

机加工油雾颗粒散发模型与粒径分布规律

王 非^{1,2}, 李振海¹, 王 鹏³, 黄 晨²

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 200092; 2. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093;

3. 上海保利房地产开发有限公司, 上海 200232)

摘要: 引入气溶胶雾化率, 结合理论模型得到最大雾化流量, 由此计算出油雾颗粒散发率。利用 Rosin-Rammler 函数拟合粒径分布规律。采用一种环境舱的实验方法得到了气溶胶雾化系数和 Rosin-Rammler 函数的关键参数。建立了甩出机制下各个粒径油雾颗粒的散发率模型。实验数据表明, 总的油雾颗粒散发率为 $14.58 \sim 620.95 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$, 油雾颗粒散发率和气溶胶雾化系数随着刀具转速的增加而增加, 其中气溶胶雾化系数与刀具转速呈线性关系, 相关系数 R^2 为 0.998。本文的模型能预测的机加工过程中各粒径油雾颗粒的散发率, 平均偏差为 $(3.69 \pm 12.7) \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

关键词: 金属加工液; 气溶胶; 粒径分布; 预测模型

中图分类号: TU834.5

文献标志码: A

Model Study of Machining Aerosol Emission Rate and Particle Size Distribution

WANG Fei^{1,2}, LI Zhenhai¹, WANG Peng³, HUANG Chen²

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. Shanghai Poly Real Estate Development Co., Ltd., Shanghai 200232, China)

Abstract: This paper introduces an aerosol atomization factor to calculate the mass emission rate of oil particles using the maximum fluid flow rate for atomization obtained from a theoretical model. The particle size distribution is obtained by the Rosin-Rammler function. An environmental chamber is used to obtain the mass median diameter and the distribution coefficient of the Rosin-Rammler function, as well as the aerosol atomization factor. The particle emission rate is then modelled for each particle size. The experimental data

show that the mass emission rate of oil particles ranges from 14.58 to 620.95 $\text{mg} \cdot \text{h}^{-1}$. Both the particle emission rate and the aerosol atomization factor increase with tool rotational velocity. Moreover, the aerosol atomization factor is a linear function of the tool rotational velocity, with a determination coefficient R^2 of 0.998. The model established in this paper represents the oil particle emission rate accurately for each particle size, with an average error of $3.69 \pm 12.7 \text{ mg} \cdot \text{h}^{-1}$.

Key words: metal work fluids (MWFs); aerosol; size distribution; prediction model.

在机械加工过程中, 为了达到冷却、润滑和防锈的目的, 经常使用金属加工液。机械切削加工过程中, 金属加工液通过甩出、飞溅、蒸发冷凝等过程形成油雾颗粒^[1-2], 部分小颗粒会长时间悬浮在空气中, 并会随气流扩散至工作区, 极易被室内人员呼吸系统吸入。Deng 等^[3]通过 CFD(计算流体力学)的方法发现颗粒会在呼吸系统中沉积, 引起呼吸系统疾病。美国国家职业安全与健康研究所(NIOSH)推荐的限值为低于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ PC-TWA}$ (时间加权平均允许质量浓度)^[4], 有研究表明, 即使低于该限值, 哮喘、肺炎、过敏性皮肤病和恶性肿瘤等职业发病率仍然显著^[5-6]。因此控制工业厂房空气中油雾颗粒浓度十分重要。

机械加工中影响油雾颗粒的产生有多种因素: 金属加工液的黏度^[7]、种类^[8]、稀释比例、流量、通过刀具的方式^[9]等, 而影响最大的是转速^[9]。Sokolovic 等^[10], Sutherland 等^[11], Ko 等^[12]也针对不同条件, 对机加工油雾颗粒散发率和粒径分布规律进行了研究, 但并没有建立数学模型。Yue 等^[13], Sun 等^[14]针

收稿日期: 2019-03-08

基金项目: 上海市联盟计划(LM201659)

