

中国能源研究会储能专委会 | 专  
中关村储能产业技术联盟 | 栏

◀ 储能技术与产业 ▶

## 高温耐火砖蓄热孔道形状及排布研究

鞠亮亮<sup>1</sup>, 邹 杨<sup>2</sup>, 马凤仓<sup>1</sup>, 戴 叶<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学, 上海 200093; 2. 上海应用物理研究所, 上海 201800)

**摘 要** 以氧化镁耐火砖作为蓄热单元, 采用高温氮气加热, 研究计算单个耐火砖的蓄热特性。在矩形孔道耐火砖顺排情况下, 分析比较不同矩形孔道宽高比下, 氮气加热 2h 后末端最高平均温度所对应的耐火砖截面宽高比。当矩形孔道宽高比小于 0.8 时, 矩形孔道宽高比对应的耐火砖截面宽高比呈线性关系且斜率为 0.62, 截距为 0.5; 当矩形孔道宽高比为 0.8~1 时, 其对应的耐火砖截面宽高比为 1。在矩形孔道宽高比合理的情况下各点压力损失相差较小, 中心线速度与耐火砖末端平均温度成反比。在椭圆形孔道交叉排布情况下, 椭圆形孔道的长短半轴比值越大, 耐火砖升温越快。椭圆形孔道在  $y$  轴方向长度大于  $x$  轴方向长度的情况下, 通过六边形宽度和侧面高度的合理配置, 其升温特性优于椭圆形孔道  $x$  轴方向长度大于  $y$  轴方向长度。椭圆形孔道的压力损失变化较小, 且比矩形孔道耐火砖的压力损失小。矩形孔道耐火砖与椭圆形孔道耐火砖相比, 升温更快, 中心线速度更高, 但压力损失更大。

**关键词** 耐火砖 蓄热特性 矩形孔道 椭圆形孔道 排布 压力损失 中心线速度

### 1 前言

随着我国能源革命的不断深化以及新技术的迅猛发展, 电网峰谷差进一步加大, 导致用电低谷弃电问题难以消除, 在高峰负荷期间, 部分地区供电能力严重不足。人们利用储电技术进行“削峰填谷”, 常规的抽水蓄能电站多依赖于自然环境中的水, 对于缺水地区难以实现, 而固体蓄热可以解决上述难题。

氧化镁作为一种固体蓄热材料具有较高的体积热容, 与氧化铝有着近似的密度和比热容, 而且导热系数更高, 成本更低, 更适合作为蓄热耐火砖的主要成分<sup>[1-9]</sup>。由于氮气在高温下热稳定性好, 适合用来为高温固体充热。与传统的固体蓄热不同, 本文采用的蓄热模块由耐火砖堆砌而成, 并且在储热阶段采用高温氮气加热, 将氮气中的热能传到蓄热模块中, 在放热阶段采用低温氮气, 通过蓄热模块将氮气加热<sup>[10]</sup>, 对热氮气中的热能加以利用。由于蓄放热采用的工作介质都是氮气, 可视其过程为互逆的。本文只考虑蓄热阶段, 研究矩形孔道在顺排情况下不同宽高比的最优长方体截面形状、在交叉排布情况下不同长短半轴之比的最优六棱柱截

面形状, 为实际设计过程提供参考。

### 2 蓄热体数学模型

#### 2.1 条件假设

通道入口处高温氮气的速度和温度恒定, 氮气垂直流入且分布均匀; 氮气与耐火砖的对流换热系数恒定, 不随时间、温度及位置的变化而变化; 氮气和耐火砖的物理参数恒定。

#### 2.2 传蓄热模型

蓄热模块的蓄热过程, 就是高温氮气流入蓄热体通道的过程, 其中高温气体作为流动的热源将耐火砖加热, 流体热量的减少等于耐火砖热量的增加。N-S 方程可以写成如下形式<sup>[11]</sup>:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial\tau} + \nabla \cdot (\rho U\phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + \phi \quad (1)$$

式中:  $\Gamma$  为广义散度系数;  $\phi$  为通用变量, 可以代表  $T, u, v, w$ 。

湍流的计算选用的是标准  $k-\varepsilon$  模型, 该模型是

作者简介: 鞠亮亮, 上海理工大学材料学院材料科学与工程专业在读硕士研究生, 主要研究方向为固体蓄热方案模拟计算。

E-mail: 1099454731@qq.com

在雷诺平均 Navier-Stoke 模型(RANS)的基础上,引入了湍动能  $k$  和湍动能耗散速率  $\varepsilon$ 。该模型收敛性

较好,应用广泛。其中湍动能  $k$  和湍流耗散率  $\varepsilon$  由以下输运方程<sup>[12]</sup>求得:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) + \frac{\partial}{\partial t} \left[ \left( u + \frac{u_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( u + \frac{u_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (3)$$

