



نویسندگان: مجتبی صفدری^۱، روح‌اله احمدی^{۲*}، صادق صادق‌زاده^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، سیستم‌های انرژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار، فناوری نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، ahmadi@iust.ac.ir

چکیده

مدیریت حرارتی باتری‌ها در خودروهای الکتریکی بسیار ضروری است. مخصوصاً زمانی که از باتری‌های لیتیوم-یون استفاده می‌شود این نیاز به دلیل میزان تولید حرارت در این باتری‌ها بیشتر احساس می‌شود. معمولاً از هوا یا یک سیال خنک‌کننده جهت خنک‌کاری باتری استفاده می‌شود. اما این سیستم‌ها حجم زیادی در فضای خودرو اشغال می‌کنند و همچنین هزینه بالایی را از نظر سرمایه‌گذاری و تعمیرات بر اتومبیل تحمیل می‌کند. اما سیستم‌های خنک‌کاری مبتنی بر مواد تغییر فاز دهنده (PCM) نه تنها فضای بسیار کمی را در خودرو اشغال می‌کنند بلکه هم از نظر هزینه و هم از نظر سادگی طراحی شرایط بهتری را برای سیستم مدیریت حرارتی ایجاد می‌کند. در این مقاله پیشرفت‌های اخیر در زمینه سیستم‌های مدیریت حرارتی باتری‌ها و همچنین روش‌های عددی بکار گرفته شده جهت حل این مسائل، جمع‌آوری و ارائه شده است.

کلمات کلیدی: لیتیوم-یون، باتری، ماده تغییر فاز دهنده، مدیریت حرارتی، فعال، غیرفعال

Review on passive thermal management systems for Li-ion batteries

M. safdari¹, R. Ahmadi^{2*}, S. Sadeghzadeh², ...

1- School of Advanced Technologies, Iran University of Science and Technology, 16846-13114 Tehran, Iran

Tehran, Iran, ahmadi@iust.ac.ir

Abstract

The thermal management of batteries in electric vehicles (EVs) is vital, Especially for Li-ion batteries due to their heat dissipation effects. Normally air flow or coolant loop mechanisms are engaged as cooling system. But these strategies not only occupy lots of space but also are high-priced in the terms of maintenance and investing. On the other hand Phase change material (PCM) based cooling systems are less costly and voluminous and additionally have much simpler installation. In this article, recent advancements on passive thermal management systems in Li-ion batteries and also the numerical methods adopted to solve these problems has been declared.

Keywords

Li-ion, battery, Phase change material, Thermal management, Passive, Active

خنک‌کاری فعال در باتری‌ها استفاده شوند و در روش‌های غیرفعال نیز می‌توان از رویکردهای استفاده از لوله‌های حرارتی [۴] و مواد تغییر فاز دهنده (PCM^۳) [۵] استفاده کرد. با ترکیب دو روش فعال و غیرفعال می‌توان تأثیر خنک‌کاری را به مراتب افزایش داد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های لوله حرارتی-PCM [۶]، هوا-لوله حرارتی [۷]، هوا-PCM [۸] و هوا-لوله حرارتی-PCM [۹، ۱۰] اشاره کرد. با مطالعه تحقیقات مختلف می‌توان به این نکته پی برد که روش‌هایی که در آن‌ها از مواد PCM استفاده شده است تأثیر بسزایی در کاهش دمای باتری داشته‌اند [۱۱].

یکی از خواص ویژه‌ای که در مواد تغییر فاز دهنده وجود دارد این است که این مواد می‌توانند مقدار زیادی انرژی گرمایی را در خود ذخیره کرده و در شرایط دیگری آن را به بیرون منتقل کنند [۹]. مواد تغییر فاز دهنده می‌توانند در مدیریت حرارت باتری‌ها نقش ویژه‌ای را ایفا کنند. حضور این مواد در مجاورت باتری‌های لیتیوم یون همچنان

۱) مقدمه

وسایل نقلیه برقی می‌توانند جایگزین خوبی برای وسایلی باشند که از موتورهای احتراق داخلی معمول استفاده می‌کنند و باعث آسیب به محیط زیست می‌شوند. استفاده گسترده‌تر از این وسایل به توسعه باتری‌های قابل شارژ وابسته است. باتری‌های لیتیوم-یون به دلیل ویژگی‌های عملکردی خوب نظیر چگالی انرژی بالا، طول عمر بالا و خود تخلیه شونده^۱ پایین در این زمینه مورد استفاده واقع شده‌اند. اگرچه این باتری‌ها از محدوده پایین دمای کارکرد مناسب‌شان رنج می‌برند و این اتفاق باعث ایجاد یک چالش برای مدیریت حرارتی این باتری‌ها به وجود می‌آورد. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها پدیده فرار حرارتی^۲ (TR) می‌باشد که مرسوم‌ترین روش‌ها برای کنترل این مشکلات استفاده از روش‌های خنک‌سازی به صورت فعال، انفعالی، یا مجموعی از این دو روش است.

سیال‌های مختلفی نظیر هوا [۱، ۲] و آب [۳] می‌توانند در زمینه

3 Phase change material (PCM)

1 Self-Discharge

2 Thermal runaway

که می‌تواند دمای باتری‌ها را در سطح پایینی نگه‌دارند می‌توانند دمای یکنواختی را در کل بسته باتری ایجاد کند [۱۲، ۱۳]. همچنین این مواد می‌توانند در صورت ایجاد پدیده فرار حرارتی گرمای حاصله از باتری معیوب را با توجه به توانایی بالا در جذب و ذخیره گرما، جذب کرده و جلوی گسترش آن را بگیرد [۱۳، ۱۴]. با مطالعه تحقیقاتی که اخیراً در زمینه مدیریت حرارتی باتری‌ها انجام شده است مشخص می‌شود که حجم زیادی از تحقیقات در زمینه استفاده از مواد تغییر فاز دهنده مختلف، و افزایش میزان ضریب انتقال حرارت در این PCMها با هدف کاهش دمای حداکثری باتری‌ها و توزیع دمای مناسب در بسته باتری بوده است [۱۵-۲۳].

در زمینه حل مسائل مدیریت حرارتی باتری‌ها، روش‌های مختلفی بکار گرفته شده‌اند از جمله روش‌های انتگرالی [۲۴]، آنتالپی [۲۵] و ظرفیت گرمایی ویژه [۲۶]. همچنین مطالعات گسترده‌ای نیز روی روش‌های گسسته‌سازی بر روی روش‌های ذکر شده انجام شده است. در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی در موضوع جمع‌آوری و مرور تحقیقات، در زمینه مدیریت حرارتی باتری‌ها انجام شده است.

۲) مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیم-یون به روش انفعالی

۱-۲) لوله‌های حرارتی

مهم‌ترین سیستم‌های مدیریت حرارتی بر پایه پدیده تغییر فاز بنا شده‌اند تا بتوانند به سرعت گرمای ایجاد شده را از بین ببرند یا اینکه سرعت افزایش دمای باتری را کاهش دهند. لوله حرارتی یک وسیله خنک‌کاری به صورت تخت یا استوانه‌ای است که بر اساس پدیده تغییر فاز مایع-بخار خنک کاری را انجام می‌دهد. در لوله حرارتی استوانه‌ای زمانی که یک سمت لوله گرم می‌شود مایع به بخار تبدیل شده و به دلیل اختلاف فشار به سمت دیگر لوله که دمای سردتری دارد می‌رود. بخار در این محل با انتقال حرارتی که با محیط خود انجام می‌دهد به مایع تغییر فاز داده و دوباره به محل گرم لوله وارد می‌شود. بنابراین، سیستم تا زمانی که اختلاف دما بین دو سر لوله برقرار باشد کار می‌کند. لوله‌های حرارتی به طور عمده در مدیریت‌های حرارتی در ماهواره‌ها و تجهیزات الکترونیکی استفاده می‌شود.

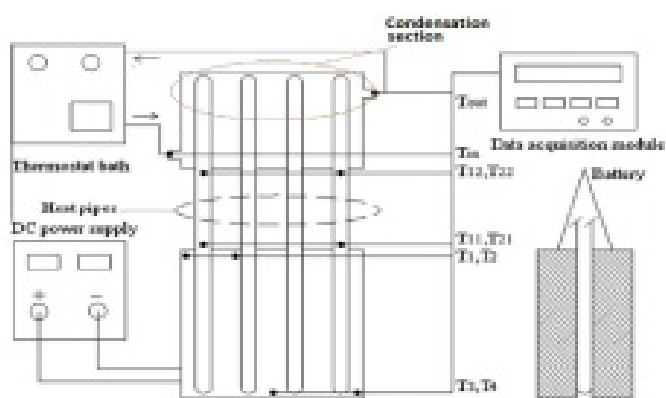
وو و همکاران [۳۳] به صورت تجربی، امکان‌سنجی استفاده از لوله‌های حرارتی به منظور مدیریت حرارتی باتری را انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که سطح تماس برای رسیدن به بازدهی بالا بسیار مهم است. در واقع آن‌ها از دو لوله حرارتی برای مدیریت حرارتی باتری استفاده کردند که به دلیل سطح تماس نامناسب هیچ تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در دما ملاحظه نشد. به همین دلیل آن‌ها به دلیل انتقال حرارت و پخش بالا و بهبود سطح تماس از الومینیوم استفاده کردند و همین تغییر باعث شد آن‌ها بتوانند دما را از ۴۵ به ۳۸ درجه برسانند.

رائو و همکاران [۳۴] به صورت تجربی مدیریت حرارتی باتری‌های ماشین‌های الکتریکی به وسیله لوله حرارتی را انجام دادند. اهمیت تماس سطح با استفاده از ۴ لوله حرارتی که به صورت منظم

رائو و همکاران [۲۷] و همچنین لانسیلیو و همکاران [۲۸] مروری روی تحقیقات انجام شده در زمینه روش‌ها و مواد استفاده شده در زمینه مدیریت حرارتی منبع قدرت استفاده شده در ماشین‌های الکتریکی، هیبریدی و پیل سوختی انجام دادند. لینگ و همکاران [۲۹] مروری بر روش‌های مدیریت حرارتی سلول‌های فتوولتائیک و باتری‌های لیتیم-یون انجام دادند. وانگ و همکاران [۳۰] و همچنین مالیک و همکاران [۳۱] انواع باتری‌ها، بسته‌ها و خودروهای الکتریکی تولید شده در شرکت‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند و در نهایت اهمیت مدیریت حرارتی و روش‌های آن را مورد مطالعه قرار دادند. لیو و همکاران [۳۲] مروری بر مشکلات موجود در زمینه مدیریت حرارتی باتری با انجام دادند و در نهایت روش‌های به وجود آمده جهت رفع این مشکلات از جمله مشکلات حرارتی را بررسی کردند.

در این مطالعه مروری روی مقالات و ثبت اختراع‌های انجام شده در زمینه مدیریت حرارتی باتری‌های لیتیم یون به روش انفعالی و همچنین روش‌های عددی مورداستفاده جهت مدل‌سازی پدیده تغییر فاز انجام شده است.