第一作者: 王 非(1982—), 男, 实验师, 博士生, 主要研究方向为室内空气品质及空气污染控制。

E-mail: wangfei@usst.edu.cn

通信作者: 李振海(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为室内空气品质及空气污染控制。

E-mail: lizh@tongji.edu.cn



对车削加工,建立了雾化模型,用于计算甩出机制下雾化液滴的散发率及液滴的直径分布,并进行了实验验证。Atamid等^[15]建立了飞溅机制下的雾化液滴散发率及直径分布的计算模型,Chen等^[16]总结了车削加工时,切削液雾化关键参数的计算方法。这些研究都是在机床的加工腔体内进行的,研究对象为各粒径颗粒。但大粒径的颗粒沉降较快,不会直接对车间空气质量产生很大影响。而小粒径的油雾颗粒长时间悬浮在空气中,对车间的空气品质和人员健康产生较大影响。

本文利用薄膜理论,推导出最大雾化流量的计算公式,并引入气溶胶雾化率,建立机加工过程中,油雾颗粒散发率与最大雾化流量间的关系。并使用Rosin-Rammler分布函数拟合了各个粒径段的散发比例,最终建立机加工过程中各个粒径段下油雾颗粒散发率模型。

1 油雾颗粒散发率及粒径分布模型

Wang等^[17]通过实验发现,甩出机制是油雾颗粒散发的主要机制,Dasch等^[9]发现转速的影响最大。因此本文主要研究甩出机制的油雾颗粒散发率及其粒径分布,并使用不同转速的实验数据进行验证。甩出机制产生油雾颗粒的过程如下:金属加工液喷射到刀具上,一部分金属加工液直接沿着刀具掉落,另一部分黏附在刀具表面,向上下两个方向流动形成液膜。由于空气的扰动,黏附在刀具表面的金属加工液液膜在高速转动时,在液膜的上下端形成波纹状的液面^[18],随着转速升高,波纹状液面的波峰处形成液带,液带破碎后形成液滴。变化过程与旋转雾化器相似,原理如图1所示。液滴飞出后再次破碎形成颗粒^[19],其中大粒径颗粒迅速沉降,而小粒径颗粒则扩散到空气中并长时间悬浮形成油雾颗粒。

1.1 油雾颗粒散发率模型

从雾化的过程可以看出,黏附在刀具表面的金属加工液的流量(雾化流量)与切削加工的油雾颗粒散发率有直接关系。

理论上最大雾化流量如公式(1)所示^[13]。

$$q_{\max} = HQ\omega R^2 \quad (1)$$

式中: Q 为雾化流量密度; $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; ω 为刀具的转速, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; R 为刀具的半径, m ; H 为液膜层的宽度, m ; H 由 H_1, H_2 两部分组成, H_2 的最大值为金属加工液入射点到刀具底端的距离,根据能量守恒定律, H_1 可由公式(2)计算得出。

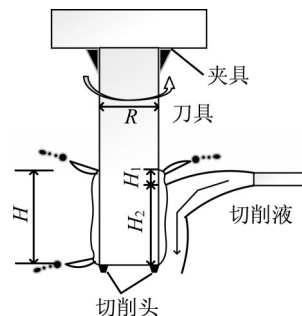


图1 切削液破碎过程示意图

Fig.1 Atomization process of metal working fluids

$$H_1 = \frac{U_j^2}{2g} \cos \varphi \quad (2)$$

式中: U_j 为金属加工液的入射速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; g 为重力加速度, $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; φ 为金属加工液入射角度与水平方向的夹角。

Preziosi等^[20]假设薄膜层上的流体无径向流动,并且薄膜层最外部流体无切向应力。利用N-S方程建立薄膜层流体切向速度 u 与半径 r 之间的关系,如式(3)所示。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} = \gamma \cos \theta \quad (3)$$

式中: θ 为金属加工液入射角度与切向速度夹角; γ 为斯托克斯数,可由公式(4)得出。

$$\gamma = \frac{\rho g R}{\omega \mu} \quad (4)$$

式中: ρ 为金属加工液密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; μ 为金属加工液黏度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

Kelmanson^[21]根据公式(3)推导出了液膜层流量最大时的稳定条件,Sun等^[14]在实验中验证了Kelmanson的模型。模型如公式(5)所示。

$$\left| \frac{288\gamma^2 Q^2 + 24\gamma^2(5Q+3) - 1}{64\gamma^3 + (1+16\gamma^2(1+3Q))^{3/2}} \right| \leq 1 \quad (5)$$

