

车辆隔热壁 K 值计算中空气层的处理方法

王 建 王云霄 张永鑫 王常宇

(中车长春轨道客车股份有限公司基础研发部, 130062, 长春//第一作者, 高级工程师)

摘 要 对轨道交通车辆多层复合结构的隔热壁进行隔热性能理论计算与仿真计算的对比, 对隔热壁内部空气层的隔热性能进行分析。结论为: 在车辆多层复合结构的隔热壁 K 值计算中, 当空气层厚度大于一定厚度时, 流体自然对流对隔热壁的隔热性能影响较大。利用多项式密度(Polynomial Denisity)和 Boussinesq 模型两种算法, 对所得结论进行了验证。

关键词 轨道交通车辆; 隔热壁; 隔热性能; K 值计算

中图分类号 U270.2

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.04.019

Treatment of Air Layer in K 's Analysis and Calculation of Vehicle Heat Insulation Wall

WANG Jian, WANG Yunxiao, ZHANG Yongxin, WANG Changyu

Abstract The air thickness can effect the heat-insulation of the complex heat insulation wall. Though the contrast between the theoretical calculation and simulation calculation of the thermal insulation performance of vehicle multilayer composite structure, the influence of air layer inside the heat insulation wall is studied. The result shows that when the air thickness reaches a certain degree in the K 's analysis and calculation of the multilayer composite vehicle heat insulation wall, the influence of natural conversion on the thermal insulation performance of multilayer composite wall will be greater. In this paper, the methods of Polynomial Denisity and Boussinesq Model are used to verify the result.

Key words rail transit vehicle; heat insulation wall; heat insulation performance; K 's analysis and calculation

Author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

轨道交通车辆为保证乘客的热舒适性, 除必要的加热及制冷设备外, 需要保证车辆具备一定的隔热性能。为此, 需在车体的结构上敷设一定厚度的隔热材料。具有一定隔热性能的结构称为隔热壁。隔热壁的传热系数(K 值)与其结构及材料热力学性

能有关。在车辆制造完毕进入实验室进行 K 值测试前, 即详细设计阶段需要对隔热壁 K 值进行仿真计算评估。车辆隔热壁结构一般为多层复合结构, 包含有不同厚度的空气层。经过分析对比, 发现不同厚度的空气层对隔热壁 K 值影响不同, 本文就空气层对隔热壁 K 值计算结果的影响进行分析论证。

1 K 值计算原理

1.1 计算方法

根据《铁道客车隔热性能试验方法》, 客车车体壁面传热系数(K 值)由下式确定:

$$K = \frac{P}{A \times \Delta t} \quad (1)$$

式中:

K ——车体壁面等效传热系数;

P ——车内加热功率;

Δt ——车体内、外两侧平均空气温度差;

A ——试验空间车体的总传热面积, $A = \sqrt{A_i \times A_e}$, 其中 A_i 为试验空间车体内表面积, A_e 为试验空间车体外表面积。

由式(1)可得:

$$K = \frac{P}{\sqrt{A_i A_e} \times \Delta t} = \sqrt{\frac{P \times P}{A_i A_e}} \times \frac{1}{\Delta t} = \frac{\sqrt{q_i \times q_e}}{\Delta t} \quad (2)$$

式中:

q_i ——试验空间车体内表面热流密度;

q_e ——试验空间车体外表面热流密度。

1.2 传统计算模型

传统的传热学计算方法是把车体看成由内饰、墙板、中间保温材料及外壁结构组成的一维多层平壁, 忽略了车体实际几何形状和多层平壁的差别, 因此可采用如下传统的传热学方法来分析计算:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_N} + \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_W}} \quad (3)$$

式中:

α_N ——车辆静止时车体内表面和车内空气间的对流传热系数, $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

λ_i ——第 i 层车壁材料的传热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

δ_i ——每层车壁材料的厚度, m ;

α_w ——列车静止时车体外表面和车外空气之间的对流传热系数, $16 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

