

液态金属沿斜坡槽的磁流体力学分析

薛明伦

(中国科学院,力学研究所)

本文在简化模型下分析了在行波磁场驱动下液态金属沿斜坡输送的磁流体力学规律。这是一个带自由面的流动,因而和封闭管道内的电磁输送有本质不同。

液体金属爬坡式的电磁输送由于在一定条件下能显著提高劳动生产率和减轻恶劣环境下的劳动强度,已在某些铸造业中得到应用。

这种电磁输送的基本形式如图1所示。

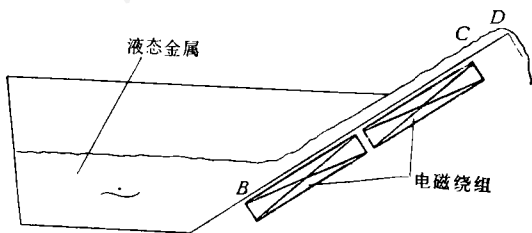


图1 液态金属电磁流槽简图

从图1可以看出,液态金属受到布置在斜坡下行波磁场的驱动而向上方流动,完全发展的定常流动受到三个力的作用。i) 电磁力, ii) 重力, iii) 流体摩擦力。由于存在自由面,沿流动方向不存在压力梯度。从图1还可看到,被泵送的流量还取决于两个因素: 1) 加进口段的供应充分,流量取决于出口段CD的条件,可以设想如CD段很长,液态金属离开泵送段BC后克服不了重力的影响而流不出去,液体倒流回来,使净流量为零。如逐步缩短CD段长度,流量会逐步上升直到最大值。即使在流量为零时,只说明平均速度为零,事实上这时有一部分流体向上流动,一部分向下流动,使总流量为零。2) 决定流量的第二个因素是进口条件,如进口流量受到一定限制,即使出口段CD十分理想,流量还是受到进口条件的限制。下面将

看到,这在两个泵串联工作时会发生。

为了突出问题的本质,考虑一个完全发展的二维流动简化模型,且因流层很薄(≤ 1 厘米),磁雷诺数 $Re_M \ll 1$,和外加磁场比较,液态金属的感生磁场影响很小,可以忽略。在行波磁场作用下,任一物理量 q 可以表示为

$$q = \bar{q} \exp[i(\omega t - kx)] \quad (1)$$

这里 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为波长, ω 为圆频率。

忽略感生磁场的磁场分布满足“真空”磁场方程:

$$\nabla^2 \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

对于 x 方向分量 B_x 可以写成

$$\frac{d^2 \bar{B}_x}{dy^2} - k^2 \bar{B}_x = 0 \quad (2a)$$

解出

$$\bar{B}_x = A \exp(ky) + B \exp(-ky) \quad (3)$$

边界条件:

$$y = 0 \quad \bar{B}_x = B_{x_0}$$

$$y \rightarrow \infty \quad \bar{B}_x \rightarrow 0$$

\bar{B}_{x_0} 由电磁绕组的安匝数确定,故

$$\bar{B}_x = B_{x_0} \exp(-ky) \quad (3a)$$

由

$$\text{div} \mathbf{B} = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} = 0$$

可以得出

$$\bar{B}_y = -i \bar{B}_{x_0} \exp(-ky)$$

液态金属中的感应电流密度是

$$\begin{aligned} j_z &= -\sigma(u_s - u) \bar{B}_y \\ &\approx -\sigma u_s \bar{B}_y \quad (\text{由于 } u \ll u_s) \end{aligned} \quad (4)$$

这里 σ 为导电率, u 为速度,下标 s 表示行波磁场的速度 $u_s = f\lambda$, f 为频率。

写下 x 方向的液态金属电磁驱动完全发展

流动的动量方程:

$$\mu \frac{d^2 u}{dy^2} + k_1 \exp(-2ky) - \rho g \sin \alpha = 0 \quad (5)$$

这里 μ 为粘性系数, ρ 为密度, g 为重力加速度, α 为斜坡倾角,

$$k_1 = \sigma u_s \frac{\bar{B}_{x0}^2}{2}$$

边界条件:

$$\begin{aligned} y = 0 & \quad u = 0 \\ y = \delta & \quad \frac{du}{dy} = 0 \end{aligned}$$