توزیع شده‌اند و به صورت فشرده در تماس با سیلیکا (ZC-۸۰۱) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، لوله‌های حرارتی می‌توانند به طور مؤثر برای باتری‌هایی که دارای تولید حرارت کمتر از ۵۰W هستند استفاده شود. همین‌طور اختلاف دما در سلول باتری زمانی که نرخ تولید حرارت کمتر از ۳۰W است از ۵ درجه بیشتر نمی‌شود. شکل ۱ یک نمای شماتیک از دستگاه تست استفاده شده در این تحقیق است:

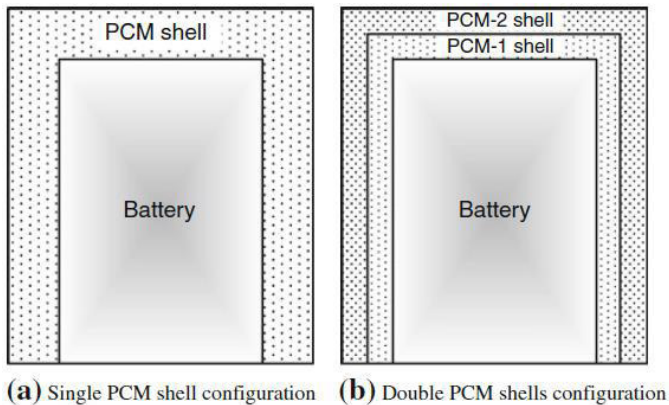


شکل ۱ دستگاه تست آزمایشگاهی سلول باتری و خنک‌کاری به وسیله لوله حرارتی [۳۴]

۲-۲) مواد تغییر فاز دهنده

سیستم مدیریت حرارتی باید فشرده، سبک وزن، قابلیت جایگیری آسان در اتومبیل، قابل اعتماد و کم‌هزینه باشد. اخیراً تمایلات برای سرمایه‌گذاری با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در تحقیقاتی که در زمینه مدیریت حرارتی باتری‌ها انجام می‌شود افزایش یافته است. حرارت نهان که از طریق تغییر فاز در مواد PCM ایجاد می‌شود مزیت بزرگ جذب حرارت تولید شده توسط منابع دیگر و همین‌طور

همچنین رامانندی و همکاران [۳۶]، انتقال حرارت و مدیریت حرارتی یک وسیله نقلیه برقی را در شرایط استفاده از PCM بررسی کردند. شبیه‌سازی عددی یک باتری منشوری شکل که به وسیله PCM محاط شده است در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا یک لایه PCM با و بدون دیواره‌های عایق مورد بررسی قرار گرفت. سپس دو لایه PCM با دیواره عایق نیز مورد آزمایش قرار گرفت. این دو شرایط مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ نحوه چیدمان انواع دو نوع سیستم خنک کاری

(a) با یک نوع PCM

(b) با دو نوع PCM [۳۶]

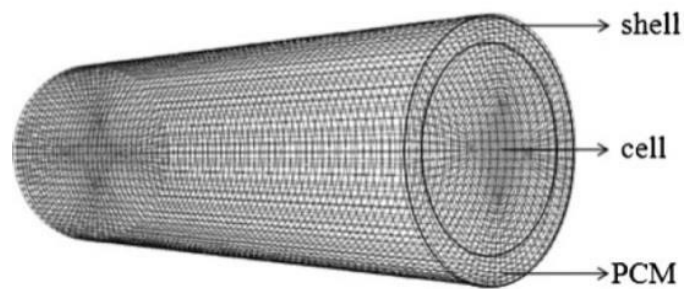
آن‌ها یک برای دستیابی به یک نرخ تولید گرمای ثابت یک نرخ تخلیه^۴ ثابت برای آن در نظر گرفتند. همچنین مشخصات گرمایی و فیزیکی PCM ثابت در نظر گرفته شد و انتقال حرارت تشعشی نیز در نظر گرفته نشد. آن‌ها نشان دادند که PCM می‌تواند به‌عنوان یک سیستم مدیریت گرمایی استفاده شود اما گرمایی که از محیط وارد PCM می‌شود می‌تواند باعث کاهش بازدهی PCM در حین شرایط کارکرد باتری شود. بعلاوه استفاده از دو لایه PCM نسبت به یک لایه تاثیر چندان مثبتی بر بازدهی PCM نداشت.

PCM‌ها پتانسیل بسیار بالایی در کاهش دمای اوج کارکرد و همچنین بهبود عملکرد در دمای سرد دارند. دوان و ناترر [۳۷] به‌صورت آزمایشگاهی رفتار دو نوع PCM مختلف را در شرایط محیطی مختلف مورد بررسی قرار دادند. برای کنترل شرایط محیطی از یک حمام استفاده شد (Neslab bath). باتری با یک گرم‌کننده^۵ که به همراه PCM در درون یک محفظه آلومینیومی که در حمام قرار گرفته است شبیه‌سازی شد. این PCM دارای دمای تغییر فاز ۱۸ درجه سانتی‌گراد، گرمای ویژه ۲/۱، گرمای نهان ۱۹۵، چگالی ۸۴۰ و ضریب انتقال حرارت ۰/۵۵ است. این ماده در دمای محیط به‌صورت مایع است و مطابق شکل ۵ درون محفظه آلومینیومی است و گرم‌کننده فرا گرفته است.

4 Discharge

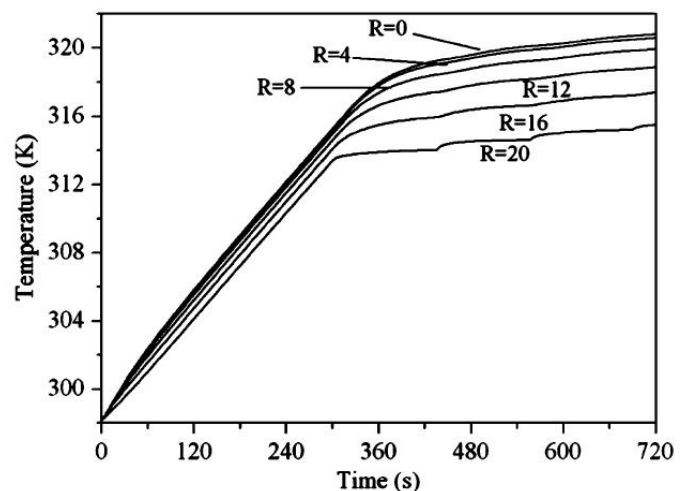
5 Heater

ایجاد تأخیر در افزایش دمای اجسام را به این مواد اعطا کرده است. راثو و همکاران [۳۵] همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود مدل‌سازی عددی جذب حرارت توسط یک PCM که در جوار یک باتری استوانه‌ای قرار دارد را انجام دادند. آن‌ها در این مدل‌سازی، تولید حرارت متغیر، انتقال حرارت داخلی و هدایت حرارتی خارجی را مدل کردند. در این تحقیق به‌منظور ساده‌سازی محاسبات، یک نرخ تولید حرارت داخلی بجای واکنش‌های شیمیایی داخلی مدل‌سازی شد. همچنین تمامی خواص PCM و باتری در طول محاسبات ثابت در نظر گرفته شد. همین‌طور تغییر چگالی PCM در اثر تغییر فاز ناچیز در نظر گرفته شده است و دمای ذوب نیز یک دمای مشخص در نظر گرفته شد. ماده PCM نیز همگن و دارای خواص یکسان در همه جهات در نظر گرفته شد و اثر انتقال حرارت تشعشی نیز در نظر گرفته نشد. مدل تغییر فاز از نوع مبتنی بر گرمای نهان (Enthalpy-Based) با استفاده از نرم‌افزار FLUENT شبیه‌سازی شد.



شکل ۲ شبکه‌بندی باتری استوانه‌ای با روش خنک‌کاری استفاده از PCM [۳۵]

ماده PCM توانست با وجود یک همرفت طبیعی خارجی دمای سلول را زیر ۴۵ درجه سانتی‌گراد نگه دارد. اگرچه همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، پایین بودن ضریب انتقال حرارت PCM می‌تواند باعث اختلاف زیاد در دمای داخل و بیرون استوانه شود.



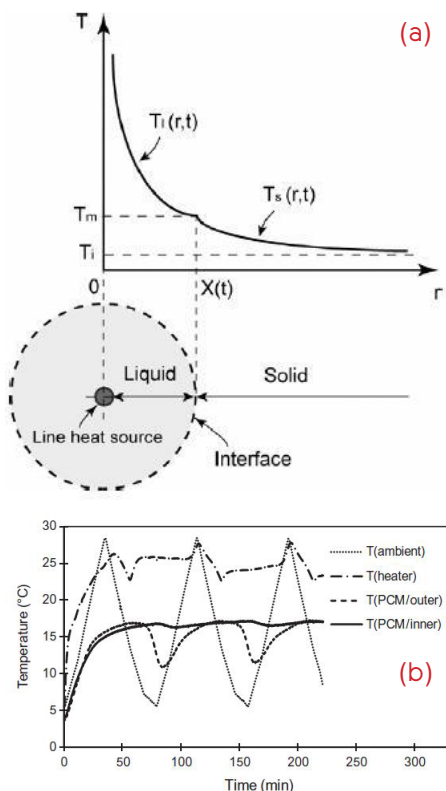
شکل ۳ توزیع دما در راستای شعاعی در استوانه با مشخصات ضریب همرفت و هدایت به ترتیب ۳ و ۵ [۳۵]

همچنین، اثر سرمایش و انتقال حرارت، زمانی که گرم‌کننده در مجاور PCM است و حالتی که گرم‌کننده با هوای آزاد همرفت حرارتی دارد مقایسه شد. شکل ۶ (b) نشان می‌دهد که سرمایش با استفاده از PCM دمای سطح گرم‌کننده را بسیار پایین‌تر (کمتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد) گزارش می‌دهد. هم‌زمان، گرم‌کننده در مجاور هوای آزاد دمای سطح بسیار بالاتری را به خودش می‌بیند. در ادامه نویسندگان تاثیر تغییر دمای محیط را روی عملکرد این سیستم بررسی کردند. که دریافتند دمای محیط می‌تواند تاثیر بالایی روی این سیستم بگذارد.

شکل ۷ روند تغییر در دمای خروجی، PCM و دمای گرم‌کننده را نشان می‌دهد. دمای گرم‌کننده یک نوسان مختصر را تجربه می‌کند درحالی‌که دمای محیط نوسان بسیار زیادی را در خود می‌بیند. این اتفاق به دلیل خواص PCM اتفاق افتاده است که بعد از اینکه گرم‌کننده گرمای اولیه خودش را به PCM وارد می‌کند PCM با تغییرات دمای خارجی دمای داخلی خود را تقریباً ثابت نگه می‌دارد.

