

知識物件上傳表

計畫名稱：節能綠色吸附材料關鍵元件及設備技術開發計畫(2/3)

上傳主題：固態蓄熱磚放熱特性研究：實驗與模擬

國別	■國內
能源業務	☐ 總體能源 ☐ 化石能源 ☐ 電力 ☐ 核能 ☐ 新及再生能源 ■節約能源
能源領域	☐ 政策與法規 ☐ 環境衝擊與調適 ☐ 經濟及產業 ■科技 ☐ 統計資訊
決策知識類別	☐ 建言 ■評析 ☐ 標竿及統計數據 ☐ 其他
關鍵字	Solid heat storage, Electric heating boiler, Fluid structure coupling, Convective heat transfer
重點摘述	新能源發電將逐漸取代化石能源發電，這需要能量儲存技術來進行儲能。能量儲存單元特性對系統性能有著重大影響。通過模擬和實驗研究了解固態蓄熱輕質磚的放熱特性。實驗結果顯示，在放熱結束時，6 通道的放熱完成度比 2 通道高 5%。12 m/s 風速下的放熱完成度比 6 m/s 高 3%。通過模擬，6 通道的熱提取比 2 通道和 4 通道分別高 15.8%和 3.3%，而 9 m/s 風速下的熱提取比 6 m/s 和 12 m/s 分別高 0.2%和 2.9%。模擬和實驗之間的誤差小於 10%，驗證了模型的準確性，並證明可以擴展到其他情況。建議使用 6 通道儲熱磚，風速不應超過 12 m/s。
主要參考資料來源	Energy Reports Volume 9, December 2023, Pages 1948-1962 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723000094

1. 簡介

在能源互聯網的發展過程中，可再生能源的發展對傳統電網帶來了巨大影響。

為了解決風光等清潔能源消耗的問題，近年來能量儲存市場不斷擴大，各種能量儲存技術也日益成熟（陳等，2015 年）。

作為太陽熱發電的核心技術之一，高溫儲熱技術的典型系統形式主要包括熱化學、感應熱和潛熱。其中，感應熱儲存是最廣泛應用的，其原理相對簡單，包

括液體和固體的感應熱儲存。固體儲熱（SHS）包括固體磚儲熱、熔鹽儲熱、固體顆粒儲熱等。瑞典、美國等國家在感應熱儲存方面進行了深入研究並在某些領域投入使用。從目前的研究進展來看，瑞典處於領先地位。固體電熱儲存（SEHS）裝置是其中一種具有高能量儲存密度、高效率和經濟性的能量儲存技術。

SHS 材料的特性對它們的充放電容量至關重要。建議使用混凝土和輕質磚作為 SHS 材料，這在充放電過程中具有良好的物理特性和低成本。不同材料具有不同程度的熱層化。Mawire 和 McPherson，Mawire 等以及 Mawire 和 McPherson 研究了鵝卵石床熱能儲存系統，包括石英玻璃、氧化鋁和不銹鋼的特性，提出了評估不同材料特性的評價標準。

此外，改變儲熱裝置的結構可以提高儲熱裝置的充放電速率，例如使用圓形通道，添加橫截面板，以及使用單面雙通道。Vigneshwaran 等人建立了一維動態模型來研究六個混凝土模塊儲熱系統的性能。結果顯示，六個串聯混凝土模塊的總儲存和釋放能量最高。流固耦合的計算方法可以應用於固體電熱儲存和加熱材料的原理。Domański 和 Fellah 以及 Domański 和 Fellah 研究了感應熱儲存系統的完整高溫過程，並得到了系統的最佳高溫單元數量、儲熱時間以及在異質效率情況下對‘貨幣價值’的影響法則。

SHS 技術可以應用於許多場合。Dreizigacker 和 Belik 提出了一種基於電加熱敏感固體介質能量儲存系統的新概念，應用於電動車，並進行了模擬研究。SHS 技術在太陽能乾燥器中的應用表現優於潛熱儲存。它還可以提高乾燥程度。在焚聯發電系統中，集成的 SHS 系統使電和熱功率評估指標分別提高了 24.52% 和 20.08%。SEHS 技術可以應用於發電廠實現同時發電和供熱，還可以與其他技術如熱泵或太陽加熱進行集成。SEHS 技術可以提供長時間穩定的放電溫度和功率。儲熱技術有助於峰值負載管理。將 SEHS 技術集成到供暖系統中可以顯著節省供暖成

本，提高系統的靈活性和性能。同時，集成可再生能源，儲熱系統充當需求和供應之間的緩衝。

基於上述分析，改善 SEHS 的放電特性有助於提高整個系統的性能。本研究的目的是研究動態固體電熱儲存的放電特性和運行效率評估。儲熱單元由氧化鎂製成，具有圓形氣道。為了實現這一目標，採取了以下措施。

(1) 通過文獻研究發現，在應用過程中存在一些問題，例如由於不科學的運行模式導致系統運行效率低、操作成本高，以及由於不完全放電而導致的熱積聚。建造了一個小型實驗設備，測試了不同操作條件下 SHS 磚的溫度變化數據，選擇放電評估指標進行數據分析。

(2) 通過 CFD 模擬軟件建立了磚塊的內部流動和高溫模型，模擬了現有 MgO 磚結構的內部高溫過程，並對計算結果進行了分析。

(3) 從 SHS 磚的結構特點和高溫性能出發，改進了現有 SHS 磚的缺點。改進的模型進行了模擬，分析了在不同的 SHS 磚佈局和不同的風速下，SHS 磚的內部溫度場分布特徵和放電效果。與實驗結果進行比較，驗證了模型的可靠性，並推廣了模擬以避免大規模實驗的麻煩。

2. 實驗

一件小型的 SHSE 實驗設備被設計並建造出來。根據佈局對風口風速 12m/s 時放電效應的影響，設計了兩種不同的實驗條件。在砌磚的過程中，首先需要將磚塊定位。位置確定後，將磚塊有序地排列在外殼中。預留了通道的位置，並設計了溫度測試點的熱電偶。電加熱線被插入散熱通道。完整的磚塊結構、測試臺的示意圖和實物圖在圖 1 中顯示。實驗設備主要包括 SHS 磚塊、循環風扇、熱交換器等。SHS 磚塊是購買的，其尺寸為 $3000 \times 2550 \times 1500$ ，磚塊冷卻孔的直徑為'D