δ 为液态金属流层厚度, 在自由面上摩擦阻力为零。

原则上交变的电流和磁场作用, 除产生一个定常电磁力外, 还有一个频率为 2ω 的交变力, 但下面可以看到, 对于液态金属在工业频率下的电磁驱动, 交变电磁力引起的速度脉动是可以忽略的, 因为可作近似估计

$$\rho \frac{\partial v'}{\partial t} \sim \sigma u_s \frac{\bar{B}_y^2}{2} \sin(2\omega t)$$

脉动速度的上限

$$v' \sim \frac{\sigma u_s \bar{B}_y^2}{2\rho} \cdot \frac{1}{2\omega}$$

对于熔融铝, $\sigma \sim 10^6$ (欧姆·米) $^{-1}$, $u \sim 15$ 米/秒, $\bar{B}_y \sim 0.2$ 韦伯/米 2 , $\rho \sim 2.7 \times 10^3$ 公斤/米 3 , $\omega = 2\pi \times 50$ 秒 $^{-1}$ 可得 $v' \sim 0.2$ 米/秒, 因而可以忽略。

方程(5)的解是

$$\begin{aligned} \mu u = \rho g \sin \alpha \left(\frac{y^2}{2} - \delta y \right) - \frac{k_1}{2k} y \exp(-2ky) \\ + \frac{k_1}{4k^2} [1 - \exp(-2k\delta)] \end{aligned} \quad (6)$$

上式给出了速度沿流层高度的分布规律, 而流量 Q 和 δ 的关系是由

$$Q = \int_0^\delta u dy$$

确定, 这里 Q 是单位宽度的容积流量, 把(6)式化为无因次形式, 得

$$\bar{u} = \frac{u}{u_s} = HG\bar{y} \left(\frac{1}{2} \bar{y} - \bar{\delta} \right)$$

$$+ \frac{H}{T} \left\{ \frac{1}{T} [1 - \exp(-T\bar{y})] \right.$$

$$\left. - \bar{y} \exp[-T\bar{\delta}] \right\}$$

$$\bar{Q} = HG \left(-\frac{\bar{\delta}^3}{3} \right) + \frac{H}{T}$$

$$\times \left[\frac{1}{T} \left\{ \bar{\delta} + \frac{2}{T} [\exp(-T\bar{\delta}) - 1] \right. \right.$$

$$\left. \left. + \bar{\delta} \exp(-T\bar{\delta}) \right\} \right]$$

其中

$$\bar{Q} = \int_0^\delta u dy / (u_s \delta), \quad H = \frac{\sigma B_{ox}^2 a^2}{\mu}$$

$$G = \rho g \sin \alpha / (\sigma v_s B_{ox}^2), \quad T = 2\pi \frac{a}{\tau}$$

$$\tau = \lambda/2, \quad \bar{y} = \frac{y}{a}, \quad \bar{\delta} = \frac{\delta}{a}$$

a 为 1 厘米。

计算结果见图 2。

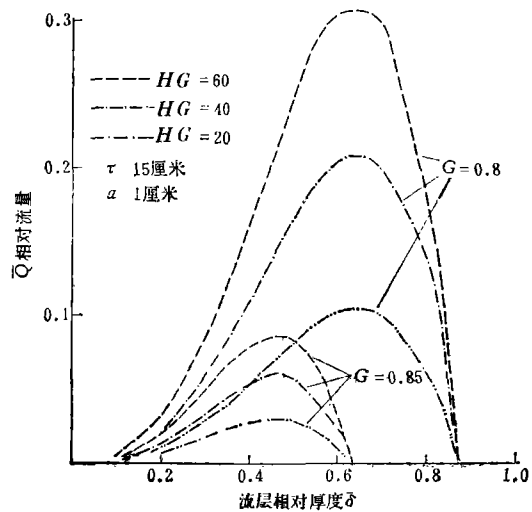


图 2 电磁流槽中液态金属流量-液高关系

从图 2 可以看到, 一定的流量可能对应于两个不同的流层厚度 δ , 曲线右段较大的 δ 对应于流动受后段(下游)影响而减少的情况, 而较小的 δ 对应于流量由于前段供应不足而减少的情况。如前后段供应和输出的条件都充分满足, 则流量由曲线的顶点确定, 这对应于流量最大值, 流量最大值并不对应于流层最厚的情况, 不

