

## 电熔镁砂熔坩余热回收利用分析

谢 兴 王承阳

东北大学 工程热物理研究所 辽宁沈阳 110004

**摘 要:** 通过不同工艺下熔坩余热加热矿石量的计算,分析了电熔镁砂熔坩余热回收利用的可行性,表明电熔镁砂熔坩的余热有很大的回收利用价值。

**关键词:** 电熔镁砂; 熔坩; 余热; 回收利用

中图分类号: TK3\_9

文献标识码: A

文章编号: 1001-1935(2014)03-0236-03

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1935.2014.03.019

中国是世界上菱镁矿资源最为丰富的国家,总保有储量约 30 亿 t,居世界首位。主要由菱镁矿生产的电熔镁砂是重要的耐火原料,我国的电熔镁砂产量也居世界首位。目前,我国对于电熔镁砂熔坩仍采用自然冷却工艺,白白浪费了熔坩的大量余热。电熔镁砂生产能耗很大,能耗成本占总成本的 60% 左右,在电熔镁砂生产过程中有很大的节能空间<sup>[1]</sup>。

为了充分利用电熔镁砂熔坩的余热,对电熔镁砂熔坩余热回收利用的可行性进行了分析。

## 1 电熔镁砂熔坩余热潜能的分析计算

由于电熔镁砂熔坩的自然冷却过程持续大约一周,采用强制取热的方式可缩短其冷却时间,强制取热时间为 24 h。

电熔镁砂熔坩直径为 1 300 ~ 1 600 mm,高度为

3 000 ~ 4 500 mm,体积约为 7 ~ 10 m<sup>3</sup>,圆柱体,属于大型构件,本身为耐火材料,换热属于非稳态传导方式。

为使余热取热符合 MgO 析晶的要求,采用分段分时取热方法:将取热温度分为 2 000 ~ 1 280 °C 和 1 280 ~ 812 °C 两个阶段,并根据每个阶段熔坩的放热具体情况采取相应的取热方法<sup>[2]</sup>。

物体在向温度相对较低的环境放热时,其热量方程的基本形式为:

$$Q = c \times V \times \rho \times \Delta t \quad (1)$$

式中:  $Q$  为热量, kJ;  $c$  为比热容, kJ · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>;  $V$  为体积, m<sup>3</sup>;  $\rho$  为密度, kg · m<sup>-3</sup>;  $\Delta t$  为温度, °C。因此,两个电熔镁砂熔坩的总热量  $Q = 2 \times 1.343 \times 9.04 \times 3500 \times (2000 - 20) = 1.68 \times 10^8$  kJ。

电熔镁砂熔坩在高温、低温两个放热阶段的放热情况见表 1。

表 1 熔坩在高温、低温两个阶段的放热情况

项 目	高温阶段	低温阶段
放热量/kJ	$Q = 2 \times 1.343 \times 9.04 \times 3500 \times (2000 - 1280) = 6.1 \times 10^7$	$Q = 2 \times 1.343 \times 9.04 \times 3500 \times (1280 - 812) = 3.9 \times 10^7$
平均放热速率/(kJ · h <sup>-1</sup> )	$Q_{\text{平均}} = 6.1 \times 10^7 / 24 = 2.5 \times 10^6$	$Q_{\text{平均}} = 3.9 \times 10^7 / 24 = 1.6 \times 10^6$
1 kg 矿石从常温预热到 400 °C 再到 700 °C 需要的热量/kJ	$Q = 1.239 \times 1 \times (700 - 400) + 191(\text{分解热}) = 563$	$Q = 1.239 \times 1 \times (400 - 20) = 471$
系统热损失	$Q \times 30\%$	$Q \times 20\%$
1 h 的放热量可加热矿石量/kg	$m = 2.5 \times 10^6 \times (1 - 30\%) / 563 = 3108$	$m = 1.6 \times 10^6 \times (1 - 20\%) / 471 = 2717$

由以上计算可见,电熔镁砂熔坩的余热巨大,余热能量比加工矿石所需的热量大得多,具有直接利用的价值。

\* 谢兴:男,1989 年生,硕士研究生。  
E-mail: 13998173701@126.com  
指导老师:王承阳,男,1964 年生,硕士,副教授。  
E-mail: wangcy@smm.neu.edu.cn  
收稿日期:2013-07-14