最大雾化流量为可黏附在刀具上最大液膜流量。超过该流量的金属加工液将直接掉落不参与雾化过程。由于加工过程的转动和金属加工液颗粒对周围空气的扰动,无法用现有的沉降模型对雾化过程中形成的气溶胶的进行计算。由此本文定义气溶胶雾化率为 K ,表示被雾化的金属加工液最终形成气溶胶的比例,则最终加工中油雾颗粒散发率为

$$E = Kq_{\max} \quad (6)$$

气溶胶雾化率 K 为刀具转速 ω 的函数,本文中气溶胶雾化率 K 采用实验的方法获得。

1.2 油雾颗粒粒径分布函数

切削加工中油雾颗粒的形成有一定的随机性,

常用概率密度函数或经验公式^[19]进行表述。本文采用 Rosin-Rammler 函数拟合粒径分布。Rosin-Rammler 分布函数因其数学参数较少且物理意义明确,在环保、化工等行业的颗粒粒径分布的研究方面都有着广泛的应用^[22-23]。

Rosin-Rammler 分布函数的表达式为

$$F(D)=1-\exp(-(D/D_0)^m) \quad (7)$$

式中: D 为颗粒粒径, μm ; $F(D)$ 为粒径小于 D 的颗粒概率分布; D_0 为形态粒径, μm ; m 为分布系数,该参数可以表征粒径分布范围。本文中 D_0 和 m 采用实验标定的方法获得。

根据上述模型,在 $[D_1, D_2]$ 粒径范围内,油雾颗粒散发率如公式(8)所示。

$$E(D)\Big|_{D_1}^{D_2}=Kq_{\max}[F(D_2)-F(D_1)] \quad (8)$$

2 实验方法及步骤

2.1 实验方法

为了得到模型中的气溶胶雾化率 K 及分布模型中的形态粒径 D_0 、分布系数 m ,更准确地描述加工形成的油雾颗粒对车间空气品质的影响,本文采用实验舱的方法对切削加工产生的油雾颗粒发生率进行测试。实验装置如图2所示。实验在一个位于厂房内部的精密加工实验室内完成,实验室尺寸为 $17.4\text{ m}\times 7.8\text{ m}\times 4.0\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。机床放置在实验室中。使用直流变频调速风机与高效过滤器组合形成空气过滤单元。过滤器放在风机入口段,风机出口通过管道与实验室连接,连接部分进行密封处理。管道中设置孔板流量计,用来测试送入房间的净化空气的体积流量。空间内设置多个混流风扇以保证空间内气溶胶浓度的均匀性。为了防止空间外的颗粒随机渗入影响实验结果,实验过程中需要调节风机转速以控制空间对外的压差为 3 Pa ,送入的空气通过空间的缝隙渗透出房间。

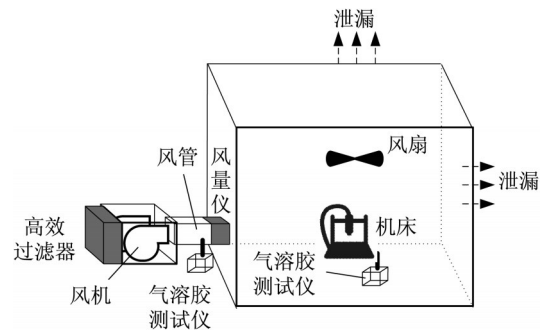


图2 测试装置原理图

Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 实验步骤

实验步骤如下:开启风机至最大风量,以快速降低房间颗粒浓度;开启房间内混流风扇。将气溶胶测试仪放置在风机出口侧,监测送风颗粒物浓度至其不再降低,并维持 30 min 。使用调速装置降低风机转速,调节送风量使实验室维持 $3\sim 5\text{ h}^{-1}$ 的换气次数,使得房间对外的压力保持正压 3 Pa ,监测送风口各个粒径的颗粒浓度 C_{ib} 。运行机床,产生油雾颗粒。将气溶胶测试仪移至实验室,当室内颗粒浓度不再上升后开始记录稳定颗粒浓度 C_i , 30 min 后停止机床运行,进行下一工况的测试。

2.3 实验装置及参数

本文使用润滑油作为金属加工液,经过实验测试,该润滑油 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 时的密度为 $867\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,运动黏度为 $33.7\text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$,金属加工液流量为 $1\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。使用直径 25 mm 铣刀,转速分别为 $1\ 000$ 、 $2\ 000$ 、 $3\ 000$ 、 $4\ 000$ 、 $5\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。本文主要研究甩出机制下的颗粒散发,因此实验过程中没有发生实际的切削。