شکل ۷

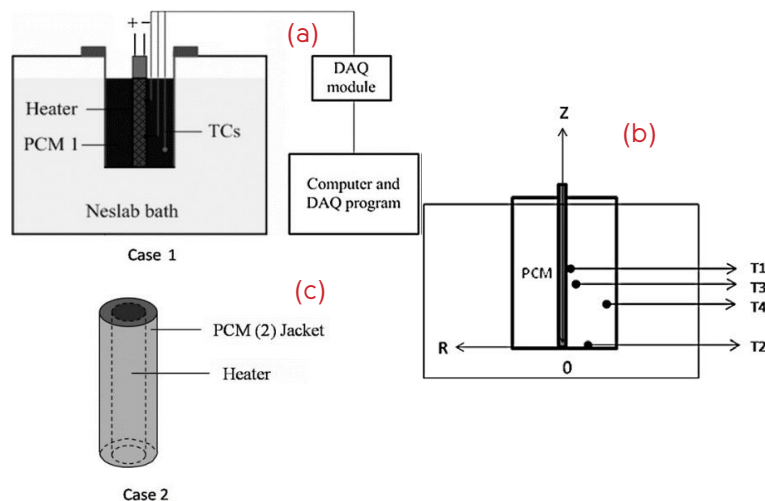
(a) مدل نوسانی دمای محیط باتری که توسط PCM محافظت می‌شود



(b) طرح کلی نحوه قرارگیری PCM و منبع حرارتی [۳۷]

به طور کلی هر دو نوع PCM به‌طور مؤثر توانستند دمای گرم‌کننده را در محدوده دمای مناسب نگه‌دارند حتی در شرایطی که دمای محیط در حال نوسانات شدید بود. همین‌طور بازدهی و وزن کم آن‌ها بسیار مهم و یک مزیت در این سیستم است. در ادامه نویسنده‌ها [37] مسئله استفان^۷

7 Stefan Problem



شکل ۵ (a) تجهیز آزمایشگاهی

(b) محل قرارگیری دماسنج‌ها*

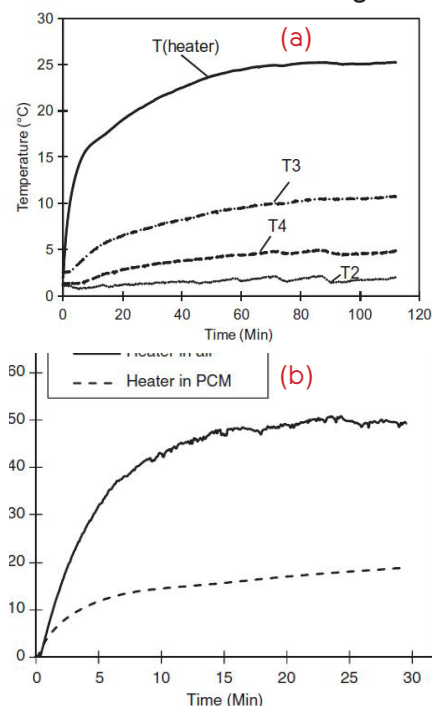
(c) استفاده از ورقه‌ای PCM [۳۷]

آن‌ها همچنین در مطالعه‌ای دیگر، یک گرم‌کننده را که توسط نوع دیگری از PCM پوشانده شده بود مورد بررسی قرار دادند. این پوشش PCM به‌صورت یک ورق PCM انعطاف‌پذیر (PCM flexible sheets) ساخته شده بود و ماده تغییر فاز دهنده دارای دمای ذوب ۵۰ درجه سانتی‌گراد بود. در ادامه گرم‌کننده که توسط ورق ماده تغییر فاز دهنده پوشیده شده بود در حمام قرار گرفت و تحت دماهای مختلف محیط قرار گرفت.

اندازه‌گیری دما در شرایط آزمایشگاهی کمک کرد تا درک بهتری از تغییر دما در حین انجامد توسط دمای محیط و ذوب شدن PCM توسط گرم‌کننده به دست آید. دماهای گزارش شده توسط دماسنج‌ها که در شکل ۶ شکل ۵ (a) جایگیری آن‌ها گزارش شده است در شکل ۶ نشان داده شده است.

شکل ۶

(a) دمای اندازه‌گیری شده در حین ذوب PCM اطراف گرم‌کننده.



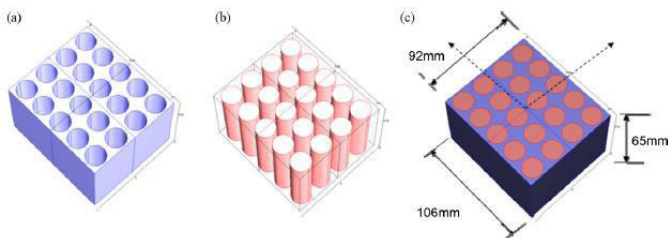
(b) دمای گرم‌کننده در هوای آزاد و در جوار PCM که نرخ ثابتی از تولید حرارت در گرم‌کننده وجود دارد [۳۷]

6 Thermocouples

گرم‌کننده به ۶۰ درجه سانتی‌گراد برسد و دیگری حداکثر اختلاف دمای موجود در ساختار ترکیبی تفاوت ناچیزی در نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی وجود داشت طوری که دما در شبیه‌سازی نرم‌افزاری سریع‌تر افزایش پیدا می‌کرد. این اختلاف ناچیز ناشی از مقدار بسیار کمی اتلاف حرارتی بود که با وجود عایق حرارتی باز هم اتفاق افتاده بود. نویسنده‌ها به منظور جلوگیری از نشت ماده تغییر فاز دهنده از ساختار گرافیت و ضریب انتقال حرارت مناسب توصیه کرده‌اند که از گرافیت با چگالی ۸۹۰ و ۷۵ درصد ماده تغییر فاز دهنده استفاده شود.

در همین زمینه کیزیل و همکاران [۱۳] به صورت عددی ساختار ترکیبی ماده تغییر فاز دهنده موم پارافین^{۱۱} و گرافیت را در شرایطی بحرانی مورد آزمون قرار دادند. در این ساختار ترکیبی ضریب انتقال حرارت تا ۱۶/۶ افزایش یافت. هدف اصلی از این تحقیق، مقایسه اثر ساختار ترکیبی و منبع حرارتی در شرایط تماس با هوای محیط در شرایط فرار حرارتی بود. به منظور ایجاد شرایط فرار حرارتی در نمونه، نرخ تولید حرارت در یک باتری و در شرایط آزمایشگاهی که دچار فرار حرارتی شده است در شبیه‌سازی مورد استفاده واقع شد.

بسته باتری^{۱۲} مورد تحقیق از ۶۷ واحد باتری تشکیل شده است. هر واحد باتری مطابق شکل ۹ از ۲۰ باتری استوانه‌ای ۱/۵ آمپرساعتی قابل خرید از بازار تشکیل شده است. هر واحد از ۵ ردیف عمودی و ۴ ردیف افقی تشکیل شده است. سیستم‌های خنک کاری به وسیله هوا و ساختار ترکیبی در قسمت‌های (b) و (a) نشان داده شده است.



شکل ۹ طرح کلی از نحوه قرارگیری ستون‌ها و ردیف‌های واحد باتری

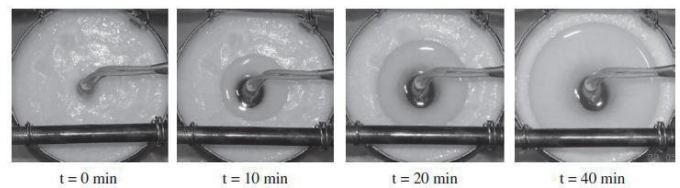
(a) محفظه پر شده به وسیله ماده تغییر فاز دهنده

(b) باتری‌های لیتیوم-یون

(c) واحد باتری [۱۳]

در این شبیه‌سازی حداکثر دمای میانگین هر سلول (باتری) طی خنک‌سازی در شرایط هوای آزاد و وجود ساختار ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت و همچنین در قدم بعد تاثیر هر کدام از روش‌های ذکر شده در توزیع دما در شرایط محیطی با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد آزمایش شد. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است حداکثر دمای به دست آمده در شرایط وجود ساختار ترکیبی، ۱۰ درجه سانتی‌گراد سردتر از شرایط بدون ساختار ترکیبی و در مجاور هوا با ضریب همرفت است.

را در هندسه استوانه‌ای و به صورت یک‌بعدی حل کردند که در این مسئله منبع حرارتی باعث جابجایی مرز مشترک بین جامد و مایع می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است منبع حرارتی در شعاع صفر قرار گرفته است و کل جسم جامد محدود در دمای اولیه T_1 و کمتر از دمای ذوب ماده تغییر فاز دهنده یعنی T_M است. اگرچه به دلیل وجود نیروی شناوری (شکل ۸) مدل برای مقایسه با حالت آزمایشگاهی مورد استفاده واقع نشد.



شکل ۸ ماده تغییر فاز دهنده اطراف منبع گرما [۳۷]

با این وجود، کم بودن ضریب انتقال حرارت هدایتی مواد تغییر فاز دهنده در سرمایش انفعالی استفاده از آن‌ها برای سیستم‌های خنک‌کاری را کمی محدود کرده است و می‌تواند آن را در شرایط بحرانی که ممکن است فرار حرارتی به وجود آید ناکارآمد کند. پس در نتیجه ضریب انتقال حرارت این مواد را می‌توان با افزودن موادی با ضریب هدایت حرارتی بالا تا حد چشم‌گیری افزایش داد.

در این زمینه پای و همکاران [۳۸] به منظور افزایش ضریب انتقال حرارت ماده تغییر فاز دهنده از ساختار گرافیتی^۸ استفاده کردند. آن‌ها به صورت آزمایشگاهی نشان دادند که ساختار مرکب^۹ از ماده تغییر فاز دهنده و گرافیت ضریب انتقال حرارتی به اندازه خود ساختار گرافیتی دارد. همچنین در ساختار نهایی ساختار مرکب ضریب انتقال حرارت به صورت ناهمسانگرد^{۱۰} مشاهده شد که به چگالی گرافیت وابسته بود. در تحقیقی دیگر که توسط لینگماننی و همکاران [۳۹] انجام شد، موضوع عدم وابستگی ضریب کلی انتقال حرارت ساختار مرکب، به ماده تغییر فاز دهنده بار دیگر مورد بررسی قرار گرفت این بار در شرایطی که از یک ساختار فلزی استفاده شد.

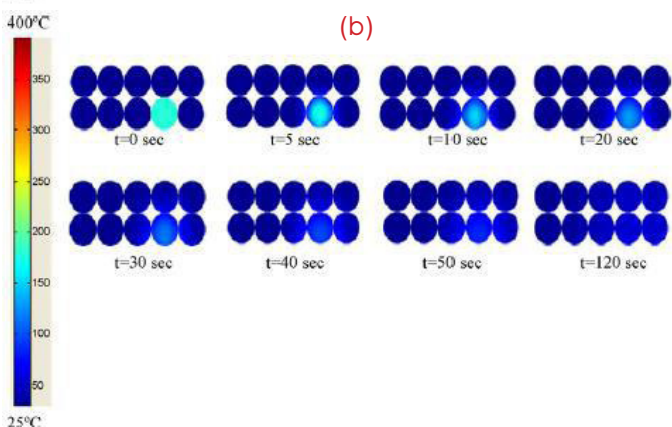
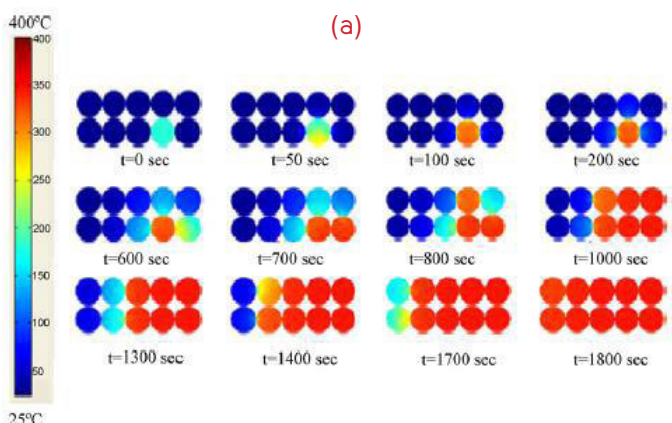
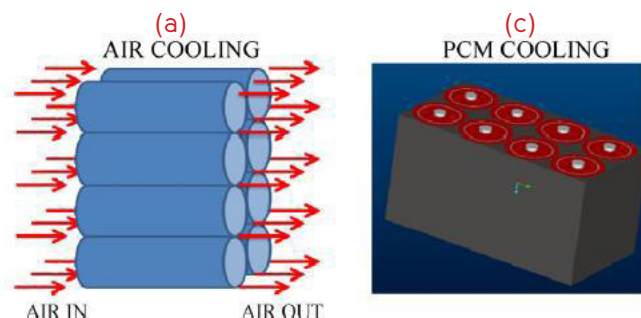
در بررسی عددی و آزمایشگاهی دیگری که توسط لینگ و همکاران [۴۰] روی ساختار ترکیبی ماده تغییر فاز دهنده و گرافیت انجام شد. برنامه Fluent برای بررسی تغییر فاز ماده تغییر فاز دهنده استفاده شد. همچنین باتری‌ها به صورت یک منبع حرارت استوانه‌ای مدل‌سازی شدند که توسط ساختار ماده تغییر فاز دهنده و گرافیت محاط شده است. ساختارهای ترکیبی متفاوتی از این دو ماده به منظور بررسی میزان کارایی آن‌ها با هم مقایسه شدند. یکی از متغیرهایی که مورد آزمایش قرار گرفت زمانی بود که طول می‌کشید تا دمای سطح

8 Graphite Matrix

9 Composite

10 Anisotropic

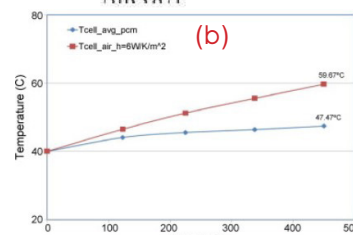
در شرایط هوا خنک، با دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد و ضریب همرفت ۱۰ پخش شدن فرار حرارتی در واحد باتری مطابق شکل ۱۲ (a) انجام می‌شود اما هم‌زمان در شکل ۱۲ (b) که خنک کاری در شرایط وجود ساختار ترکیبی را نشان می‌دهد فرار حرارتی در همان سلول متوقف شده است و واحد باتری به شرایطی نزدیک به حالت محیطی بازگشته است.