式中:  $G_k$  表示由于平均速度梯度而产生的湍流动能;  $G_b$  表示由于浮力产生的湍动能;  $Y_M$  表示可压缩湍流中膨胀波动对总耗散率的贡献;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$  为常数;  $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$  为对  $k$  和  $\varepsilon$  的普朗特数;  $S_k$ 、 $S_\varepsilon$  为源项。

其中,  $G_k$  由式(4)计算得出,  $Y_M$  由式(5)计算得出:

$$G_k = -\overline{lu_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (4)$$

$$Y_M = 2\rho \varepsilon M_t^2 \quad (5)$$

式中:  $M_t$  为湍流马赫数, 由下式定义:

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}} \quad (6)$$

式中:  $a$  为声速。

湍流黏度  $\mu_t$  由  $k$  和  $\varepsilon$  共同决定:

$$\mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

最终取值:  $C_u=0.09$ ,  $C_{1\varepsilon}=1.44$ ,  $C_{2\varepsilon}=1.92$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

### 2.3 耐火砖物理参数

本文仅模拟计算固体蓄热模块中的一块耐火砖的蓄热升温特性。耐火砖采用的材料是 MgO, 其中设置氮气入口段的尺寸为 200mm, 单个耐火砖的截面积为 0.01m<sup>2</sup>、长度为 0.5m, 孔道的面积与耐火砖截面积之比为 1:3。入口段与出口段的设置是为

了将单个耐火砖置于相同的加热环境中。采用三维建模软件 DesignModeler 对耐火砖进行建模, 同时将耐火砖的壁面设置为对称边界条件(即处在蓄热模块中)。固体 MgO 的热导率取值 5W/(m·K), 密度为 3000kg/m<sup>3</sup>, 比热容为 1kJ/(kg·K)<sup>[4]</sup>。热氮气入口温度为 1313.2K, 耐火砖初始温度为 300K。

### 3 矩形孔道顺排

#### 3.1 模型几何参数

矩形孔道适合顺排情况下进行传热, 图 1 为顺排条件下蓄热体的结构示意图, 蓄热体由多个耐火砖堆砌而成。图 2(a)为单个耐火砖的截面图, 其中矩形截面的面积是中心矩形孔面积的 3 倍, 图 2(b)为耐火砖结构示意图。  $A=100\text{mm}$  时耐火砖截面为正方形,  $a=50\text{mm}$  时中心孔道为正方形。

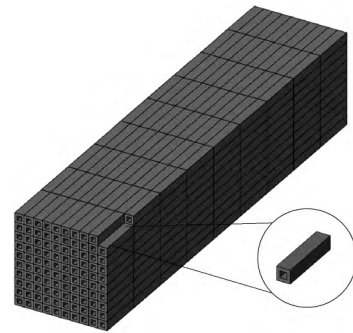
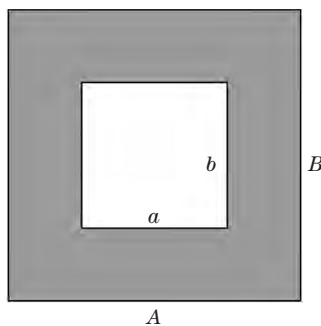
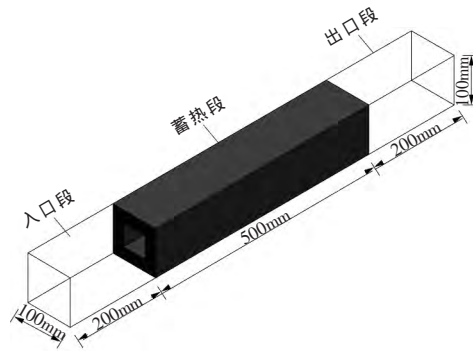


图 1 耐火砖顺排结构示意图



(a) 耐火砖截面图



(b) 耐火砖结构示意图

图 2 耐火砖结构图

### 3.2 蓄热特性

图3为  $A=100\text{mm}$ 、不同  $a$  值时耐火砖末端平均温度随时间的变化。

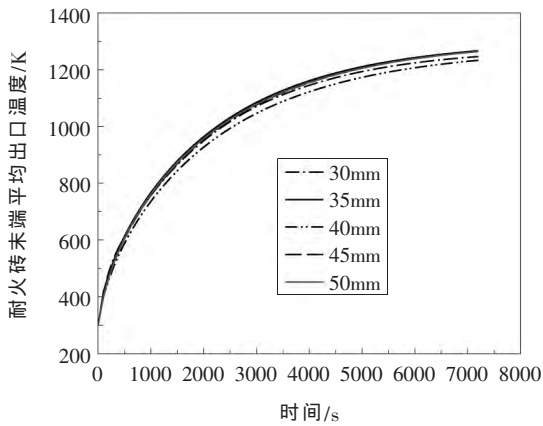


图3  $A$  为  $100\text{mm}$  不同  $a$  值时耐火砖末端平均温度

由图3可以看出,在相同的截面形状下,不同孔道形状耐火砖所对应的温度上升趋势相同,在充热的初始阶段由于初始温差大,初始的升温速度快,之后升温速度慢慢降低,在  $7200\text{s}$  时达到不同的末端平均温度。