1.3 空气层流体分析计算模型

由于实际的空气层流动多为湍流流动, 所以需要采用湍流模型来进行计算。本文计算采用 Navier-Stocks 方程的 Realizable $k-\varepsilon$ 模型, 同时考虑重力对空气层流体的影响, 重点考虑空气层流体因温度变化而引起的密度变化, 即考虑空气层流体的自然对流。

引入多项式密度(Polynomial Density)。通过空气密度与温度对照表, 确定空气密度随温度变化的多项式参数:

$$\rho = 1.293 - 0.0047T \quad (4)$$

引入 Boussinesq 模型(Boussinesq Model)。根据 Boussinesq 模型假设: 流体的密度与温度及压强有关, 流体在低速流动中的压强变化不大, 主要是由温度变化引起密度变化, 因此可忽略压强变化引起的密度变化, 只考虑温度变化引起的密度变化。在模型中确定体积膨胀系数(当物体温度改变 1°C 时, 其体积的变化和它在 20°C 时体积之比, Thermal Expansion)为 $0.003\ 676/\text{K}$ 。

2 车辆模型 K 值计算

2.1 型材中空气层对 K 值的影响

以某车型侧墙结构的计算模型为例(见图 1 a)), 对型材中空气分析计算时考虑自然对流传热。从图 1 b) 和图 1 c) 的计算结果对比可知, 因空气本身的导热系数和对流温差小, 可看作纯导热, 不参与传热和自然对流传热, 故计算过程中可忽略。

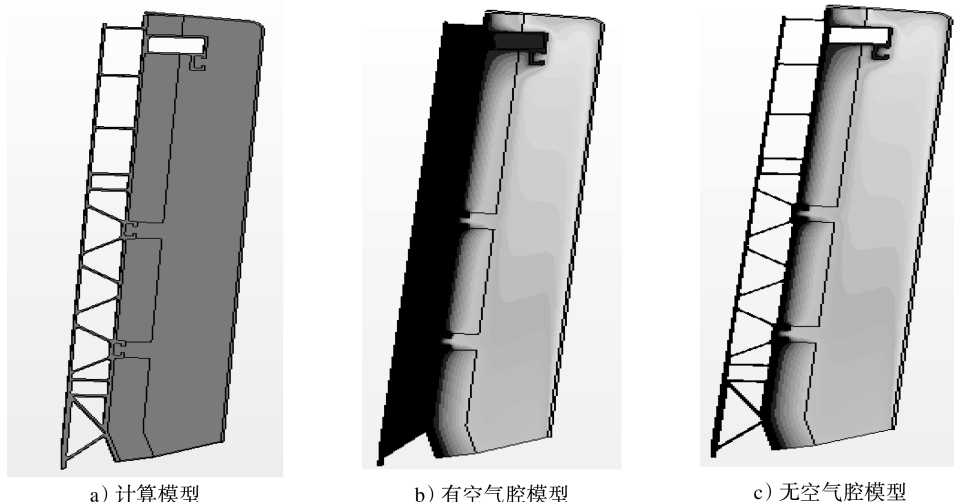


图1 型材中空气层 K 值计算模型

2.2 多层复合结构中空气层对 K 值的影响

某车型的车体断面(一半)如图 2 所示。车宽为 1.6 m , 车高为 2.6 m , 车体外表面距地面、墙壁和屋顶均为 1 m 。车内电加热器的功率 P 已知, 试验空间车体的总传热面积 A 已知, 车体内、外两侧平均空气温度差 Δt 可求, 则根据式(1)可求得传热系数 K 。

在模拟计算过程中, 对该模型进行适当等效

简化: 车体壁厚 0.1 m , 材料导热系数 $0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 三维模型沿车长方向的进深为 0.1 m , 车内外各增加距内外表面距离为 0.1 m 的空气层; 空气层内流过的空气温度分别为 10°C 和 35°C 。计算模型如图 3 所示。以此模型为基础, 分别在车内增加不同厚度的空气夹层及 2 mm 厚的内装层, 用于式(2)模拟计算空气层对车辆隔热壁 K 值的影响。计算结果如表 1 所示

(下转第 101 页)

