



基于壅塞流的动力电池防爆阀泄压特性的动态仿真

厉运杰, 张光雨, 祝维文, 闵远远, 饶成飞, 孙言飞, 徐庆庆
(合肥国轩高科动力能源有限公司, 安徽 合肥 230012)

摘要: 防爆阀作为缓解电池系统热失控的被动安全措施, 在电芯设计中扮演着非常重要的角色, 防爆阀的开启压力、阀体面积及阀体位置对电芯热失控后的泄压过程有着重要影响。本工作主要介绍了动力电池热失控后产热产气导致防爆阀开启的泄压过程, 通过理论计算、实验测试及仿真分析相结合的方式, 对防爆阀的泄压特性进行了系统阐述与分析。首先, 基于流体力学基本原理和方程从理论上对防爆阀的泄压过程进行了分析, 阐述了电芯热失控过程中防爆阀开启后的泄压壅塞流基本状态; 其次, 通过开展无阀电芯的加热热失控和过充热失控两类实验, 实验中实时监测了电芯热失控过程中卷芯的温度和电芯的内压, 从而得到电芯热失控过程中防爆阀开启前电芯的产热产气速率; 最后, 对电芯的产热产气及泄压过程进行仿真, 基于COMSOL软件, 建立了动力电池防爆阀泄压过程的系统模型。且对防爆阀的开启压力、阀体面积及阀体位置等影响因素进行了归类仿真分析, 并与实验数据进行了对比验证, 得到了较为优化的防爆阀结构设计, 为动力电池优化设计提供了一定的参考。

关键词: 动力电池; 防爆阀; 壅塞流; 动态仿真; 泄压特性

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0442

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2023) 03-960-08

The dynamic simulation of pressure relief characteristics of the power battery vent based on choking flow

LI Yunjie, ZHANG Guangyu, ZHU Weiwen, MIN Yuanyuan, RAO Chengfei,
SUN Yanfei, XU Qingqing

(Hefei Gotion High-Tech Power Energy Co., Ltd, Hefei 230012, Anhui, China)

Abstract: As a passive safety measure to prevent the thermal runaway of the battery system, the vent plays a very essential role in cell design. After the cell has reached thermal runaway, the pressure relief procedure is significantly impacted by the opening pressure, area, and position of the vent. This paper mainly presents the pressure relief process of the vent opening caused by heat and gas production after the cell thermal runaway. Through theoretical calculation, experimental test and simulation analysis, the pressure relief features of the vent are systematically described and analyzed. First, the pressure relief process of the vent is examined theoretically based on the basic principles and equations of fluid mechanics, and the basic state of the pressure relief choke flow after the vent is opened in the process of thermal runaway is expounded; Second, by performing two kinds of experiments of heating thermal runaway and overcharging thermal runaway of the cell, the temperature of the jerry roll and the internal pressure of the cell were monitored in real time, to determine the heat and gas production rate before the vent was opened; Finally, a simulation of the cell's pressure relief, gas production, and heat output are performed. The system model for the vent's pressure

relief is built using COMSOL, and impacting elements including the vent's opening pressure, area, and position are categorized and simulated. Additionally, the simulation results and test data from experiments are compared. A more optimized structure design of the vent is obtained, which provides a certain reference for the optimal design of the power battery.

Keywords: the power battery; vent; choking flow; dynamic simulation; pressure relief characteristics

近年来,随着社会的快速发展,环境污染、能源短缺等问题日趋严重,特别是随着“双碳”目标的提出,节能减排成为了当下最热门的话题^[1]。传统的燃油汽车油耗高,废气污染大,不符合节能减排的发展趋势,而新能源汽车零油耗、无污染、噪声低,是汽车未来发展的主要趋势,全球新能源汽车发展已进入不可逆的快车道^[2]。基于动力电池的新能源汽车,其安全问题一直以来备受大众关注,特别是电芯热失控带来的安全隐患,成为了当前动力电池安全研究的热点^[3]。

