

动力电池组汇流排热电耦合 数值计算与实验研究*

余剑武^{1,2}, 范光辉^{1,2†}, 罗红², 李鑫², 张亚飞¹

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:以某电动汽车动力电池模组汇流排为研究对象,提取汇流排的三维数模、工况边界条件以及与电池单体的连接关系,采用热电耦合数值计算方法研究电流大小、对流换热系数以及焊接工艺对汇流排温升的影响规律.为保证数值计算的准确性,采用动力电池组综合测试系统对指定的不同工况进行温升试验测试,试验测试工况条件与数值计算中的边界设置保持一致.研究表明,网格离散、边界条件、电流大小、对流换热系数以及极耳焊接工艺都会对汇流排的温升产生不同程度的影响.针对个别工况下数值计算与试验测试结果误差较大的情况,详细分析误差产生的原因,深入研究因素之间的关联性以及对误差的影响规律,进而对数值计算模型进行修正.最后,设定新工况再次对汇流排进行数值计算和试验测试,运用因素的关联性和对误差的影响规律,数值计算与试验测试结果的误差不超过3.7%.

关键词:动力电池;因素关联性;焊接工艺;温升;热电耦合

中图分类号:TH132.47

文献标志码:A

Numerical Calculation and Experimental Research on Thermoelectric Coupling of Power Battery Module Bus-bars

YU Jianwu^{1,2}, FAN Guanghui^{1,2†}, LUO Hong², LI Xin², ZHANG Yafei¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Taking the battery module bus-bars of an electric vehicle as the research object, the 3D digital of bus-bar, working boundary conditions, connection relationships between bus-bar and battery cells were extracted. The influence rules of current size, convective heat transfer coefficient and pole welding process on the temperature of bus-bar were studied by numerical method of thermoelectric coupling. In order to ensure the accuracy of the numerical calculation, the dynamic battery pack test system was used to investigate the temperature variance of the specified working condition. The test condition was consistent with the boundary setting in the numerical calculation. The results show that the grid partition, boundary condition, current size, convective heat transfer coefficient and pole welding process have different effects on the temperature rise of the bus-bar. As the error between the numerical calculation and test result oc-

* 收稿日期:2017-07-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275165,51575174), National Natural Science Foundation of China(51275165,51575174)

作者简介:余剑武(1968-),男,湖南冷水江人,湖南大学 教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail:79022719@qq.com

curs in some working conditions, the reason was analyzed in detail. The correlation between the factors and the influence law of the error were also further studied, and then the numerical calculation model was modified. Finally, under the new working conditions, the numerical calculation and experimental measurements of bus-bar were carried out. Through using factor association and the influence rule on the error, the error between numerical calculation and experimental measurement was within 3.7%.

Key words: power battery; factor association; welding process; temperature rising; thermo-electric coupling

随着电动汽车行业的迅猛发展,续航里程和动力性能对动力电池系统的比容量、比能量、不同倍率下的充放电性能稳定安全可靠性的要求更高^[1]. 电池单体电压电流较小,为满足充放电电流的需求,要对电池单体进行并联连接;提高动力电池组的供电电压,需对电池单体进行串联连接^[2-4]. 作为电池单体串并联的重要连接部件,汇流排在大电流作用下温度会急剧上升,有严重的安全隐患. 此外,设计不良的汇流排会引起并联电池单体电流分配的不均衡^[5-6]. 电池单体充放电电流的不均匀性不仅严重降低整个动力电池系统的容量和能量,长期使用还会降低电池单体的使用寿命. 电池单体充放电的均衡性影响整个动力电池系统的寿命、安全性等^[7-9].

目前国内外关于汇流排温升的文献还不多,设计优良的汇流排不仅可以降低汇流排的温升、提高电池能量的利用率,还可以显著改善电池单体充放电电流的均衡性^[10-12]. 研究表明,铝排形状和电流进出口会影响电流的均匀性和汇流排温升^[13-16]. 汇流排的汇流特性通常采用实验测试和数值计算两种方法来评估. 实验测试具有结果可靠、可操作性强的优点;但实验测试过程复杂、周期长. 另外,测试设备成本高,而且现有设备几乎无法测试超大电流工况. 数值计算基于传热学、电学、流体力学、多物理场耦合等理论采用有限元方法对汇流排的温度场分布、电流分布以及发热点进行物理场求解. 数值计算具有开发周期短、设计灵活、便于重复设计、成本低廉等优点^[17-19]. 实验测试的试验工况点十分有限,过多的实验工况点会大大提高测试成本,而数值计算方法可以在几乎不增加成本的前提下任意增加测试工况点;数值计算方法理论上可以计算无限大电流的工况,这是实验测试无法实现的.

