超音速气流粉碎机核心喷射带流动规 律与几何结构探讨

叶 菁 陈家炎

(武汉工业大学)

【提要】本文分析了超音速气流粉碎机喷射流在粉碎室内的流动规律, 提出了核心喷射带的概念,并从理论上获得了核心喷射带的流动参数变化 规律及几何结构参数,解释了实验中的流动现象。 【关键词】 超音速气流粉碎机 喷射流 核心喷射带

一、前言

作为超细粉碎设备的超 音速 气流 粉 碎 机,其流动过程主要由三个部分组成:喷嘴 流动、引射器流动和粉碎室流动。由喷射流 切向高速喷入粉碎室所形成的粉碎室流场, 决定着颗粒间相互碰撞、摩擦的剧烈程度。 在喷嘴流动与粉碎室流动相互作用的结合部 分上,流动参数变化十分显著,激波或膨胀 波多数是在这里产生,对这部分的情况进行 研究是十分重要的。

二、核心喷射带流动分析

由喷嘴喷入粉碎室的超音速气流其速度 远远高于周围的环形流场速度,相应的流动 参数也有明显的区别。图1是Kurten和Rumpf 两人拍摄的粉碎室流动图¹¹¹。我们将喷入 粉碎室的具有锥度的柱状射流带称为核心喷 射带,如图2所示。

作者曾系统地分析了喷嘴流动,并得知 警嘴出口处压力与周围粉碎室环境背压通常



图1 粉碎室流动图



图2 核心喷射带

是不相等的,相应其它的流动参数也会不同。喷射气体通过一系列膨胀或压缩使压力 发生变化,达到与环境背压相平衡。若设 沿喷射轴线方向附近的迎流面(图3中曲线 ABC)的某点处(r_L,θ_L)压力刚好与经膨 胀或压缩的喷射流的压力相等,那么从该点 起沿喷射流的下游方向某段距离内,喷射气 流就会由于环境压力的增大而受压缩,通过 压缩激波的气体流速将大大减小。

作者对粉碎室流场已进行了解析。本文 在分析核心带喷射流动时,仅考虑旋流场中 的速度和压力:

$$\mathbf{V}_{\theta}(\gamma, \theta) = \frac{\mathbf{Q}_{P}}{\pi h} \frac{\rho_{ep}}{\rho} \frac{\mathbf{R}_{P} \sin\theta}{\gamma^{2} + \mathbf{R}_{P}^{2} - 2\mathbf{R}_{P} \gamma \cos\theta} - \frac{\mathbf{Q}}{\pi de} \frac{\rho_{e}}{\rho} \sum_{i=1}^{n} \frac{\mathbf{R}_{b} \sin(\lambda_{i} - \theta)}{\gamma^{2} + \mathbf{R}_{b}^{2} - \mathbf{R}_{b} \gamma \cos(\lambda_{i} - \theta)} - \frac{\Gamma}{2\pi} \cdot \frac{1}{\gamma^{2}}$$
(1)

$$\mathbf{p}(\boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{p}_{e} \left(\frac{\mathbf{K}-1}{\mathbf{K}\mathbf{R}t_{e}} \right)^{\frac{\mathbf{K}}{\mathbf{K}-1}} \cdot \left[n \left(\frac{\mathbf{K}\mathbf{R}t_{e}}{\mathbf{K}-1} + \frac{\mathbf{V}_{e}^{2}}{2} \right) - \frac{\mathbf{V}_{\theta}^{2}}{2} \right]^{\frac{\mathbf{K}}{\mathbf{K}-1}}$$
(2)

式中:

- Q, Q P 每一喷嘴及引射器的体积 流量:
- de, p.---喷嘴出口截面直径及气体密

度;

ρ----引射器出口气体密度;

ρ——气体密度;

- R_b, R_p 粉碎室衬壁半径及引射器 位置半径:
 - Γ——粉碎室速度环量;
 - α---准自由涡系数;

h₀——排气管与上盖衬壁之间隙;

$$\mathbf{h} = \left[\mathbf{n} \frac{\rho_e}{\rho_{ep}} \frac{\mathbf{Q}}{\mathbf{Q}_p} \left(\frac{1}{\mathbf{h}_0} - \frac{1}{\mathbf{d}e} \right) + \frac{1}{\mathbf{h}_0} \right]^{-1}$$

n——喷嘴数量;

 λ_i = ^{2π}/_n (i-1) (i=1,2,3,....n)
 R,K—分别为气体常数和比热比;
 v_e,t_e,p_e—喷嘴出口截面速度和温度及 压力。

