·2026中国汽车工程学会年会优秀论文(选登)·

软包半固态电池模组热失控防护策略研究

刘家为　王斌　邱波　柳亮　余琴

（东风汽车集团有限公司汽车具身智能技术湖北省重点实验室，武汉 430056）

【欢迎引用】刘家为，王斌，邱波，等．软包半固态电池模组热失控防护策略研究[J]．汽车文摘，2026(10)：38-43.

【Cite this paper】LIU J W, WANG B, QIU B, et al. Thermal Runaway Protection Strategy for Pouch-Type Semi-Solid Battery Module[J]. Automotive Digest (Chinese), 2026(10): 38-43.

【摘要】为了加速实现固态电池商业化应用，对软包半固态电芯单体及小模块的热失控特性展开研究，相较于传统液态电池，半固态电池在热失控过程中反应更为剧烈，表现为剧烈燃烧并伴随大量高温高压气体及内部活性物质喷发，最高温度超过1 300 ℃。基于此特性，提出了一种集成“定向排气”与“多级隔热”安全设计、并结合高效冷却系统的电池模组方案。该方案有效抑制了电芯热失控后的蔓延，模组层级的定向排气设计显著降低了电池系统热安全设计的复杂度，提升了电池包的热安全可靠性。

关键词：半固态电池；软包电芯；热失控防护；定向排气；相变材料

中图分类号：TM911　　**文献标志码：**A　　**DOI:** 10.19822/j.cnki.1671-6329.20260156

Thermal Runaway Protection Strategy for Pouch-Type Semi-Solid Battery Module

Liu Jiawei, Wang Bin, Qiu Bo, Liu Liang, Yu Qin

(Hubei Key Laboratory of Automotive Embodied Artifical Intelligence Technology, Dongfeng Motor Corporation, Wuhan 430056)

【Abstract】To accelerate the commercial application of solid-state batteries, the paper investigates the thermal runaway characteristics of pouch-type semi-solid battery cells and small modules. The study reveals that compared to conventional liquid electrolyte batteries, semi-solid batteries exhibit more violent reactions during thermal runaway, characterized by intense combustion accompanied by a large amount of high-temperature and high-pressure gas and internal active material ejection, with maximum temperatures exceeding 1 300 ℃. Based on these characteristics, the paper proposes a battery module solution integrating “directional venting” and “multi-level thermal insulation” safety design combined with an efficient cooling system. This solution effectively suppresses the propagation of thermal runaway after cell failure, and the directional venting design at the module level significantly reduces the complexity of thermal safety design for battery systems and enhances the thermal safety reliability of battery packs.

Key words: Semi-solid battery, Pouch cell, Thermal runaway protection, Directional venting, Phase change material

0　引言

在全球能源结构转型与“双碳”战略驱动下，电动汽车与储能产业对高能量密度、高安全性动力电池的需求日益迫切。由于液态电解质体系的内在热不稳定性，传统锂离子电池难以兼顾高能量密度与安全性，易引发热失控。半固态电池通过引入固态电解质组分，显著提升了电池的耐热性与抗滥用能力，同时保留少量液态电解质，确保了较优的电极-电解质界面接触与离子电导率，相较于全固态电池更具近期产业化可行性，已成为下一代电池技术的重要发展方向[1-2]。采用软包封装的半固态电池兼具传统软包电池高能量密度、设计灵活、工艺兼容性好的优点，是当前市场主流的半固态电池形态。

然而，本征热稳定性的提升并未从根本上消除热失控风险。在极端滥用条件下，残余液态电解质与活性材料在高温下仍可能发生副反应，且随着能量密度提升，固态电解质与电极材料在热失控过程中可能产