然而对动力电池组汇流排汇流特性的评估,热电耦合数值计算结果常与实验测试结果存在误差. 某些工况下甚至因计算误差较大而失去评估指导的意义. 本文基于热电耦合计算和实验测量存在误差的现象,对汇流排热电耦合计算中误差产生的因素进行研究和分析. 首先以某电动汽车动力电池模组为研究对象,采用动力电池组综合测试系统对指定

的不同工况进行温升实验测试,着重考察电池组汇流连接排的温升变化;其次提取汇流排的三维模型、工况边界条件以及与电池单体的连接关系,对模型简化处理后进行热电耦合数值计算,计算工况的设定与实验测试工况完全一致;然后对实验测试结果和数值计算结果进行对比,分析误差产生的原因.

1 热电耦合数值计算

1.1 热电耦合数值计算本构方程

热电耦合数值计算方法是基于传热学、电学相关定理采用有限元方法,对传热学电学偏微分本构方程进行数值求解的过程. 采用这种方法可以定量计算出导体热效应引起的温度场和电子流动产生的电场,为工程设计提供有力的参考. 本文动力电池组热电耦合分析的本构方程为:

$$\mathbf{q} = \mathbf{\Pi} \mathbf{J} - \mathbf{K} \nabla T \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = \boldsymbol{\sigma} (\mathbf{E} - \boldsymbol{\alpha} \nabla T) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{\Pi}$ 为珀耳帖效应系数矩阵; $\boldsymbol{\alpha}$ 为塞贝克系数矩阵; \mathbf{q} 为热通量矢量; \mathbf{J} 为电流密度矢量; \mathbf{K} 为电流为零时材料热的传导系数矩阵; ∇T 为温度梯度; $\boldsymbol{\sigma}$ 为材料在零温度梯度下材料的导电率矩阵; \mathbf{E} 为电场.

此外

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{zz} \end{bmatrix}$$

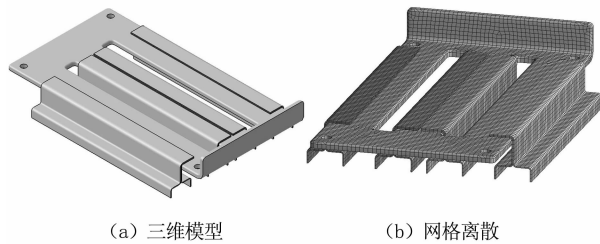
$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\rho_{xx}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\rho_{yy}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\rho_{zz}} \end{bmatrix}$$

式中: $\alpha_{xx}, \alpha_{yy}, \alpha_{zz}$ 为塞贝克系数; K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} 为材料的热传导系数; $\rho_{xx}, \rho_{yy}, \rho_{zz}$ 为材料的电导率.

1.2 模型建立及网格离散分析

本文采用 Catia 对汇流排进行了三维建模,在 Ansys 中进行三维离散以及热电耦合数值计算,三维模型和计算域的离散如图 1 所示. 汇流排通过与电池单体正负极耳的焊接实现电池单体的串并联连接关系. 计算域三维离散的主要目的是把复杂的偏微分方程转化为代数方程,从而实现温度场、电场的精确计算.



(a) 三维模型

(b) 网格离散

图 1 汇流排三维模型以及网格离散

Fig. 1 Bus bar 3D model and grid dispersion

网格离散对温升的影响主要考察网格尺寸对温升的影响. 在分析中,汇流排模型的网格尺寸从小到大依次为 0.2 mm、0.4 mm、0.8 mm、1.6 mm、2 mm、4 mm,网格数量如表 1 所示.

电流采用单侧进入单侧输出的方式,大小 400 A(即每个进口电流 100 A). 实际所测动力电池组的汇流排材料为 6061 系铝,其材料特性如表 2.

表 1 网格设置
Tab. 1 Grid setup

工况序号	网格尺寸/mm	网格数量/万
01	0.2	571.32
02	0.4	71.52
03	0.8	8.93
04	1.6	1.12
05	2	0.59
06	4	0.07

表 2 铝材料物理性质
Tab. 2 Physical properties of aluminum 6061

物理性质	参数
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 704
热导系数/[$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]	238
比热容/[$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]	951
电导率/($\Omega \cdot \text{m}$)	2.83E-08

图 2 为网格离散对汇流排温升的影响,随着网格尺寸的减小,汇流排温升趋于稳定. 网格尺寸小于 2 mm,温升波动锁定在 3% 范围内,超过 4 mm,计算误差将会超过 8%. 为兼顾计算的准确性和效率,本文后续计算工况网格尺寸均为 0.8 mm.