从图1的流场照片中看出,粉碎室的环 向流动在核心喷射带处很难贯穿高速射流 区,环向速度被改向偏转β角(β为喷嘴轴线 与喷嘴所在位置半径方向之夹角)。由于流 动的突然改向,则对核心喷射带的迎流面产 生一个附加动压Δp,用气体动量方程可求 得:

$$\Delta p = \rho v_{\vartheta}^2 \sqrt{2 (1 - \cos\beta)}$$

喷射迎流面上任意点的压力为:

 $p_{N}(r, \theta) = p(r, \theta) + \Delta p$

 $p_{N}(\gamma, \theta) = p_{e} \left(\frac{K-1}{KRt_{e}} \right)^{\frac{K}{K-1}} \cdot \left[n \left(\frac{KRt_{e}}{K-1} + \frac{V_{e}^{2}}{2} \right) - \frac{V_{\theta}^{2}}{2} \right]^{\frac{K}{K-1}} + \rho V_{\theta}^{2} \sqrt{2(1-\cos\beta)} (3)$ $E J \Psi (\gamma_{L}, \theta_{L})$



图3 迎流面分析

1-衬壁; 2-粉碎室; 3-排气管; 4-喷嘴

如果喷嘴出口处压力大于粉碎环境背压,核心喷射带的流动参数及结构参数的变化规律分析如图4。



图4 核心喷射带流动及结构 喷嘴出口压力大于环境背压时,气体将 膨胀以使压力平衡,流动符合普朗特---迈

$$\delta = \sqrt[4]{\frac{\mathbf{K}+1}{\mathbf{K}-1}} \int t \mathbf{g}^{-1} \left(\frac{\mathbf{M}_{\mathrm{L}}^2 - 1}{\sqrt[4]{\frac{\mathbf{K}+1}{\mathbf{K}-1}}} \right)^{\frac{1}{2}} - t \mathbf{g}^{-1}$$

核心喷射带膨胀段长度及宽度

 $(M_e^2 - 1)^{\frac{1}{2}}$

$$\lambda_{\rm L} = \left(\left(R_{\rm b} - \Upsilon_{\rm L} \right) \right) / \sin\beta \qquad (6)$$

 $b_L = de + z\lambda_L tg(\delta + \alpha z)$ 式中, αz为喷嘴扩散段半锥角

喷射气流达到平衡点再往下游流动时,

耶理论:

$$d\delta = -\sqrt{M^{2} - 1} \frac{dv}{v}$$
作为等熵膨胀过程:

$$M_{L}^{2} = \frac{2}{K - 1} \left[\left(\frac{p_{0}}{p_{L}} \right)^{\frac{K - 1}{K}} - 1 \right]$$

$$V_{L} = \sqrt{\frac{KRt_{0}M_{L}^{2}}{1 + \frac{K - 1}{2}M_{L}^{2}}}$$

$$t_{L} = t_{0} \left(1 + \frac{K - 1}{2} M_{L}^{2} \right)^{-1}$$

$$\rho_{L} = \frac{p_{L}}{Rt} \left(1 + \frac{K - 1}{2} M_{L}^{2} \right)$$
(4)
膨胀角:

$$\frac{M_{e}^{2}-1}{\sqrt[4]{\frac{K+1}{K-1}}} \right)^{\frac{1}{2}} + tg^{-1} (M_{L}^{2}-1)^{-\frac{1}{2}} - tg^{-1}$$

(5)

)

气流将受到连续压缩,并产生激波,使速度 降低压力升高至核心喷射带最大压力 P_{Nmax} (Υ_m, θ_m)。

根据作者以往研究所获得的激波前后的 流动参数关系式:

$$\sin^{2} \varepsilon = \left(\frac{P_{Nmax}}{P_{L}} + \frac{K-1}{K+1} \right) / \frac{2K}{K+1} M_{L}^{2}$$

$$c t g \delta_{P} = \left(\frac{K+1}{2} \cdot \frac{M_{L}^{2}}{M_{L}^{2} \sin^{2} \varepsilon - 1} - 1 \right) \cdot t g \varepsilon$$

$$M_{m}^{2} = \left[\sin^{2} \beta_{1} \left(\frac{K+1}{2} \cdot \frac{t g \varepsilon}{t g \beta_{1}} - \frac{K-1}{2} \right) \right]^{-1}$$

$$V_{m} = V_{L} \frac{\sin \varepsilon}{\sin \beta_{1}} \left[\frac{2}{(K+1) M_{L}^{2} \sin^{2} \varepsilon} + \frac{K+1}{K-1} \right]$$

$$t_{m} = \frac{2 + (K-1) M_{L}^{2}}{2 + (K-1) M_{m}^{2}} t_{L}$$

$$\rho_{\rm m} = \rho_{\rm L} \frac{(\mathbf{K}+1) \mathbf{M}_{\rm L}^2 \sin^2 \varepsilon}{2 + (\mathbf{K}+1) \mathbf{M}_{\rm L}^2 \sin^2 \varepsilon}$$