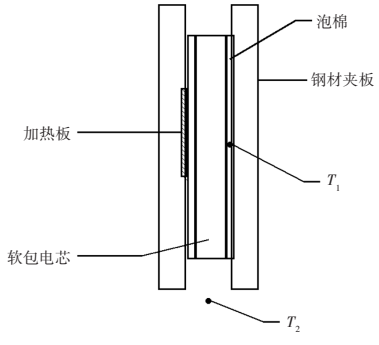
生新的放热分解反应，增加热失效机制的复杂性[3]。此外，软包封装结构在承受热失控内部高压冲击时，其机械完整性面临严峻考验。一旦软包半固态电池模组中发生热失控，其热蔓延特性、产气行为与火焰传播模式可能与液态电池存在显著差异，传统液态电池防护方案不再完全适用[4-5]。因此，系统探究软包半固态电池的热失控演变规律，并据此发展适配的新型多维防护策略，是推动其安全商业化应用的先决条件。

目前，关于电池热安全的研究多集中于传统液态体系，针对软包构型半固态电池的研究尚处于起步阶段[6-7]。本研究基于系统工程视角，深入探究半固态软包电池模组的热失控传播机理与协同防护策略，旨在为高能量密度、高安全性的下一代电池系统提供理论支撑与可行的技术路径。

1　软包电芯单体及小模块热失控特性探究

1.1　软包电芯单体试验方法

本文采用东风自研的半固态软包电芯。试验前先将半固态电池单体进行预处理，用1/3 C恒流充电至截止电压，再恒压充电至100%。如图1所示，通过钢制工装固定软包半固态电芯，在电芯与工装之间设置4 mm泡棉，将平板式加热板贴于电芯一侧中心位置，加热板功率为350 W，同侧粘贴耐高温热电偶。将工装垫高，电芯正对处的地面上粘贴热电偶，用于检测喷射物温度。



(a)单电芯热失控试验方案

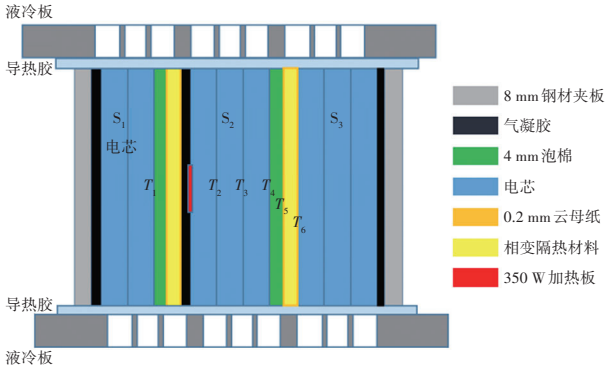


(b)单电芯试验装置

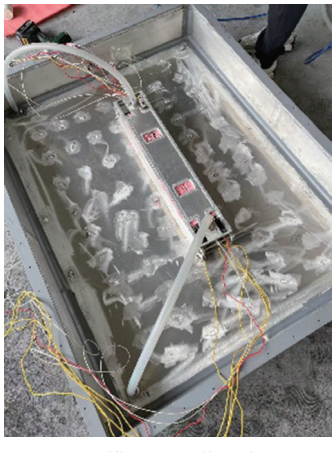
图1　单电芯热失控试验方案与装置

1.2　小模块试验

为模拟电池包中电芯的真实情况，同时验证相变隔热材料的隔离效果并探索最佳厚度，制备了3P3S小模块验证热失控传播机制。如图2所示，小模块由3串电芯组成(S_1、S_2、S_3)，每串电芯由2~3个电芯单体并联。热失控靶电芯为中间S_2串的第一颗电芯(S_{2-1})，加热板功率为350 W。



(a)小模块热失控试验方案



(b)小模块试验装置实物

图2　小模块热失控试验示意

电芯组两侧使用钢制工装固定，并施加一定的预紧力，每串电芯间使用相变隔热材料和泡棉隔开，电芯与工装间用气凝胶隔离避免机械损伤。小模块上下采用液冷板散热，电芯与液冷板间涂覆2 mm厚导热凝胶来保证散热均匀性。热失控发生后通冷却水，上层液冷板设置排气孔以保证排气顺畅。小模块制备完成后放置于热失控箱体中密封。试验过程全程监控每颗电芯的电压，主要考察S_2串热失控后S_3串电芯的状态。