编辑:黄卫国

## 2 电熔镁砂熔坩实际生产的取热计算

### 2.1 电熔镁砂熔坩的放热功率

初始温度均匀的长圆柱体在等温介质中冷却问题的解为:

$$\theta = 2\theta_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{Bi}{(\beta_m^2 + Bi^2) J_0(\beta_m)} J_0\left(\frac{\beta_m r}{r_0}\right) \exp\left(-\beta_m^2 \frac{a\tau}{r_0^2}\right), \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为过余温度, K;  $Bi$  为毕渥数;  $r$  为半径, m;  $\alpha$  为热扩散率,  $m^2 \cdot s^{-1}$ ;  $\tau$  为时间, s;  $\beta_m$  是特征方程

$$\frac{J_0(\beta)}{J_1(\beta)} = \frac{\beta}{Bi} \text{ 的第 } m \text{ 个正根; } J_n(z) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(n+k)!} \left(\frac{z}{2}\right)^{n+2k}, \text{ 为 } n \text{ 阶第一类贝塞尔函数}^{[3]}。$$

到  $\tau$  时刻为止, 单位长度的圆柱体在冷却过程中放出的热量为:

$$Q(\tau) = 2\pi\rho c\theta_0 \left[ 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4Bi^2}{\beta_m^2(\beta_m^2 + Bi^2)} \exp\left(-\beta_m^2 \frac{a\tau}{r_0^2}\right) \right]. \quad (3)$$

根据实际测量, 每个熔坩的散热表面积为 24.63  $m^2$ , 2 个熔坩为 49.26  $m^2$ 。取热风温度为 800  $^{\circ}C$ , 预热菱镁矿到 700  $^{\circ}C$ , 表面传热系数为 60  $W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ , 通过热电偶测量生产温度, 计算不同表面温度的熔坩的放热功率如表 2 所示。

表 2 电熔镁砂熔坩的放热功率

$t_w / ^{\circ}C$	$\Delta t / ^{\circ}C$	$Q / kW$
2 500	1 800	5 320
2 400	1 700	5 025
2 300	1 600	4 729
2 200	1 500	4 433
2 100	1 400	4 138
2 000	1 300	3 842
1 900	1 200	3 547
1 800	1 100	3 251
1 700	1 000	2 956
1 600	900	2 660
1 500	800	2 364
1 400	700	2 069
1 300	600	1 773
1 200	500	1 478
1 100	400	1 182
1 000	300	887
900	200	591
800	100	296

### 2.2 电熔镁砂熔坩的降温时间

由电熔镁砂熔坩的毕渥数  $Bi = hR/\lambda = 5.074$  及  $r/R = 1.0$  查诺模图得  $\theta_w/\theta_m = 0.22$ , 对于过余温度  $\theta_m = t_w - t_m = 1 800 ^{\circ}C$  意味着  $\theta_w = 0.22\theta_m = 396 ^{\circ}C$  时, 导热才能进入正规状况阶段<sup>[4-6]</sup>。对于电熔镁砂熔坩不同半径处的传热状况如表 3 所示。

表 3 电熔镁砂熔坩不同半径处的传热状况表

$r/m$	$r/R$	$\theta_r/\theta_m$	$\theta_w/\theta_r$
0.05	0.06	0.98	0.22
0.10	0.13	0.97	0.23
0.15	0.19	0.96	0.23
0.20	0.25	0.94	0.24
0.25	0.31	0.91	0.24
0.30	0.38	0.88	0.25
0.35	0.44	0.82	0.27
0.40	0.50	0.76	0.29
0.45	0.56	0.70	0.31
0.50	0.63	0.63	0.35
0.55	0.69	0.56	0.39
0.60	0.75	0.50	0.44
0.65	0.81	0.45	0.49
0.70	0.88	0.37	0.59
0.75	0.94	0.29	0.76
0.80	1.00	0.22	1.00

### 2.3 非正规状况阶段电熔镁砂坩的壁温

当  $\theta_r = \theta_0$  时, 导热为非正规状况阶段。近似地,  $R$  即为  $r$ , 则有  $q_m/q_0 = 1$ 。根据诺模图查得  $\theta_w/\theta_m$  及表面无量纲过余温度公式  $\frac{\theta_w}{\theta_0} = \frac{t_w - t_{\infty}}{t_0 - t_{\infty}}$ , 并取计算的电熔镁砂坩的壁温计算得到  $\theta_m/\theta_0$ , 计算得出的放热规律表, 如表 4 所示。