شکل ۱۲ گسترش فرار حرارتی در واحد به‌واسطه ایجاد فرار حرارتی در یک سلول. (a) هوا خنک.

(b) خنک کاری در شرایط وجود ساختار ترکیبی. [۱۳]

در نهایت تاثیر فاصله بین سلول‌ها در روش خنک کاری هواخنک مورد بررسی قرار گرفت. سلول‌ها به وسیله عایق نایلون^{۱۳} به اندازه‌ی ۱ و ۲ میلی‌متر از هم قرار گرفتند. هدف از این آزمون بررسی افزایش دما در سلول‌های کناری یک سلول که دچار فرار حرارتی شده است بود. در شرایطی که فاصله بین سلول‌ها ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد افزایش دمای سلول‌های همسایه ۷ درجه سانتی‌گراد بود. در طرف دیگر با وجود فاصله ۱ میلی‌متری بین سلول‌ها افزایش دمای سلول‌ها به اندازه ۹/۵ درجه سانتی‌گراد بود. نویسنده‌ها نتیجه گرفتند که با وجود افزایش فاصله بین سلول‌ها ایجاد فرار حرارتی در سلول‌های مجاور اجتناب‌ناپذیر است. در مقابل، خنک کاری با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده نیازی به داشتن فضا برای جذب



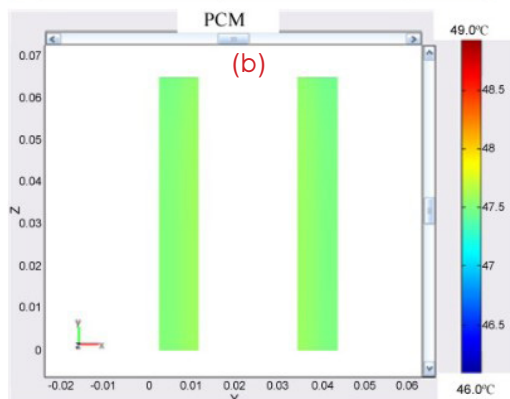
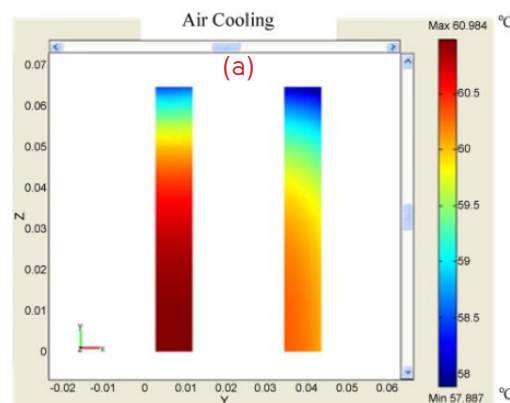
شکل ۱۰

(a) خنک کاری هوایی

(b) خنک کاری با ماده تغییر فاز دهنده

(c) دمای سلول در شرایط محیطی با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد [۱۳]

ثبات دمای سلول که در شکل ۱۱ گزارش شده است در شرایط وجود ماده تغییر فاز دهنده بسیار مطلوب‌تر از وجود همرفت طبیعی هوا است. در ادامه، شبیه‌سازی فرار حرارتی با مدل‌سازی این پدیده روی یکی از سلول‌ها انجام شد.



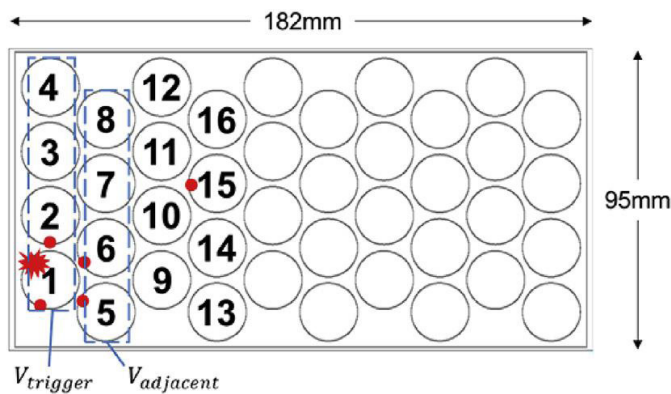
شکل ۱۱ توزیع دما در دو سلول مجاور و دمای محیط ۴۰ درجه سانتی‌گراد

(a) هوا خنک

(b) خنک کاری در شرایط وجود ساختار ترکیبی [۱۳]

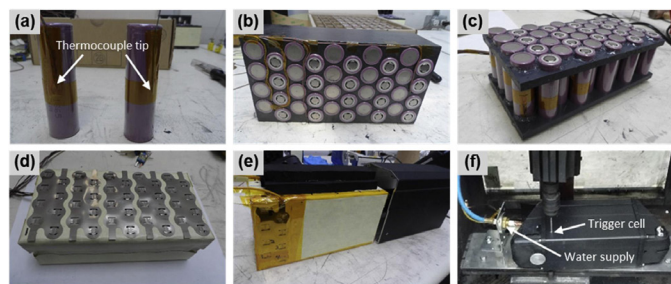
مروری بر مدیریت حرارتی غیرفعال باتری‌های لیتیوم یون

ترکیبی گرافیتی و موم پارافین قرار گرفتند (شکل ۱۵(b)). در این پروژه باتری‌ای که به‌عنوان ماشه برای شروع فرایند فرار حرارتی در بسته انتخاب شده است باتری است که در گوشه بسته است (شکل ۱۵(f)) و دارای بهترین شرایط از نظر تخلیه حرارتی است تا بتوان بدترین شرایط را مدل کرد.



شکل ۱۴ نمای کلی از بسته باتری که نشان‌دهنده چیدمان باتری‌ها و ابعاد بسته، باتری که فرار حرارتی در آن ایجاد شده و باتری‌های همسایه [۱۴]

نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که در مورد اول، حرارت ایجاد شده به‌راحتی در بسته گسترش پیدا می‌کند و نمی‌تواند قابل‌اعتماد باشد در طرف مقابل مواد تغییر فاز دهنده نشان دادند که نه‌تنها می‌توانند در نگهداری دمای باتری در محدوده مناسب بسیار خوب عمل کنند، بلکه می‌توانند یک عامل بسیار تعیین‌کننده در جلوگیری از پخش حرارت ایجاد شده توسط سلول معیوب باشند و باتری را از خطراتی مثل انفجارهای بزرگ مصون بدارند.



شکل ۱۵ ساختمان بسته مورد استفاده به‌منظور آزمون نفوذ میخ،

(a) اتصال دماسنج به باتری؛

(b) باتری‌های جای‌گیر شده در ساختار ترکیبی در مورد دوم و سیم‌های دماسنج؛

(c) باتری‌های چسب شده به‌نگهدارنده در مورد اول؛

(d&e) پوشش‌های اطراف بسته نظیر محافظ آلومینیومی؛

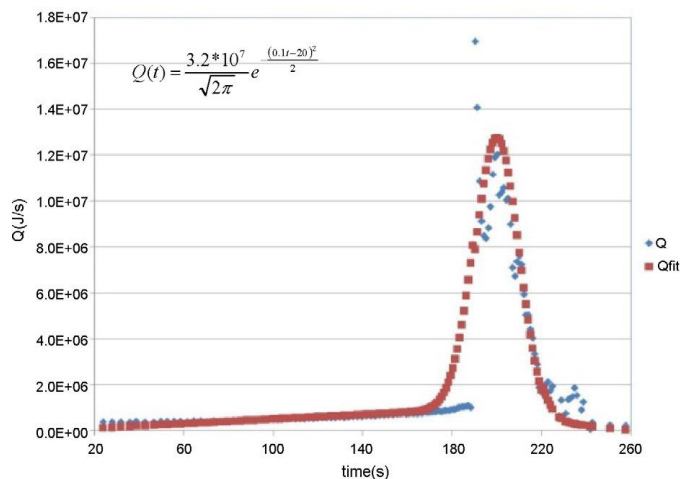
(f) مرحله پیش از انجام آزمون نفوذ میخ در بسته [۱۴]

محمد و همکاران [۴۱] با یک مدل فیزیکی سعی کردند تا روش نرم‌افزار دینامیک محاسباتی (فلوئنت) را با داده‌های خروجی از سایر روش‌های محاسباتی و همچنین روش تجربی مقایسه کرده و آن را صحت‌گذاری کنند.

حرارت در حین پدیده فرار حرارتی ندارند. همچنین ماده تغییر فاز دهنده باید نزدیک باتری باشد که می‌تواند مزیت دیگر کم‌حجم بودن را برای آن رقم بزند.

نتایج نشان دادند که ساختار ترکیبی ماده تغییر فاز دهنده و گرافیتی می‌تواند از پخش حرارت ایجاد شده توسط فرار حرارتی، که به‌صورت اتفاقی در بسته‌بندی باتری ایجاد می‌شود جلوگیری کند. همین‌طور این ساختار ترکیبی توانست یک توزیع دمای یکسان، در حین تخلیه شارژ را برای باتری رقم بزند. اگرچه در مقاله کیزیلل [۱۳] یک ضریب انتقال حرارت ثابت را برای این ساختار استفاده شده‌بود، درحالی‌که پای و همکاران [۳۸] مشخص کردند که انتقال حرارت در این ساختار به‌صورت ناهمسانگرد ایجاد می‌شود.