图4为不同矩形孔道的宽度  $a$  对应不同矩形耐火砖截面宽度  $A$  时,在氮气加热  $2\text{h}$  后耐火砖末端的平均温度。

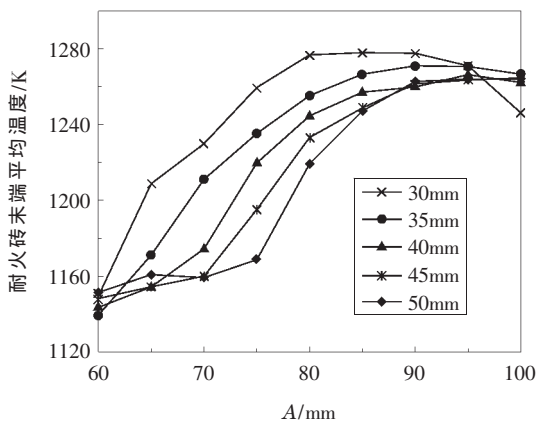


图4 当  $a$  取不同值时在不同  $A$  下的耐火砖末端平均温度

由图4可以看出,当  $a=30\text{mm}$  时,末端最高平均温度在  $A=85\text{mm}$  的耐火砖中。当  $a=35\text{mm}$  时,末端最高平均温度在  $A=90\text{mm}$  的耐火砖中,且末端温度为  $1278.1\text{K}$ 。当  $a=40\text{mm}$  时,末端最高平均温度在  $A=95\text{mm}$  的耐火砖中,且末端温度为  $1266.4\text{K}$ 。当

$a=45\text{mm}$ 、 $50\text{mm}$  时,末端最高平均温度在  $A=100\text{mm}$  的耐火砖中,末端温度分别为  $1264.7\text{K}$  和  $1264.1\text{K}$ 。由此可以得出,耐火砖孔道宽度越窄,在一定范围内耐火砖末端温度越高,随着矩形孔道宽度的减小,耐火砖末端温度最大值所对应的耐火砖截面宽度减小。

由图5可知,随着  $a$  的增高,最优截面下耐火砖末端平均温度逐渐降低,降低速度逐渐变慢,在  $a=50\text{mm}$  时最慢,且耐火砖末端平均温度最低。

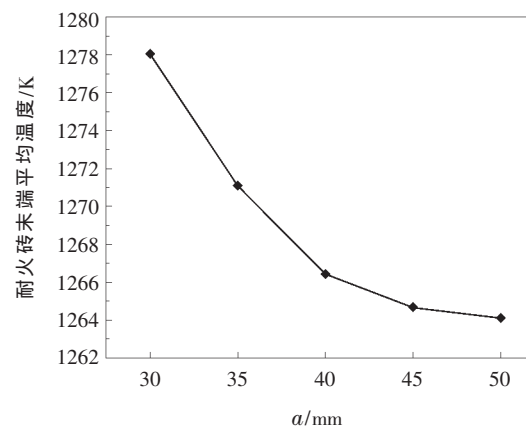


图5 当  $a$  取不同值时耐火砖末端最高平均温度

图6为不同矩形孔道宽高比下,末端最高平均温度对应的耐火砖截面宽高比。

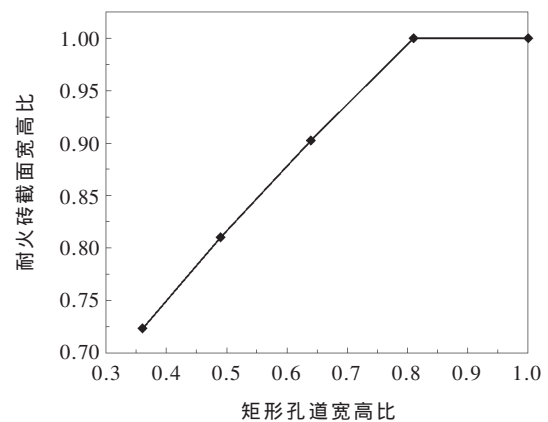


图6 末端温度最高时对应的耐火砖截面宽高比和矩形孔道宽高比

由图6可以看出,当矩形孔道宽高比小于  $0.8$  时,矩形孔道宽高比对应的耐火砖截面宽高比呈线性关系且斜率为  $0.62$ ,截距为  $0.5$ ;当矩形孔道的宽高比为  $0.8\sim 1$  时,矩形孔道宽高比对应的耐火砖截面宽高比为  $1$ 。