实验过程中所使用的测试仪器量程及精度信息如表1所示。

2.4 实验数据处理

根据质量平衡原理,油雾颗粒散发率可以根据送风量、送风口颗粒浓度、室内稳定颗粒浓度计算得到。

$$E_i=(C_i-\bar{C}_b)Q \quad (9)$$

表1 测试仪器信息表

Tab.1 Specification of instruments

序号	仪器	量程	分辨率	精度/%
1	气溶胶测试仪	$0.1\sim 1\times 10^5\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ $0.265\sim 22.5\ \mu\text{m}$	$0.1\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	± 2
2	手持粒子计数器	$0\sim 1.4\times 10^8\ \text{个}\cdot\text{m}^{-3}$ $0.3\sim 10.0\ \mu\text{m}$	$35\ \text{个}\cdot\text{m}^{-3}$	± 5
4	风量仪	$18\sim 10\ 700\ \text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	$1\ \text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	± 3
5	空气过滤器	$95.0\%\sim 99.9\%(0.5\ \mu\text{m})$		

式中: E_i 为机床散发的第 i 种粒径的颗粒物散发率, $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$; C_i 为第 i 种粒径的稳定浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; C_{ib} 为第 i 种粒径的送风口浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; Q 为送风量, $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。

对公式(7)进行变形可以得到公式(10)。

$$\ln(-\ln(1-F(D))) = m \ln D - m \ln D_0 \quad (10)$$

由实验数据进行线性拟合可以得到形态粒径 D_0 、分布系数 m 。

3 数据与结果

3.1 气溶胶散发率

实验在主轴转速 1 000~5 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 范围内设置了 5 个工况进行测试。使用气溶胶检测仪测得各个工况不同粒径油雾颗粒的送风口颗粒浓度、室内稳定颗粒浓度。该气溶胶测试仪可以直接测量出油雾颗粒的计重浓度和 PM1.0~PM10 的值, 其中颗粒密度按照 2.3 中所测得的润滑油密度进行设置。根据公式(9)计算出每个工况下不同粒径的油雾颗粒散发率及其标准差, 详细数据如表 2 所示。不同转速下总的散发率曲线和雾化流量曲线如图 3 所示: 油雾颗粒散发率和雾化流量随着转速的升高而升高, 呈二次曲线形态。油雾颗粒散发率随转速升高的速度较雾化流量大。

气溶胶雾化率 K 随转速的变化如图 4 所示。系

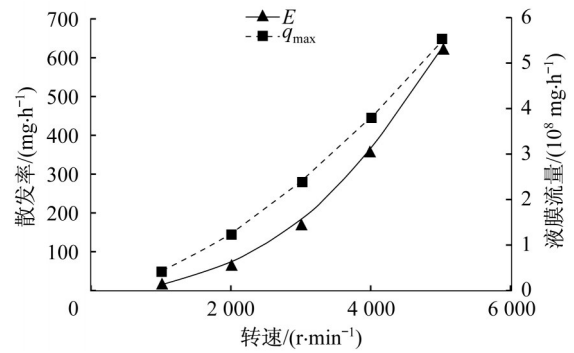


图 3 不同转速下总的气溶胶散发率及最大雾化流量

Fig. 3 Particle emission rate and maximum flow rate at a variety of rotation speeds

数 K 随着转速的增加而增大, 说明随着转速的增加, 雾化的颗粒中小粒径颗粒的占比增加, 这与 Yue 等^[13]的结论和 Sun 等^[14], Ahmed 等^[24]的实验结果相一致。通过拟合可以得到 K 与转速呈线性关系, 相关系数为 0.998。为了验证测试方法的可靠性和数据的可信度, 本论文中每一种测试工况都在不同的时间段进行了两次测试, 测试结果偏差 $< 3\%$ 。该偏差小于测试仪器的精度。实验过程中使用手持粒子计数器进行了实验舱各点的气溶胶浓度测试, 结果表明, 浓度稳定后实验舱内均匀性较好, 各点浓度偏差较小。手持粒子计数器仅用于验证均匀性, 并没有用于散发率的测量。