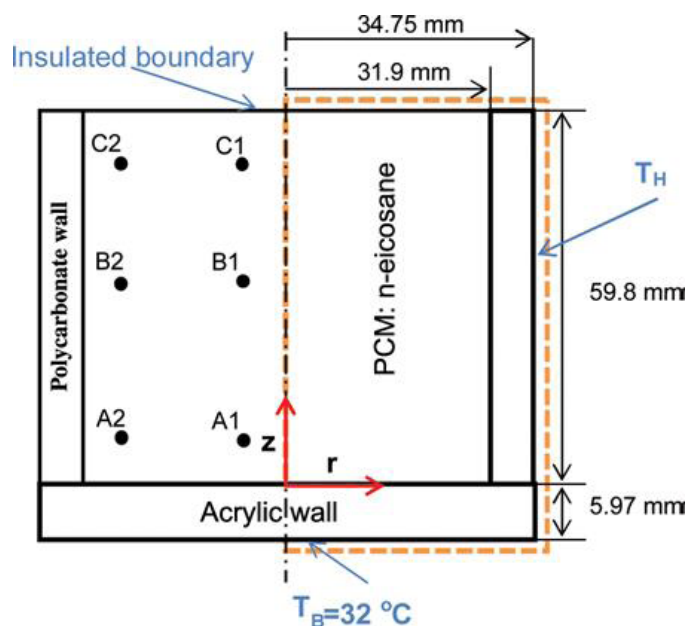
در صنعت باتری‌سازی یکی از آزمایش‌هایی که روی باتری‌ها انجام می‌شود آزمون نفوذ میخ^{۱۴} است که باعث ایجاد فرار حرارتی در یک سلول می‌شود. در این آزمایش یک جسم میخ مانند تحت شرایط محافظتی خاص وارد باتری شده و باعث ایجاد یک اتصال کوتاه بین کاتد و آند می‌شوند که طی آن انرژی بسیار زیادی آزاد می‌شود که نتیجه آن گرمای بسیار زیاد تولید شده در سلول است. این گرمای زیاد که طبق گزارش‌ها [۱۳] می‌توان منحنی به شکل ۱۳ برای آن در نظر گرفت می‌تواند توانی به‌اندازه ۱۳ مگاوات در درون سلول ایجاد کند که همین امر باعث انفجار سلول می‌شود.



شکل ۱۳ نرخ تولید حرارت در واحد زمان برای یک باتری ۱۸۶۵۰ [۱۳]

در همین زمینه استفان و همکاران [۱۴] فرار حرارتی را به‌صورت آزمایشگاهی روی یک بسته باتری انجام دادند. در این تحقیق محققان در یکی از باتری‌های موجود در بسته (شکل ۱۴) فرار حرارتی را ایجاد کردند و میزان تاثیر پذیری باتری‌های دیگر موجود در پک در اثر این پدیده را در دو مورد بررسی قراردادند. در مورد اول باتری‌ها در یک پایه که به‌طور معمول برای باتری‌ها استفاده می‌شود قرار گرفتند و به‌طوری‌که سطح باتری‌ها در مواجهه با هوای آزاد قرار می‌گرفت (شکل ۱۵(c)). در مورد دوم باتری‌ها در درون یک پوشش از ساختار

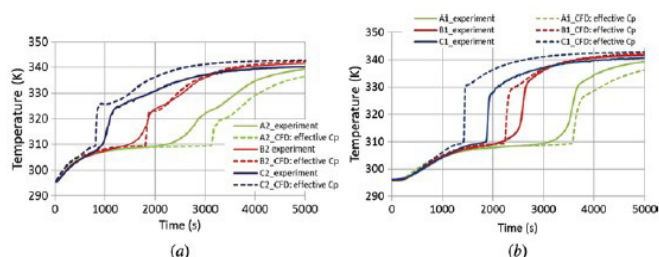
مدل استفاده شده در این مقاله به صورت شکل ۱۶ است.



شکل ۱۶ هندسه و شرایط مرزی مدل آزمایشگاهی برای ذوب شدن یک استوانه [۴۲]

چگالی وانگ و همکاران [۴۳] روش استفاده از گرمای ویژه مؤثر در قسمت جامد را معرفی کردند.

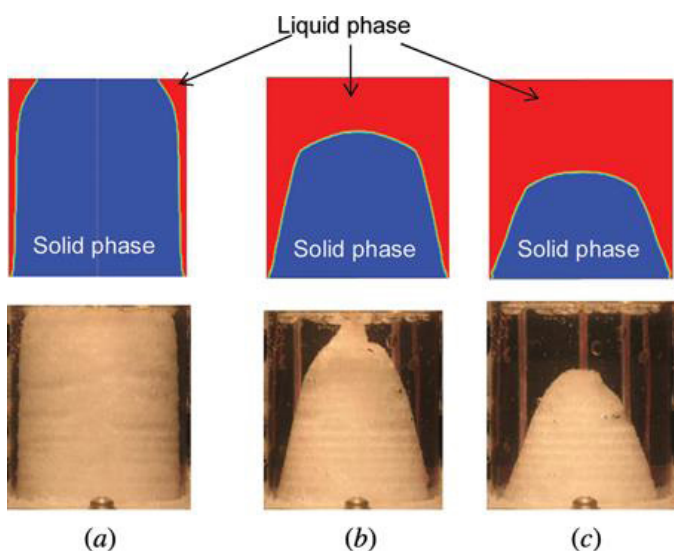
از این روش هم برای مدل سازی استفاده شد و نتایج در شکل ۱۸ مشاهده می شود. اما نمودارها تفاوت قابل توجهی در نتایج را نشان نمی دهند زیرا این گرمای ویژه معادل تنها روی قسمت جامد تأثیر می گذارد. همین طور در این شبیه سازی نحوه ذوب شدن در حالت شبیه سازی و تجربی نیز باهم مقایسه شده اند (شکل ۱۹)



شکل ۱۸ دمای گزارش شده در قسمت های مختلف دامنه حل در حالت استفاده از گرمای ویژه مؤثر در قسمت جامد

(a) نزدیک دیواره استوانه

(b) نزدیک خط مرکزی استوانه [۴۱]

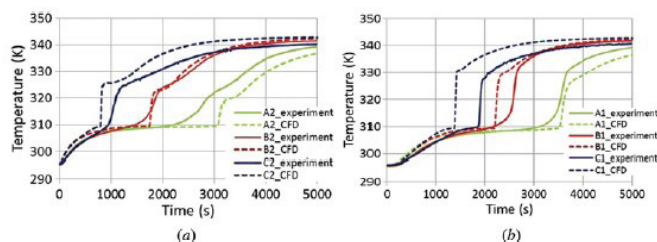


شکل ۱۹ مقایسه مرز مشترک جامد و مایع در دو حالت شبیه سازی عددی و تجربی، بعد از ۶۰۰ ثانیه (a)، ۱۸۰۰ ثانیه (b) و ۲۴۰۰ ثانیه [۴۱] (c)

بنابراین در شبیه سازی هایی که توسط دینامیک سیالات محاسباتی با رویکرد آنتالپی کل صورت می پذیرد در پیش بینی محل مرز مشترک خطایی به اندازه ۷ درصد وجود دارد، نشان می دهد که این خطا در پیش بینی دمای نقاط به مراتب از این حد فراتر می رود. روش های دیگر نیز که توسط محققان دیگر [۴۳] و [۴۲] ارائه شده اند نیز با مقدار کمی اختلاف همین خطاها را گزارش می دهند.

اما همچنان می توان از این روش ها برای شبیه سازی پدیده های تغییر فاز استفاده کرد و این اختلاف نسبت به شرایط واقعی

میزان کسر مایع کل سیستم در شرایط شبیه سازی و تجربی در شکل ۱۹ نشان داده شده است. حداکثر اختلاف نتایج بین این دو روش برابر ۷ درصد است. اما در مقایسه از نظر رویکرد دمایی که نتایج آن در شکل ۱۷ آورده شده است نتایج تفاوت بیشتری را گزارش می دهند. این به این دلیل است که در شبیه سازی در نرم افزار یک چگالی ثابت به اندازه چگالی مایع برای قسمت مایع و جامد در نظر گرفته شده است. حال آنکه چگالی قسمت جامد بیشتر است گرمای ویژه آن نیز کمتر است بنابراین در گزارش حالت تجربی دمای بیشتری گزارش شده است.



شکل ۱۷ دمای گزارش شده در قسمت های مختلف دامنه حل در حالت شبیه سازی و تجربی

(a) نزدیک دیواره استوانه

(b) نزدیک خط مرکزی [۴۱]

در این شبیه سازی به منظور شبیه سازی اثر بویانسی از مدل بوزینسک (Boussinesq) استفاده شده است. در این مدل برای پیش بینی درست اثر بویانسی باید یک چگالی ثابت برای کل دامنه حل در نظر گرفت. به منظور در نظر گرفتن اثر بویانسی و تغییر

در حل معادلات دارد نمی‌تواند تمامی حالت‌های فیزیکی حاکم بر مسائل را در نظر بگیرد. این قضیه موجب می‌شود که در حل مسائل تغییر فاز روش‌هایی برای حل معادلات به وجود بیایند که بتوانند پاسخ مسائل در شرایط مرزی مختلف را تا حد امکان به جواب صحیح آن مسئله همگرا کنند.

۳) روش‌های حل معادلات حاکم بر مسائل تغییر فاز

باعث ناپایداری حل شوند از بین برود. در این شرایط در نظر گرفتن یک شبکه‌بندی با ضخامت مناسب برای این ناحیه خمیری به یک مسئله کلیدی تبدیل می‌شود. روش آنتالپی می‌تواند محدودیت‌های ناشی از ناحیه خمیری و تغییر فاز هم‌دما را از بین ببرد اما دما در بعضی نقاط شبکه می‌تواند با گذشت زمان نوسان داشته باشد [۴۹]. این روش در نمونه‌های زیادی با موفقیت مورد آزمایش قرار گرفته است [۵۰-۵۲]. هانتز^{۲۱} [۵۳] و امجدی^{۲۲} [۵۴] اذعان کردند که مناسب‌ترین روش برای حل مسائل معمول استفاده از روش آنتالپی است زیرا هیچ راه مناسب دیگری جهت مدل‌سازی مرز مشترک مسائل تغییر فاز وجود ندارد.

قبل از این، دو روش المان محدود (FEM) و تفاضل محدود به‌منظور حل مسائل تغییر فاز استفاده می‌شدند. سپس روش حجم محدود و حجم کنترل المان محدود^{۲۳} مورداستفاده واقع شدند [۵۵]. از آنجایی که دما می‌تواند در بعضی شرایط، با زمان نوسان کند بعضی از نویسندگان به روش‌های مبتنی بر ظرفیت گرمایی ویژه وابسته به زمان متوسل شده‌اند [۵۶]. در این مدل، معادله انرژی مبتنی بر تغییرات آنتالپی، به یک معادله یک متغیره غیرخطی تبدیل می‌شود. این روش، روش مدل انتقال دمایی (TTM)^{۲۴} نام گرفته است. این مدل، یک مدل دقیق، ساده و کارا است [۵۶].

در روش TTM، معادلات پیوستگی و مومنتوم برای سیالات استفاده می‌شود. اما برخلاف روش آنتالپی، معادله انرژی از یک عبارت منبع وابسته به دما استفاده می‌کند. مشکل اصلی این رویکرد، گسترش روشی برای نگاه‌داشتن سرعت صفر در ناحیه جامد است. راحت‌ترین روش برای انجام این کار، روش خاموش کردن (SOM)^{۲۵} یا نسخه دیگر آن، روش خاموش کردن رمپ (RSOM)^{۲۶} است [۵۱، ۵۷، ۵۸]. این روش‌ها به‌صورت مستقیم، با تنظیم کردن ضرایب مومنتوم و اصلاح سرعت در ناحیه جامد، سرعت را در این ناحیه برابر صفر قرار می‌دهند. اگرچه این روش‌ها به‌صورت معمول در مسائل تغییر فاز استفاده می‌شوند، ما و ژانگ [۴۹] نشان دادند که اگر این روش

را پذیرفت. اما استفاده از معادله استفان در انتقال حرارت در مسائل تغییر فاز می‌تواند این خطاها را بسیار کاهش دهد. این معادلات که در فصول بعد ارائه شده‌اند دارای روش‌های حل متفاوتی هستند که اولین روش که می‌توان به آن اشاره کرد حل به روش تحلیلی است، اما این روش به دلیل محدودیت‌هایی که

پدیده تغییر فاز در قالب یک نوع خاص از مسائل مقدار مرزی با معادلات دیفرانسیل جزئی تعریف می‌شود. این معادلات ابتدا توسط کلایپرون و لامه^{۱۶} در سال ۱۸۳۱ مطالعه شد که مسئله تشکیل پوسته زمین هنگام سرد شدن را بررسی می‌کرد. در آن مطالعه مسئله از یک هندسه کره به یک هندسه یک‌بعدی نیمه بی‌نهایت ساده شد [۴۴]. همچنین این حل، به‌صورت جداگانه توسط فرانز نیومن^{۱۷} در یادداشت‌های سخنرانی‌اش در سال‌های ۱۸۴۰-۱۸۳۵ معرفی شد [۴۵]. اگرچه، این نوع مسائل را به دنبال نام جوزف استفان^{۱۸} نام‌گذاری می‌کنند. فیزیکدان اسلونیایی که کلاس جهانی این نوع مسائل را در موضوع تشکیل یخ، در سال ۱۸۸۹ معرفی کرد [۴۶]. وجود این راه‌حل و همچنین یکتا بودن آن به ترتیب توسط ایوان^{۱۹} در سال ۱۹۵۱ [۴۷] و داگلاس^{۲۰} در سال ۱۹۵۷ [۴۸] ثابت شد.