### 3.3 压力损失对比

由图 6 可知,矩形孔道的宽高比越大,在合理的  $A$  取值情况下,耐火砖末端温度越高,这是由于孔道在相同面积下周长越长,升温越快。由于宽高比的增加会导致孔道内表面的面积增大,进而增加流动阻力,导致压力损失加大,对于蓄热过程是不利的。设  $a=30\text{mm}$  且  $A=80\text{mm}$  为  $p_1$  点、 $a=35\text{mm}$  且  $A=90\text{mm}$  为  $p_2$  点、 $a=40\text{mm}$  且  $A=95\text{mm}$  为  $p_3$  点、 $a=45\text{mm}$  且  $A=100\text{mm}$  为  $p_4$  点、 $a=50\text{mm}$  且  $A=100\text{mm}$  为  $p_5$  点,计算  $p_1\sim p_5$  点的进出口压力损失,结果见表 1。

点	压力损失
$p_1$	148.05
$p_2$	143.89
$p_3$	143.40
$p_4$	142.20
$p_5$	141.62

由表 1 可知,在耐火砖宽高比合理的情况下压力损失相差较小,压力损失最大处在  $p_1$  位置,压力损失最小处在  $p_5$  位置,最高压力损失相差 4.54%,在蓄热过程中可以忽略。

### 3.4 中心线速度对比

研究对比  $p_1\sim p_5$  点的中心线速度分布。图 7 中 0~200mm 是入口段长度,200~700mm 是中间耐火砖长度,700~900mm 是出口段长度。当氮气在入口段时,速度一直保持不变,直到进入耐火砖中,气流速度快速上升,随后在耐火砖孔道中充分发展,流动变得稳定,速度开始变慢,直到出口段,由于出口处的扩容影响导致出口段开始时流速有小幅上升,随后流速下降。

由图 7 可知,  $p_1$  的中心线速度较  $p_2\sim p_5$  慢,而  $p_2, p_3, p_4$  和  $p_5$  耐火砖末端温度接近且较  $p_1$  低。由于矩形孔道越窄,孔道的换热面积越大,流动阻力增大,导致流速下降,由此可知,中心线速度与耐火砖末端平均温度成反比。

### 3.5 换热量对比

换热方程如下<sup>[11]</sup>:

$$\phi = q_m C_p (t_i'' - t_i') \quad (8)$$

式中:  $q_m$  为氮气流量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_p$  为氮气的定压热容;

$t_i'', t_i'$  为进出口温度。

图 8 为  $p_1\sim p_5$  各点换热量随时间的变化。由图可知,由于  $p_1\sim p_5$  在初始时刻的换热量依次减小,到 2000s 以后换热量出现变化,  $p_1\sim p_5$  换热量依次增加。这是由于在初始时刻  $p_1\sim p_5$  的受热面积依次减小,导致初始时刻  $p_1\sim p_5$  初始换热量依次减小,此时换热面积占主导。在 2000s 以后,由于此前  $p_1\sim p_5$  点的换热量依次降低,使得 2000s 后换热温差依次升高(即  $p_5$  换热温差大于  $p_1$ ),导致 2000s 之后换热量依次增加,此时换热温差占主导。

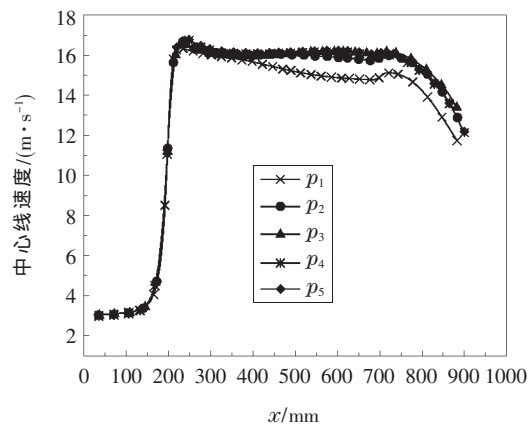


图 7 中心线速度比较

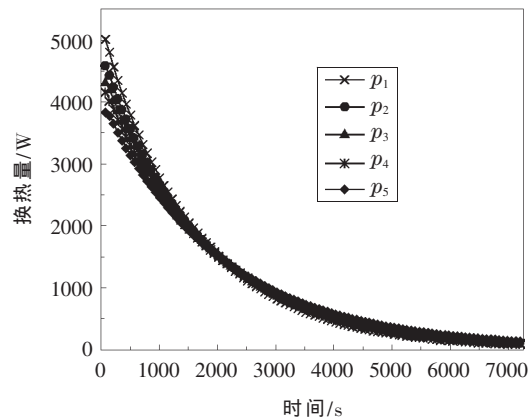


图 8 各点的换热量

## 4 椭圆形孔道交叉排布

### 4.1 模型几何参数

当采取交叉排布时,耐火砖应选用六棱柱耐火砖,图 9 为六棱柱耐火砖交叉排布示意图,图 10 为交叉排布情况下的蓄热体结构示意图。设六边形的横向宽度为  $L$ 、侧边高度为  $H$ ,椭圆形孔道在  $x$  轴上的轴长度为  $2r$  建立模型,耐火砖截面如图 11 所

