

基于机舱热害的隔热结构设计策略研究

王鹏, 秦肖肖, 梁海明, 勾赵亮, 王月, 陈世灯
东风汽车集团有限公司技术中心

【摘要】 汽车机舱热害问题如机舱燃烧、炭化、烧熔现象近期频发, 发动机作为汽车的心脏, 机舱热害问题直接决定用户的购买欲, 加之目前暂无应对机舱热害问题的技术储备, 为应对恶劣机舱热害温度, 建立应对不同温场变化的耐热隔热方案的技术货架, 弥补机舱零部件耐热害技术储备短缺问题迫在眉睫。本文阐述了机舱温场热传递方式并对隔热耐热零件材料进行研究, 通过建立隔热耐热试验台架及试验方法, 对试验结果进行研究分析, 建立机舱隔热耐热技术货架和设计策略, 并搭载实车进行运用, 为后续机舱零件的设计提供了强有力理论支持。

【关键词】 汽车, 发动机舱, 隔热, 耐热, 隔热结构

Research on Thermal Insulation Structure Design Strategy Based on Engine Room Heat Damage

Wang Peng, Qin Xiaoxiao, Liang Haiming, Gou Zhaoliang, Wang Yue, Chen Shideng
Dongfeng Motor Corporation Technical Center

Abstract: The thermal damage problems in the automotive engine compartment, such as combustion, carbonization, and melting, have been frequent occurred recently. Engine as the heart of automobiles, the thermal damage problem in the engine compartment directly determines the purchasing desire of users. In addition, there is currently no technical reserve to deal with the thermal damage problem in the engine compartment. In order to cope with the harsh thermal damage temperature in the engine compartment, a technical shelf has been established for heat resistance and insulation solutions to cope with different temperature field changes. It is urgent to compensate for the shortage of heat resistant technical reserves for cabin components. This article elaborates on the heat transfer mode of the engine room temperature field and studies the materials of insulation and heat resistant parts. By establishing an insulation and heat resistant test bench and test methods, the test results are analyzed and studied. The engine room insulation and heat resistant technology shelf and design strategy are established, and they are used on a real vehicle, providing strong theoretical support for the subsequent design of engine room parts.

Key words: automobile, engine compartment, insulation, heat resistance, insulation structure

引言

随着汽车保有量的急剧增加, 机舱热害问题也逐渐增多, 比如发动机舱内风扇故障、冷却液故障导致不能冷却, 三元催化剂阻塞或管道破裂, 排气阻塞导致发动机过热等问题, 发动机舱冒烟、烧焦现象时有发生, 机舱零件如前围隔声垫出现温场热害问题, 发动机装饰盖热熔, 甚至出现机舱内隔声垫、风窗下装饰板零件燃烧现象, 加之目前应对机舱热害问题的技术储备短缺, 为应对更加恶劣的机舱温场及温场试验, 机舱内零件耐热害技术研究迫在眉睫。

本文通过对发动机舱内热传递路径及发动机舱隔热耐热结构进行研究, 筛选出 48 组隔热结构进行隔热耐热试验, 分析出了 100~350°C 下的耐热隔热技术方案、不同隔热结构的耐温等级及隔热量, 同时进行了隔热敏感度的研究, 搭建了应对机舱温度 100~350°C 耐热隔热方案的技术货架, 形成机舱隔热零部件耐热隔热性能数据库, 总结出了机舱内零部件隔热试验方法, 形成机舱热害的隔热结构设计策略, 为后续车型开发提供技术储备和技术支持。

1 发动机舱隔热原理分析

1.1 发动机舱内热传递方式

通常发动机舱内热传递有三种方式, 分别是热对流、热传导和热辐射, 如图 1 所示。

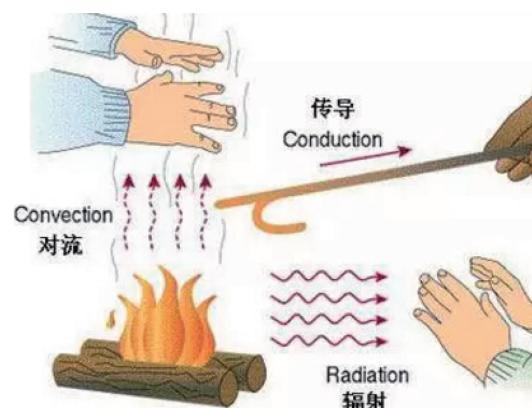


图 1 热传递形式

热对流是指热量通过流动介质传递的过程, 主要是指由

于流体的密度变化或外力驱动而产生的宏观运动，从而使流体各部分之间发生相对位移，冷热流体相互掺混所引起的热传递过程。热对流仅发生在流体中，有热对流必然伴随有导热现象，根据引起流动的原因，对流换热可以分为自然对流和强制对流两类，自然对流是由于流体冷、热各部分的密度不同而引起的，如果流体的流动是由于水泵、风机或其他压差作用所造成的，则称为强制对流。