本次探究依次测试了5.5 mm、4.5 mm、3.9 mm、3.5 mm厚度的相变材料对热失控的隔离效果，电芯与物料参数如表1所示。

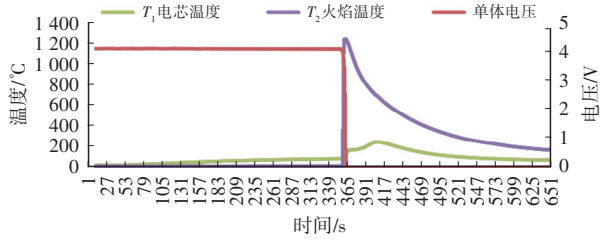
1.3　软包电芯单体试验结果与分析

如图3a所示，接通加热板电源6 min后，触发电芯

热失控，电压迅速下降至0。如图3b所示，电芯中部明显膨胀（未出现白烟），然后剧烈燃烧喷发火焰，火焰高度约1 m，喷发过程持续约30 s。

表1　小模块电芯及相变材料参数

小模块编号	电芯编号	电芯厚度/mm	电芯容量/A·h	相变隔热材料厚度/mm
1	1~8#	9.8±0.1	101.5±0.5	5.5
2	9~16#	9.8±0.1	101.5±0.5	4.5
3	17~24#	9.8±0.1	101.5±0.5	3.9
4	25~32#	9.8±0.1	101.5±0.5	3.5



（a）半固态软包电芯热失控温度曲线



（b）半固态软包电芯热失控现场

图3　半固态软包电芯热失控试验

其中，T_2测点位于电芯正下方，可较为准确地反映喷射物温度，火焰喷发瞬间最高温度达1 258 ℃。燃烧过后电芯完全损坏，底部堆积燃烧后的黑色产物，初步判断为电芯内部导电炭黑及活性物质。从试验过程来看，半固态软包电芯的热失控过程短且反应剧烈，高温高压气体会冲破铝塑膜的束缚向四周喷发。因此，热失控防护的重点在于：（1）抵抗火焰冲击：防止单电芯热失控后喷发的火焰反射或向四周蔓延；（2）隔热：防止热失控产生的高温通过接触介质传递，引发连锁热蔓延；（3）保证排气顺畅：及时疏导内部高压，避免电池包爆炸。

1.4　小模块试验结果

如图4所示，靶电芯$S_{2\text{-}1}$触发热失控后T_2点温度迅速上升，随后$S_{2\text{-}2}$和$S_{2\text{-}3}$电芯依次间隔10 s热失控。

T_3温度测点监测到相变材料热面最高温度仅736 ℃，而T_5相变材料冷面温度升至约95 ℃后平缓下降，表明相变材料在持续发挥作用。触发热失控后立刻接通冷却水，所有温度点均快速下降，表明上下液冷板对整个模块快速降温同样具有重要作用。

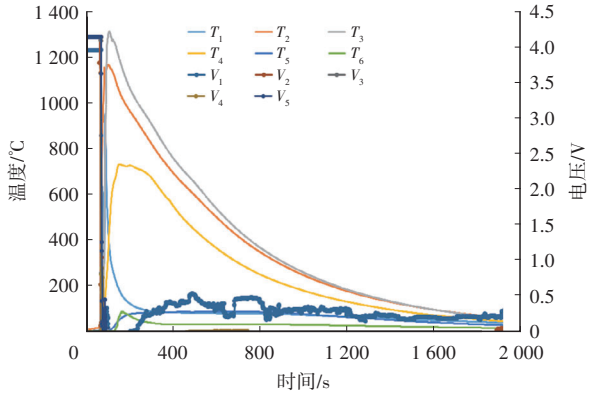


图4　5.5 mm相变材料小模块热失控温度曲线

热失控触发后，热失控箱体上盖明显鼓胀，同时箱子上4个防爆阀开启，向外排气。如图5所示，将试验装置及工装拆除，箱体内残留了大量的喷发物，小模块整体结构完整，S_3串电芯完好无损，表明上层液冷板预留的排气孔对电芯排气具有导向作用。