示。当  $L=107.457\text{mm}$ 、 $H=28.21\text{mm}$  时六边形为正六边形。

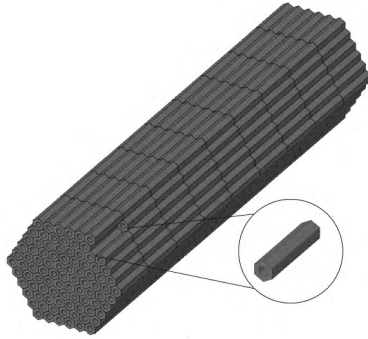


图9 耐火砖交叉排布示意图

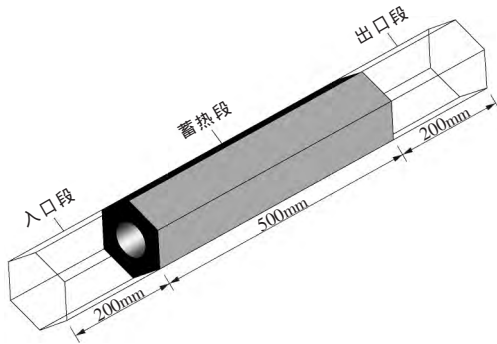


图10 交叉排布情况下蓄热模块结构图

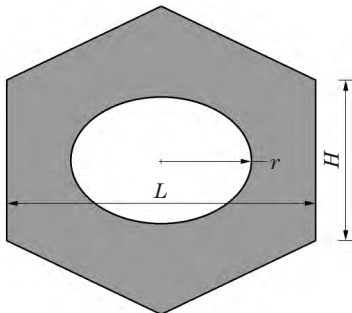


图11 交叉排布的耐火砖截面图

#### 4.2 蓄热特性

图12为  $r$  取不同值时,  $L$  和  $H$  不同组合情况下, 氮气加热2h后耐火砖末端平均温度的平均值。可以看出, 当  $r=28.21\text{mm}$  时, 耐火砖末端平均温度的平均值最小。分析可得, 椭圆形孔道的充热速度比圆形孔道耐火砖快。

图13为  $r$  取不同值时, 加热2h后耐火砖末端最高平均温度下  $L$  对应的  $H$  值。可以看出, 不同  $r$  值下, 不同  $L$  对应的最优  $H$  值, 均随着  $L$  的增大而减小。

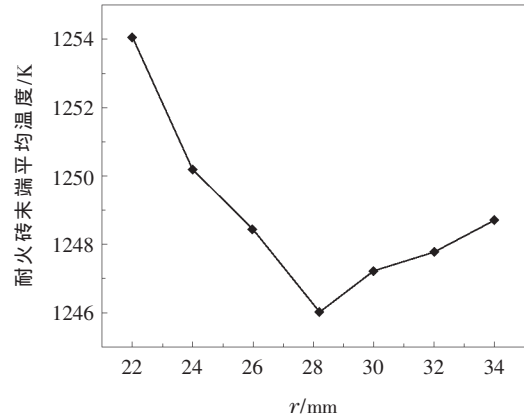


图12 不同  $r$  值时  $L$  和  $H$  组合的末端平均温度的平均值

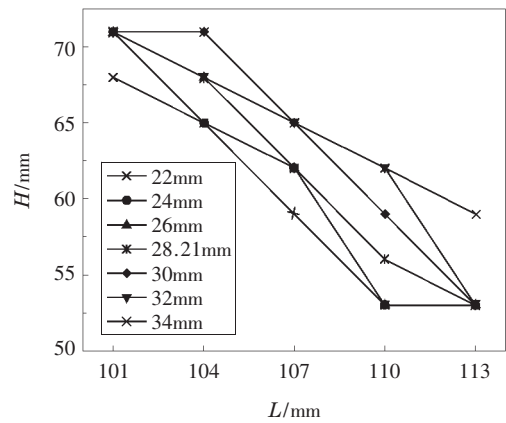


图13 不同  $r$  值时耐火砖最高平均温度下  $L$  和  $H$  的组合

从图14可以看出, 当  $r=22\text{mm}$  时, 椭圆在  $x$  轴方向的长度小于在  $y$  轴方向上的长度, 椭圆轮廓左右两侧的长度较长, 可视为主要加热区。  $L$  和  $H$  的最优组合趋近于随着  $L$  的增大,  $H$  减小。这趋向于减小耐火砖在椭圆形孔道两侧的面积, 即减小离主加热区域较远处的面积。

