计算公式

《规范》推荐动态起尘量公式为：

$$Q_2 = \alpha \beta H e^{w_2(w_0-w)} Y / [1 + e^{0.25(v_2-U)}] \tag{4}$$

式中： Q_2 为动态作业起尘量 (kg)； α 为物料类型起尘调节系数； β 为作业方式系数，装船时 $\beta=1$ ，取料时 $\beta=2$ ； H 为作业落差 (m)； w_2 为水分作用系数，与散货性质有关，取 0.40~0.45； w_0 为水分作用效果的临界值，即含水率高于此值时水分

作用效果增加不明显，与散货性质有关，煤炭取 6%，矿石取 5%； w 为含水率 (%)； Y 为作业量 (t)； v_2 为作业起尘量达到最大起尘量 50% 时的风速 (m/s)。

根据作业方式系数 β ，上述动态起尘量计算公式仅考虑了装船和取料作业工况，并未考虑翻车机房作业粉尘排放和一般动态作业粉尘起尘和排放特征的巨大差别。

对比翻车机作业和其他堆取料、装船作业的起尘特征，符合动态作业基本规律，将翻车作业起尘量单独拟合计算：1) 以动态起尘公式为基础，翻车机房作业落差 H 固定取值 2 m；2) 根据起尘量 $Q_{翻}$ 反推作业系数，得到翻车机房作业系数为 0.001。上述系数作为常数值直接代入公式中，形成如下公式：

$$Q_{翻} = 0.001 \alpha e^{w_2(w_0-w)} Y / [1 + e^{0.25(v_2-U)}] \tag{5}$$

式中： $Q_{翻}$ 为翻车机动态作业起尘量 (kg)。

2.3 参数修正后的排放总量计算公式构建

2.3.1 静态起尘公式修正

《规范》推荐公式中的静态起尘公式：

$$Q_1 = 0.5 \alpha (U - U_0)^3 S \tag{6}$$

$$U_0 = 0.03 e^{0.5w} + 3.2 \tag{7}$$

依前文所述，修正公式量纲和起尘面积参数 S 后，得到新的静态起尘公式：

$$Q_{静} = 1.46 \alpha (U - U_0)^3 S_{总} \tag{8}$$

$$S_{总} = \frac{A}{M} \cdot S_{单} \tag{9}$$

式中： Q_1 为静态起尘量； S 为堆垛表面积 (m^2)； w 为含水率 (%)； $Q_{静}$ 为堆场静态起尘量 (kg/a)； α 为物料类型起尘调节系数，见表 2； U 为风速 (m/s)，多堆堆场表面风速取单堆的 89%； U_0 为混合粒径颗粒的启动风速 (m/s)； $S_{总}$ 为堆垛总表面积 (m^2)； A 为形成堆垛的物料总质量 (包括倒垛质量) (kg)； M 为单个堆垛质量 (kg)； $S_{单}$ 为单个堆垛表面积 (m^2)。

2.3.2 动态起尘公式修正

动态起尘计算公式：

$$Q_{动}=0.242\alpha\beta H e^{w_2(w_0-w)} Y/[1+e^{0.25(v_2-U)}] \quad (10)$$

翻车机房起尘量计算公式:

$$Q_{翻}=0.001\alpha e^{w_2(w_0-w)} Y/[1+e^{0.25(v_2-U)}] \quad (11)$$

式中: $Q_{动}$ 为除翻车机作业外的动态作业起尘量(kg); 物料类型起尘调节系数 α , 见表 2。

表 2 物料类型调节系数 α

煤炭类型	水洗煤	原煤	精煤
物料类型调节系数 α	0.66	1.00	1.25

3 煤炭港口粉尘总量测算

通过煤炭基本特性分析和环保措施抑尘效率现场实测, 结合风洞试验研究成果, 获得适用于监测煤堆场实际排放总量测算所需的相关参数取值, 构建了适用于监测煤堆场的煤炭粉尘排放总量评估体系, 结合监测煤堆场年实际作业情况测算年粉尘实际排放总量, 获得 2018 年神华黄骅港实际作业情况见表 3。

表 3 2018 年神华黄骅港煤炭作业情况

工艺	因子	参数取值	取值依据
静态堆存	煤炭集港和疏港分别为 2.04 亿 t, 堆场堆存 1 亿 t, 筒仓堆存 1.04 亿 t	1 亿 t	港口实际作业量
	堆存面积	21.7 万 m ²	按 1 亿 t 堆场煤炭通过量计算获得
动态作业	翻、堆、取、装	2.04 亿 t	港口实际作业量
煤炭基本特性	含水率	3.79%、6%、8%、14%	与煤炭含水率监测结果保持一致

在一定的煤炭种类、含水率、港口正常作业强度等前提假定下, 结合气象统计资料, 并考虑到防风网的平均风速折减率约为 30%, 其典型抑尘效率为 28%~33%, 核算获得 2018 年神华黄骅

港综合排放量, 见表 4。此外, 若黄骅港煤炭含水率可长期稳定达到 14% 时, 则煤炭粉尘排放总量约为 2 255 t/a。

表 4 黄骅港粉尘排放量估算结果

静态或动态	工艺类型	估算起尘量/(t·a ⁻¹)			
		含水率 3.79%	含水率 6%	含水率 8%	含水率 14%
静态起尘量	静态堆存	54 076	37 549	14 151	1 798
	翻车作业	20	8	3	1
动态起尘量	堆料作业	3 290	1 301	562	151
	取料作业	6 579	2 600	1 123	203
	装船作业	4 973	1 966	849	102
合计		68 938	43 424	16 687	2 255

4 结论

1) 在《港口建设项目环境影响评价规范》推荐的起尘量计算公式的基础上, 吸取其他排放量计算公式的优点和优势, 对原计算模型进行了修正和优化, 推导得出更加适合煤炭港口的静态和动态粉尘排放量计算模型。

2) 利用修正的煤炭港口粉尘排放计算公式对黄骅港煤炭港区 2018 年粉尘总排放进行了测算, 得出黄骅港煤炭含水率与各环节粉尘排放量的对应关系。

参考文献:

[1] 国家环境保护总局. 排污申报登记实用手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社出版, 2004: 599-613.

[2] 李若玲, 柳领君, 任爱玲, 等. 河北省煤炭和矿石港口码头粉尘排放影响因素及防治措施研究[C] // 中国环境科学学会 2013 年学术年会论文集. 北京: 中国环境科学学会, 2013: 1156-1158.

[3] 张晋恺. 港口散货堆场起尘规律研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.

[4] 雷鹏. 港口散货堆场铁矿石和煤起尘规律研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.