电池热失控的根本原因是电池内部放热副反应引起的热量积聚。电池的外部散热速率低于发热速率,导致电池内部温度持续升高,直到达到点火点温度,从而导致燃烧甚至爆炸。为了防止热失控事故的发生,避免电池组内外压力不平衡,同时考虑到锂电池再次着火时会立即产生大量有毒气体,有必要及时定向泄压排气。防爆阀作为防止电池系统热失控的被动安全措施,可以满足上述保持压力平衡和气体定向泄放的要求^[4-5]。国内外学者对于此也做了一些研究工作,Finegan等^[6]借助X射线首次跟踪了导致热失控和热失控期间内部结构快速变形的进展。这种新方法使我们能够观察气袋的形成、排气和温度升高对锂离子电池内部螺旋缠绕层结构的影响,并评估工程设计对电池安全和性能的影响。Coman等^[7]借助热失控实验提出热失控防爆阀打开喷出物带走热量和电解液汽化吸热的概念,建立六方程热失控模型,对比常规四方程仿真方法能精准预测电芯达到热失控的时间,但由于采用集总模型,在热失控最高温度预测方面仍存在误差;Feng等^[8]从电池材料、电芯、模组、电池包四个层级综述了锂电池热失控缓解策略,并总结可能引发热失控的滥用条件;常修亮等^[9]总结了目前锂电池热失控仿真研究现状,当前的热失控模型已经具有较好的精确度,可以模拟出电池发生热失控时主要的放热副反应,但未提及防爆阀设计相关仿真方法;付一民

等^[10]通过有限元仿真分析的方法,主要对防爆阀结构静力学进行仿真分析,通过等效法为动力电池用防爆阀的设计提供一种思路;杜光超等^[11]通过高镍圆柱电池热失控发现锂电池安全阀破坏温度随着SOC的增高而降低。总结上述研究发现,目前文献多以研究热失控机理和产气为主,对于防爆阀设计类安全措施较少,没有对防爆阀开启压力、开阀面积、布置位置等参数做系统性研究,形成理论性指导。

防爆阀的开阀压力是电芯防爆阀设计的一个重要参数,一方面开阀压力过低,可能导致电芯长周期循环防爆阀异常开启,降低了电芯可靠性,另一方面,开阀压力过高,可能导致电芯热失控后直接炸裂,增加了安全风险。此外防爆阀的开阀面积、布置位置等也会影响电芯防爆阀开启后的泄压特性,因此开展防爆阀开启压力、设计面积、布置位置的研究对防爆阀的优化设计具有重大意义^[12]。本研究基于COMSOL软件建立电芯防爆阀的流体仿真模型,分析在壅塞状态下防爆阀设计参数对电芯热失控后泄压的影响,为防爆阀的开阀压力、设计面积及布置位置等优化设计提供参考和支撑。

1 系统介绍及理论分析

以某一款动力电池单体电芯为例,开展防爆阀的泄压壅塞流理论分析。电芯防爆阀布置于小面(顶面),采用跑道形结构设计,如图1所示。



图1 电芯防爆阀示意图

Fig. 1 Schematic diagram of battery proof valve

电芯热失控后产生大量热量及气体,导致电芯内压急剧增加,当内压增加到防爆阀的开启压力后,防爆阀打开,气体从防爆阀开口处泄出,此过程可以等效为一个壅塞流模型。电芯壳体内部的温

度、压力、气体密度、体积分别为 T_1 、 P_1 、 ρ_1 、 V_1 ，电芯外部空间的温度、压力、气体密度、体积分别为 T_2 、 P_2 、 ρ_2 、 V_2 ，电芯内部截面积为 A ，防爆阀的开口面积为 S^* [13-14]。

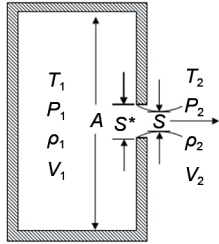


图2 电芯防爆阀泄压等效数学模型
Fig. 2 Equivalent mathematical model of battery proof valve

电芯防爆阀开启后，气体从壳体内泄放到外界大气中，该过程满足压缩气体的伯努利方程：

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} \quad (1)$$

其中， γ 是等熵系数，不同气体等熵系数不同。

同时，防爆阀的壅塞流过程满足气体连续性方程、理想气体状态方程：

$$\rho_1 A V_1 = \rho_2 A V_2 \quad (2)$$

$$PV = nRT \quad (3)$$

由于防爆阀泄压过程气体流动速度快，系统来不及与外界交换热量，且气体黏性很小，摩擦力很小，可以忽略，故该过程还满足理想气体多变方程(可逆绝热过程)[15]：

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (4)$$

由式(1)、(2)、(4)可以理论计算出防爆阀出口等效截面处的流速：

$$V_2 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{P_1}{\rho_1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \quad (5)$$