（a）小模块拆解前　　（b）小模块拆解后

图5　小模块试验后拆解过程

不同厚度相变材料对热失控防护的效果如表2所示，3.5 mm的相变材料未能抵抗热蔓延，整个小模块全部烧毁。厚度大于3.8 mm的相变材料可以有效隔离热失控。

表2　不同厚度相变材料隔热效果

小模块编号	相变材料厚度/mm	热失控结果
1	5.5	通过
2	4.5	通过
3	3.8	通过
4	3.5	不通过

2　软包半固态电池模组热失控防护方案

2.1　模组结构设计方案

本方案设计了一种高度集成、多层防护的紧凑型结构模组，核心是3P22S的电芯模块，其结构爆炸图如图6所示。

设计要点包括：（1）隔热屏障：每个电芯小模块

由3颗电芯、泡棉、相变材料和散热铝板组成。相变材料材料起主要防火隔热作用。(2)高效散热:散热铝片位于电芯之间,通过高导热系数的导热结构胶与顶部液冷板连接,实现高效散热。(3)定向排气:模组框架由铝端板和铝合金上下盖板构成。通过极耳两侧及上部灌胶,并在模组下盖板设置排气孔,实现模组底部定向喷发。为防止火焰回弹,模组底部采用低密度耐高温发泡胶填充排气孔(图7),既保证绝缘,又能被高压气体冲开泄压。(4)结构密封与绝缘:电芯极耳处采用聚碳酸酯片加聚氨酯发泡胶密封,确保结构轻量化和绝缘。

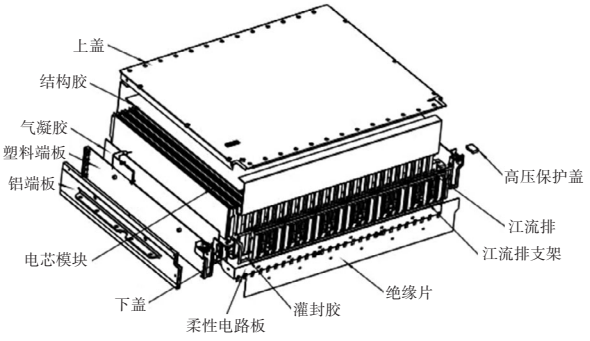
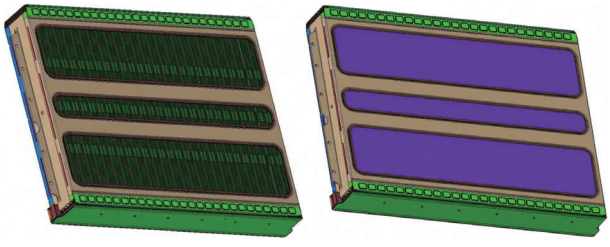


图6　3P22S软包半固态电池模组



(a)灌胶前模型　　(b)灌胶后模型

图7　软包半固态电池模组底部模型

2.2　模组仿真分析

通过仿真验证模组设计的可靠性与有效性。

(1)结构仿真:对模组进行随机振动、膨胀力、机械冲击仿真,结果如表3所示。模组一阶模态83.1 Hz,满足刚度要求。所有关键部件应力及脱胶面积均满足设计阈值,结构设计合格。

(2)热管理仿真:如图8所示,基于顶面液冷模型进行仿真。在常温25 ℃、1 C充电(30%~80%)、冷却水温18 ℃、流量20 L/min工况下,模组最高温度为44.9 ℃(底部),最低温度为37.6 ℃(顶部),满足最高温度<50 ℃、最大温差<8 ℃要求。电芯截面温度显示,热量被有效导向顶部液冷板,极耳处温度最高,证明散热设计有效。