تعداد کمی روش تحلیلی در این زمینه در فرم بسته وجود دارد. و همچنین اکثر آن‌ها در شرایط یک‌بعدی یک جسم بی‌نهایت یا نیمه بی‌نهایت به همراه شرایط اولیه و مرزی ساده صادق هستند. مسئله پیش‌بینی رفتار مواد تغییر فاز دهنده بسیار مشکل است، و این مسئله به خاطر طبیعت غیرخطی حرکت مرز مشترک است که سرعت جابجایی به‌وسیله میزان جذب یا دفع گرمای نهان در مرز مشترک مشخص می‌شود. در این شرایط مکان و سرعت مرز مشترک از پیش مشخص نیست. به‌علاوه به دلیل اینکه دو ناحیه مختلف مشخصات فیزیکی مختلفی دارند، این قضیه می‌تواند باعث ایجاد یک ناپیوستگی فیزیکی ایجاد کند که بادی به آن رسیدگی شود.

۳-۱) شبکه ثابت

با معرفی روش آنتالپی، مسائل تغییر فاز ساده‌تر می‌شوند زیرا معادلات برای دو ناحیه یکسان است. شرایط مرز مشترک به‌صورت خودکار حاصل می‌شود و بین دو فاز یک ناحیه خمیری ایجاد می‌کند. این ناحیه کمک می‌کند تا ناپیوستگی‌هایی که ممکن است

21 Hunter

22 Amdjadi

23 Control volume finite element method

24 Temperature transforming model

25 switch-off method

26 ramped switch-off method

16 Clapeyron and Lamé, 1831

17 Franz Neumann

18 Joz'ef Stefan

19 Evans

20 Douglas

با روش TTM به منظور حل معادلات تغییر فاز با رویکرد همرفت استفاده شود باعث ایجاد یک بی‌ثباتی جدی در حل می‌شود.

۲-۳) روش شبکه انتقال یافته^{۲۷}

مهم‌ترین جنبه این روش که نام دیگر آن ثابت کردن جبهه^{۲۸} است، این است که با استفاده از یک منبع مختصات فضایی^{۲۹} مکان مرز مشترک جامد و مایع در زمان‌های مختلف در یک مکان ثابت شود. در این روش از روش انتقال لاند^{۳۰} استفاده می‌شود [۵۹، ۶۰]. با استفاده از این انتقال می‌توان توابعی که حتی در دو یا سه بعد تعریف می‌شوند را در یک دامنه مربعی محصور کرد. به عنوان مثال مسئله‌ای که در دامنه (x,y) تعریف شده باشد را می‌توان با استفاده از توابع انتقال به دامنه (s,p) انتقال داد که به آن بدنه محصور در شبکه^{۳۱} (BFC) می‌گویند [۶۱، ۶۲]. مزیت اصلی این روش این است که با استفاده از این روش معادلات انتقال حرارت و جریان در یک شبکه مربعی یکنواخت حل می‌شود و هیچ کاهش دقتی در گسسته‌سازی اطراف مرزهای متحرک وجود ندارد. این روش ساده بودن شبکه‌بندی را به دنبال دارد اما از طرفی باعث پیچیده شدن معادلات می‌شود. کلید اصلی در استفاده از این روش، تولید شبکه است، زیرا این شبکه باید مطابق با شبکه فیزیکی و ثابت در هر نقطه در زمان‌های مختلف باشد [۶۲].

۳-۳) شبکه انطباقی

به منظور ارائه یک رویکرد معقول از اتفاقات فیزیکی که در مرز مشترک جامد-مایع می‌افتد تراکم شبکه مدل باید به قدری باشد که بتواند مرز مشترک را به خوبی پوشش دهد. اگرچه این تراکم در دیگر نواحی دامنه حل مورد نیاز نیست. از این رو به جهت رسیدن به یک جواب مناسب باید یک شبکه محلی در اطراف محل تغییر فاز ایجاد کرد. در این راستا دو روش وجود دارد. یکی از این روش‌ها روش بهبود شبکه محلی^{۳۲} (روش h)^{۳۳} است [۶۳-۶۶]. در این مدل، دامنه در ابتدا یک شبکه ثابت دارد، اما در هر تکرار نقاط شبکه اضافه یا کم می‌شوند تا با نیاز مسئله به جهت دقت بیشتر هم‌راستا شوند. این روشی است که در اکثر کدهای تجاری استفاده می‌شود. مشکل اصلی در این روش‌ها طبقه‌بندی اطلاعات دریافت شده می‌باشد زیرا مکان نقاط دائماً در حال تغییر می‌باشد.

به جهت حل این مشکل روش r ^{۳۴}، یا نام دیگر آن روش شبکه متحرک^{۳۵} استفاده می‌شود. در این روش شبکه ابتدا با یک شکل یکنواخت در شبکه توزیع شده است و سپس شبکه را جابجا می‌کند اما در حین حل، تعداد نقاط شبکه و نحوه توزیع آن یکنواخت می‌ماند. تغییرات شبکه معمولاً با دنبال کردن مسیر حل یا یکی از مشتق‌های مرتبه بالا انجام می‌شود. این روش در مورد مواد تغییر فاز دهنده در این تحقیقات بکار بسته شده است [۶۷-۶۹].

۴) رویکرد صنعت و ثبت اختراع‌های انجام شده در زمینه استفاده از PCM در مدیریت حرارتی



شکل ۲۰ پک‌های باتری تولید شده توسط شرکت AllCell technologies [۷۰]

امروزه شرکت‌های مختلفی خنک کاری باتری‌ها به صورت غیرفعال را در دستور کار خود قرار داده‌اند. در بعضی شرکت‌ها به صورت تجاری در حال تولید و فروش هستند و در بعضی شرکت‌ها نیز ثبت اختراع^{۳۶}‌هایی در این زمینه انجام شده است. لیست مختصری از این شرکت‌ها در زیر ارائه می‌شود:

شرکت ALLCell Technologies

شرکت ALLCell technologies [۷۰] پک‌های باتری با فناوری کامپوزیت مواد تغییر فاز دهنده و گرافیت تولید می‌کند که می‌تواند در پک‌های باتری‌های استوانه‌ای یا مکعبی استفاده شوند. در همین راستا حلاج و همکاران [۷۱، ۷۲] با ایجاد یک سیستم مدیریت بر تأمین قدرت باتری عملکرد باتری در مجاورت PCM را بهبود بخشیدند. همچنین فرید و همکاران [۷۳] یک سیستم مدیریت حرارتی باتری، مبتنی بر لوله‌های باریک مبدل حرارتی دارای ریز کپسول‌های PCM را جهت خنک کاری باتری ایجاد کردند.

32 Local mesh refinement method

33 h-method

34 r-method (r stand for relocation)

35 Moving mesh method

27 Transformed grid

28 Front fixing

29 Space coordinate

30 Landa transformation

31 Body-fitted coordinate

36 Patent

شرکت Milwaukee tool

شرکت Milwaukee tool اختراعی را توسط جرمی و همکاران [۷۶] ثبت کردند که در آن بین باتری‌های موجود در یک بسته (۲۲) باتری یک محفظه (۱۱۰) که یک سر آن فلنج متصل شده است (۱۲۲)، وجود دارد که درون حفره تعبیه شده (۱۱۸) در بسته (۶۶) قرار می‌گیرد درون این محفظه یک لایه از مواد تغییر فاز دهنده قرار می‌گیرد (۱۸)، هنگامی که باتری گرم می‌شود مواد تغییر فاز دهنده موجود در یک باتری شروع به تغییر فاز می‌کنند و در این حسن از داخل این محفظه نیز در صورت اختلال در خنک کاری PCM هوا جریان می‌آید. تصاویر مربوط به این ثبت اختراع در زیر آورده شده است.

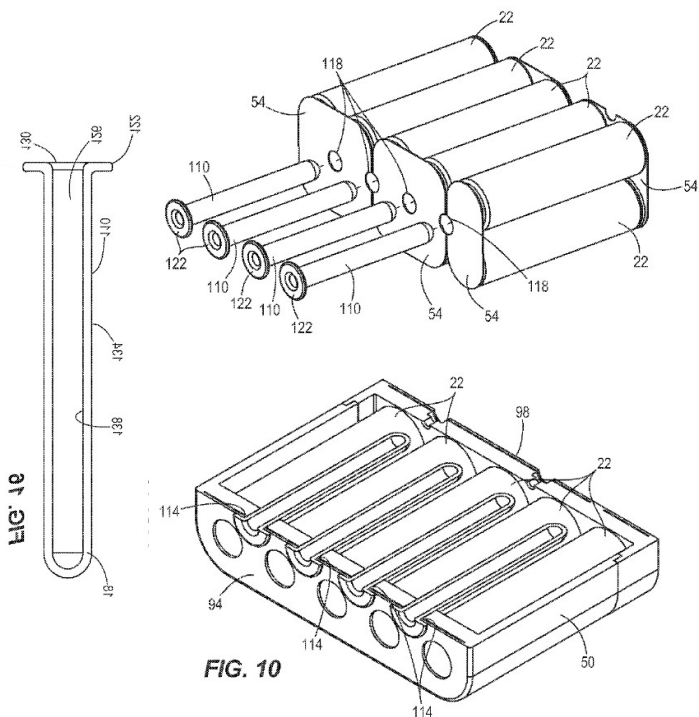


FIG. 10

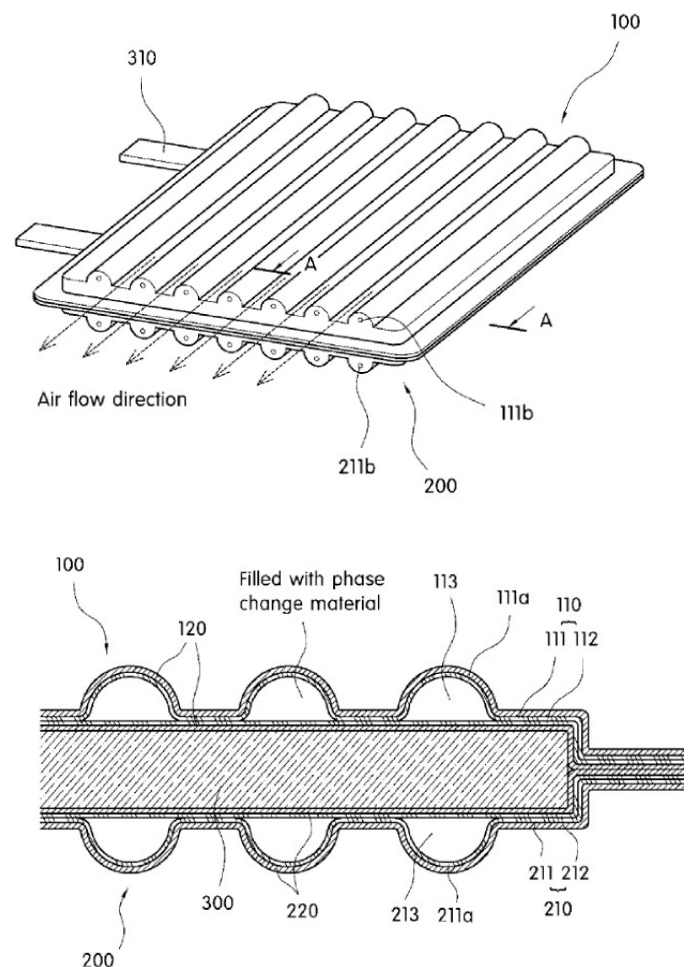
شکل ۲۲ استفاده از PCM در تجهیزات الکترونیکی [۷۶]

شرکت Bosch

شرکت Bosch یکی از بزرگ‌ترین شرکت‌های تولید لوازم الکترونیکی در آلمان اختراعی را در این زمینه توسط KERKAMM [۷۴] ثبت کرده است که می‌تواند مواقعی که باتری داغ می‌شود گرما را از باتری دریافت کرده و در خود ذخیره کند و در مواقعی که باتری در معرض انجماد است این گرما را آزاد کند [۷۵-۷۷].