由式(2)、(3)、(5)可以理论计算出防爆阀出口等效截面处的质量流量：

$$q_2 = S \cdot \frac{P_1}{\sqrt{T_1}} \cdot \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{1}{R} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (6)$$

由式(6)可以求出壅塞流量的临界压比：

$$b = \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (7)$$

由式(7)可知，临界压比仅与气体种类有关，

对于空气临界压比为1.4。

电芯热失控的产气是由多种气体组成的混合气体，主要包含 H_2 、 CO_2 、 CO 、 CH_4 等，其内压在1.2 MPa以内，符合上述理论分析的假设，可以采用基于上述理论模型的软件进行仿真计算。

2 系统仿真分析

本部分讨论热失控产气速率及防爆阀设计参数对泄压壅塞流的影响，主要分析开阀压力、防爆阀设计面积、开阀位置及热失控产气速率对防爆阀的泄压时间和平衡压力的动态变化规律，明确在防爆阀泄压壅塞流过程中的主要影响因素。仿真模型示意图如图3所示，采用简化的电芯模型，包括壳体(保留防爆阀开口特征)、流体域和卷芯3部分，其中卷芯两个侧面(小面)为产气输入，原防爆阀口为泄压口。

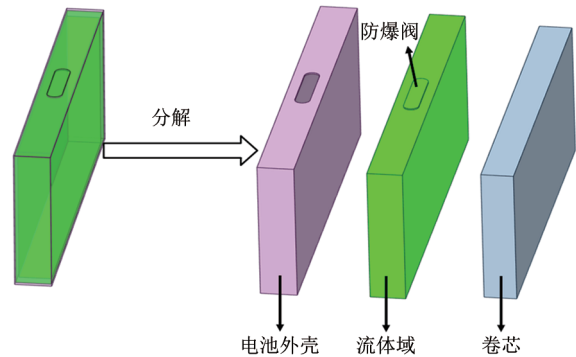


图3 仿真模型搭建示意图
Fig. 3 Schematic diagram of simulation model construction

2.1 模型搭建及验证

在仿真模型搭建中，采用图3所示的简化方式，对实际电芯进行简化处理后进行3D建模，仿真模型如图4所示。考虑到防爆阀开启瞬间，泄压口处及周边压力变化剧烈，为了更好地捕捉压力等参数变化，在泄压阀周边区域均对网格进行了加密处理。

为了获取电芯热失控过程中的产气速率作为模型输入，开展了过充热失控和加热热失控实验测试，实验测试电芯如图5所示，图5(a)为加热热失控有阀实验测试后的电芯图片，电芯内压的监测是通过布置在电芯内部的压力传感器测量的，对于有阀电芯，一旦防爆阀开启，实际的电芯热失控产气内压监测就会失真，因此实验电芯采用无阀设计，



图4 防爆阀仿真计算模型

Fig. 4 Explosion proof valve simulation calculation model

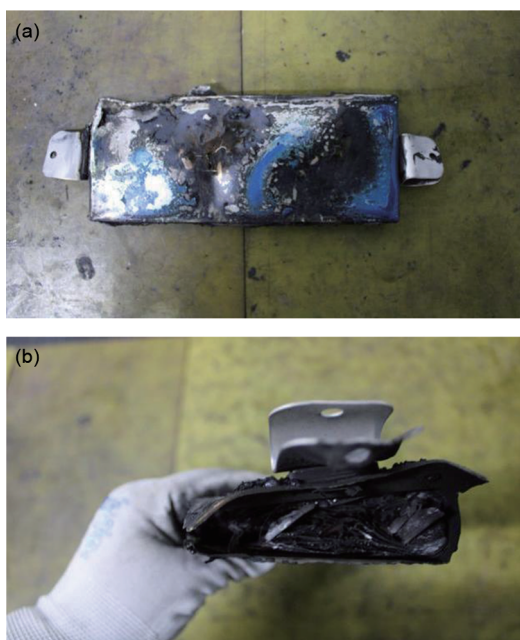


图5 (a) 加热热失控有阀实验测试和(b)过充热失控无阀实验测试

Fig. 5 (a) Experimental test of heating out of control with valve; (b) Valveless experimental test of overcharge out of control

可以监测到防爆阀设计开启压力前的内压及防爆阀设计开启压力后一段区间内的内压(内压上限为壳体承受压力,一般在1.2 MPa左右)。图5(b)为过充热失控无阀实验测试后的电芯图片。通过测量电芯热失控过程中的温度及内压变化,结合理想气体状态方程[式(3)],可以计算得到热失控过程中的瞬态产气速率。模型中的流体域流体属性设置为可压缩流体,产气速率根据测试数据计算得到,产气温度根据实验测试数据得到。在仿真分析中,通过获