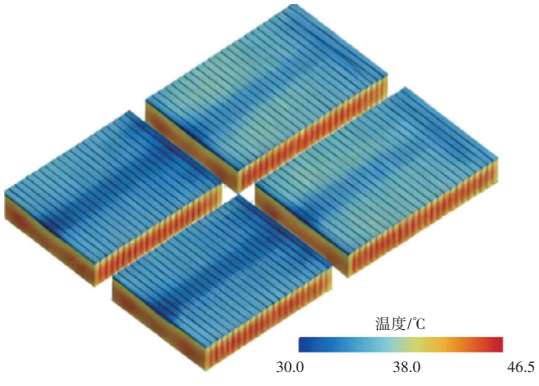
仿真结果表明,本模组方案实现了机械支撑、高效散热和安全性的平衡。

表3　结构仿真结果

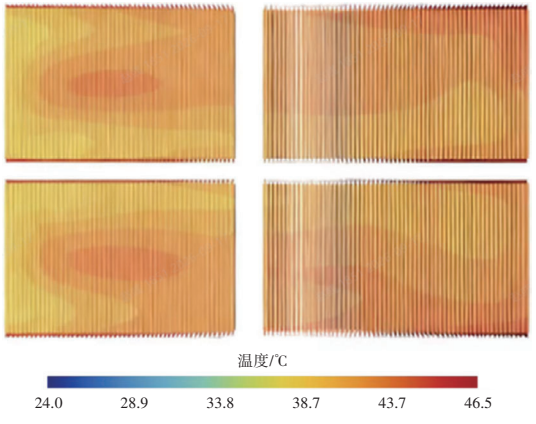
仿真项	零件名称	阈值	RMS最大值	结论
随机振动Z向	模组上盖	130 MPa	12.7 MPa	合格
	模组下盖	130 MPa	9.0 MPa	合格
	模组铝端板	190 MPa	61.5 MPa	合格
	汇流排支架	18 MPa	0.2 MPa	合格
	导热结构胶	脱胶面<10%	未脱胶	合格
膨胀力仿真	模组上盖	130 MPa	43.6 MPa	合格
	模组下盖	130 MPa	72.2 MPa	合格
	模组铝端板	190 MPa	177.0 MPa	合格
	汇流排支架	18 MPa	2.2 MPa	合格
	导热结构胶	脱胶面<10%	脱胶面8.9%	合格
机械冲击仿真	模组上盖	130 MPa	93.2 MPa	合格
	模组下盖	130 MPa	64.5 MPa	合格
	模组铝端板	190 MPa	105.1 MPa	合格
	汇流排支架	18 MPa	2.3 MPa	合格
	导热结构胶	脱胶面<10%	未脱胶	合格

2.3　模组热失控试验及分析

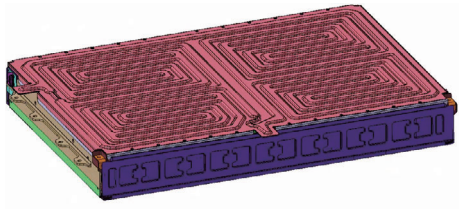
模组热失控试验方案如图9所示,以中间第12串的第一颗电芯S_{12-1}为靶电芯,采用600 W加热板。模组置于热失控箱体内,箱体预留12 mm高排气通道连接模组排气孔与防爆阀,以验证底部定向排气。