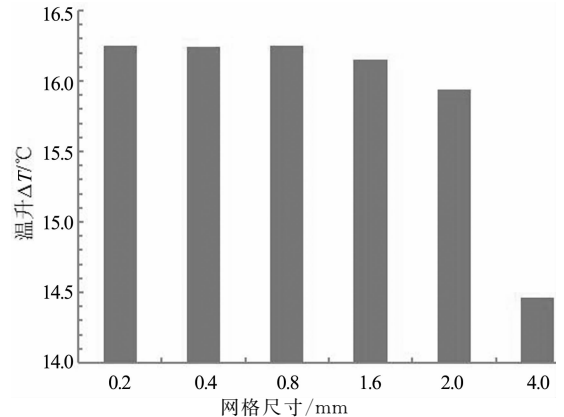


图 2 网格离散对汇流排温升的影响

Fig. 2 Influence of grid dispersion on the temperature rise of confluence

2 热电耦合数值计算工况设计

根据试验工况和经验可知,电流大小、进出口边界条件、对流换热系数和极耳焊接工艺都会对汇流排温升产生较大影响. 因此,热电耦合数值计算主要是模拟电流大小分别为 120 A、240 A、360 A、400 A 下汇流排的温升情况. 为分析汇流排温升中热电耦合数值计算误差产生的原因,本文从进出口边界条件、对流换热系数两个方面对工况进行了设计.

2.1 进出口边界设置

电流的进出口边界主要反映电流在汇流排所连接的极耳上的进出情况,在数值模拟中也是较难捕捉的边界设置. 为研究电流进出口边界对汇流排温升的影响,电流进口采用单侧进入、双侧进入、截面进入、双侧截面进入 4 种方式,表 3 为进出口边界工况设计详细参数.

表 3 进出口边界工况设计

Tab. 3 Boundary case design of inlet and outlet boundary

工况序号	进口因素(单侧出)	出口因素(单侧进)	电流/A	网格尺寸/mm	换热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	壁面温度/ $^\circ\text{C}$
01	单侧进	单侧出	400	0.8	5	25
02	双侧进	双侧出	400	0.8	5	25
03	截面进	截面出	400	0.8	5	25
04	双侧+截面进	双侧截面出	400	0.8	5	25

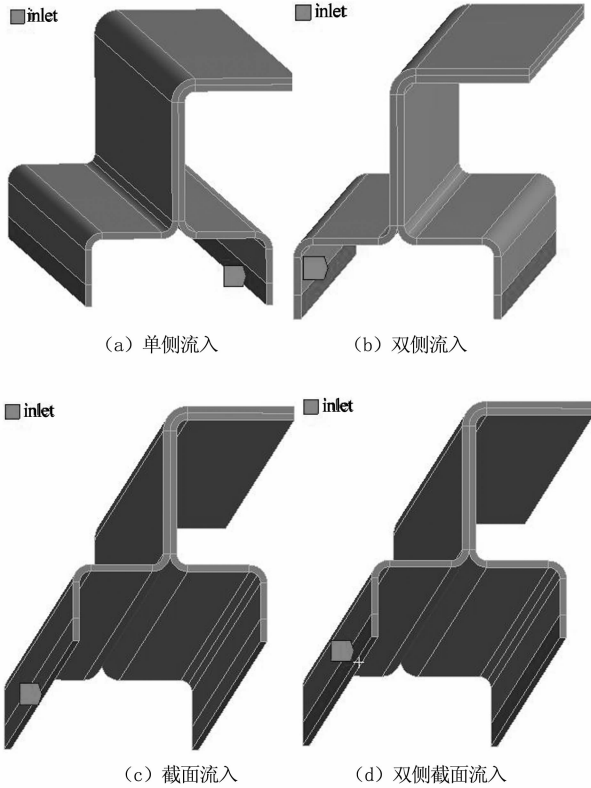


图3 进出口边界条件

Fig. 3 Inlet and outlet boundary condition

电流出口为零电位点,同样采取单侧流出、双侧流出、截面流出、双侧截面流出4种方式,其流入流出如图3所示.为了揭示进出口边界的影响规律,在考察入口边界的影响时,保持出口为单侧流出边界设定不变.同理,在考察出口边界的影响时,保持进口为单侧流入边界设定不变.

2.2 对流换热系数设置

对流换热系数受流体黏度、密度、导热系数、比热容、流动状态、几何结构等因素的影响较大.在分析中,为了探究对流换热系数对热电耦合数值计算温升的影响,进一步校准数值计算的数学模型,对流换热系数的工作设计如表4所示.