经过最大流量点,运行不可能在曲线的右段运行。

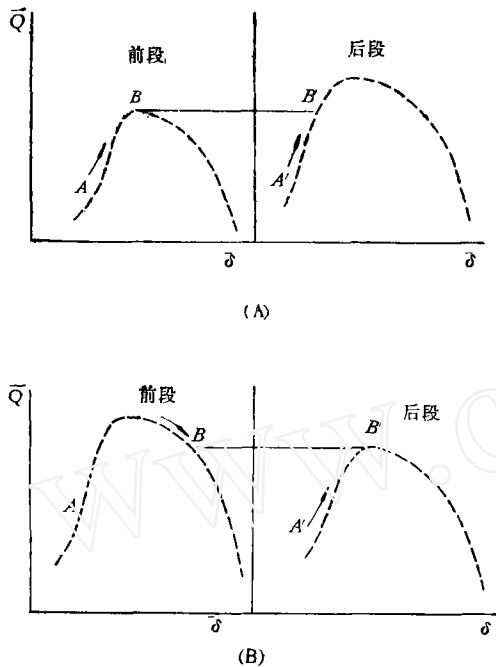


图3 电磁绕组串联工作时特性图(δ 为流层相对厚度, \bar{Q} 为相对流量)

实用上常采用绕组不同的两段泵串联工作的方案,这对于控制流量是有利的。下面讨论两种不同的情况:在稳态运行时,两段泵只能以同一流量运行,对于 i) 后段泵较前段泵有较强的场强,则可能的运行点只能是对前段泵而言从 $A \rightarrow B$ 点,这时前段泵已达最大流量,而后段泵从 $A' \rightarrow B'$,即只能工作于曲线的左端,这相当于后段泵受到前端供应不足的情况。ii) 如果前段泵较后段泵有较强的场强,则可能的运行点只能是后段泵工作在最大流量处,而前段泵工作于曲线的右端,这相当于前段泵受到后端的影响不能以最大流量输出的情况。这两种情况分别如图 3(A), (B) 所示。

本文的简化分析提供一个液态金属电磁驱动爬坡的质的规律性认识,如用于工程设计则尚需考虑实际因素加以修正。

参 考 文 献

- [1] Верте, Л. А. Электромагнитный транспорт жидкого металла, металлургия (1965), 135—174.
- [2] 中科院力学所,上海电器科学研究所合著,液态金属电磁泵,科学出版社(1979)。

(本文于1985年1月27日收到)

力学应用 100 例

实验力学面向经济建设事例

傅 梦 莲

11. 液压挖掘机的全场应力分析

液压挖掘机的结构为大型空间薄壁结构。

由于它的结构复杂,加载型式多样,不易稳定,中国农业机械化科学研究院测试计算中心采用光弹性贴片法和模型实验相结合的方法,对一台液压挖掘机进行了全场应力分析。模型与原型之比为 1:25。试验时,选用了中等外载、极限外载和超载三种工况。实验仪器采用装有巴比涅-索列尔补偿器的反射式光弹性仪。贴片材料为 #618 环氧树脂加苯二甲酸二丁酯加三乙烯四胺,其配比为 100%:5%:11%,获得较佳的常温性能。在仪器的数字显示装置上,可

自动显示出试件的主应力方向和主应力差的大小,从而获得液压挖掘机整机边界和主要断面较为完整的应力分析资料,并对其危险区域进行了弹塑性分析,确定了破坏源的位置和结构的容许极限载荷。再用一种快速补强的实验方法,改进了局部的结构,降低了 30% 左右的危险应力水平,有效地提高了结构的承载能力。

12. 用光弹性法对汽车发动机连杆进行减重优化设计

第二汽车制造厂生产的 EQ-6100 发动机连杆,经台架疲劳试验和电测试验表明,连杆设计比较保守,最大应力为 1100 kgf/cm²; 与国外同