= 55mm'，儲熱能力為 6400 kWh。通過改變 SHS 磚塊的佈局和風口風速，研究了對放電特性的影響。

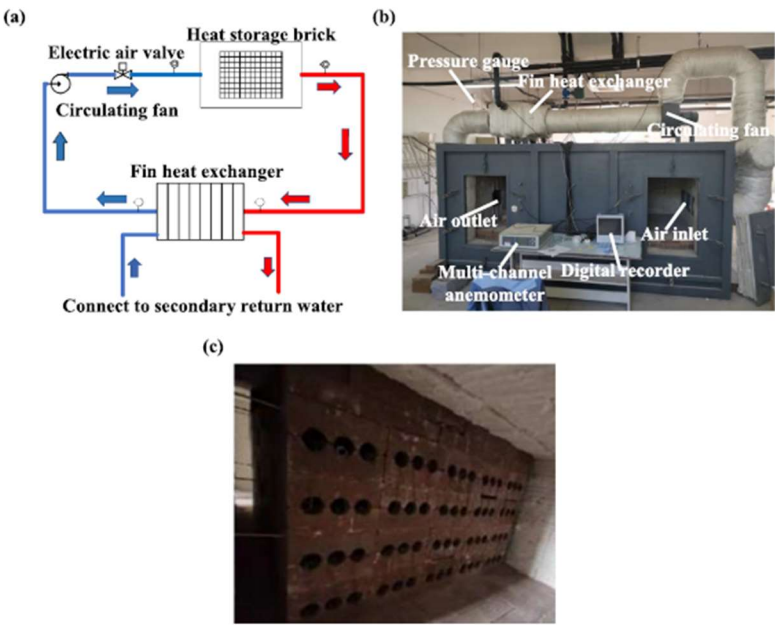


圖 1 實驗設備

SHS 磚塊進風口風速對放電效應的影響也進行了討論。設定了以下實驗條件：採用 6 通道佈局，放電時間為 10 小時。記錄了未加熱的 SHS 磚塊風口風速，並分析了不同進風風速下散熱通道的風速分佈。放電後，記錄了每個溫度測試點的磚塊溫度和放電期間風口溫度，並分析了放電效應的差異。具體操作見表 1。

Table 1
Experiment conditions.

Operating conditions	Structural parameters Number of channels	Operating parameters Wind velocity/m s ⁻¹	Initial temperature/°C
1	2	12	500
2	6	12	
3	6	6	

表 1

建造實驗設備的 SHS 磚塊數量為 5 列×8 層×10 行，總共 400 塊，風口位於磚塊風口部分的中央。考慮到對稱性，僅使用磚塊長度、寬度和高度的 1/2 進行測試點的佈局。風速測試點的佈局如圖 2 所示。主要使用多通道風速計在工作條件穩定時測量風速，並根據實驗數據分析 SHS 磚塊的內部風速場。

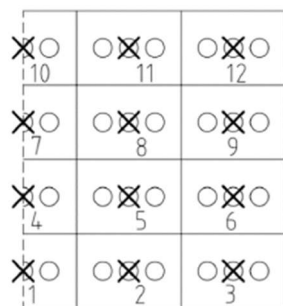


圖 2

溫度測試點安排在第 1 區的位置，即在磚塊風口面後方 50mm，中央的第 2 和第 3 區則位於風口前方 50mm。每個區域都布置了溫度測試點。該區域的示意圖和熱電偶分佈如圖 3 所示。

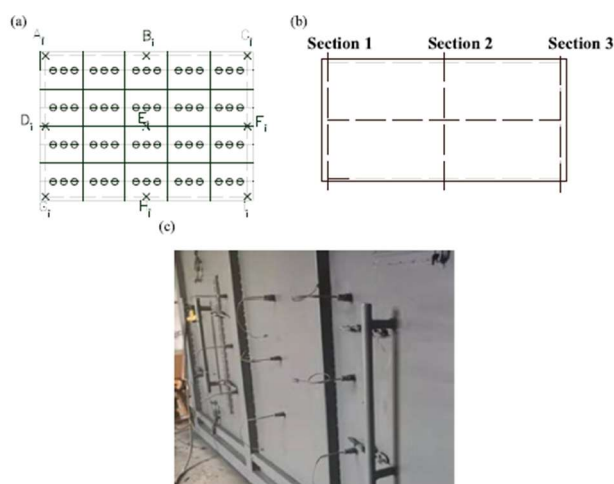


圖 3

測試儀器的溫度和風速信息請參見表 2。

Table 2
Main test instruments and parameters.

Name	Model	Measuring range	Precision
Digital recorder	Test points measurement		
Temperature recorder	K-type thermocouple	PT100	0~1300 °C
Multi-channel anemometer	Wind velocity probe	SYSTEM 6242	0~25 m/s

表 2

使用風速分佈均勻性系數 W (Tao 等人, 2010 年) 來分析風速數據。這個系數作為評估標準首次出現的時間可以追溯到約 1990 年左右。該系數的計算是基於偏差原則的，對平面上的風速分佈均勻性具有良好的穩定性。 W 的表示式為：

$$W = 1 - 1/2n \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{|v_i^2 - \bar{v}^2|} / \bar{v} \quad (1)$$

其中， v_i 為溫度測試點處的風速，m/s； $\bar{v}$ 為測試平面的平均風速，m/s； n 為測試點的數量。 W 的值範圍是[0,1]。 W 越大，流動均勻性越好。放電完成時間 t_c 用於分析溫度數據，它可以指示磚塊在放電周期內的放電完成程度。 t_c 的表示式為：

$$\bar{t}_c = (t_{\max} - \bar{t}) / (t_{\max} - t_{\min}) \times 100\% \quad (2)$$

其中， t 為溫度測試點的平均溫度， $^{\circ}\text{C}$ ； n 為溫度測試點的數量； $t_{\max}$ 為溫度測試點的最高溫度， $^{\circ}\text{C}$ ； $t_{\min}$ 為溫度測試點的最低溫度， $^{\circ}\text{C}$ 。

在不同進風風速條件下，每個測試點的風速顯示在圖 4 中。發現在進風風速變化時，每個測試點的風速變化趨勢相似，不同位置之間存在顯著的風速差異。比較兩種工作條件，在 6 m/s 和 12 m/s 的條件下，最大風速差異分別為 1.68 m/s 和 3.29 m/s。計算 W 的值分別為 0.62 和 0.58，表明在進風風速較大時，風速均勻性較差。

