

电磁铸造铝扁锭的电参数计算与选择^①

曹志强 张兴国 金俊泽

(大连理工大学铸造中心, 大连 116023)

摘 要 针对电磁铸造铝扁锭中, 感应器-铸锭系统的电磁参数 R 、 Z 、 X 进行了计算, 计算结果与实测数据相符, 并在此基础上对电磁铸造中使用的中频电源各项参数进行了选择, 为中频电源和结晶器的设计提供了理论根据。

关键词 电磁铸造 中频电源 铸造速度 互感耦合模型 能耗

电磁铸造(简称 EMC)技术自 60 年代问世以来, 引起了广泛注意并获得迅速发展。目前, 美国、瑞士等国铝合金的电磁铸造已大规模投入工业性生产^[1,2], 我国也成功地进行了单锭铸造的工业性试验。

电磁铸造是靠电磁推力克服铝液的静压力而实现的无接触铸造。为了使铸锭截面均匀, 铝液柱侧面必须保持垂直, 故要求电磁力沿铝液柱侧面的分布与静压力的分布一致。

研究电磁铸造的有关问题, 首先要选择试验装置, 确定电源的电流、电压、频率和功率等。从小试到中试, 再从中试到生产, 铸坯的尺寸形状不同, 其所需电能也不同。因此准确确定电源的电参数对于电磁铸造的工业性生产具有一定的指导意义。

因铝扁锭感应形成的是三维电磁场, 理论计算相当复杂, 给结晶器的设计和中频电源参数选择带来困难。本文采用耦合电感等效电路进行参数计算和选择。

1 电流的估算

电磁铸造过程中, 液柱侧面液固界面处的铝液载持条件为:

$$\rho g h_z = P_E + P_s \quad (1)$$

式中 ρ 为铝液的密度, g 为重力加速度, h_z 为液柱高度, P_E 为电磁压力, P_s 为表面张力。

从电磁场理论^[3]可知, 电磁压力为:

$$P_E = B^2 / (2\mu) \quad (2)$$

式中 B 为磁感应强度有效值, μ 为铝液的磁导率。

在铸锭半径较大时, 表面张力产生的压力 P_s 较小, 可以忽略。

由式(1)和式(2)可以得到液柱高度与磁感应强度的关系式:

$$h_z = B^2 / (2\mu\rho g) = \mu H^2 / (2\rho g) \quad (3)$$

式中 H 为磁场强度。该式说明液柱高度与其表面磁场强度的平方成正比。

H 的求解方法比较复杂, 尤其是三维情况, 直观的估计式为:

$$H = I / (2h_1) \quad (4)$$

式中 I 为通入感应器的电流, h_1 为感应器的有效高度。

将式(4)代入式(3), 可以得到通入感应器的电流与液柱高度的关系式:

$$I = 2h_1 \cdot \sqrt{2\rho g h_z / \mu} \quad (5)$$

对于铝合金的电磁铸造, 感应器的高度 h_1 一般选为 0.04 m, 液柱高度 h_z 一般为 0.04 m 左右, 铝液 660℃时密度为 2400 kg/m³, 铝液磁导率为 1.000 000 6 μ_m 。将其代入式(5)便可

① 辽宁省自然科学基金与国家八五攻关资助项目 收稿日期: 1994-06-07; 修回日期: 1994-08-08

算出通入感应器的电流为 3095 A。考虑到变压器、中频电源、有效高度结晶器引起的磁漏、磁场分布不均以及线路传输引起的电流降,由式(4)估算的磁场强度偏大,由式(5)计算的电流则偏小。因此,试验时电流一般为 4800 A。

2 频率的选择

对于频率的选择,一方面要从液体金属柱成型的角度考虑,另一方面要从液体金属柱的稳定性考虑。文献[4]中介绍频率的选择应使得:

$$\sqrt{2} a/\delta > 7 \quad (6)$$

式中 a 为液柱半径, δ 为集肤层厚度。

$$\delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)} \quad (7)$$

式中 ω 为电流角频率, μ 为铝液导磁率, σ 为铝液电导率, $\sigma = 3.85 \times 10^6 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ 。