表 2 不同中心粒径油雾颗粒的散发率

Tab.2 Particle emission rate in each size

粒径/ μm	质量散发率/ $(\text{mg}\cdot\text{h}^{-1})$				
	1 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 2.62 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 5.23 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	3 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 7.85 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	4 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 10.47 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	5 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 13.08 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
0.265	0.021±0.021	0.067±0.025	0.102±0.026	0.219±0.046	0.162±0.052
0.35	0.021±0.023	0.070±0.029	0.124±0.030	0.252±0.052	0.192±0.054
0.45	0.019±0.041	0.061±0.045	0.057±0.032	0.026±0.058	0.080±0.040
0.575	0.021±0.030	0.046±0.034	0.068±0.043	0.143±0.063	0.161±0.061
0.725	0.021±0.030	0.048±0.042	0.108±0.062	0.214±0.098	0.315±0.120
0.9	0.015±0.037	0.041±0.057	0.128±0.107	0.261±0.134	0.369±0.159
1.3	0.104±0.156	0.310±0.273	0.957±0.527	1.811±0.678	2.782±0.805
1.8	0.302±0.419	0.780±0.833	1.882±1.487	3.809±2.383	5.678±3.142
2.5	0.692±0.816	2.041±1.785	5.520±3.416	9.714±4.770	15.424±6.203
3.5	0.853±1.011	4.533±2.635	12.800±3.418	24.717±5.277	40.804±6.774
4.5	2.145±2.363	9.910±5.116	24.982±7.041	49.358±11.316	81.393±14.424
6.25	4.931±5.613	23.275±11.195	57.539±18.341	115.272±26.889	202.757±43.151
8.75	3.289±7.406	15.830±14.807	39.587±26.109	85.064±41.952	152.683±65.674
12.5	2.502±10.094	12.107±22.390	25.979±33.543	64.635±59.498	118.156±89.548
PM1.0	0.037±0.076	0.333±0.098	0.586±0.140	1.115±0.199	1.279±0.226
PM2.5	1.135±0.934	3.464±1.992	8.944±3.765	16.449±5.378	25.162±7.003
PM5.0	4.133±2.734	17.907±6.089	46.726±8.685	90.523±13.595	147.359±17.406
PM10	12.353±9.687	57.012±19.536	143.852±33.068	290.859±51.651	502.800±80.486

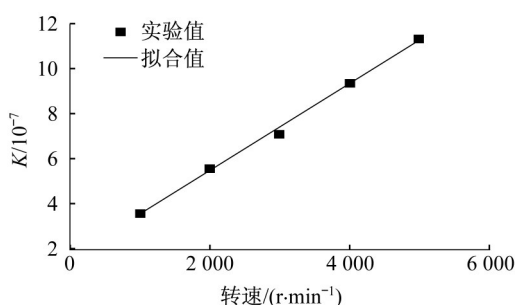


图 4 不同转速下的气溶胶雾化率 K

Fig.4 Aerosol atomization factor at a variety rotation speeds

3.2 油雾颗粒的粒径分布

根据公式(10)可知,利用一组工况的散发率数据就可以得到形态粒径 D_0 和分布系数 m 。本文选用转速为 $5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 各个粒径下的油雾颗粒散发率数据计算 D_0 和 m 。并利用其他工况数据进行校验。拟合数据如图 5 所示:实验值与拟合值相关性较好,相关系数 R^2 为 0.978。根据拟合式得到 D_0 为 $7.56\ \mu\text{m}$ 、 m 为 2.53。

得到参数峰值 D_0 、分布指数 m 和气溶胶雾化率 K 后,可由公式(8)预测出各个转速工况下,不同粒径的油雾颗粒散发率。实测数据与模型预测数据的对比见图 6。从图 6 可以看出,模型可以预测出不同转速下小于该粒径的累计散发率,与实测数据吻合较好,模型预测值与实测值平均偏差为 $(3.69 \pm 12.7)\text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}$,平均偏差百分比为 7%。

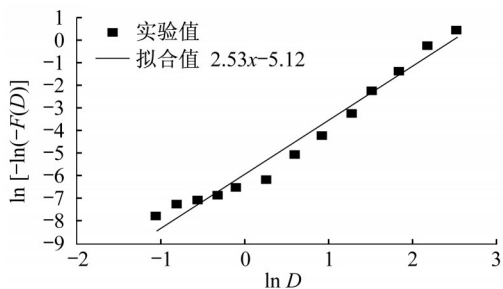


图 5 $5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下 Rosin-Rammler 分布函数的拟合值
Fig.5 Fitting curve of distribution function based on Rosin-Rammler at a rotation speed of $5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$