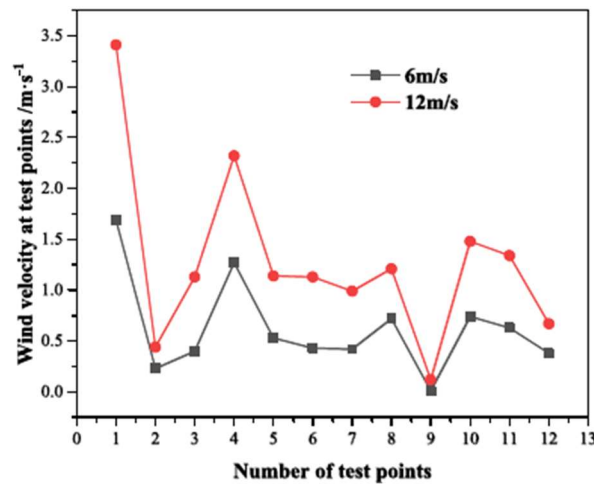


圖 4

圖 5 顯示了在不同佈局下，放電時間為 10 小時的測試點的平均溫度圖。從圖 5 中可以看出，隨著通道數量的增加，磚塊的溫度隨著放電時間的增加而降低。放

電 10 小時後，2 通道和 6 通道測試點的平均溫度分別為 119.1°C 和 81.9°C 。比較兩種佈局在同一時間的溫度差異，溫度差異在前五個小時逐漸增加，而在後五個小時逐漸減少，表明在放電的早期，改變佈局對放電效應的影響較大，而在放電的後期，影響逐漸減小。計算得到的 t_c 分別為 60%和 65%，表明通過改變佈局並在相同的進風風速下均勻安排通道，可以有效提高磚塊的放電效果，在一定時間內增加溫度下降範圍，實現更高的放電完成度。

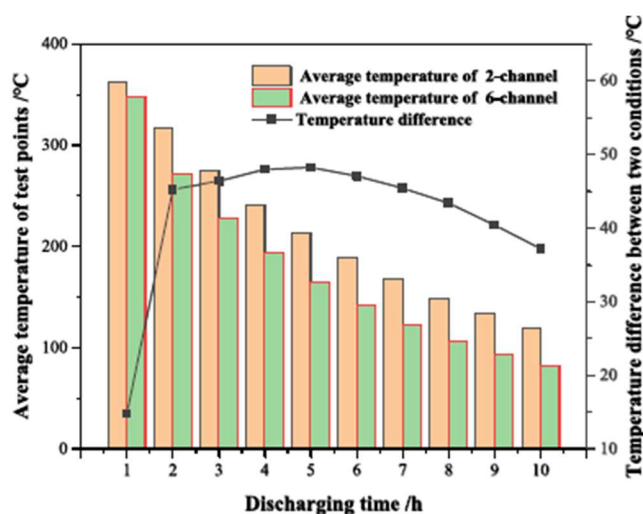


圖 5

圖 6 顯示了在不同進風風速下，測試點平均溫度隨時間變化的情況。從圖 6 中可以看出，在不同進風風速下，溫度變化趨勢基本相同。在放電 10 小時後，6 m/s 和 12 m/s 條件下測試點的平均溫度分別為 119.7°C 和 81.9°C 。風速越快，放電結束時磚塊的溫度越低，放電程度越高。從折線圖可以看出，兩種條件之間的溫度差異在第一小時增加，然後減小，到放電結束時差異較低。計算得到的 t_c 分別為 62%和 65%，顯示當進風風速增加時，放電完成度有所提高。這是因為流體速度加快，流動過程中流體的衝擊和擾動更加劇烈，促進了對流傳熱過程，使磚塊的放電過程更加充分完成。

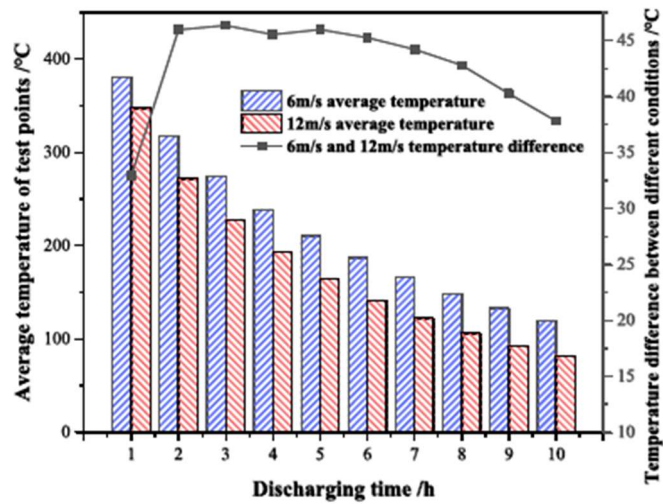


圖 6

3. 模擬

根據實際設備，在合理簡化之後，建立了如圖 7 所示的三維模型。該模型是一種廣泛使用的無縫 SHS 磚，磚的兩側都有 2 個通道。這種方法的優點在於可以在有限的空間內最大程度地提高充放電容量。

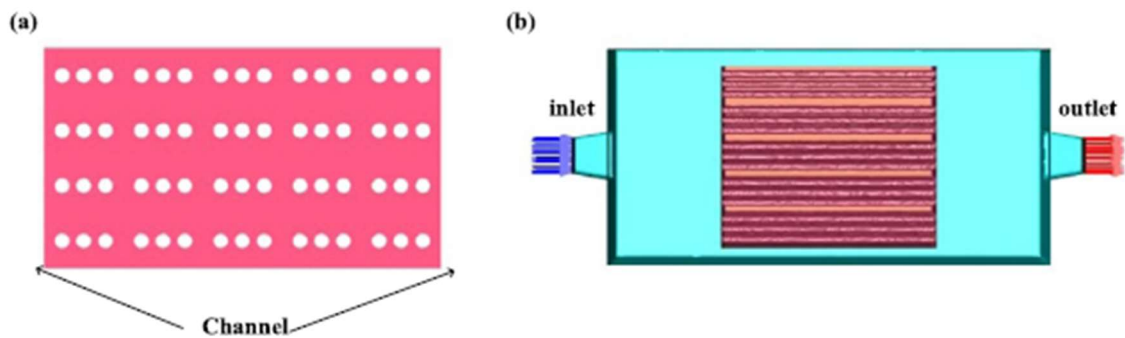


圖 7

這個模型的尺寸參考了實際的 SHS 磚，其長、寬和高分別為原尺寸的 1/2，尺寸為 1500 毫米×1275 毫米×720 毫米；SHS 磚的散熱孔直徑為' $D = 55$ 毫米'；SHS 磚與風口的距離與風口相同，這兩個地方的間隔為 795 毫米×1275 毫米×720 毫米。