取达到瞬态平衡时的泄压时间和平衡压力来评估各关键设计参数对防爆阀泄压的影响。

为了验证仿真模型的有效性,将电芯开阀前实验测试得到的加热热失控数据及过充热失控数据与仿真计算得出的结果进行对比,仿真计算结果如图6所示,图6(a)为加热热失控实测数据与仿真结果的对比,瞬态过程中最大误差为3.9%,图6(b)为过充热失控实测数据与仿真结果的对比,瞬态过程中最大误差为5.1%,说明此模型能较好地模拟计算电芯热失控过程中的压力变化情况。

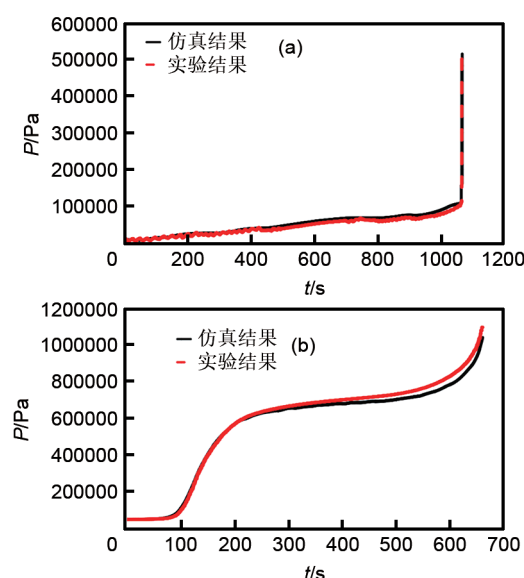


图6 (a)加热热失控压力仿真与测试对比和(b)过充热失控压力仿真与测试对比

Fig. 6 (a) Simulation and test comparison of heating thermal runaway pressure; (b) Simulation and test comparison of overcharge out of control pressure

2.2 防爆阀开阀压力对泄压的影响

由于加热热失控实验采用有阀电芯,防爆阀开启压力在0.6 MPa左右,故选取了0.5/0.4/0.3 MPa 3个开阀压力进行仿真;过充热失控实验采用无阀电芯,电芯热失控后测试内压达到了1.1 MPa,故选取了1.0/0.9/0.8/0.7/0.6 MPa 5个开阀压力进行仿真,分别计算得到不同压力下的泄压时间和平衡压力。图7为加热热失控不同开阀压力下的泄压时间曲线,仿真结果显示,在0.5/0.4/0.3 MPa开阀压力下达到平衡压力的开阀时间分别为4.9/4.3/3.7 ms,说明在开阀压力线性减小的情况下,开阀泄压时间也相应地呈线性缩短趋势。

图8为过充热失控不同开阀压力下的泄压时间

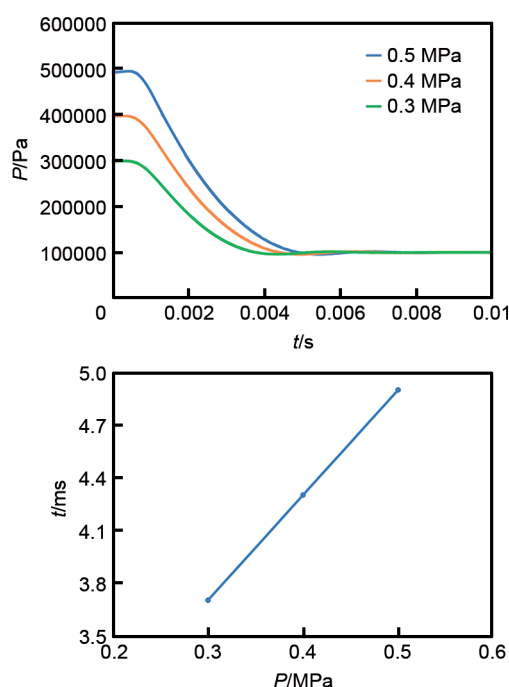


图7 加热热失控不同开阀压力下的泄压时间曲线
Fig. 7 Pressure relief time curves of heating out of control under different valve opening pressures