表4 对流换热系数工况设计

Tab. 4 Case design of convective heat transfer coefficient

工况序号	对流换热系数 /($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	壁面流体温度 /°C
01	1	25
02	3	25
03	5	25
04	7	25
05	9	25
06	11	25
07	13	25
08	15	25

2.3 极耳焊接工艺设置

在模组内部,电芯之间的串并联连接是通过焊接工艺将极耳与汇流排固定在一起,焊接工艺对汇流排的温升也会产生一定影响.如图4所示,汇流排连接先四并再串联的八个电池单体.由于焊接位置和焊接深度限制,八个极耳中两个极耳共用一条焊缝.焊接工艺主要控制焊缝位置和宽度,进而影响电流在汇流排的出入口位置以及出入口截面积.

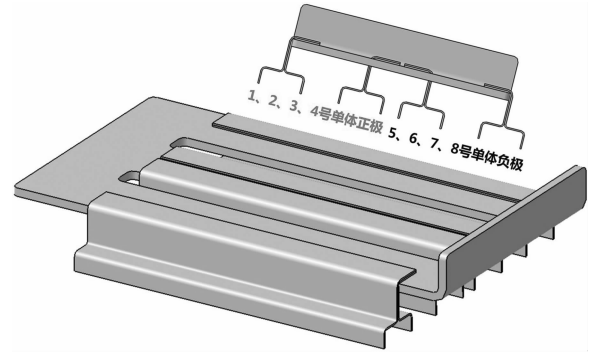


图4 汇流排与极耳连接示意图

Fig. 4 Schematic diagram of bus bar and lead connection

图5为焊接工艺控制示意图,焊接工艺的控制只需改变焊缝宽度和位置即可实现.焊缝宽度以矩形长条的宽度来定义.焊缝宽度分别设置为1 mm(标准工况)、1.5 mm、2 mm、2.5 mm、3 mm.焊缝位置通过图5中黑色线段的长度来控制.焊缝位置分别设置为1 mm、2 mm、3 mm(标准工况)、4 mm、5 mm,数值模拟标准工况设置如表5所示.

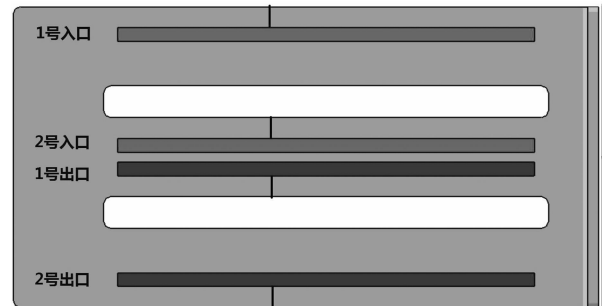


图5 焊接工艺控制示意图

Fig. 5 Welding process control schematic

表5 标准工况参数设置

Tab. 5 Parameter setup of standard case

标准工况	参数设置	标准工况	参数设置
汇流排厚度	1.5 mm	电流大小	400 A
焊缝位置	3 mm	环境温度	25 °C
焊缝尺寸	60 mm · 1 mm	换热方式	自然对流

3 数值计算结果与分析

3.1 进出口边界条件对汇流排温升的影响分析

图 6 为电流进口边界对温升的影响,图 7 为电流出口边界对温升的影响. 分析结果表明,截面流入流出方式温升最大. 电子流在极耳区域大规模汇聚,无论两侧还是极耳截面处都出现大规模电子流汇聚现象. 从整体来看,进出口边界条件对温升影响不大,温升波动范围在 3% 以内,主要原因是极耳内阻在 1 mΩ 以下,小电流下的热效应不明显. 根据电芯制造工艺,一般来说选择单侧流入流出方式即可满足计算精度要求.

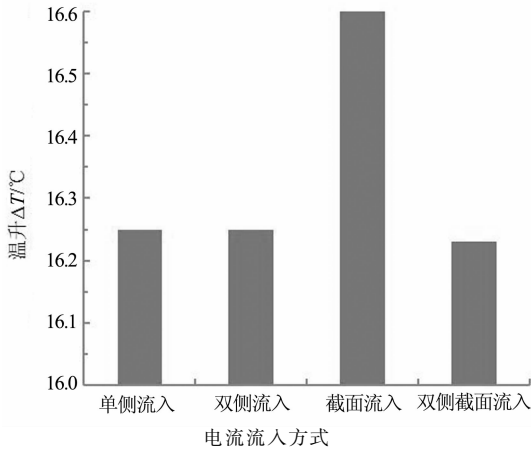


图 6 电流进口边界对温升的影响
Fig. 6 Influence of current inlet boundary on the temperature rising in bus-bars