模擬條件與實驗條件相同，並對 SHS 磚的結構進行了優化。如圖 8 所示，優化後的模型分別為 4 通道和 6 通道。SHS 磚的外部尺寸保持不變。4 通道和 6 通道的通道寬度分別為 60 毫米和 40 毫米。

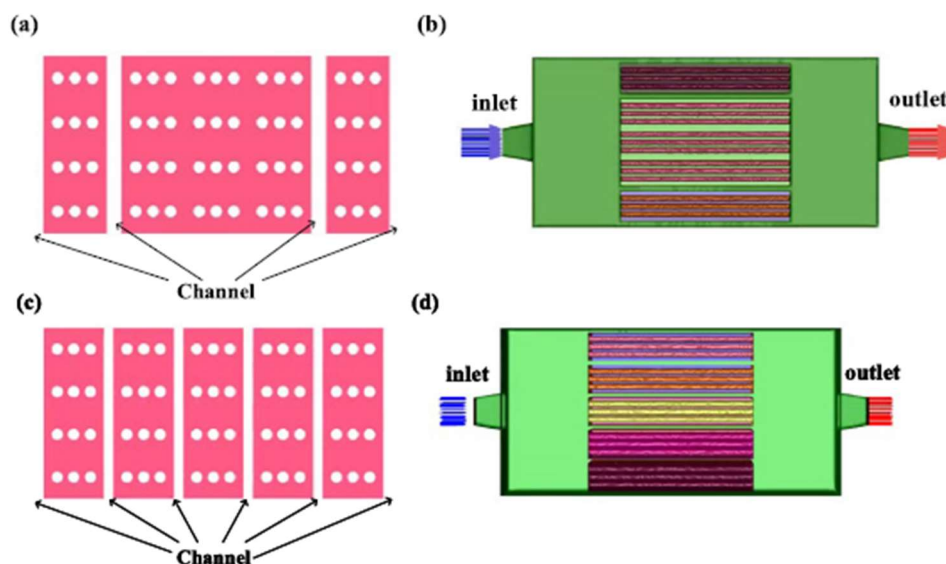


圖 8

對磚塊的三種佈局對放電效果的影響進行了模擬。進風溫度為 70°C 。具體的模擬方案請參見表 3。空氣和輕質磚的物理參數設置如表 4 所示。使用模擬軟件進行網格劃分，並使用後處理軟件獲取溫度場和速度場。如圖 9 所示，展示了網格劃分和所選擇的截面。

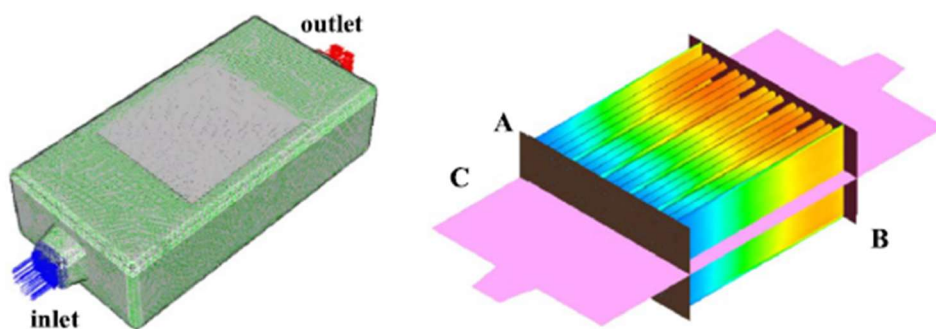


圖 9

在這個物理模型中，HT 流體由外部風扇提供，HT 模式是強制對流傳熱，而熱儲存裝置外殼被設置為絕緣邊界。模型中的流動滿足不可壓縮粘性流體的要求。

流體流動過程必須遵循質量守恆方程、動量守恆方程和能量守恆方程。控制方程的具體形式如下（He，2021）：

質量守恆方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

其中 ρ — 流體密度， kg/m^3 ； u 、 v 、 w — 分別是 x 、 y 和 z 方向的速度， m/s 。納維爾-斯托克斯方程：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial (\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial (\rho u)}{\partial z} \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial (\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial (\rho v)}{\partial z} \\ & = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + u \frac{\partial (\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial (\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} \\ & = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \rho g \end{aligned} \quad (6)$$

其中 p — 壓力， Pa ； μ — 動力黏度， N s/m^2 。

能量守恆方程：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + u \frac{\partial (\rho T)}{\partial x} + v \frac{\partial (\rho T)}{\partial y} + w \frac{\partial (\rho T)}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 λ — 熱傳導率， W/(m K) ； C_p — 比熱容， J/(kg K) 。

選用標準的 $k-\varepsilon$ 模型進行計算，該模型具有簡單、高效的解法，計算穩定且準確度高的明顯優勢。紊流動能 k 及其耗散率 ε 可從以下方程式中獲得：

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_t)}{\partial x_t} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + Y_M + S_k \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_t)}{\partial x_t} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (9)$$

其中 G_k — 平均速度梯度產生的紊流動能； G_b — 浮力產生的紊流動能； Y_M — 壓縮性校正項，即壓縮性紊流中脈動膨脹的貢獻； $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ — 常數； σ_k 、 σ_ε — k 和 ε 的紊流普朗特數； $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ， $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ， $\sigma_k = 1.0$ ， $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。 $C_{3\varepsilon}$ 是與壓縮流計算中浮力有關的系數。當主流與重力方向平行時， $C_{3\varepsilon} = 1.0$ ，當主流與重力方向垂直時， $C_{3\varepsilon} = 0$ ； S_k 、 S_ε — 源項。紊流黏度 μ_t 的計算如下：

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

$$C_\mu = 0.09.$$

在模擬計算中，網格劃分的處理方法和網格數量對計算結果的準確性有很大的影響。因此，在網格劃分過程中進行獨立性驗證可以大大避免在後續模擬計算和數據分析中的錯誤，提高計算的準確性。在熱儲存裝置的網格劃分中，通過控制最大網格尺寸，使網格得到連續加密。在這次模擬中，最大網格尺寸分別設置為 50 毫米、40 毫米、30 毫米和 20 毫米，相應模型的網格數分別為 201 萬、339 萬、362 萬和 467 萬。構建整體模型，進行整體求解。在監測磚的平均溫度後，結果如圖 10 所示。