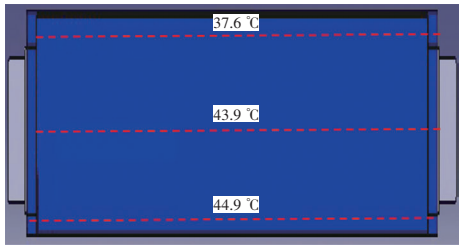
(a)模组快充时温度



(b)中部截面温度分布

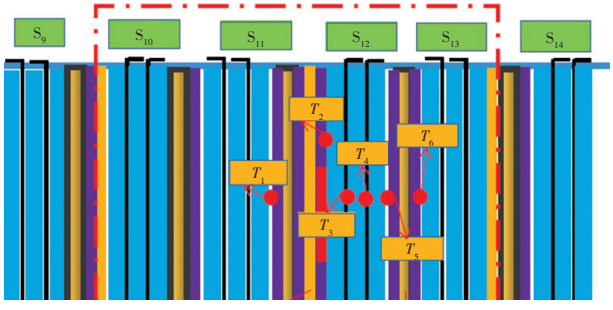


(c)液冷板流道

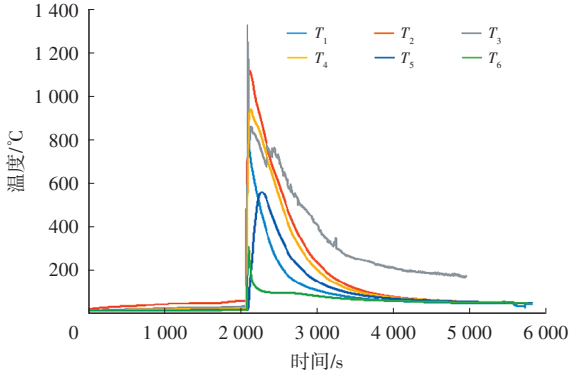


(d)电芯温度分布

图8　热管理仿真结果



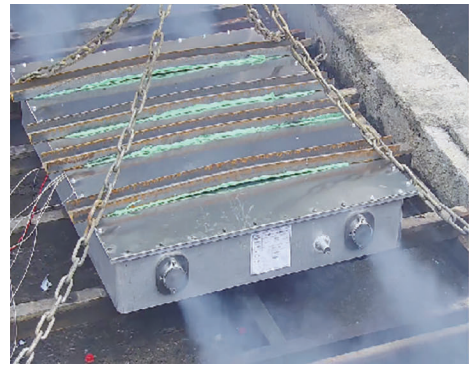
(a)热失控温度采样点布置方案



(b)热失控温度曲线

图9　模组热失控试验方案及结果

试验结果显示，热失控触发后模组温度陡然上升，T_2/T_3最高温度达到1 327 ℃，持续时间<1 s。水冷开启5 min后温度降至500 ℃左右，30 min后降至100 ℃左右。T_6点最高温度95 ℃，S_{13}串电芯未被触发，热失控得到控制。但T_1温度最高达到1 100 ℃，表明S_{11}串电芯被引发热失控。从拆解结果分析S_{11}串电芯表面的发泡胶存在脱落现象，原因可能是S_{12}串喷发气体将S_{11}串表面的阻燃胶掀开，火焰反射引发S_{11}串电芯热失控。S_{13}串电芯侧发泡胶非常完整，热失控未向S_{13}串电芯侧蔓延。图10为试验过程及试验后模组。



(a)热失控触发瞬间



(b)热失控后模组底部烧蚀情况

图10　试验过程及试验后模组

试验过程表明，热失控后箱体4个防爆阀同时开启，该模组方案顺利实现了底部定向排气。最终，热失控在2串电芯烧蚀后停止，防护基本达到预期效果，本方案能有效抑制软包半固态电池热失控蔓延。

3　结束语

本文对软包半固态电芯单体及小模块热失控特性进行了探究，研究结果表明：半固态电芯热失控过程短且反应非常剧烈，热失控瞬间温度高于1 300 ℃，伴随高温高压气体和火焰喷射；与方壳电芯相比，软包半固态电池没有泄压阀装置，热失控泄压方向不固定；针对本文研究的半固态软包电池，3.8 mm厚度以上的相变材料可以有效地隔离热失控；主动热管理策略如水冷可以有效降低模块温度，避免阴燃现象发生。综上所述，软包半固态电池热失控防护的重难点主要集中在短时间内高温火焰隔离、排气泄压方向可控、主动降温等方面。