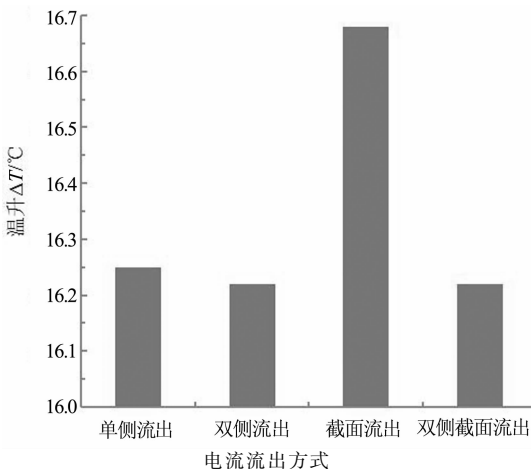


图 7 电流出口边界对温升的影响
Fig. 7 Influence of current outlet boundary on the temperature rising in bus-bars

3.2 对流换热系数对汇流排温升的影响分析

图 8 为对流换热系数对汇流排温升的影响,随着热交换系数的减小,汇流排温升急剧上升. 对流换

热系数对热电耦合数值计算的影响十分敏感,这一参数也是造成热电耦合数值计算结果与实验结果误差的主要因素. 在对标实验工况的热电耦合数值计算中,对流换热系数均设置为 $5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

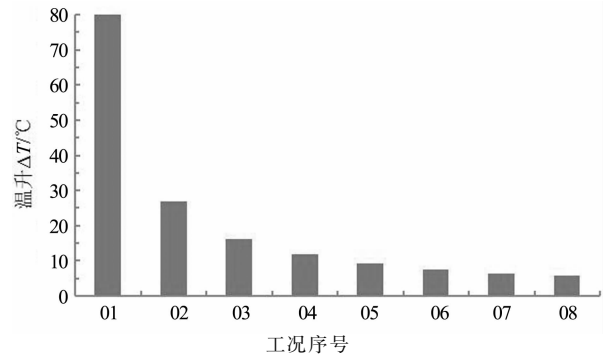


图 8 对流换热系数对汇流排温升变化的影响
Fig. 8 Influence of convective heat transfer coefficient on the temperature rising in bus-bars

3.3 极耳焊接工艺对汇流排温升的影响分析

图 9 为极耳焊接工艺对汇流排温升的影响,(a) 为焊接宽度对汇流排温升的影响,(b) 为焊接位置对汇流排温升的影响. 随着焊缝宽度的增加,汇流排温升呈上升趋势,随着焊缝趋近中心位置,汇流排温升呈现下降趋势.

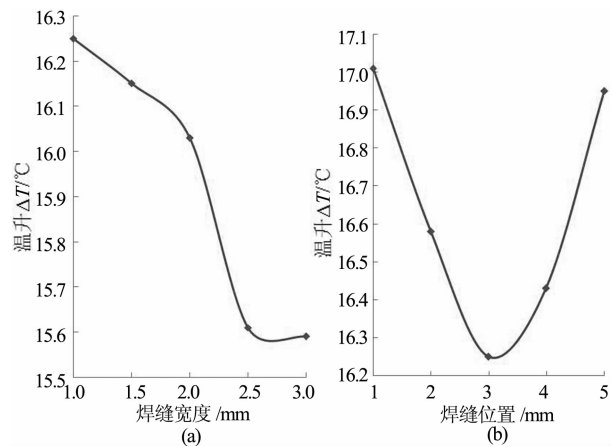


图 9 极耳焊接工艺对汇流排温升的影响
Fig. 9 Influence of lead welding process on the temperature rising in bus-bars

4 实验设备与工况

4.1 实验设备

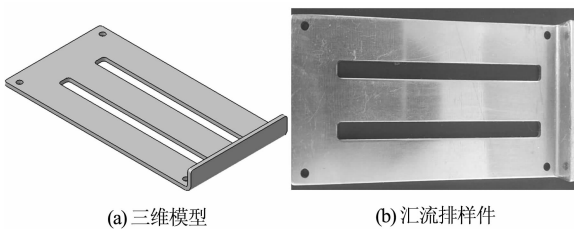
本文采用动力电池组综合测试系统对电池模组进行实验测试,动力电池组综合测试系统如图 10 (a) 所示. 图 10(b) 中的红外热像仪是用来捕捉某一区域表面的温度场,对温度测试点进一步从侧面验证,汇流排三维模型与实物图如图 11 所示.