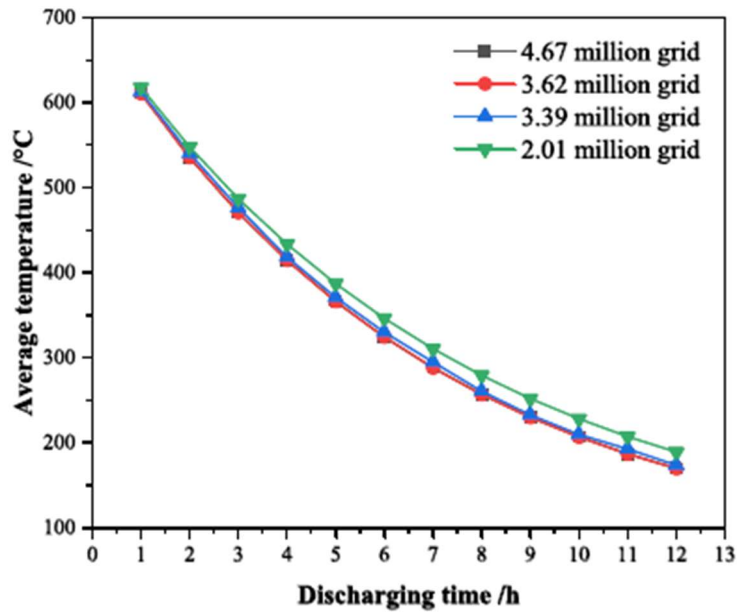


圖 10

從圖 10 可以明顯看出，當網格數量從 201 萬增加到 362 萬時，12 小時後的溫度差異為 19.4°C 。當最大網格尺寸進一步減小，網格加密到 467 萬時，12 小時後，儲熱磚的平均溫度下降了 0.2°C 。為了提高計算效率，選擇了 362 萬個網格進行數值計算。

在圖 11 中，顯示了放電結束時磚塊溫度分布的雲圖。經過 12 小時的放電過程，溫度場與初始階段相比發生了很大變化。如圖 11 所示，由於 HT 時間長，A 部分已經與流體充分交換熱量，最高溫度不超過 78°C ，且該表面的固體與流體區域之間的溫度差異較小；在 B 部分，固體區域中風口正對的區域的溫度較低，其他位置的溫度較高，差異較小；磚塊與流體之間的總體溫差不超過 10°C ；根據 C 部分的溫度雲圖，發現連續放電過程 12 小時後，超過 60% 的固體區域冷卻到 100°C 以下，顯示出顯著的放電效果。靠近風口的磚塊的放電速率低於風口，容易積聚熱量。

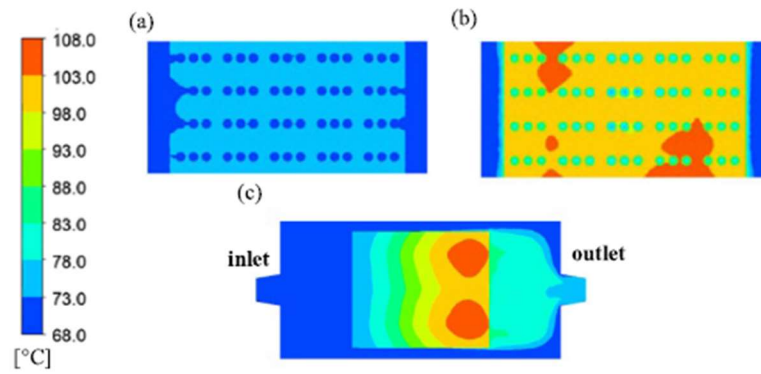


圖 11

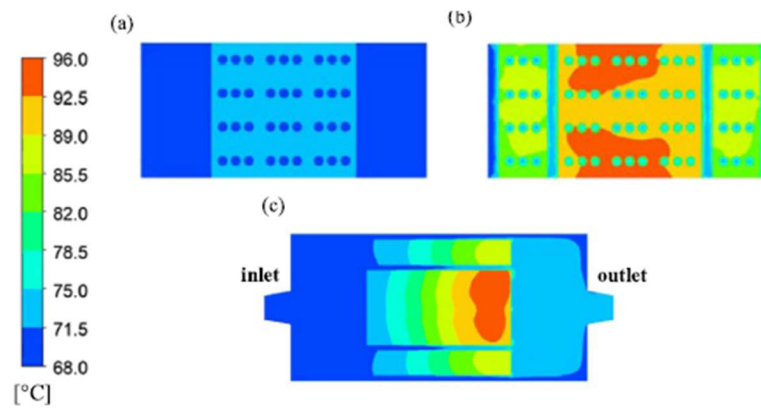


圖 12

從圖 11 中可以看出，在 2 通道佈局的放電階段，由於內部通道面積有限，熱交換效率不高，不同區域的磚塊溫度分布不均勻，熱量積聚，資源浪費。磚塊的結構對其內部溫度場有著重要作用。通過改變磚塊的佈局，通過模擬探索了不同佈局對磚塊放電效果的影響。4 通道和 6 通道的模擬結果的溫度圖分別顯示在圖 12 和圖 13 中。與 2 通道、4 通道和 6 通道三種佈局相比，放電 12 小時後，6 通道的磚塊溫度最低，放電效果最好，放電完成度更高。

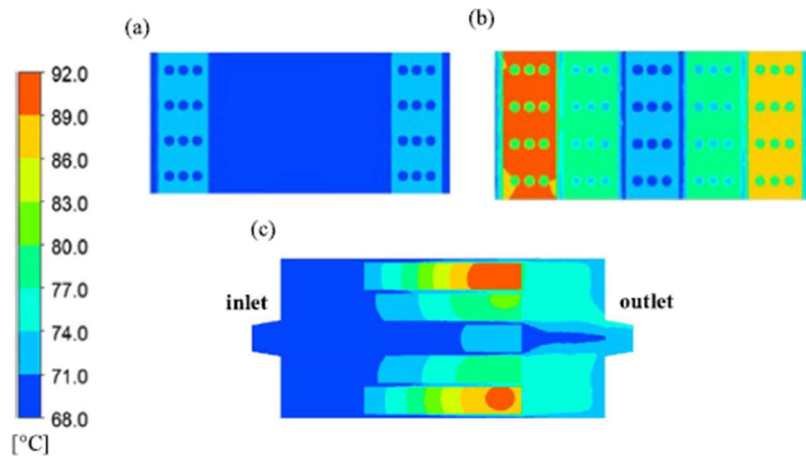


圖 13

圖 14 顯示了不同佈局下磚塊在放電過程中的平均溫度變化。並且在條形圖中展示了磚塊每小時結束時整體平均溫度的變化趨勢。點線圖表示了每小時磚塊的平均溫度差異。在放電 12 小時後，2 通道、4 通道和 6 通道的磚塊的平均溫度分別為 91.9°C 、 82.7°C 和 77.4°C 。在放電過程的前 4 小時，6 通道結構的溫度下降速率高於其他條件。放電五小時後，三種條件的放電速率基本相同。總的來說，6 通道的放電速率更快，放電完成度更高。