表 4 电熔镁砂熔坩的放热规律表

$\theta_{wA}$	$t_{wA} / ^{\circ}C$	$t_{wB} / ^{\circ}C$	$\theta_w/\theta_0$	$\theta_m/\theta_0$	$Bi$	$Bi^{-1}$
404	1 104	1 101	0.223	0.993	4.757	0.210
408	1 108	1 105	0.225	0.993	4.440	0.225
412	1 112	1 109	0.228	0.993	4.123	0.243
423	1 124	1 121	0.234	0.993	3.805	0.263
435	1 135	1 132	0.240	0.993	3.488	0.287
450	1 150	1 147	0.248	0.993	3.171	0.315
483	1 183	1 180	0.267	0.994	2.854	0.350
521	1 221	1 218	0.290	0.990	2.540	0.390
566	1 266	1 263	0.313	0.995	2.220	0.450
629	1 329	1 326	0.348	0.995	1.903	0.526
707	1 407	1 404	0.390	1.000	1.590	0.630
792	1 492	1 489	0.438	0.996	1.268	0.788
880	1 580	1 577	0.490	1.000	0.950	1.050
1 070	1 770	1 767	0.593	0.997	0.634	1.577
1 366	2 066	2 063	0.760	1.000	0.320	3.150
1 800	2 500	2 497	0.998	0.998	0	

### 2.4 熔坩加热的矿石量计算

#### 2.4.1 高温取热阶段

高温传热阶段, 取热风温度为 800  $^{\circ}C$ , 表面传热系数为 60  $W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ 。由  $Bi = 5.074$  及  $r/R = 1.0$  查得  $\theta_w/\theta_m = 0.22$ 。由  $Fo = \frac{a\tau}{R^2} = 0.4017$  查诺模图得  $\theta_m/\theta_0 = 0.32$ , 于是, 对于过余温度  $\theta_0 = t_0 - t_{\infty} = 1 700 ^{\circ}C$  可求得  $\theta_m = 0.32\theta_0 = 544 ^{\circ}C$ , 即:  $t_m = 1 344 ^{\circ}C$ ,  $\theta_w = 125.12 ^{\circ}C$ ,  $t_w = 925.12 ^{\circ}C$ 。

高温期传热量为  $\Phi$ , 则两个电熔镁砂熔坩平均每

小时的传热量  $2\Phi = 2 \times 590\,869.18 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} = 328.26 \text{ kW}$ 。设循环系统内部进入电熔镁砂熔坩取热器时风温为  $500\text{ }^\circ\text{C}$  加热到  $800\text{ }^\circ\text{C}$  则可加热热风量为  $m_{\text{air}} = \Phi / (h_{800} - h_{500}) = 2.917 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , 标态时热风量为  $V_{\text{air}} = m_{\text{air}} / \rho = 2.256 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 8\,121.10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 实际加热后热风量为  $V = V_{\text{air}} \frac{273.15 + 800}{273.15} = 31\,906.13 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

假设矿石从  $400\text{ }^\circ\text{C}$  被加热到  $700\text{ }^\circ\text{C}$ , 同时有  $30\%$  的碳酸镁分解吸热, 则热平衡式为  $\Phi = m_{\text{矿石}} [c_p (700 - 300) + Q_{\text{分解}}]$ , 得  $m_{\text{矿石}} = 1\,208.8 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。考虑  $30\%$  的散热等损失, 则  $m_{\text{矿石}} = 1\,208.8 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \times (1 - 30\%) = 846.16 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。则  $4\text{ h}$  (矿石被  $800\text{ }^\circ\text{C}$  高温风加热到  $700\text{ }^\circ\text{C}$  需大约  $4\text{ h}$ ) 可处理矿石量  $4\text{ h} \times 846.16 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} = 3\,384.64 \text{ kg}$ 。

#### 2.4.2 低温取热阶段

低温传热阶段, 取热风温度为  $450\text{ }^\circ\text{C}$ , 表面传热系数为  $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。由于温度的改变, 电熔镁砂熔坩的导热系数重新取值为  $6.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。计算  $Bi = 7.164$  及  $r/R = 1.0$  查诺模图得  $\theta_w / \theta_m = 0.165$ 。