(a) 电池组测试系统 (b) 红外热像仪

图 10 测试设备

Fig. 10 Test equipment



(a) 三维模型 (b) 汇流排样件

图 11 汇流排三维模型及实物

Fig. 11 Bus bar 3D model and grid entity

采用实验方法评估动力电池组的汇流特性,主要测试不同放电倍率下汇流排处的温升变化.测试模组如图 12 所示,容量为 120 Ah,其中 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 为温度测试点. T_1 、 T_6 为模组总正总负汇流排温度测试点, T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 则为本文重点观测的温度测试点,该区域的汇流排结构形状和装配关系是完全一样的.同时检测四处汇流排的温升变化,主要是为了验证实验结果的一致性和准确性.其余的为电压检测点,与本文研究内容关系不大,此处不再赘述.

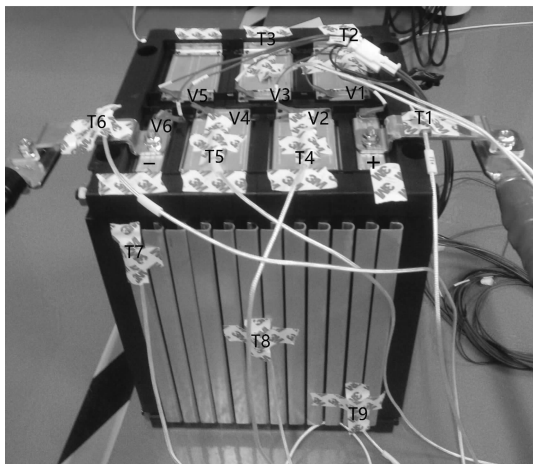


图 12 测试模组温度监测点

Fig. 12 Testing module temperature monitoring point

4.2 测试流程

为了测试不同电流下汇流排的温度变化,务必保持电流大小恒定.由于电池组测试系统功能局限性,只能恒流充电、不能恒流放电,故实验测试工况设置如图 13,实验主要考察 120 A、240 A、360 A、400 A 电流下汇流排的温升.

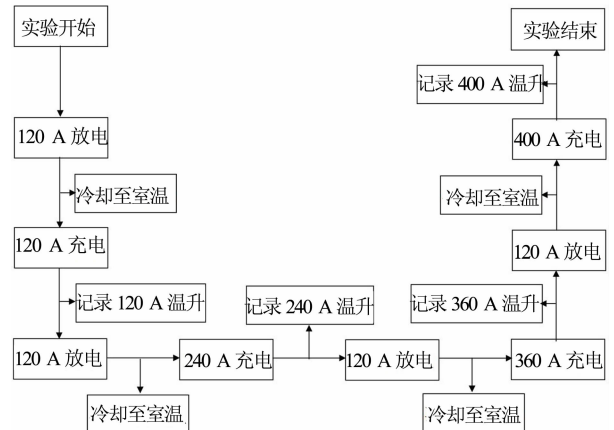


图 13 实验流程图

Fig. 13 Experimental flow chart

5 实验结果对比与误差分析

5.1 实验结果对比

图 14 为数值计算温升与实验测试温升对比情况,数值计算网格尺寸仍为 0.8 mm,采用单侧流入单侧流出的电流进出方式,对流换热系数为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.由图 14 可知,无论那种电流工况,数值计算和实验均存在不同程度的误差且表现出明显的规律性.随着电流不断增加,数值计算温升的增幅较大,从而导致数值计算超越实验结果的幅度就增大.在 120 A 电流作用下,数值计算比实验温升还略低,240 A 时比实验温升稍高.当电流达到 360 A、400 A 的时候,计算结果明显偏高,误差不断增大.

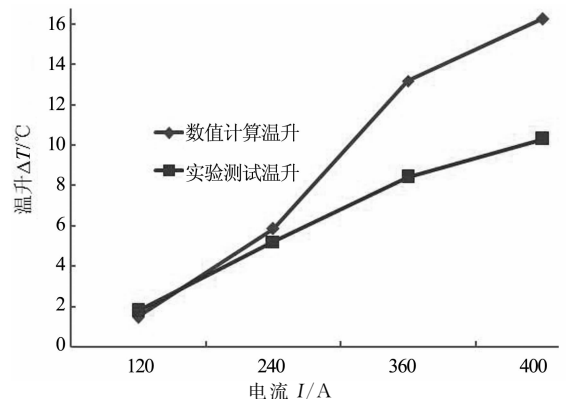


图 14 数值计算温升与实验测试温升对比图

Fig. 14 Comparison of temperature rising between numerical calculation and experiment test before correction

5.2 误差分析与修正

根据流体力学、传热学以及前文对影响数值计算结果的因素分析可知,由于数值计算的对流换热系数均设定为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,而周围空气流动状态随温度变化影响较大,周围空气的流动状态又会显著影响对流换热系数.低温状态下,空气流动缓慢,对流换热系数可能小于 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.高温下空气流动加剧,对流换热系数可能大于 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.因此,所用的工况采用同一个对流换热系数将会引起计算误差.根据测试的温升结果,对不同电流下的对流换热系数进行修正,重新进行数值计算,图 15 为数值计算温升与实验测试温升对比图,修正后的数值计算结果与实验结果得到很好的吻合.