شرکت Hyundai

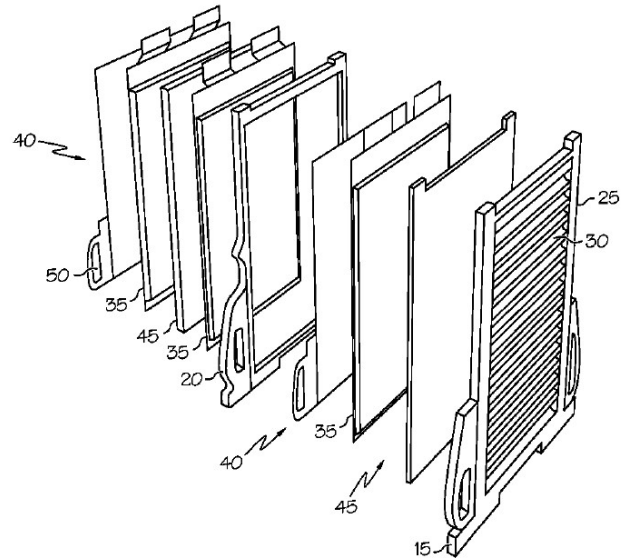
شرکت Hyundai ثبت اختراعی را در این زمینه توسط جین وو و همکاران [۷۸] ثبت کرده است. در این اختراع سلول باتری (۳۰۰) توسط PCM (۱۱۳-۲۱۳) دربر گرفته شده است قسمت بیرونی این محفظه‌ها توسط یک لایه ورق آلومینیومی (۱۱۱-۱۱۲) احاطه شده است تا با هوایی که در بیرون در جریان است (۱۰۰) بیشترین انتقال حرارت را داشته باشد.



شکل ۲۱ استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به منظور خنک کاری تجهیزات الکترونیکی [۷۸]

شرکت General Motors

شرکت General Motors اختراعی در زمینه استفاده از مواد تغییر فاز دهنده توسط یانگ و همکاران [۸۰] ثبت کرده است. در این طراحی یک لایه از PCM (۴۵) در مجاورت سلول باتری (۳۵) قرار می‌گیرد و با لایه‌های دیگری که در مجاورت PCM قرار می‌گیرند می‌توان گرمای حاصل شده از فرار حرارتی را قبل از اینکه به سلول‌های دیگر برسد از این سلول خارج کرد.



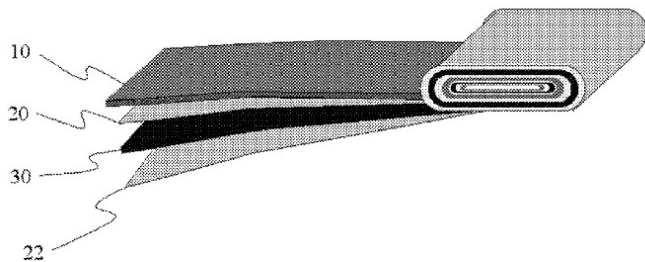
شکل ۲۳ بسته استفاده شده توسط شرکت General Motors جهت بهبود خروج گرمای فرار حرارتی از بسته باتری [۸۰]

شرکت Chevron

شرکت Chevron اختراعی را توسط یانگ و همکاران [۸۲] ثبت کرده است که در آن این شرکت به موادی با بهترین شرایط فیزیکی و شیمیایی از مواد PCM رسیده است که بازدهی آن‌ها را در استفاده به‌عنوان خنک کار بسیار بهبود می‌بخشد.

شرکت LG chemical

ثبت اختراع شرکت LG که توسط سونگدان و همکاران [۸۳-۸۴] در زمینه خنک کاری باتری‌های لیتیومی ثبت شده است، از یک لایه از مواد PCM در درون ساختار خود باتری لیتیوم یون به‌منظور انجام عملیات خنک کاری استفاده می‌کند. این لایه از ماده تغییر فاز دهنده می‌تواند در شرایطی که در اثر اختلال، گرمای زیادی در باتری ایجاد می‌شود از باتری محافظت کند (شکل ۲۴)



شکل ۲۴ استفاده از یک لایه داخلی در سلول باتری توسط شرکت LG به‌منظور کنترل دمای باتری [۸۴]

(۵) نتیجه‌گیری

- بالا بردن ضریب انتقال حرارت PCM با افزودن فین، فوم فلزی، فوم گرافیتی یا نانوذره‌های دیگر
- انجام مطالعاتی روی چگالی یا کسر جرمی مواد افزودنی به PCM
- بکار بردن PCM‌های مختلف در دماها و گرمای نهان‌های مختلف به‌صورت چندلایه‌ای
- بهینه کردن هندسه سیستم
- افزایش جرم یا سطح PCM

در مطالعات زیادی ثابت شده است که مدیریت حرارتی با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده عملکرد بهتری را نسبت به خنک‌کاری به روش‌های فعال ارائه می‌دهد. با بکار بردن PCM می‌توان حداکثر دمای باتری را تا میزان زیادی کاهش داد و همچنین توزیع دمای یکنواختی را در بسته باتری ایجاد کرد. به‌علاوه می‌توان عملکرد PCM در مدیریت حرارتی باتری را با روش‌های زیر افزایش داد:

- یافتن بهترین PCM از نظر داشتن مناسب‌ترین دمای تغییر فاز، گرمای نهان و ضریب انبساط حرارتی

(۶) منابع

[1] H. Wang, F. He, and L. Ma, "Experimental and modeling study of controller-based thermal management of battery modules under dynamic loads," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 103, pp. 2016, 164-154.

[2] S. Hong, X. Zhang, K. Chen, and S. Wang, "Design of flow configuration for parallel air-cooled battery thermal management system with secondary vent," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 116, pp. 2018 /01/01/2018, 1212-1204.

- [3] S. Panchal, I. Dincer, M. Agelin-Chaab, R. Fraser, and M. Fowler, "Experimental and theoretical investigations of heat generation rates for a water cooled LiFePO₄ battery," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 101, pp. ,1102-1093 2016.
- [4] J. Liang, Y. Gan, and Y. Li, "Investigation on the thermal performance of a battery thermal management system using heat pipe under different ambient temperatures," *Energy Conversion and Management*, vol. 155, pp. ,9-1 2018 /01/01/2018.
- [5] Y. Lv, X. Yang, G. Zhang, and X. Li, "Experimental research on the effective heating strategies for a phase change material based power battery module," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 128, pp. 2019 ,400-392.
- [6] Q. Huang, X. Li, G. Zhang, J. Zhang, F. He, and Y. Li, "Experimental investigation of the thermal performance of heat pipe assisted phase change material for battery thermal management system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 141, pp. -1092 2018 /01/08/2018 ,1100.
- [7] S. K. Mohammadian and Y. Zhang, "Thermal management optimization of an air-cooled Li-ion battery module using pin-fin heat sinks for hybrid electric vehicles," *Journal of Power Sources*, vol. 273, pp. 2015 /01/01/2015 ,439-431.
- [8] Z. Rao, Q. Wang, and C. Huang, "Investigation of the thermal performance of phase change material/mini-channel coupled battery thermal management system," *Applied Energy*, vol. 164, pp. 2016 /15/02/2016 ,669-659.
- [9] W. Wu, X. Yang, G. Zhang, K. Chen, and S. Wang, "Experimental investigation on the thermal performance of heat pipe-assisted phase change material based battery thermal management system," *Energy Conversion and Management*, vol. 138, pp. 2017 /15/04/2017 ,492-486.
- [10] J. Zhao, P. Lv, and Z. Rao, "Experimental study on the thermal management performance of phase change material coupled with heat pipe for cylindrical power battery pack," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 82, pp. ,188-182 2017 /01/04/2017.
- [11] A. Alrashdan, A. T. Mayyas, and S. Al-Hallaj, "Thermo-mechanical behaviors of the expanded graphite-phase change material matrix used for thermal management of Li-ion battery packs," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, pp. 2010 ,179-174.
- [12] J. Yan, Q. Wang, K. Li, and J. Sun, "Numerical study on the thermal performance of a composite board in battery thermal management system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 106, pp. ,140-131 2016 /05/08/2016.
- [13] R. Kizilel, R. Sabbah, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj, "An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs," *Journal of Power Sources*, vol. 194, pp. 2009 ,1112-1105.
- [14] S. Wilke, B. Schweitzer, S. Khateeb, and S. Al-Hallaj, "Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: An experimental study," *Journal of Power Sources*, vol. 340, pp. ,59-51 2017.
- [15] B. Mortazavi, H. Yang, F. Mohebbi, G. Cuniberti, and T. Rabczuk, "Graphene or h-BN paraffin composite structures for the thermal management of Li-ion batteries: A multiscale investigation," *Applied Energy*, vol. 202, pp. /15/09/2017 ,334-323 2017.
- [16] M. Pan and Y. Zhong, "Experimental and numerical investigation of a thermal management system for a Li-ion battery pack using cutting copper fiber sintered skeleton/paraffin composite phase change materials," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 126, pp. ,543-531 2018 /01/11/2018.
- [17] J. Li, J. Huang, and M. Cao, "Properties enhancement of phase-change materials via silica and Al honeycomb panels for the thermal management of LiFeO₄ batteries," *Applied Thermal Engineering*, vol. 131, pp. 2018 ,668-660.
- [18] Y. Lv, W. Situ, X. Yang, G. Zhang, and Z. Wang, "A novel nanosilica-enhanced phase change material with anti-leakage and anti-volume-changes properties for battery thermal management," *Energy Conversion and Management*, vol. 163, pp. 2018 ,259-250.