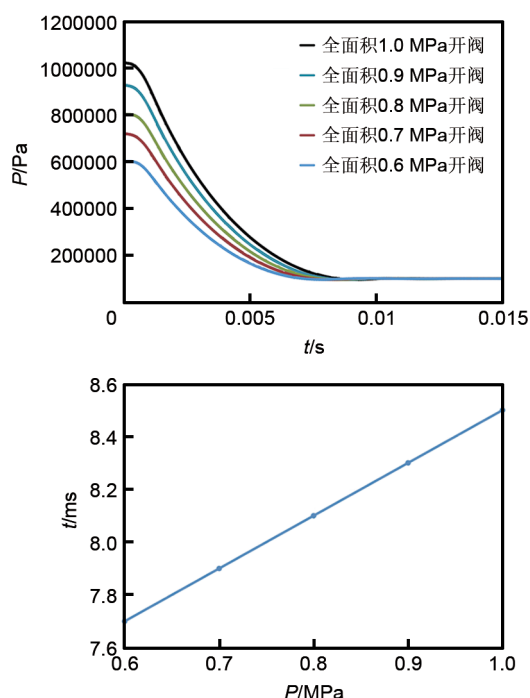


图8 过充热失控不同开阀压力下的泄压时间曲线
Fig. 8 Pressure relief time curves of overcharge runaway under different valve opening pressures

曲线, 由图可知, 过充热失控不同压力下泄压趋势与加热热失控基本一致, 分析泄压时间发现, 在开阀压力线性减小0.1 MPa的情况下, 开阀时间也相

应地呈线性缩短0.2 ms的趋势。

2.3 防爆阀面积对泄压的影响

在电芯防爆阀现有设计面积的基础上, 分别选取防爆阀面积的1倍、1/2倍、1/4倍、1/8倍、1/16倍共5个防爆阀面积进行仿真, 同时给定加热热失控开阀压力为0.4 MPa和过充热失控开阀压力为0.9 MPa, 获得不同开阀面积下的开阀时间和平衡压力曲线。图9为加热热失控不同开阀面积下的泄压时间曲线, 仿真结果显示, 随着开阀面积等比例减小(1、1/2、1/4、1/8、1/16), 泄压时间间隔近似按2的指数幂增长, 1/16面积所需泄压时间最长, 且最终平衡压力为0.102 MPa, 均能满足泄压要求, 主要是因为选取的开启压力较低, 此时的瞬态产气速率较小。

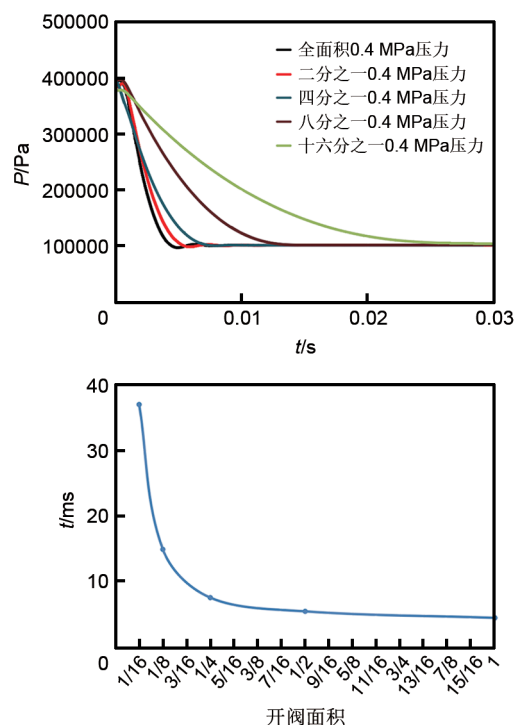


图9 加热热失控不同开阀面积下的泄压时间曲线
Fig. 9 Pressure relief time curves of heating out of control under different valve opening areas

图10为过充热失控不同开阀面积下的泄压时间曲线, 仿真结果显示, 随着开阀面积等比例减小(1、1/2、1/4、1/8、1/16), 泄压时间间隔近似呈指数增长, 1/16面积所需泄压时间最长, 均能完全泄压。由泄压时间曲线可知, 面积减小到1/4之后时, 泄压时间急剧增长, 对防爆阀设计影响较大。