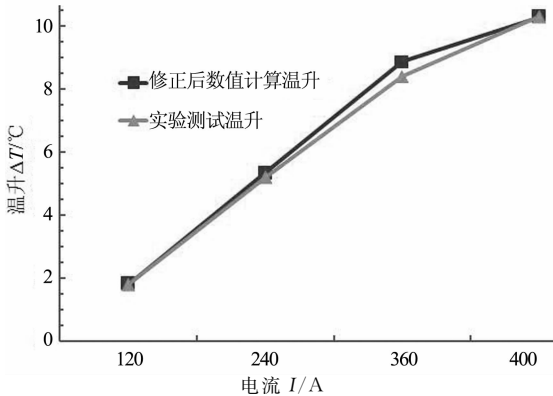


图 15 修正后数值计算温升与实验测试温升对比图
Fig. 15 Temperature rise comparison chart between the numerical calculation and experiment test after correction

由 3.2 节图 8 分析可知,400 A 电流作用下,对流换热系数为 $7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,温升为 $11.7 \text{ }^\circ\text{C}$;对流换热系数为 $9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,温升为 $9.2 \text{ }^\circ\text{C}$.400 A 工况下实验测试温升为 $10.2 \text{ }^\circ\text{C}$,推断可知该实验工况的对流换热系数约为 $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.采用此种单一变量法,对其他电流工况的对流换热系数进行修正,修正前后对比如表 6 所示.该方法可以为热边界条件提供较为精确的预测,从而提高数值计算的准确性和有效性.

表 6 对流换热系数修正

Tab. 6 Correction of convective heat transfer coefficient

I/A	对流换热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$		温升/ $^\circ\text{C}$	
	修正前	修正后	修正前	修正后
120	5	4.0	1.47	1.82
240	5	5.5	5.85	5.33
360	5	7.5	13.17	8.87
400	5	8.0	16.25	10.29

5.3 新工况计算与实验对比

为了进一步验证对流换热系数与电流工况数据

拟合的准确性,设定电流工况为 256 A,此时的对流换热系数约为 $5.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.图 16 为数值计算与热像仪测量结果对比图,数值计算与实验测量结果得到较好的吻合.

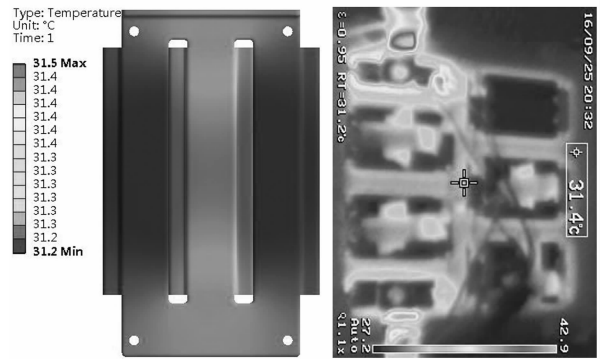


图 16 数值计算与热像仪测量结果对比
Fig. 16 Comparison of temperature between the numerical calculation and experiment test

6 结论

1) 网格离散、进出口边界条件对热电耦合计算和实验结果之间的误差影响不显著,而对流换热系数对误差的产生具有显著的影响.极耳焊接在保证一定焊接宽度的同时,确保焊缝处于中心位置.

2) 对流换热系数与电流大小具有相互耦合的关系,电流在 120~400 A 区间对应的对流换热系数范围为 $4 \sim 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.该方法可以为热边界条件提供较为精确的预测,从而提高数值计算的准确性和有效性.

3) 经误差分析,得到对流换热系数与电流工况之间的关系是控制误差的关键.利用曲线拟合插值法,可以精确计算不同电流工况下汇流排的温升,误差控制在 3.7% 以内.