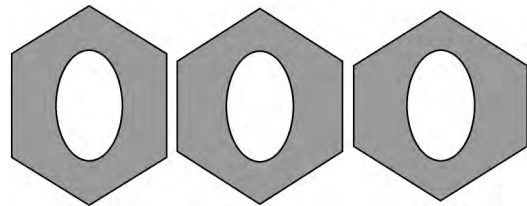


图14  $r=22\text{mm}$  时  $L$  和  $H$  组合的耐火砖截面图

从图15可以看出, 当  $r=34\text{mm}$  时, 椭圆在  $x$  轴方向的长度大于在  $y$  轴方向上的长度, 椭圆轮廓上下两侧的长度较长。从左到右  $L$  和  $H$  的最优组合随着



$L$  的增大  $H$  减小, 即趋向于减小离主加热区较远处的面积。

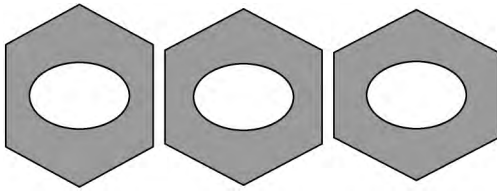


图 15  $r=34\text{mm}$  时  $L$  和  $H$  组合的耐火砖截面图

分别取  $r=22\text{mm}$ 、 $24\text{mm}$ 、 $26\text{mm}$ 、 $28.21\text{mm}$ 、 $30\text{mm}$ 、 $32\text{mm}$ 、 $34\text{mm}$  时, 最高温度点对应的  $L$ 、 $H$  组合。如图 13 所示, 当  $r$  一定时,  $L$  和  $H$  的最优组合值随  $H$  的增加  $L$  减小。图 13 中的横坐标值除以 107.457, 纵坐标值除以 62.04 (即与正六边形的  $L$ 、 $H$  值做比), 求出其误差棒并进行拟合, 得出斜率为 -2.39, 截距为 3.39,  $R^2$  值为 0.987, 拟合度高, 结果如图 16 所示。基于此可对耐火砖形状及交叉排布情况下的排布间距进行设计。

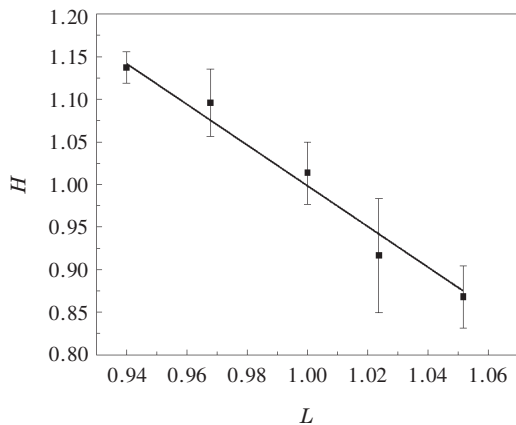


图 16 耐火砖最高温度下  $L$  和  $H$  的组合

图 17 为椭圆形孔道  $r$  取不同值时,  $L$  和  $H$  组合得出的耐火砖末端最高平均温度。由图 17 可知, 当  $r=28.21\text{mm}$  时中心孔为圆形, 此时  $L=107.457\text{mm}$  且  $H=62.04\text{mm}$  (即正六边形), 耐火砖末端的平均温度最高。当中心孔为椭圆形时 (即  $r$  小于或者大于  $28.21\text{mm}$  时), 通过  $L$  和  $H$  组合得出的末端最大平均温度较高, 纵向长度大于横向长度的椭圆形孔升温要快 (即椭圆较长的轴与六边形截面纵向的中心线共线时较优)。椭圆形孔道耐火砖与矩形孔道相比末端温度较小。表 2 为不同  $r$  值下的最优截面参数。

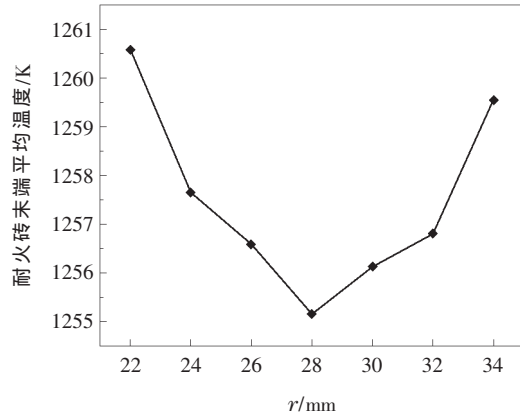


图 17 椭圆形孔道不同  $r$  值时耐火砖末端最高平均温度

表 2 不同  $r$  值下耐火砖最优蓄热截面参数 mm

$r$	$L$	$H$
22	107.457	59
24	107.457	62.04
26	107.457	62.04
28	107.457	62.04
30	110	59
32	110	62.04
34	107.457	65