大数量钻孔循环等可为同类产品的制造提供有效借鉴。另外,A型车底架延伸结构要求枕梁空气簧安装平面最大去除深度为5 mm,扭杆座等平面可不加工,故为最大程度地保证空气簧安装面不受底架组焊变形的影响,可在枕梁组焊完成之后加工2 mm,底架合成后再在剩余的3 mm内完成空气簧安装平面的最后加工。

参考文献

- [1] 若松义人. 精益改善力[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [2] 姚瑞敏. 铝合金高速加工的研究[J]. 山西冶金, 2009(6): 56.
- [3] 郭力, 刘建宁. 高速加工机床及关键技术的新进展[J]. 新技术新工艺, 2011(3): 3.
- [4] 袁国伟. 高速加工切削用量选择分析[J]. 现代制造技术与装备, 2014(3): 52.
- [5] 鲁祥. 动车组铝合金车体加工自动编程和仿真系统研究[J]. 机械制造, 2013(8): 57.
- [6] 张烘州, 戎斌, 陈洁, 等. 航空铝合金整体结构件数控加工变形控制现状分析[J]. 航空制造技术, 2012(12): 58.

(收稿日期: 2019-08-19)

(上接第80页)

3 结语

理论计算结果与仿真分析结果的对比可知, 在车辆隔热壁 K 值计算中, 对于型材结构中密封的空气层, 因结构两侧空气的对流温差小, 无传热

和自然对流传热, 故计算中可看作纯导热; 对于多层复合结构隔热壁, 当其空气层的厚度大于一定比例时(本案例大于20 mm), 按照传统热学公式的理论算法和无自然对流计算的 K 值结果偏差较大, 需要在分析计算中利用 Polynomial Denisity 或 Boussinesq Model 来模拟自然对流对结构隔热性能的影响。

表1 对应不同厚度空气层的计算结果

空气层 厚度/mm	理论 K 值/ (W/(m ² ·K))	无自然对流 K 值/ (W/(m ² ·K))	多项式计算 K 值/ (W/(m ² ·K))	Boussinesq 模型 K 值/ (W/(m ² ·K))
10	0.388	0.409	0.410	0.410
20	0.338	0.352	0.353	0.353
50	0.243	0.252	0.353	0.352
100	0.166	0.168	0.327	0.327
200	0.101	0.099	0.310	0.312
500	0.047	0.043	0.311	0.313

参考文献

- [1] 徐宁. 热工学基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] 中华人民共和国铁道部. 铁路客车隔热性能试验方法: TB/T 1674—1993[S]. [2018-05-23]. <http://www.biaozhuns.com/archives/20150926/show-138026-112-1.html>.
- [3] 中华人民共和国铁道部. 客车空调设计参数: TB/T 1951—1987[S]. [2018-08-15]. <http://www.pv265.com/hangye/tb/27291.html>.

(收稿日期: 2019-08-23)

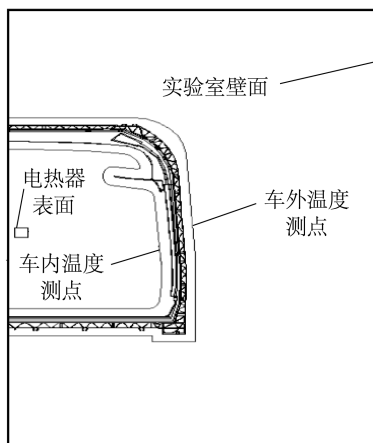


图2 被试车断面示意图

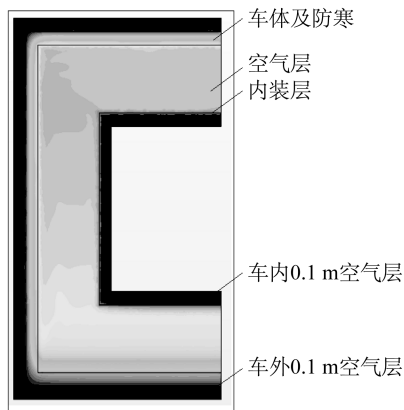


图3 被试车计算模型示意图