(8)

$$\beta_1 = \varepsilon - \delta_P$$

核心喷射带压缩段长度及宽度为: $\lambda_m = (R_b - Y_m) / sin\beta_1$

 $\mathbf{b}_{\mathrm{m}} = \mathrm{d}\mathbf{e} - 2 \left\{ \lambda_{\mathrm{m}} - \lambda_{\mathrm{L}} \left[1 + \mathrm{tg}\delta_{\mathrm{P}} \cdot \mathrm{ctg} \left(\delta_{\mathrm{P}} - \delta \right) \right] \right\} \mathrm{tg} \left(\delta_{\mathrm{P}} - \delta \right)$ (10)

由于在理论分析时对她种假设进行了简 化,因此,以上各参数是需要进行修正的, 尤其是喷射速度Vm。因核心喷射带速度与 旋流场速度相差较大,在两种流动的交界面 沿流动的垂直方向上有较大的 速度 梯度存 在, 而实际的气体是有粘性的, 加之湍流耗 散,会使喷射速度较理想气体衰减的更大更 快。如果考虑这些因素,取速度修正系数为 Cv,则到达粉碎室共切圆的切向速度为:

 $V_{\Gamma} = C_{V}V_{m}$ (11)共切圆半径为

 $r_{\Gamma} = R_{b} c O_{S} \beta$

三、结 论

喷射流动和粉碎室流动相互作用的结合 部分,即喷入粉碎室具有锥度的柱状气体射

 $\lambda_{\rm L} = (R_b - \Upsilon_{\rm L}) / \sin\beta$ $b_{\rm L} = de + 2\lambda_{\rm L} tg (\delta + \alpha_2)$ $\lambda_{m} = (R_{b} - \gamma_{m}) / \sin\beta_{1} \qquad b_{m} = de - 2 \{\lambda_{m} - \lambda_{L} [1 + tg\delta_{P}ctg(\delta_{P} - \delta_{P})] \} tg(\delta_{P} - \delta_{P})$

(12)

参考文献

(1) H. Kurten; H. Rumpf, Chemie-Ing .-Techn., Jan., 1966, 38.

- (9)

流带称为核心喷射带。在核心喷射带内,流 动参数变化剧烈,具有明显的流动特征,它 对粉碎室流场起着重要的作用,决定着粉碎 机的粉碎效率。核心喷射带流动及结构参数 为:

$$M_{m}^{2} = \left[\sin^{2}\beta_{1} \left(\frac{\mathbf{K}+1}{2} \frac{\mathrm{tg}\varepsilon}{\mathrm{tg}\beta_{1}} - \frac{\mathbf{K}-1}{2} \right) \right]^{-1}$$
$$V_{m} = V_{\mathrm{L}} \frac{\sin\varepsilon}{\sin\beta_{1}} \left[\frac{2}{(\mathbf{K}+1) M_{\mathrm{T}}^{2} \sin^{2}\varepsilon} + \frac{\mathbf{K}-1}{\mathbf{K}+1} \right]$$

$$t_m = t_L \cdot \frac{2 + (K - 1) M_L^2}{2 + (K - 1) M_L^2}$$

$$\rho_{m} = \rho_{L} \frac{(\mathbf{K} + 1) \mathbf{M}_{L}^{2} \sin^{2} \varepsilon}{2 + (\mathbf{K} - 1) \mathbf{M}_{L}^{2} \sin^{2} \varepsilon}$$

[2] J.Zucrow; D.Hoffman, Gas Dynamics, John Wily & Sons, Inc., 1976.

THE FLOWING LAW AND GEOMETRICAL STRUCTURE OF A KEY INJECTION BELT IN A SUPERSONIC AIR FLOW PULVERIZER ----- DISCUSSION

Ye Qing Cheng Jiayan

(Wuhan University of Technology)

Abstract

The flowing law of ejected air flow in a supersonic air flow pulverizer is analyzed. The authors have developed a concept of key injection belt and obtained its fluctuation law of flow parameters and its geometrical structure parameters theoretically, explaining the flowing phenomena in experiments.

Key words. Supersonic air flow pulverizer, Ejected air flow, Key injection belt