取电熔镁砂熔坩的初始温度为  $1\,280\text{ }^\circ\text{C}$ , 当电熔镁砂熔坩的壁面温度达到  $812\text{ }^\circ\text{C}$  时,

$$\frac{\theta_w}{\theta_0} = \frac{812 - 450}{1\,280 - 450} = 0.436,$$

于是有:

$$\frac{\theta_m}{\theta_0} = \frac{\theta_w / \theta_0}{\theta_w / \theta_m} = \frac{0.436}{0.165} = 2.64 > 1,$$

表明传热尚未进入正规状况阶段, 需另寻计算方法。

由  $\theta_w / \theta_m = 0.165$  查诺模图得到导热进入正规阶段对应壁温为  $\theta_w = 143.04\text{ }^\circ\text{C}$ , 即  $t_w = \theta_w + t_\infty = 593.04\text{ }^\circ\text{C}$  时进入正规状况阶段。

由于电熔镁砂熔坩中心与壁温的初始温度不是均匀的, 所以进入正规状况阶段比较快, 假定提前  $4\text{ h}$  (偏少估计), 计算  $Fo = \frac{a\tau}{R^2} = 0.3375$ , 于是根据诺模图得到:  $\theta_m = 0.35\theta_0 = 190.4\text{ }^\circ\text{C}$ , 即  $t_m = 190.4 + 450 =$

$640.4\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\theta_w = 0.165\theta_m = 31.416\text{ }^\circ\text{C}$ , 即  $t_w = 31.416 + 450 = 481.42\text{ }^\circ\text{C}$ 。

计算得出:  $Q_0 = \rho c_p V (t_0 - t_\infty) = 36\,095\,919.41 \text{ kJ}$ ,  $Fo \cdot Bi^2 = 17.32$ , 查得  $Q/Q_0 = 0.87$ , 所以  $Q = 0.87 Q_0 = 1\,403\,449.89 \text{ kJ}$ 。

低温期传热量为  $\Phi$ , 两个电熔镁砂熔坩平均每小时的传热量  $2\Phi = 2 \times 261\,695.42 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1} = 145.4 \text{ kW}$ 。设循环系统内部进入电熔镁砂熔坩取热器时风温为  $300\text{ }^\circ\text{C}$  加热到  $450\text{ }^\circ\text{C}$  则可加热热风量为  $m_{\text{air}} = \Phi / (h_{450} - h_{300}) = 0.911 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , 标态时热风量为  $V_{\text{air}} = m_{\text{air}} / \rho = 0.705 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 7\,609.28 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 实际加热后热风量为  $V = V_{\text{air}} \frac{273.15 + 450}{273.15} = 20\,145.16 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

矿石从  $20\text{ }^\circ\text{C}$  被加热到  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , 有热平衡式  $\Phi = m_{\text{矿石}} c_p (400 - 20)$ , 则  $m_{\text{矿石}} = 1\,748 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。考虑  $30\%$  的散热等损失, 则  $m_{\text{矿石}} = 1\,748 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \times (1 - 0.3) = 1\,223.6 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 。  $4\text{ h}$  (矿石被  $450\text{ }^\circ\text{C}$  热风加热到  $400\text{ }^\circ\text{C}$  需大约  $4\text{ h}$ ) 可处理矿石量为  $4 \times 1\,223.6 = 4\,894.4 \text{ kg}$ 。

### 3 结论

电熔镁砂熔坩余热量大, 在保证耐火材料品质的前提下, 其余热有很大的回收利用价值。

#### 参考文献

- [1] 栾禄毅, 林阳, 李玉娟. 大型固体电熔镁余热潜能开发与生产利用[J]. 节能, 2010(8): 54-56.
- [2] 郭茂先. 工业电炉[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 78-84.
- [3] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 119-121.
- [4] 陆钟武. 火焰炉[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1994: 16-27.
- [5] 赵渭国, 杜涛, 王爱华. 火焰炉设计[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2005: 44-52.
- [6] 奚士光, 吴味隆, 蒋君衍. 锅炉及锅炉房设备[M]. 北京: 中国建设工程出版社, 2006: 15.