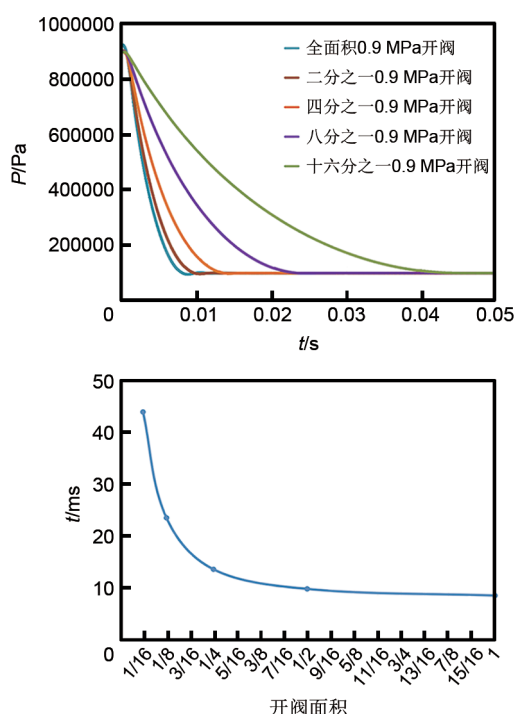


图10 过充热失控不同开阀面积下的泄压时间曲线
Fig. 10 Pressure relief time curves under different valve opening areas of overcharge out of control

2.4 预估产气速率下开阀面积对泄压的影响

由于电芯热失控实验测试得到的内压并不能反映热失控最剧烈阶段的产气速率,故在选定防爆阀开启瞬间产气速率的基础上,按其增加趋势,取其10倍作为预估产气速率,评估其在不同开阀面积下对泄压的影响,为电池防爆阀设计提供充分的安全裕度。图11为加热热失控预估产气速率下不同开阀面积对比下的泄压时间曲线,在5个开阀面积下,随着开阀面积等比例减小,泄压时间间隔呈指数增长,面积越小泄压时间增长越快,且均不能完全泄压,1/16时达到平衡压力为0.28 MPa,存在明显风险。

图12为过充热失控预估产气速率不同开阀面积对比下的泄压时间曲线,在预估产气速率下,在5个开阀面积下,随着开阀面积等比例减小,泄压时间间隔呈指数增长,面积越小泄压时间增长越快,且均不能完全泄压,1/16时达到平衡压力为0.26 MPa,此设计与加热热失控一致,存在明显风险。本节与2.3节对比可知,产气速率为影响防爆阀开阀泄压的主要参数之一,因此在防爆阀设计时,在保证准确的产气速率测试状态下,应保证设计合理的开阀面积以确保完全泄压,阻止热失控反

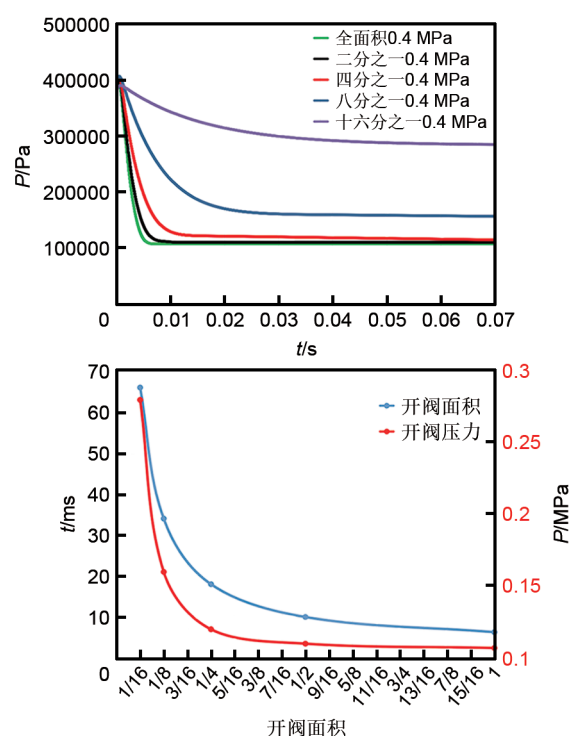


图11 加热热失控预估产气速率不同开阀面积对比下的泄压时间曲线
Fig. 11 Pressure relief time curves under different valve opening areas