### 4.3 中心线速度对比

设  $r=22\text{mm}$  时耐火砖末端最高平均温度的  $L$  和  $H$  尺寸的最优组合为  $d_1$ , 相应地设  $r=24\text{mm}$ 、 $26\text{mm}$ 、 $28.21\text{mm}$ 、 $30\text{mm}$ 、 $32\text{mm}$ 、 $34\text{mm}$  时的耐火砖末端最高平均温度的  $L$  和  $H$  尺寸的最优组合分别为  $d_2$ 、 $d_3$ 、 $d_4$ 、 $d_5$ 、 $d_6$ 、 $d_7$ 。图 18 为  $d_1 \sim d_7$  截面下耐火砖的中心线速度。

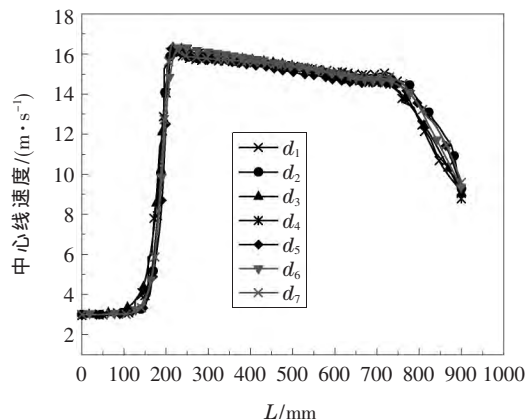


图 18 椭圆耐火砖中心线速度

由图 18 可知, 在  $r$  取不同值的条件下, 中心线速度差别不大, 其中  $0 \sim 200\text{mm}$  是入口段, 速度为

3m/s;200~700mm 是加热段,由于入口效应,热氮气速度快速上升,达到 16m/s;700~900mm 是出口段,由于出口效应,热氮气速度逐渐下降,且中心线速度最大值较矩形孔道要小,中心线速的变化比矩形孔道要小。

#### 4.4 压力损失对比

表 3 为椭圆形孔道在不同  $r$  值条件下,通过  $L$  和  $H$  的最优组合后末端最高平均温度对应横截面的压力损失。可以看出,椭圆形孔道在不同  $r$  值条件下, $L$  和  $H$  最优配比的压力损失变化较小,最高压力损失相差 1.39%,同时比矩形孔道耐火砖的压力损失小,这是由于孔道的换热面积比矩形孔道小,摩擦阻力小。

表 3 椭圆形孔道耐火砖压力损失 Pa

截面	压力损失
$d_1$	125.30
$d_2$	126.01
$d_3$	124.46
$d_4$	126.15
$d_5$	124.48
$d_6$	124.39
$d_7$	124.68

#### 4.5 换热量对比

图 19 为  $d_1 \sim d_7$  的耐火砖与加热气体换热量随时间的变化。在  $r$  取值不同的情况下,换热量相差很小, $r=22\text{mm}$  时初始换热量最大,同时对应着 2h 后具有最大末端平均温度。

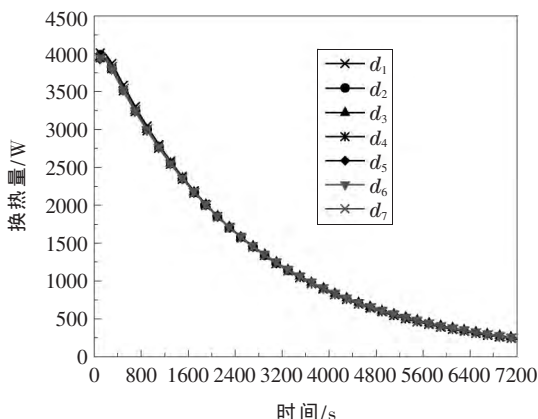


图 19 椭圆形孔道耐火砖换热量

### 5 结论

通过计算不同宽高比矩形孔道耐火砖和不同

长短半轴椭圆形孔道耐火砖的升温特性、中心线速度、压力损失,得到以下结论:

① 在矩形孔道宽高比小于 0.8 时,矩形孔道宽高比与耐火砖宽高比呈线性关系,斜率为 0.62,截距为 0.5,矩形孔道宽高比大于 0.8 时对应耐火砖的宽高比为 1。

② 椭圆形孔道的长短半轴比值越大,耐火砖升温越快。当椭圆形孔道交叉排布时,椭圆形孔道在  $y$  轴方向长度大于  $x$  轴方向长度的情况下,通过六边形宽度和侧边高度的合理配置,其升温特性优于椭圆形孔道  $x$  轴方向长度大于  $y$  轴方向长度。