热传导是指热能从高温向低温部分转移的现象，即凡是存在温度差的地方，就有热量自发地从高温物体传向低温物体，或从物体的高温部分传向低温部分的现象。

热辐射是指物体由于具有温度而辐射电磁波的现象，具体地说，热辐射指由于热的原因产生的电磁波辐射，热辐射的电磁波是物体内部微观粒子的热状态改变时激发出来的，只要物体的温度高于绝对零度，物体就不断地把热能变为辐射能，向外发射热辐射，同时物体也不断地吸收周围物体投射到它上面的热辐射，并把吸收的辐射能重新转变为热能，辐射换热就是指物体之间相互辐射和吸收的总效果，当物体与环境处于热平衡时，其表面上的热辐射仍在不停地进行，但其辐射换热量等于零^[1]。

1.2 发动机舱温场运行工况分析

车辆运行工况分为急加速、匀速、怠速、爬坡、热浸工况，其中发动机熄火之后的热浸工况热害问题最为突出，其他工况由于流场及冷却系统的影响，热害影响相对较小，如图 2、图 3 所示，其中图 2 代表 60km/h 8.7% 爬坡热浸工况下机舱温度急剧升高，温度超过 150℃ 的时长约 3.5min，图 3 代表 140km/h 高速热浸工况下机舱温度急剧升高，温度超过 150℃ 的时长约 9min。

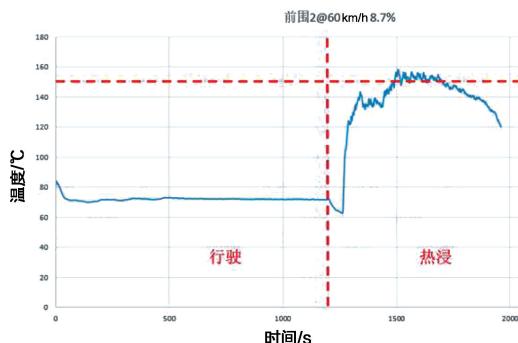


图 2 60km/h 8.7% 爬坡工况机舱温度

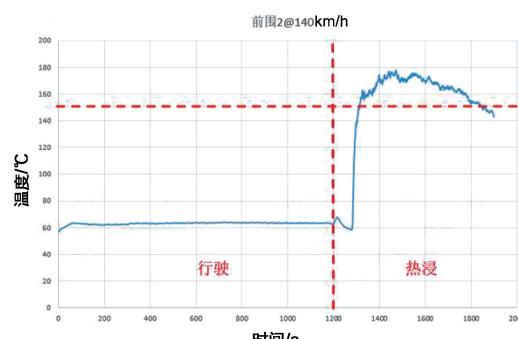


图 3 140km/h 高速工况机舱温度

综上，本文主要研究发动机在热浸工况下的热传递路径，发动机舱内前围隔声垫处的热传递形式主要有发动机、涡轮增压器、风窗下盖板、空滤及发动机装饰罩等零部件的热辐射及热对流中的自然对流两种方式，同时还会考虑隔热结构层之间的热传递方式，如图 4 所示。

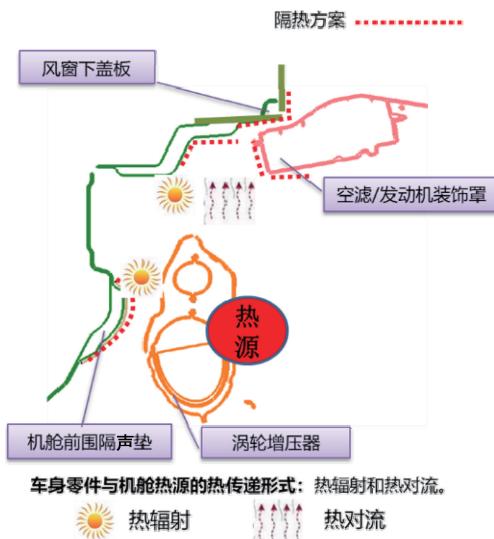


图 4 热浸工况下的机舱热传递示意图

2 试验设备模型搭建及隔热耐热技术方案分析

2.1 试验设备模型搭建

发动机舱内隔声垫不仅有 NVH 声学性能，还起到隔热、耐热的作用，本文主要研究该零部件在热浸工况下的隔热、耐热性能，考虑热浸工况温度持续仅在 10min 左右，短时耐热/隔热测试时间为 0.5~4h，本文主要针对热浸极限工况，长时耐温不作为本次主要研究方向。根据发动机舱内的热传递方式，搭建试验台架模拟发动机隔声垫的受热、隔热及耐热情况，要求零件热面温度（热面温度是指靠近热源的零件表面温度）最高达到 300℃，每次测试需布置 4 个测温点，通过温度传感器监测温度变化，测温点在热面和冷面（冷面是指隔热耐热零件底面）之间均匀布置，测试距离可在 15~130mm 之间调整，整个试验过程需模拟发动机舱热辐射的形式进行测试，如图 5 与图 6 所示。该试验台架由温度控制装置、材料固定装置、辐射热源及温度传感器组成，主要测量隔热量，其中隔热温度为热面温度与冷面温度之差。