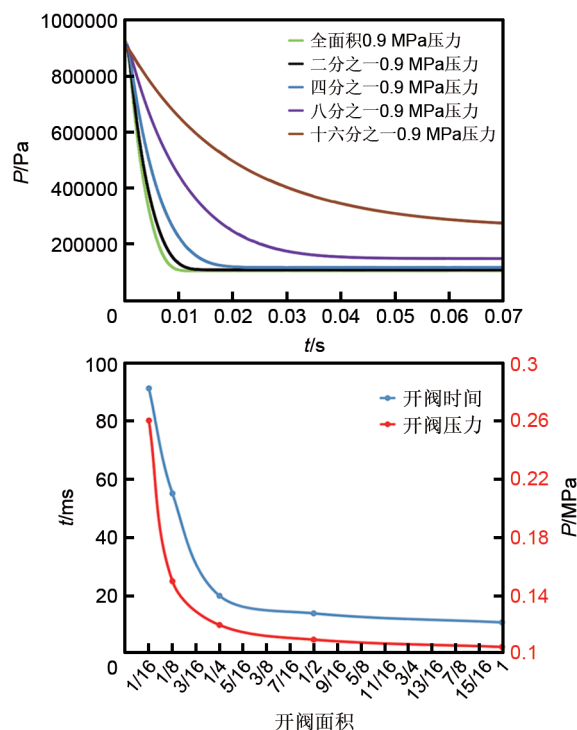


图12 过充热失控预估产气速率(10倍)不同开阀面积对比下的泄压时间曲线
Fig. 12 Pressure relief time curves under different valve opening area comparison of estimated gas production rate (10 times) due to out of control overcharge

应进一步发生。

2.5 防爆阀位置对泄压的影响

选取顶面、大面和侧面三个典型的防爆阀位置进行仿真,如图13所示,获得不同布置位置下的开阀时间和平衡压力曲线。

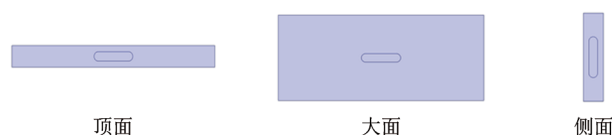


图13 防爆阀不同设计位置

Fig. 13 Different design positions of explosion-proof valve

图14(a)为加热热失控不同开阀位置下的泄压时间曲线。由图可知,在不同开阀位置中,顶面、侧面、大面泄压趋势一致,时间分别为4.7/4.4/5.0 ms,均能完全泄压,由于侧面防爆阀位置与产气面一致,泄压路径短,且流场更加均匀,故泄压时间较短。图14(b)为过充热失控不同开阀位置下的泄压时间曲线,在不同开阀位置中,顶面、侧面、大面泄压趋势一致,时间分别为8.5、

5.3、9.4 ms,均能完全泄压,同样侧面泄压时间较短。

3 结 论

本工作针对防爆阀的壅塞流泄压过程进行了理论分析和仿真模拟,通过结合实验测试的手段,为仿真模型提供了输入,同时对仿真模型进行了验证。仿真分析了加热热失控和过充热失控两种触发方式下,电芯防爆阀开阀压力、设计面积及布置位置对泄压的影响,选取泄压时间及泄压后的平衡压力作为防爆阀泄压的评价依据。仿真结果表明:①防爆阀开阀压力越小,其对热失控的干预越早,泄压时间越短,且都能完全泄压,防爆阀的设计压力应在满足电芯长周期循环可靠性的基础上越低越好;②防爆阀的设计面积对泄压时间及最后的平衡压力影响较大,应考虑在结构强度允许的前提下,尽可能增大防爆阀的面积;③防爆阀的布置位置对泄压的影响较小,但选取正对产气面的位置对泄压最优。

参考文献

- [1] 杨荣华. 产业融合背景下的新能源汽车技术发展趋势研究[J]. 时代汽车, 2022(1): 119-120.
YANG R H. Research on the development trend of new energy vehicle technology under the background of industrial convergence[J]. Auto Time, 2022(1): 119-120.
- [2] 王芳, 王峥, 林春景, 等. 新能源汽车动力电池安全失效潜在原因分析[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1411-1418.
WANG F, WANG Z, LIN C J, et al. Analysis on potential causes of safety failure of new energy vehicles[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1411-1418.
- [3] 欧阳陈志, 梁波, 刘燕平, 等. 锂离子动力电池热安全性研究进展[J]. 电源技术, 2014, 38(2): 382-385.
OUYANG C Z, LIANG B, LIU Y P, et al. Progress of thermal safety characteristics of high power lithium-ion batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(2): 382-385.
- [4] 葛瑞. 汽车动力电池系统防爆阀的选型与理论计算[J]. 上海汽车, 2021(3): 4-6, 13.
GE R. Selection and theoretical calculation of explosion-proof valve of EV power battery system[J]. Shanghai Auto, 2021(3): 4-6, 13.
- [5] 蒋南希. 新能源汽车锂电池防爆盖结构设计[J]. 电源技术, 2018, 42(8): 1129-1133.
JIANG N X. Structure design of explosion proof cap for new energy vehicle[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(8): 1129-1133.
- [6] FINEGAN D P, SCHEEL M, ROBINSON J B, et al. In-operando high-speed tomography of lithium-ion batteries during thermal