③ 矩形孔道耐火砖与椭圆形孔道耐火砖相比,升温更快,中心线速度更高,压力损失更大。

#### 参考文献:

- [1] 王政伟,吕长宁,蔡佳霖,等.光热发电高温固体蓄热系统的优化设计[J].节能技术,2018,36(4):357-360.
- [2] 李慧俭,贾俊崇,赵昕波,等.固体电蓄热散热器风道模拟优化[J].河北建筑工程学院学报,2018,36(2):59-62.
- [3] 韩雪.风电供热固体蓄热锅炉容量选择研究[J].电力勘测设计,2018(3):59-63.
- [4] 胡思科,周林林,邢姣娇.圆形和椭圆形孔道固体蓄热装置蓄放热特性模拟[J].热力发电,2018,47(1):38-45.
- [5] 郭成,罗勇.固体电蓄热装置蓄热过程的实验[J].承德石油高等专科学校学报,2017,19(6):26-28.
- [6] 白胜喜,朱长林.固体电蓄热装置热效率的试验研究[J].黑龙江电力,2005,27(4):257-259,303.
- [7] 王政伟,王海林,王叶飞,等.固体蓄热器填充床阻力损失的理论分析和实验研究[J].太阳能学报,2017,38(9):2480-2485.
- [8] 梁炬祥.固体蓄热传热过程的模拟分析及实验研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [9] 徐德玺,金映丽,邢作霞,等.基于有限元的固体电蓄热装置蓄热模拟及实验[J].机械工程与自动化,2016(4):23-25.
- [10] TALER D, DZIERWA P, TROJAN M, et al. Numerical Modeling of Transient Heat Transfer in Heat Storage Unit with Channel Structure[J]. Applied Thermal Engineering: Applied Thermal Engineering, 2019(149): 841-853.
- [11] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].4版.北京:高等教育出版社,2006:43,246,484.
- [12] LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence[M]. London: Academic Press, 1972: 1-169.

(编辑 张峰)

## Study on Shape and Arrangement Optimization of Heat Storage Channels of Refractory Bricks

Ju Liangliang<sup>1</sup>, Zou Yang<sup>2</sup>, Ma Fengcang<sup>1</sup>, Dai Ye<sup>2</sup>

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093;

2. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**[Abstract]** Using magnesia refractory brick as the heat storage unit and high temperature nitrogen as the heating medium, the heat storage characteristics of single refractory brick were studied and calculated. In the case of rectangular channel refractory brick arranged in line, the cross section width-height ratio of refractory brick corresponding to the highest average temperature at the ends of refractory brick after 2 hours of nitrogen heating was analyzed and compared under different rectangular channel width-height ratios. When the width-height ratio of rectangular channel is less than 0.8, the cross section width-height ratio of refractory brick is linear with the width-height ratio of rectangular channel with a slope of 0.62 and an intercept of 0.5. When the width-height ratio of rectangular channel is 0.8 to 1, the corresponding cross section width-height ratio of refractory brick is 1. When the width-height ratio of rectangular channel is reasonable, the difference of pressure loss at each point is small, and the centerline velocity is inversely proportional to the average temperature at the ends of refractory bricks. In the case of cross arrangement of elliptical channels, the larger the ratio of major axis to minor axis of elliptical channel is, the faster the temperature rise of refractory brick is. When the length of the elliptical channel in the y-axis direction is greater than that in the x-axis direction, through the reasonable configuration of hexagonal width and side height, the heating characteristics of the elliptical channel is better than those in the case that the length of elliptical channel in the x-axis direction is greater than that in the y-axis direction. The pressure loss of elliptical channel refractory brick changes little and is lower than that of rectangular channel refractory brick. Compared with elliptical channel refractory brick, rectangular channel refractory brick has faster heating up, higher centerline velocity, but greater pressure loss.

**[Keywords]** refractory brick; heat storage characteristics; rectangular channel; elliptical channel; arrangement; pressure loss; centerline velocity

·能源链接·

### 风力发电对于实现碳减排潜力巨大

在应对气候变化、减少温室气体排放措施中,提高能源使用效率与发展可再生能源已成为众多国家的选择。目前,风电属于技术最成熟、价格最有竞争力的可再生能源,国际风能理事会2009年12月14日在哥本哈根气候变化大会上表示,风力发电对于实现碳减排潜力巨大,发达国家当前减排承诺的相当大一部分单靠风能发电就能够实现。据测算,到2020年全球风力发电量将达到2600TW·h,相当于减排 $15 \times 10^9$ 吨二氧化碳。风能单一行业的减排就相当于发达国家承诺总体减排量的42%~65%。据统计,当前全球超过80%的碳排放来自能源行业,其中电力占到40%。而风能的减排潜力巨大,风能在发电过程中不产生任何温室气体,即使是风车在制造过程中产生的碳排放,也仅仅相当于风力发电3~6个月的减排量,而风电机组平均使用寿命长达20年。风能发电迅速发展,正在成为实现全球低碳、高效经济的核心技术之一。在哥本哈根达成的具有雄心的协议,将有助于风能在更多国家推广。(供稿 舟丹)