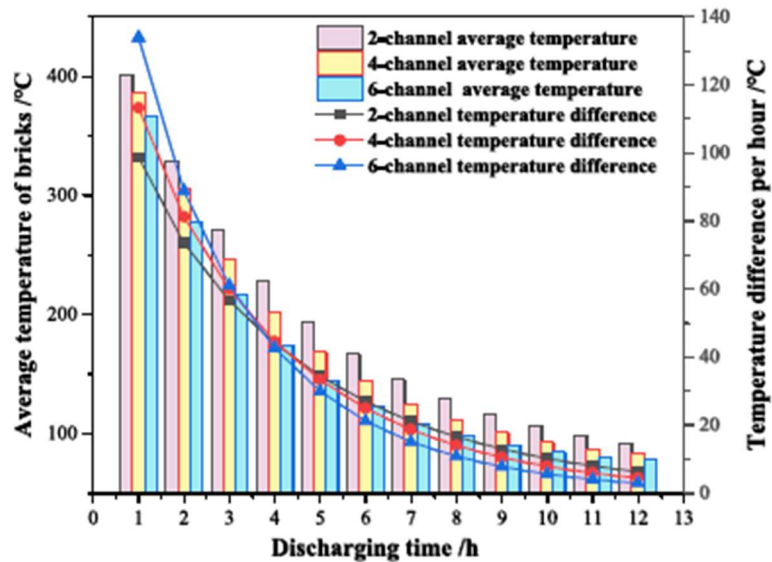


圖 14

在前一節中採用了 6 通道的最佳結構。分析了不同進風風速下磚塊的速度場和溫度場，如圖 15 和圖 16 所示。當進風風速為 6 m/s 時，磚塊進風口部分的速度圖

顯示在圖 15(a)中，最大速度約為 4.0 m/s，其速度分布與 9 m/s 和 12 m/s 的速度分布幾乎沒有區別，但該部分的整體速度差異小於 9 m/s 和 12 m/s，且區域內的速度分布更加均勻，與實驗結果一致。

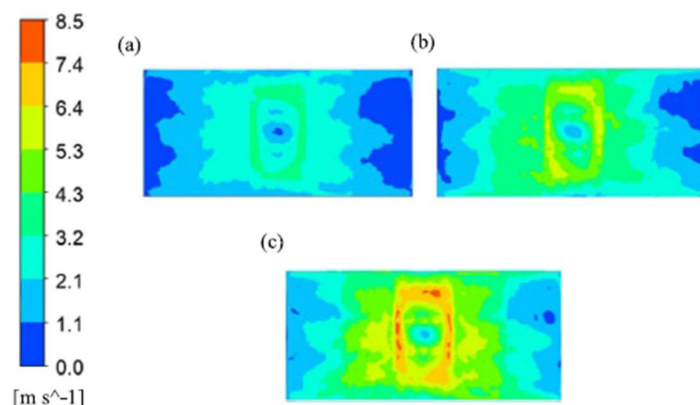


圖 15

在圖 16 中顯示了在三種風速下 A 部分的溫度分布。隨著風速的增加，溫度降低。溫度差異越小，溫度分布越均勻，放電完成度越好。然而，當風速達到 12 m/s 時，最大溫度差異小於 3°C，表明當初始溫度恒定時，風速對放電效果的影響存在上限。因此，應合理選擇風速，以避免能源浪費。

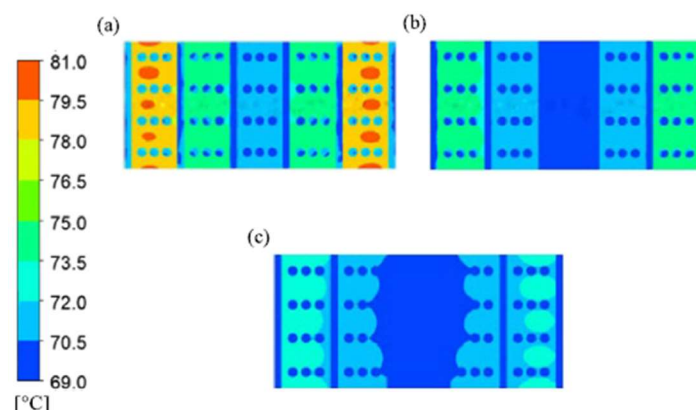


圖 16

在圖 17 中顯示了在不同風速下磚塊溫度變化的結果。條形圖顯示了每小時結束時磚塊的整體平均溫度，點線圖顯示了每小時磚塊的溫度差異。當風速從 6 m/s 增加到 12 m/s 時，放電效果更好，在放電 12 小時後，平均溫度分別為 82.3°C、75.0°C 和 72.5°C。當進風風速增加時，流體流動的紊流程度增加，高流速時 HT 邊

界層變薄，可以促進對流 HT 過程。因此，增加風速可以提高磚塊的放電速率，增強放電效果。

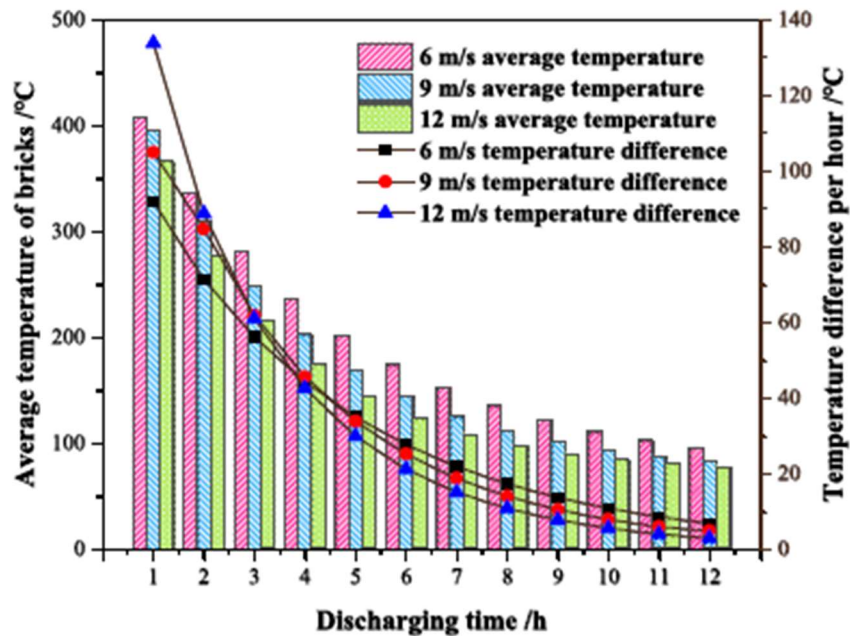


圖 17

作為傳熱流體，空氣的能量變化是從儲熱磚中提取熱量，計算公式如下：

$$Q_{\text{disch}} = C_{p,\text{air}} q_{m,\text{air}} (T_{\text{out,air}} - T_{\text{in,air}}) \quad (11)$$