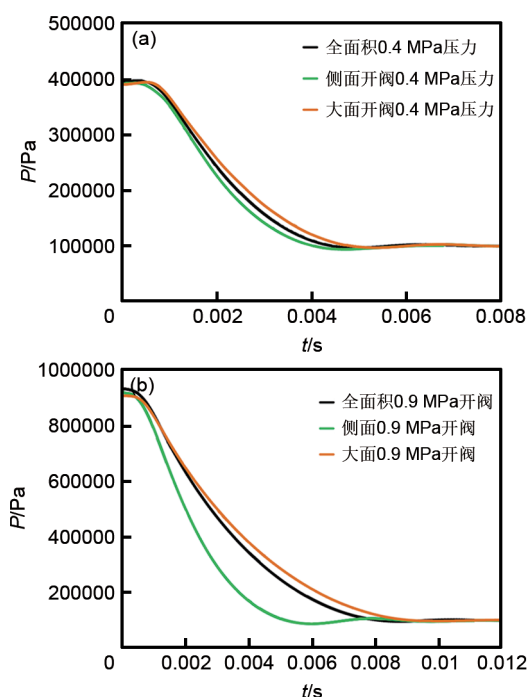


图14 (a)加热热失控不同开阀位置的泄压时间曲线和(b)过充热失控不同开阀位置的泄压时间曲线

Fig. 14 (a)Pressure relief time curves of heating out of control at different valve opening positions; (b) Pressure relief time curves of overcharge out of control at different valve opening positions

- runaway[J]. Nature Communications, 2015, 6: 6924.
- [7] COMAN P T, RAYMAN S, WHITE R E. A lumped model of venting during thermal runaway in a cylindrical lithium cobalt oxide lithium-ion cell[J]. Journal of Power Sources, 2016, 307: 56-62.
- [8] FENG X N, REN D S, HE X M, et al. Mitigating thermal runaway of lithium-ion batteries[J]. Joule, 2020, 4(4): 743-770.
- [9] 常修亮, 郑莉莉, 韦守李, 等. 锂离子电池热失控仿真研究进展[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(6): 2191-2199.
- CHANG X L, ZHENG L L, WEI S L, et al. Progress in thermal runaway simulation of lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(6): 2191-2199.
- [10] 付一民, 周健, 盛军, 等. 基于某动力电池防水透气防爆阀的仿真研究[J]. 汽车实用技术, 2019(1): 1-3.
- FU Y M, ZHOU J, SHENG J, et al. Simulation research on waterproof and ventilation explosion-proof valve based on a power battery[J]. Automobile Applied Technology, 2019(1): 1-3.
- [11] 杜光超, 郑莉莉, 张志超, 等. 圆柱形高镍三元锂离子电池高温热失控实验研究[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(1): 249-256.
- DU G C, ZHENG L L, ZHANG Z C, et al. Experimental study on high temperature thermal runaway of cylindrical high nickel ternary lithium-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(1): 249-256.
- [12] 刘红, 沈少祥, 蒋兰芳, 等. 基于 Fluent 的船用防爆阀降压特性研究[J]. 机电工程, 2018, 35(10): 1053-1057.
- LIU H, SHEN S X, JIANG L F, et al. Pressure-loss characteristics of marine explosion-proof valve based on Fluent[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(10): 1053-1057.
- [13] 朱飞成, 章军, 王芳. 基于壅塞流的恒负载气动系统的动态仿真[J]. 液压与气动, 2014(9): 123-127.
- ZHU F C, ZHANG J, WANG F. The dynamic simulation of constant loaded pneumatic system based on the choked flow[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014(9): 123-127.
- [14] 王玮, 田威. 管道阻塞特征对壅塞流的影响[J]. 液压与气动, 2014(6): 55-58, 62.
- WANG W, TIAN W. Effect of pipe blockage characteristic on choked flow[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014(6): 55-58, 62.
- [15] 董军, 杨俊. 喷管内有摩擦流动的壅塞和临界参数[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(12): 2537-2541.
- DONG J, YANG J. Chock and critical parameters of frictional flow in nozzle[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(12): 2537-2541.