气溶胶测试仪测试的气溶胶质量浓度为中心粒径的浓度,在其粒径段内对其进行平均化处理可以得到不同粒径段散发率的概率密度实验值。实测数据如图 7 所示。

随着转速的增加,各个粒径段的散发率均有所增加; $6.25\ \mu\text{m}$ 粒径下散发率最高,其他粒径段的散

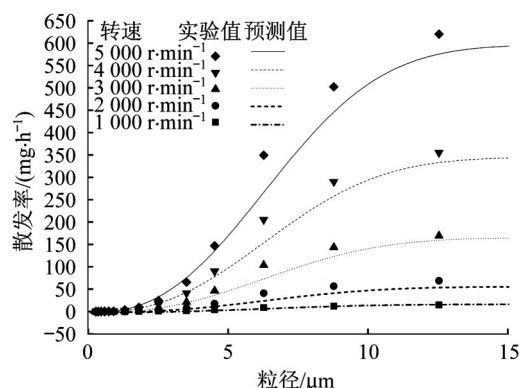


图 6 各个转速下实验值与预测分布函数对比

Fig.6 Comparison of experimental predicted distribution function at each speed

发率以 $6.25\ \mu\text{m}$ 为中心逐步递减。各个粒径段散发率的比例基本不变。

对颗粒粒径分布函数(公式(7))微分可得到各个粒径下气溶胶散发率的概率密度,进而预测不同工况下各个粒径下的油雾颗粒散发率。图 7 中,5 种不同的线型代表不同转速下各个粒径范围内油雾颗粒散发率的密度函数。由图 7 预测模型与实验值对比可见,两者吻合度较好,趋势相同。说明随着转速的增加,气溶胶散发的形态粒径 D_0 和分布系数 m 基本不变。

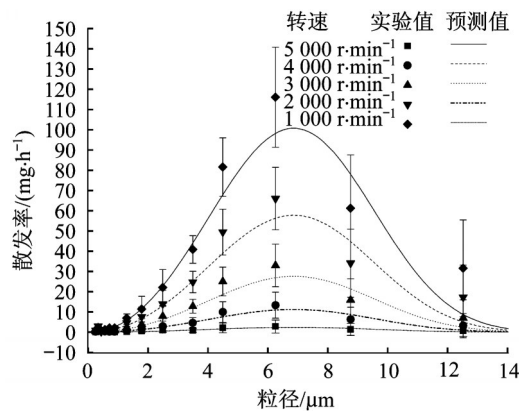


图 7 各个工况不同粒径下散发率及模型预测值

Fig.7 Emission rate and model predicted value of different particle sizes in different working conditions

综上,Rosin-Rammler 函数能够较好地描述各个粒径的油雾颗粒散发率占比。利用实验得到的气溶胶雾化系数 K ,预测模型可以直接预测机械加工中甩出机制下的各个粒径油雾颗粒散发率。该模型可以用于描述和计算机床作为室内油雾颗粒散发源的散发强度,从而为机加工车间空气品质研究、预测

及通风净化提供基础数据。

4 结论

论文引入气溶胶雾化率 K ,用来建立最大雾化流量与油雾颗粒散发率的联系。通过实验研究发现,气溶胶雾化率与转速呈线性关系,相关系数 R^2 为0.998。

机加工在甩出机制下的油雾颗粒散发率随着转动速度的增加而增加。而各个粒径段散发比例随转速升高变化不大。Rosin-Rammler函数能够较好地吻合各个粒径段的油雾颗粒散发率的比例。

基于气溶胶雾化率 K 和Rosin-Rammler函数建立的油雾颗粒散发率模型,能够预测机械加工中各个粒径段在不同转速下的油雾颗粒散发率。通过实验数据的验证,该模型与实验数据有很好的—致性。模型可以用于预测机械加工车间机床油雾颗粒散发源的强度,为机加工车间空气品质研究、预测及通风净化提供基础数据。

通过实验测试,机械加工产生时悬浮在空气中的油雾颗粒散发总量在14.58~620.95 mg·h⁻¹之间。

参考文献:

- [1] CHEN Zhong, WONG Kinwah, LI Wei, *et al.* Cutting fluid aerosol generation due to spin-off in turning operation: analysis for environmentally conscious machining[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123(3): 506.
- [2] YUE Y, GUNTER K L, MICHALEK D J, *et al.* An examination of cutting fluid mist formation in turning [J]. Transactions of NAMRI/SME, 1999, 27(3): 221.
- [3] DENG Qihong, OU Cuiyun, SHEN Yongming, *et al.* Health effects of physical activity as predicted by particle deposition in the human respiratory tract[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657(1): 819.
- [4] BECHER H, RAMROTH H, AHRENS W, *et al.* Occupation exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and laryngeal cancer risk[J]. International Journal of Cancer, 2005, 116(3): 451.
- [5] NIOSH. Criteria for a recommended standard occupational exposure to metalworking fluids [M]. Cincinnati: [s.n.], 1998.
- [6] LILLIENBERG L, ANDERSSON E M, JARVHOLM B, *et al.* Respiratory symptoms and exposure-response relations in workers exposed to metalworking fluid aerosols [J]. The Annals of Occupational Hygiene, 2010, 54(4): 403.
- [7] DASCH J M, D'ARCY J B, KINARE S S, *et al.* Mist generation from high-speed grinding with straight oils [J]. Tribology Transactions, 2008, 51(3): 381.
- [8] DASCH J M, WEI L, ROSSRUCKER T. The influence of the base oil on misting in metal removal fluids [J]. Lubrication Engineering, 2001, 57(5): 14.
- [9] DASCH J M, ANG C C, MOOD M, *et al.* Variables affecting mist generation from metal removal fluids [J]. Lubrication Engineering, 2002, 67(3): 10.
- [10] SOKOLOVIĆ D S, HÖFLINGER W, ŠEČEROV SOKOLOVIĆ R M, *et al.* Experimental study of mist generated from metalworking fluids emulsions [J]. Journal of Aerosol Science, 2013, 61(3): 70.
- [11] SUTHERLAND J W, KULUR V N, KING N C, *et al.* An experimental investigation of air quality in wet and dry turning[J]. CIRP Annals, 2000, 49(1): 61.
- [12] KO T J, PARK S H, KIM H S. Experimental verification of the mist generation mechanism in turning[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(10): 115.
- [13] YUE Y, SUN J, GUNTER K L, *et al.* Character and behavior of mist generated by application of cutting fluid to a rotating cylindrical workpiece, part 1: model development[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(3): 417.
- [14] SUN J, JU C, YUE Y, *et al.* Character and behavior of mist generated by application of cutting fluid to a rotating cylindrical workpiece, part 2: experimental validation [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(3): 426.
- [15] ATMADI A, STEPHENSON D A, LIANG S Y. Cutting fluid aerosol from splash in turning: analysis for environmentally conscious machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(4): 238.
- [16] CHEN Z, ATMADI A, STEPHENSON D A, *et al.* Analysis of cutting fluid aerosol generation for environmentally responsible machining[J]. CIRP Annals, 2000, 49(1): 53.
- [17] WANG F, LI Z, WANG P, *et al.* Experimental study of oil particle emission rate and size distribution during milling [J]. Aerosol Science and Technology, 2018, 52(11): 1308.
- [18] SUN H, CHEN G, WANG L, *et al.* Ligament and droplet generation by oil film on a rotating disk[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2015(2015): 1.
- [19] LEFEBVRE A H, MCDONELL V G. Atomization and sprays [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [20] PREZIOSI L, JOSEPH D D. The run-off condition for coating and rimming flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 187(2): 99.
- [21] KELMANSON M A. Theoretical and experimental analyses of the maximum-sustainable fluid load on a rotating cylinder[J]. 1999, 29(3): 271.
- [22] 戴丽燕. 关于Rosin-Rammler粒径分布函数的研究[J]. 工业安全与防尘, 2000, 5(3): 15.
- DAI Liyan. Study on function of rosin rammler particle size distribution[J]. Industrial Safety and Dust Control, 2000, 5(3): 15.
- [23] MACIAS-GARCIA A, CUERDA-CORREA E M, DIAZ-DIEZ M A. Application of the rosin-rammler and gates-gaudin-schuhmann models to the particle size distribution analysis of agglomerated cork [J]. Materials Characterization, 2004, 52(2): 159.
- [24] AHMED M, YOUSSEF M S. Characteristics of mean droplet size produced by spinning disk atomizers [J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(7): 071103-1.