其中 $C_{p,\text{air}}$ — 空氣的比熱容，J/(kg K)； $q_{m,\text{air}}$ — 空氣流量， m^3/s ； $T_{\text{out,air}}$ — 空氣出口溫度， $^{\circ}\text{C}$ ； $T_{\text{in,air}}$ — 空氣進口溫度， $^{\circ}\text{C}$ 。

不同工作條件下的熱量提取如圖 18 所示。從圖 18 可以看出，6 通道的空氣熱量提取高於 2 通道和 4 通道。在熱交換的早期階段，風速越高，熱量提取越多。然而，隨著空氣與磚塊之間的溫差逐漸降低，風速不再是確定熱量提取的因素。當風速為 9 m/s 時，總熱量提取最大。

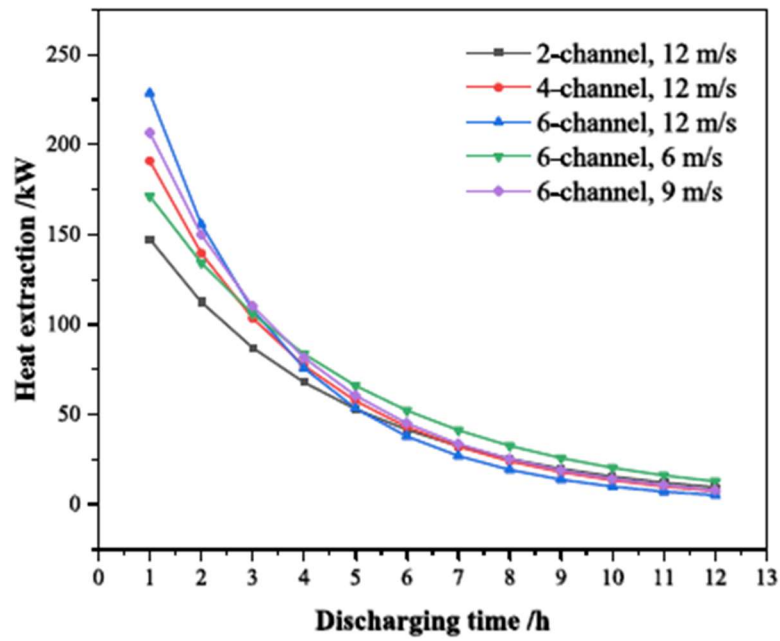


圖 18

在不同工作條件下的總熱量提取如表 5 所示。

Table 5

The total heat extraction under different working conditions.

Condition	2-channel 12 m/s	4-channel 12 m/s	6-channel 12 m/s	6-channel 6 m/s	6-channel 9 m/s
Total heat extraction/kW	623.92	716.46	741.07	761.83	763.26

表 5

使用 6 通道模型模擬了在 12 小時內以 15 m/s 的進風風速放電的磚塊，並與 12 m/s 的進風風速進行比較。結果如圖 19 所示。發現兩種條件之間的放電速率差異非常小，這意味著增加風速不會提高放電效率，反而會增加能耗並導致浪費。因此，根據放電的計算，建議在本研究中磚塊的推薦風速為 9 m/s。

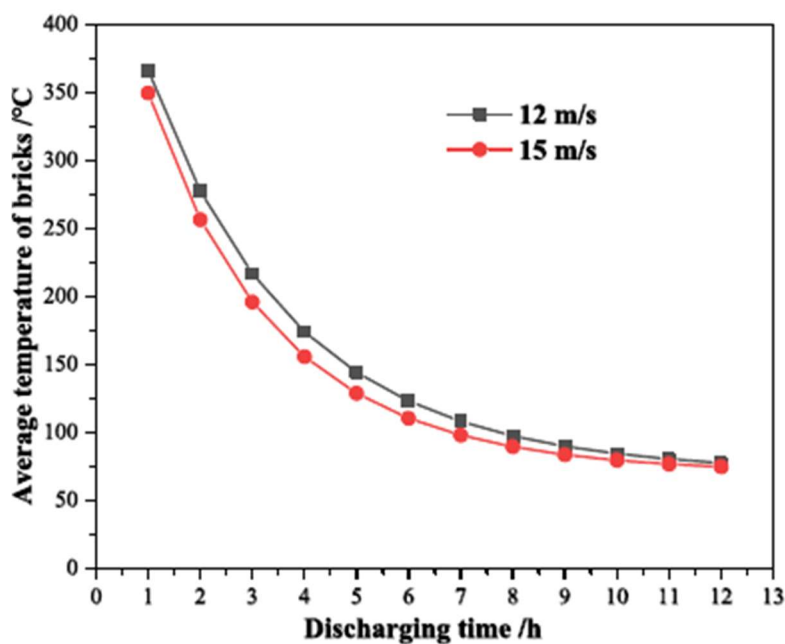


圖 19

4. 實驗和模擬之間的比較

為了驗證模型的準確性，模擬結果與實驗進行了比較。它們之間有一個平均絕對百分比誤差（MAPE）。MAPE 的表示方式為：

$$MAPE = 100/n \cdot \sum_{i=1}^n |\hat{T}_i - T_i / \hat{T}_i| \quad (12)$$

T_i 為第 i 小時結束時的實驗平均溫度，以攝氏度為單位； $\hat{T}_i$ 為第 i 小時結束時的模擬平均溫度，以攝氏度為單位； n 為總數。

在風速恆定的條件下，改變磚塊的佈局，在圖 20 中顯示了模擬和實驗結果的比較。結果顯示，在模擬和實驗中，磚塊的平均溫度變化趨勢相同，而在 6 通道條件下的排放速率大於 2 通道條件。增加通道數對磚塊的排放過程有積極影響。一般來說，6 通道的模擬和實驗之間的溫度差異小於 2 通道。