式(6)主要是从成型角度考虑的,这样选择的频率往往偏低。实际工程中,对于铝合金的电磁铸造,频率常选为 2500 Hz 左右。

3 阻抗的计算

感应器-铸锭系统的等值电路如图 1。

根据空心变压器的工作原理可列出下式:

$$(R_1 + jX_1)I_1 - jX_m I = U_d \quad (8)$$

$$(R + jX)I - jX_m I_1 = 0 \quad (9)$$

$$I_{11} \approx I_d \quad (10)$$

联立求解得:

$$U_d = (R_1 + \frac{X_m^2}{R^2 + X^2}R) + j(X_1 - \frac{X_m^2}{R^2 + X^2}X)I_d \quad (11)$$

$$\text{令 } k = \frac{X_m^2}{X^2 + R^2}$$

$$\text{则 } R_d = R_1 + kR \quad (12)$$

$$X_d = X_1 - kX \quad (13)$$

$$Z_d = \sqrt{R_d^2 + X_d^2} \quad (14)$$

铸坯中交变电磁场感应产生的电流分布是不均匀的,铝液的外表面电流密度最大,然后沿径向往中心按指数规律逐渐衰减,这就是说,系统电流主要集中在等于渗流厚度 δ 的铝锭表面层。为了方便计算,通常把铸锭看成一个壁厚等于渗透深度的空心筒,并且认为电流在这一层中均匀分布^[5]。

铸锭电阻:

$$R = \rho L/S = 2\rho(a + b - 2\delta)/(h_s\delta) \quad (15)$$

铸锭电抗:

$$X = \omega S\mu K_L/h_s \\ = 2\pi f\mu K_L(a - \delta)(b - \delta)/h_s \quad (16)$$

式(15)和式(16)中, $\rho = 2.6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 为铝液电阻率, a 与 b 分别为铸锭的长和宽, δ 为渗入深度, K_L 为铸锭的自感修正系数,可以根据 $\sigma = (D - \delta)/h_s$ 从图 2 中求出。对于矩形铸锭, $D = 2\sqrt{ab/\pi}$ 。

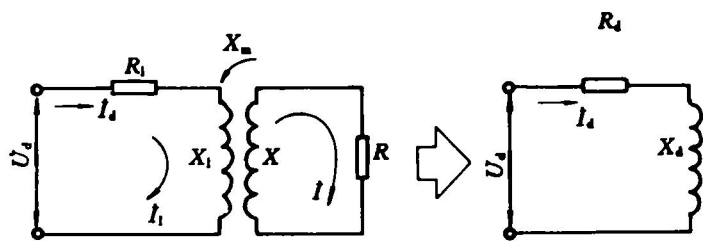


图 1 感应器—铸锭系统的等值电路

R_1 —线圈电阻; R —铸锭电阻; R_d —等效电阻;

X_1 —线圈电抗; X —铸锭电抗; X_d —等值电抗;

X_m —感应器与铸锭间互感抗

同理,

感应器电阻

$$R_1 = \rho_1 L / S_1$$

$$= 2\rho_1(a_1 + b_1 + 2\delta_1) / (h_1\delta_1) \quad (17)$$

感应器电抗

$$X_1 = \omega S_1 \mu K_{L1} / h_1$$

$$= 2\pi f \mu (a_1 + \delta_1)(b_1 + \delta_1) \cdot K_{L1} / h_1 \quad (18)$$

式(17)和式(18)中, $\rho_1 = 2.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 为纯铜的电阻率, δ_1 为纯铜的透入深度, K_{L1} 可由 $\sigma = (D_1 + \delta_1) / h_1$ 从图2中查出, 式中 $D_1 = 2\sqrt{a_1 b_1 / \pi}$.

感应器-铸锭系统的互感抗

$$X_m = \omega S \mu K_m / 2h_z'$$

$$= 2\pi f \mu (a - \delta)(b - \delta) K_m / 2h_z' \quad (19)$$

式中 K_m 为互感修正因子, 可从图3查出, h_z' 为感应器与铸锭对应部分高度, 这里 $h_z' = h_z$ 。

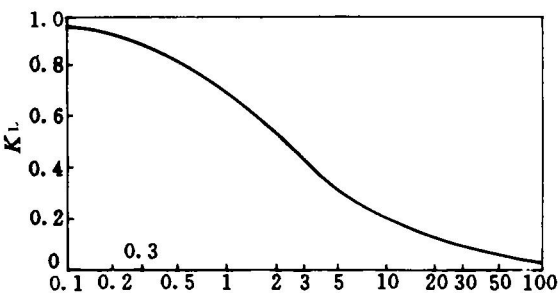


图2 线圈长度修正因子

4 感应器端部电压和功率消耗

根据公式(12)-(14)求出 R_d 、 Z_d 、 X_d 后, 可以算出感应器的端部电压:

$$U_d = I_d \cdot Z_d \quad (20)$$

感应器消耗的功率:

$$P_d = I_d^2 \cdot R_d \quad (21)$$

对于 $0.52 \text{ m} \times 0.13 \text{ m}$ 的纯铝铸锭的电磁参数计算结果如表1所示。

实测的结果表明, 当液柱高度为 0.04 m 时, 所需电压为 34 V , 电流为 4800 A , 频率为

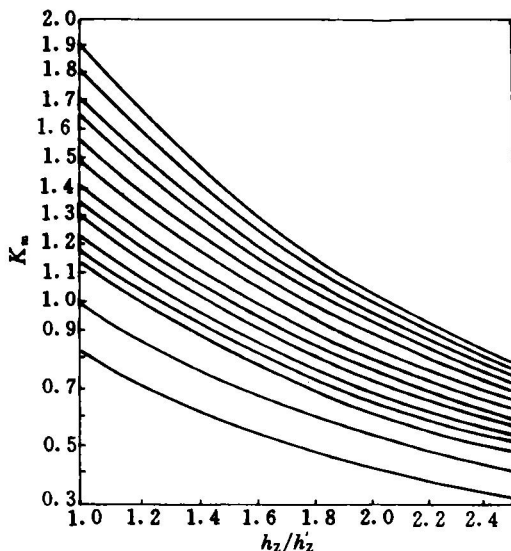


图3 互感修正因子

图中的14根线从上至下对应的 $(D_1 + \delta_1) / h_1$ 值分别为:

0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7,
0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.5, 2.0

表1 $0.52 \text{ m} \times 0.13 \text{ m}$ 纯铝扁锭电磁
铸造电参数的计算结果

电参量	R	R_1	X
计算值	$1.67 \times 10^{-3} \Omega$	$4.96 \times 10^{-3} \Omega$	$8.39 \times 10^{-3} \Omega$
电参量	X_1	X_m	k
计算值	$9.92 \times 10^{-3} \Omega$	$5.29 \times 10^{-3} \Omega$	0.38
电参量	R_d	X_d	Z_d
计算值	$1.13 \times 10^{-3} \Omega$	$6.73 \times 10^{-3} \Omega$	$6.82 \times 10^{-3} \Omega$
电参量	U_d	P_d	I
计算值	33 V	27 kW	3095 A

2500 Hz , 功率为 27 kW 。可见, 除电流外, 理论计算和实测吻合较好。

5 中频电源的电能耗耗计算

由前面的计算结果可知, 感应器的有功功率为 27 kW 。考虑到中频电源装置、中频变压器和线路损耗等, 交流电源需要提供的功率为^[6]:

$$P = P_d / \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$$

$$= 27 / 0.90 \times 0.90 \times 0.95$$

$$= 35(\text{kW}) \tag{22}$$

式中 η_1 —中频电源装置效率；
 η_2 —中频变压器效率；
 η_3 —线路传输效率。

平均每米或每公斤电磁铸造铝锭所耗电能分别为：

$$W_1 = P/v \tag{23}$$

$$W_2 = P/v\rho S \tag{24}$$

式(23)和式(24)中 S 为锭坯的横截面积， ρ 为铝锭的密度 ($2\,700\text{ kg/m}^3$)， v 为铸造速度，一般为 0.054 m/min 左右。表 2 为三种不同尺寸电磁铸锭单位长度或单位重量的能耗。可见单位长度的能耗随铸坯尺寸增加而增加，而单位重量的能耗随铸坯尺寸增加而显著降低。此外，从式(23)和式(24)还可看出能耗随铸造速度增加而降低。

表 2 三种规格尺寸电磁铸锭单位长度或重量的能耗

规格尺寸	能耗 W_1 /kWh·m ⁻¹	能耗 W_2 /kWh·kg
$d\,0.1\text{ m}$	3	0.160
$0.52\text{ m}\times0.13\text{ m}$	11	0.060
$1.28\text{ m}\times0.34\text{ m}$	17	0.014

4 结论

互感耦合模型具有简明的物理意义，且应用方便，计算所得结果与实测基本吻合。说明采用上述方法对扁锭电磁铸造电气参数的计算是可行的。

参考文献

1 Goodrich D G, Dassel J L, Shogren RM. J Metals, 1982, (5): 45.

2 Sautebin R, Haller W. Light Metals Age, 1985, (8): 14.

3 冯慈璋. 电磁场, 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1983: 250.

4 Lavers J D. IEEE IAS-80. 1980: 949.

5 潘天明. 工频和中频感应炉. 北京: 冶金工业出版社, 1983: 143.

6 杨书启, 栗嘉铭. 北方工业大学学报, 1993, (5): 13.