参考文献

[1] 张进, 宣益民. 基于光-热-电耦合利用的薄膜热电器件结构优化[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(3): 643-647.
ZHANG J, XUAN Y M. The optimization of the thin film thermoelectric devices for the hybrid utilization of the photovoltaic thermoelectric hybrid system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(3): 643-647. (In Chinese)

[2] 沈兵, 张晓锋. 舰船电力系统矩形汇流排集肤效应的数值计算[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(3): 537-539.
SHEN B, ZHANG X F. Numerical calculation of skin effect of rectangular bus bar in electrical power system of ship[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation

- Science & Engineering), 2008, 32(3):537-539. (In Chinese)
- [3] FUJISHIMA N, SUGI A, SUZUKI T, *et al.* A high density, low on-resistance, trench lateral power MOSFET with a trench bottom source contact[C]// International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICS. IEEE, 2002:143-146.
- [4] 白洁玮, 张晓东, 牛志刚, 等. 利用 LNG 冷能及废气余热的热电器件耦合场分析[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(1):132-135.
- BAI J W, ZHANG X D, NIU Z G, *et al.* Coupling analysis of thermoelectric device generated by LNG cold energy and exhaust gas heat[J]. Journal of Agricultural Mechanization in China, 2016, 37(1):132-135. (In Chinese)
- [5] PIRONDI A, NICOLETTO G, COVA P, *et al.* Thermomechanical finite element analysis in press-packed IGBT design [J]. Microelectronics Reliability, 2000, 40(7): 1163-1172.
- [6] AZOUI T, VERDE S, SAUVEPLANE J B, *et al.* 3D electro-thermal study for reliability of automotive power vertical MOSFET using COMSOL multiphysics [C]//3rd European COMSOL Conference. Milan, Italy, 2009:14-16.
- [7] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005:67-69.
- CHEN K. Test design and analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005:67-69. (In Chinese)
- [8] VITORATOS E. An analysis of DC conductivity in terms of degradation mechanisms induced by thermal aging in polypyrrole/polyaniline blends[J]. Current Applied Physics, 2005, 5(6):579-582.
- [9] YUAN L, YU H, WANG X, *et al.* The large-size low-stray-parameter planar bus bar for high power IGBT-based inverters [C]// International Conference on Electrical Machines and Systems. IEEE, 2013:1-5.
- [10] 钱剑峰, 张力隽, 张吉礼, 等. 直接式与间接式污水源热泵系统供热性能分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(S2):94-98.
- QIAN J F, ZHANG L J, ZHANG J L, *et al.* Analysis on heating performance of direct and indirect sewage source heat pump system[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009, 36(S2):94-98. (In Chinese)
- [11] 朱艳吉, 刘雪琳, 汪怀远, 等. 太阳能热电耦合合成苯甲酸[J]. 高等学校化学学报, 2016, 37(2):322-327.
- ZHU Y J, LIU X L, WANG H Y, *et al.* Solar thermal-electrochemical synthesis of benzoic acid[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2016, 37(2): 322-327. (In Chinese)
- [12] SAUVEPLANE J B, TOUNSI P, SCHEID E, *et al.* 3D electro-thermal investigations for reliability of ultra low on state resistance power MOSFET [J]. Microelectronics Reliability, 2008, 48(8):1464-1467.
- [13] 赵骏丹, 沈澍东, 孟祥. 隔爆型高压电缆连接器的热电耦合分析[J]. 电子科技, 2016, 29(3):172-174.
- ZHAO J D, SHEN S D, MENG X. Thermoelectric coupling analysis of flame-proof high voltage cable connector[J]. Electronic Science and Technology, 2016, 29(3):172-174. (In Chinese)
- [14] 彭晓燕, 刘威, 张强. 基于改进型偏差耦合结构的多电机同步控制[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(11):77-83.
- PENG X Y, LIU W, ZHANG Q. Synchronized control of multi-motor based on the improved relative coupling control [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(11):77-83. (In Chinese)
- [15] 卢翔, 苏文正, 蒯越国, 等. 复合材料雷击损伤热电耦合数值仿真分析[J]. 中国民航大学学报, 2016, 34(2):42-45.
- LU X, SU W Z, LIN Y G, *et al.* Thermo-electrical coupling simulation of composites' damage caused by lightning [J]. Journal of China Civil Aviation University, 2016, 34(2):42-45. (In Chinese)
- [16] AZOUI T, TOUNSI P, DUPUY P, *et al.* 3D Electro-thermal modelling of bonding and metallization ageing effects for reliability improvement of power MOSFETs[J]. Microelectronics Reliability, 2011, 51(9-11):1943-1947.
- [17] 林腾蛟, 何泽银, 钟声, 等. 船用齿轮箱多体动力学仿真及声振耦合分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(2):22-28.
- LIN T J, HE Z Y, ZHONG S, *et al.* Multi-body dynamic simulation and vibro-acoustic coupling analysis of marine gearbox [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(2):22-28. (In Chinese)
- [18] BAI X, WEI H. Semi-definite programming-based method for security-constrained unit commitment with operational and optimal power flow constraints[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2009, 3(2): 182-197.
- [19] 黄学杰. 电动汽车动力电池技术研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(6):28-31.
- HUANG X J. An overview of xEVs battery technologies[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(6):28-31. (In Chinese)