- [19] Z. Ling, X. Wen, Z. Zhang, X. Fang, and X. Gao, "Thermal management performance of phase change materials with different thermal conductivities for Li-ion battery packs operated at low temperatures," *Energy*, vol. 144, pp. ,983-977 2018 /01/02/2018.
- [20] P. Goli, S. Legedza, A. Dhar, R. Salgado, J. Renteria, and A. A. Balandin, "Graphene-enhanced hybrid phase change materials for thermal management of Li-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 248, pp. 2014 /15/02/2014 ,43-37.
- [21] A. Hussain, C. Y. Tso, and C. Y. H. Chao, "Experimental investigation of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using nickel foam-paraffin composite," *Energy*, vol. 115, pp. 2016 /15/11/2016 ,218-209.
- [22] A. Babapoor, M. Azizi, and G. Karimi, "Thermal management of a Li-ion battery using carbon fiber-PCM composites," *Applied Thermal Engineering*, vol. 82, pp. 2015 ,290-281.
- [23] G. Karimi, M. Azizi, and A. Babapoor, "Experimental study of a cylindrical lithium ion battery thermal management using phase change material composites," *Journal of Energy Storage*, vol. 8, pp. 2016 ,174-168.
- [24] J. Mennig and M. Özik, "Coupled integral equation approach for solving melting or solidification," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 28, pp. 1985 ,1485-1481.
- [25] V. Voller and M. Cross, "Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 24, pp. 1981 /01/03/1981 ,556-545.
- [26] M. Yao and A. Chait, "AN ALTERNATIVE FORMULATION OF THE APPARENT HEAT CAPACITY METHOD FOR PHASE-CHANGE PROBLEMS," *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, vol. 24, pp. 01/10/1993 ,300-279 1993.
- [27] Z. Rao and S. Wang, "A review of power battery thermal energy management," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. -4554 2011 ,4571.
- [28] L. Ianniciello, P. H. Biwole, and P. Achard, "Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials," *Journal of Power Sources*, vol. 378, pp. 2018 ,403-383.
- [29] Z. Ling, Z. Zhang, G. Shi, X. Fang, L. Wang, X. Gao, et al., "Review on thermal management systems using phase change materials for electronic components, Li-ion batteries and photovoltaic modules," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 2014 ,438-427.
- [30] Q. Wang, B. Jiang, B. Li, and Y. Yan, "A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 64, pp. 2016 ,128-106.
- [31] M. Malik, I. Dincer, and M. A. Rosen, "Review on use of phase change materials in battery thermal management for electric and hybrid electric vehicles," *International Journal of Energy Research*, vol. 40, pp. 2016 ,1031-1011.
- [32] H. Liu, Z. Wei, W. He, and J. Zhao, "Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review," *Energy Conversion and Management*, vol. 150, pp. 2017 ,330-304.
- [33] M.-S. Wu, K. Liu, Y.-Y. Wang, and C.-C. Wan, "Heat dissipation design for lithium-ion batteries," *Journal of power sources*, vol. 109, pp. ,166-160 2002.
- [34] Z. Rao, S. Wang, M. Wu, Z. Lin, and F. Li, "Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery with heat pipe," *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp. 2013 ,97-92.
- [35] Z. Rao, S. Wang, and Y. Zhang, "Simulation of heat dissipation with phase change material for cylindrical power battery," *Journal of the Energy Institute*, vol. 85, pp. 2012 ,43-38.
- [36] M. Ramandi, I. Dincer, and G. Naterer, "Heat transfer and thermal management of electric vehicle batteries with phase change materials," *Heat and mass transfer*, vol. 47, pp. 2011 ,788-777.
- [37] X. Duan and G. Naterer, "Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 2010 ,5182-5176.
- [38] X. Py, R. Olives, and S. Mauran, "Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material," *International Journal of heat and mass transfer*, vol. 44, pp. 2001 ,2737-2727.

- [39] S. Lingamneni, M. Asheghi, and K. E. Goodson, "A parametric study of microporous metal matrix-phase change material composite heat spreaders for transient thermal applications," in *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*, 2014 IEEE Intersociety Conference on, 2014, pp. 875-870.
- [40] Z. Ling, J. Chen, X. Fang, Z. Zhang, T. Xu, X. Gao, et al., "Experimental and numerical investigation of the application of phase change materials in a simulative power batteries thermal management system," *Applied Energy*, vol. 121, pp. 113-104 2014 /15/05/2014.
- [41] M. D. Muhammad, O. Badr, and H. Yeung, "Validation of a CFD Melting and Solidification Model for Phase Change in Vertical Cylinders," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 68, pp. 2015 02/09/2015 ,511-501.
- [42] B. J. Jones, D. Sun, S. Krishnan, and S. V. Garimella, "Experimental and numerical study of melting in a cylinder," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, pp. /01/07/2006 ,2738-2724 2006.
- [43] S. Wang, A. Faghri, and T. L. Bergman, "Melting in Cylindrical Enclosures: Numerical Modeling and Heat Transfer Correlations," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 61, pp. ,859-837 2012 01/06/2012.
- [44] G. Lamé and B. Clapeyron, "Mémoire sur la solidification par refroidissement d'un globe liquide," in *Annales Chimie Physique*, 1831, pp. 256-250.
- [45] M. Brillouin, "Sur quelques problèmes non résolus de la Physique Mathématique classique Propagation de la fusion," in *Annales de l'institut Henri Poincaré*, 1930, pp. 308-285.
- [46] J. Stefan, "Über einige probleme der theorie der wärmeleitung," *Sitzer. Wien. Akad. Math. Naturw.*, vol. 98, pp. 1889 ,484-473.
- [47] G. W. Evans, "A note on the existence of a solution to a problem of Stefan," *Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 9, pp. 1951 ,193-185.
- [48] J. Douglas, "A uniqueness theorem for the solution of a Stefan problem," *Proceedings of the American Mathematical Society*, vol. 8, pp. 1957 ,408-402.
- [49] Z. Ma and Y. Zhang, "Solid velocity correction schemes for a temperature transforming model for convection phase change," *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, vol. 16, pp. 2006 ,225-204.
- [50] C. Swaminathan and V. Voller, "On the enthalpy method," *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, vol. 3, pp. -233 1993 ,244.
- [51] V. Voller, M. Cross, and N. Markatos, "An enthalpy method for convection/diffusion phase change," *International journal for numerical methods in engineering*, vol. 24, pp. 1987 ,284-271.
- [52] B. Nedjar, "An enthalpy-based finite element method for nonlinear heat problems involving phase change," *Computers & Structures*, vol. 80, pp. 2002 ,21-9.
- [53] L. Hunter and J. Kuttler, "The enthalpy method for heat conduction problems with moving boundaries," *Journal of Heat Transfer*, vol. 111, pp. 1989 ,242-239.
- [54] M. Amdjadi, B. Fabre, and C. Meynadier, "Résolution unidimensionnelle d'un problème de Stefan par une méthode à pas de temps variable: application à une bille de chliarolithe," *Revue générale de thermique*, vol. 29, pp. 1990 ,134-129.
- [55] e. a. N. s. o. p.-c. p. l. J. H. Bonacina C and M. T. 32-16:1825;1973.
- [56] Y. Cao and A. Faghri, "A numerical analysis of phase-change problems including natural convection," *Journal of Heat Transfer (Transactions of the ASME (American Society of Mechanical Engineers), Series C);(United States)*, vol. ,112 1990.
- [57] K. Morgan, "A numerical analysis of freezing and melting with convection," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 28, pp. 1981 ,284-275.
- [58] M. Yang and W. Tao, "Numerical study of natural convection heat transfer in a cylindrical envelope with internal concentric slotted hollow cylinder," *Numerical Heat Transfer*, vol. 22, pp. ,305-289 1992.
- [59] H. G. Landau, "Heat conduction in a melting solid," *Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 8, pp. -81 1950 ,94.

- [60] J. Crank, "Two methods for the numerical solution of moving-boundary problems in diffusion and heat flow," *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, vol. 10, pp. 231-220 1957.
- [61] J. F. Thompson, "Numerical solution of flow problems using body-fitted coordinate systems," in *In Von Karman Inst. for Fluid Dyn. Computational Fluid Dyn.*, Vol 105 1 p (SEE N,(34-19 28472-79 1978.
- [62] M. Lacroix and V. Voller, "Finite difference solutions of solidification phase change problems: transformed versus fixed grids," *Numerical Heat Transfer*, vol. 17, pp. 1990 ,41-25.
- [63] R. H. Nochetto, M. Paolini, and C. Verdi, "An Adaptive Finite Element Method for Two-Phase Stefan Problems in Two Space Dimensions. II: Implementation and Numerical Experiments," *SIAM journal on scientific and statistical computing*, vol. 12, pp. 1991 ,1244-1207.
- [64] N. Provatas, N. Goldenfeld, and J. Dantzig, "Efficient computation of dendritic microstructures using adaptive mesh refinement," *Physical Review Letters*, vol. 80, p. 1998 ,3308.
- [65] N. Provatas, N. Goldenfeld, and J. Dantzig, "Adaptive mesh refinement computation of solidification microstructures using dynamic data structures," *Journal of computational physics*, vol. 148, pp. 1999 ,290-265.
- [66] M. Ainsworth and J. T. Oden, *A posteriori error estimation in finite element analysis* vol. 37: John Wiley & Sons, 2011.
- [67] J. Mackenzie and M. Robertson, "The numerical solution of one-dimensional phase change problems using an adaptive moving mesh method," *Journal of computational Physics*, vol. 161, pp. 2000 ,557-537.
- [68] J. Mackenzie and M. Robertson, "A moving mesh method for the solution of the one-dimensional phase-field equations," *Journal of Computational Physics*, vol. 181, pp. 2002 ,544-526.
- [69] J. MacKenzie and W. Mekwi, "On the use of moving mesh methods to solve PDEs," 2006.
- [70] <http://www.allcelltech.com>.
- [71] S. A. C. Hallaj, IL), Selman, Jan Robert (Chicago, IL), "Thermal management of battery systems," United States Patent, 2002.
- [72] S. C. Al-hallaj, IL, US), Selman, Jan Robert (Chicago, IL, US), "Battery system thermal management," United States Patent, 2005.
- [73] M. M. A. Farid, NZ), Al-hallaj, Said (Chicago, IL, US), "Microchannel heat exchanger with micro-encapsulated phase change material for high flux cooling," United States Patent, 2012.
- [74] I. S.-R. Kerkamm, DE), "battery thermal management using phase change material," United States Patent, 2014.
- [75] <https://www.milwaukeeetool.com/>.
- [76] J. R. M. Ebner, WI, US), Schulz, Cameron R. (Germantown, WI, US), Thorson, Troy C. (Cedarburg, WI, US), Gehring, Todd M. (Hartland, WI, US), Kolden, Michael (Wauwatosa, WI, US), "BATTERY PACK WITH PHASE CHANGE MATERIAL," United States Patent, 2016.
- [77] <https://www.hyundai.com>.
- [78] J. W. G.-d. Kwak, KR), Song, Kyong Hwa (Seoul, KR), Lee, Han Saem (Gyeonggi-do, KR), Choi, Byung Sam (Gyeonggi-do, KR), Choi, Chi Hoon (Gyeonggi-do, KR), "Battery package filled with phase change material and battery using the same," United States Patent, 2016.
- [79] <https://www.gm.com/>.
- [80] J. L. Yang, CA), Cai, Steven (Macomb, MI, US), "Batteries with phase change materials," United States Patent, 2015.
- [81] <http://global.chervongroup.com/>.
- [82] D. N. Yang, CN), Du, Hao (Nanjing, CN), Shuang, Jianjun (Yuhua District, CN), "Composite phase change material," United States Patent, 2015.
- [83] <http://www.lgchem.com>.
- [84] S. D. Choi, KR), Park, Hong-kyu (Daejeon, KR), "BATTERY SYSTEM CONTAINING PHASE CHANGE MATERIAL-CONTAINING CAPSULES IN INTERIOR CONFIGURATION THEREOF," United States Patent, 2011