针对软包半固态电芯热失控特性，本文设计了一种高集成、高效散热和定向排气多维一体的电池模组，有效的防止了电池热失控蔓延。通过PCM相变材料构建了高效的物理隔热屏障，结合模组三面封堵和下盖排气孔设计，为高温高压气体预设排放路径，在模组层级实现了软包电池的定向喷发，有效

提升了模组的热失控防护能力，同时也降低了电池系统层级热安全设计难度。将散热铝板集成于电芯模块，通过高性能导热结构胶与液冷板连接，实现了低热阻、高效率的散热效果。但随着电池模组和系统对成组效率的极致追求，需要探索开发更加轻薄的隔热材料，在保证热安全的同时进一步提升系统性能。

参 考 文 献

[1] 欧阳明高, 冯旭宁, 卢兰光. 车用锂离子动力电池热失控与安全防控[J]. 机械工程学报, 2019, 55(14): 1-12.

[2] 冯旭宁, 欧阳明高, 卢兰光, 等. 锂离子电池热失控特性与防控技术研究进展[J]. 科学通报, 2020, 65(10): 885-896.

[3] 王青松, 张慧, 孙金华. 锂离子电池热失控及其火灾危险性[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(5): 513-521.

[4] 郭玉国, 张涛, 辛森, 等. 面向规模化储能的高安全性固态锂电池研究进展[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(1): 1-15.

[5] 李泓, 许晓雄. 固态锂电池的研究现状与挑战[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(1): 1-12.

[6] 罗巍, 郑超, 周权, 等. 高能量密度半固态锂金属电池的界面调控与性能研究[J]. 电化学, 2022, 28(1): 1-12.

[7] 张明轩, 王莉, 何向明. 锂离子电池热失控传播及阻隔技术研究进展[J]. 化工学报, 2022, 73(1): 1-15.

（责任编辑 **梵玲**）

《汽车工艺与材料》投稿须知

《汽车工艺与材料》于1986年创刊，是由中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车材料与制造技术类月刊，目前已入选《中文核心期刊要目总览》（第二版）、RCCSE中国准核心学术期刊（B+）、中国核心期刊（遴选）数据库、中国学术期刊综合评价数据库、欧洲学术出版中心数据库（EuroPub）、哥白尼精选期刊数据库（ICI Journals Master List）、EBSCO International数据库、J-Gate数据库。

《汽车工艺与材料》以“为中国报道汽车制造，为汽车引领工艺材料”为办刊宗旨，致力于报道以汽车轻量化技术和智能制造技术为核心的先进制造技术与材料应用技术，重点关注电动汽车蓄电池、电机、电控关键材料技术，燃料电池材料技术，高强度钢、铝镁合金、非金属材料及其成形技术，连接技术，智能装备与绿色制造等，以期通过高质量学术内容的出版和传播助推行业创新技术的交流与发展。

《汽车工艺与材料》杂志关注领先的整车及零部件企业和材料、装备等供应商，及时报道汽车行业最新的产品设计、制造、材料、加工技术、生产装备、检测技术等方面的成功案例。

主要栏目：

AT&M视界、生产现场、材料应用、生产装备、检测技术、数字化园地、行业动态等。

投稿要求：

（1）来稿须具有独创性并与实践相结合，文章字数最好控制在5 000～8 000字。

（2）来稿不能在国内、外公开杂志上发表过，请勿一稿多投。

（3）来稿的试验方法、试验数据、试验结论必须准确、可靠。

（4）来稿须包括以下项目：题名、作者姓名、作者单位、摘要（200字左右）、参考文献等。来稿采用word文档的格式。

（5）来稿文章格式应符合一般科技论文格式，或参考近期本刊所刊登文章格式。

（6）文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献，且在文中应标注文献引用处。

（7）本刊使用网站投稿，投稿网址：http://qcgyycl.cbpt.cnki.net，咨询电话：0431-82026054。

竭诚欢迎汽车行业及相关各界的专家学者积极向本刊投稿。