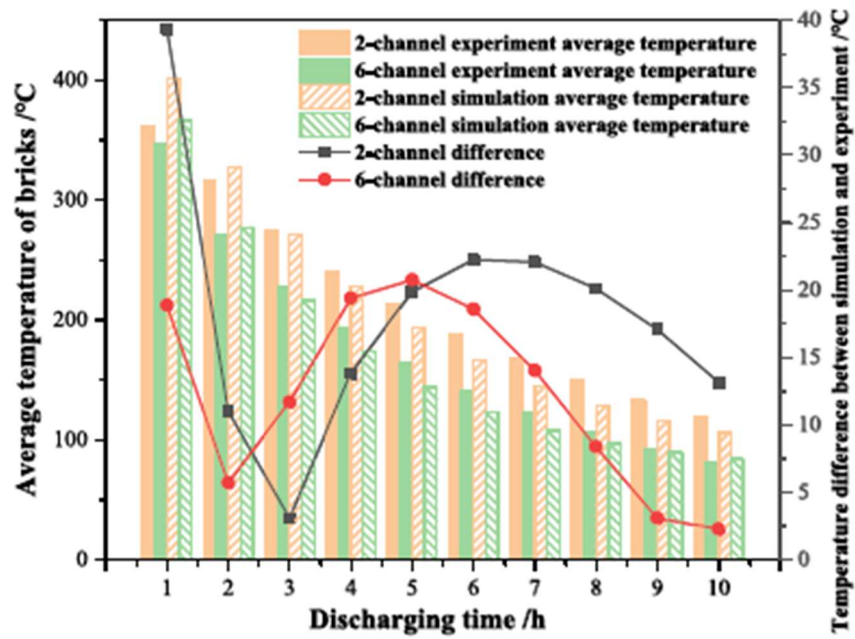


圖 20

在圖 21 中，顯示了在不同進風風速下模擬和實驗結果的比較。圖中顯示，隨著風速條件的變化，模擬和實驗具有相同的溫度變化趨勢，當風速為 6 m/s 和 12 m/s 時。

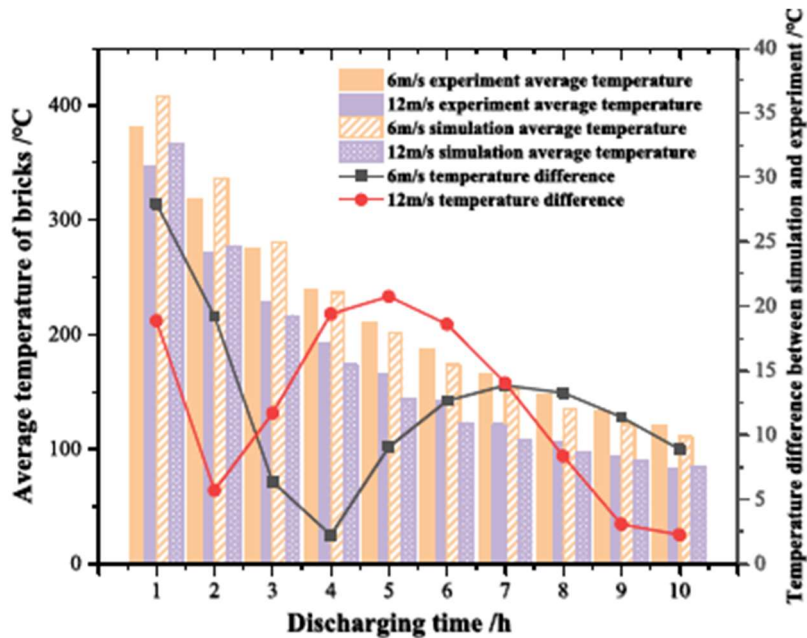


圖 21

圖中顯示了表 6 中四種條件下實驗和模擬之間的 MAPE。所有 MAPE 的值都低於 10%，表明本文模擬研究中使用的模型具有良好的可靠性。

Table 6 Error between simulation and experiment.				
Condition	2-channel	6-channel	6 m/s	12 m/s
MAPE	9.28%	7.39%	6.10%	7.39%

表 6

5. 討論

在研究磚塊的排放特性過程中，模型被理想化，與實際情況存在一定的誤差。此外，由於實驗過程中的條件有限，對排放特性的研究仍然不完善。因此，為了減少後續研究中的誤差並進行更深入的分析 and 研究，提出以下展望：

- (1) 在後續的研究中，我們可以使用更高溫耐受的實驗設備，融合溫度場和速度場，以獲得更準確的數據，更好地反映排放特性的變化。
- (2) 後續研究可以模擬和實驗整個操作過程，分析整個充放電過程中磚塊溫度場的分布特性，並優化系統設計以提高充電效率。
- (3) 後續研究可以增加對熱交換側的研究。磚塊的整體運行效率受熱交換側的影響很大。提高熱交換側的熱交換效率有助於增強磚塊上的能量交換過程，從而減少能耗，對於節能減排具有積極的意義。

6. 結論

為了討論 SEHS 的排放特性，基於當前項目建立了一個簡化的儲熱模型，並使用模擬軟件對 SHS 進行了模擬。發現現有磚塊佈局的排放效率較低，磚塊的排放完成仍有改進空間。基於這一現象，本研究將 SHS 的佈局從 2 通道優化到 6 通道。此外，利用 6 通道，實驗性地分析了風速為 6 m/s 和 12 m/s 時的排放特性。模擬分析與實驗具有相同的條件，並添加了 4 通道結構和風速為 9 m/s 的情況。通過比較模擬和實驗結果來驗證模擬的準確性。本文的主要結論如下：

(1) 在相同進風風速下改變佈局的實驗中，增加 HT 通道的數量可以使磚塊在同時達到更低的溫度和更高的排放速率。當 6 通道的結構保持不變，進風風速從 6 m/s 增加到 12 m/s 時，發現風速越高，排放結束時的溫度越低，排放完成度越高。6 通道的最終磚塊溫度比 2 通道低了 31.2%，排放完成度高 5%。

(2) 模擬使用了更多的操作條件。在 12 小時排放結束時，2 通道、4 通道和 6 通道的排放依次增加。在 6 通道的條件下，熱提取最快且最大，分別比 2 通道和 4 通道高 15.8% 和 3.3%。當結構設置為 6 通道且風速為 6 m/s、9 m/s 和 12 m/s 時，三種工作條件下的最終熱提取差異不大。風速為 9 m/s 時，最大熱提取比 6 m/s 和 12 m/s 分別高 0.2% 和 2.9%。

(3) 比較模擬和實驗結果，兩者之間的誤差均低於 10%，驗證了模擬的準確性。顯示模擬結果正確，可以擴展到其他工作條件，減少大量不便實驗帶來的限制，節省資源。因此，建議使用 6 通道儲熱磚塊，風速不應超過 12 m/s。