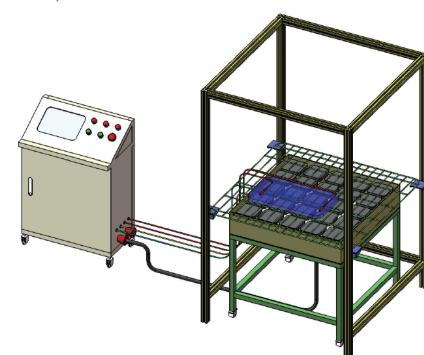


图 5 隔热耐热试验设备示意图



图 6 隔热耐热试验设备

2.2 隔热耐热技术方案分析

发动机舱隔声垫既是机舱内的声学零件，也是机舱内隔热耐热零部件，其主要由三个部分组成，分别是反射层、耐热层、阻热层，通过热压成型，上文所述试验台架模型可以简化为图 7 所示结构。

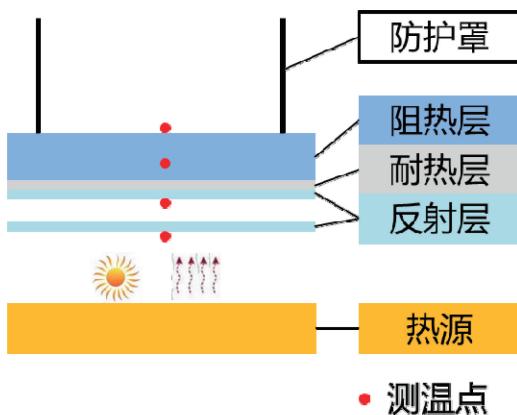


图 7 隔热耐热试验模型简化示意图

综合考虑上述分析的三种热传递方式，制定相应的隔热措施。其中对于热辐射方式的热传递形式，采用反射热能的形式来进行隔热，反射层可以为铝板也可以为铝箔，铝箔分为穿孔压花铝箔和镜面铝箔两种，可以通过铝板或者铝箔反射发动机舱热源温度，将一部分热量反射出去，对于反射不了的热量通过由 PET 无纺布或者碳纤维布组成的耐热层进行耐热，最后通过阻热层进行吸热隔热。阻热层主要采用低热传导系数的材料，同时综合考虑阻热层的成本、重量、阻燃性等因素进行选材，见表 1。阻热层可以由 PU 硬泡 (PU)、酚醛树脂毡 (PRF)、PET 毡 (PET) 或者碳纤维毡 (CPET) 组成，以保证零件整体 NVH 及耐温性能达到机舱布置要求。

本文通过对反射层、耐热层和阻热层进行不同的材料、密度、厚度组合，选出 48 组耐热隔热技术方案进行试验，见表 2，其中 1+1 表示增加一组带铝板的试验。

表 1 不同阻热层材料热传导系数及优缺点分析

分类	材料	20℃ 导热系数 $\lambda/[W/(m \cdot K)]$	应用案例	优缺点
天然 材料	空气	0.0259	保温杯	成本高
	羊毛	0.052~0.055	羊毛衫	成本高、易燃
	羽绒	0.04377	羽绒服	成本高、易燃
	棉	0.071~0.073	棉服	成本高、易燃
毛毡 发泡 材料	聚氨酯 (PU)	0.025~0.033	建筑保温层	重量轻
	涤纶 (PET)	0.084	纺织品	成本低
	丙纶 (PP)	0.221~0.302		导热系数大
塑料 材料	PP	0.14	一般不用于 隔热材料	导热系数大
	PA-6	0.36		
	PA-66	0.25		
	ABS	0.25		
其他 材料	玻璃	1.09		
	不锈钢	16		
	碳钢	36.7		
	熟铁	61		

表 2 48 组耐热隔热技术方案组合

反射层	镜面铝箔			压花铝箔			
	耐热层	PET 无纺布	碳纤 维布	—	PET 无纺布	碳纤 维布	—
PU-18-15①	1	1		1	1		
PU-15-15				1	1		
PU-18-20				1	1		
PRF-1000-15	1	1		1	1		
PRF-1200-15				1	1		
PRF-800-15				1	1		
PRF-1000-10				1	1		
PET-400-5		1+1	1		1+1	1	
PET-400-3					1	1	
PET-600-5					1	1	
PET-600-3					1	1	
PET-800-8					1	1	
PET-800-5					1	1	
PET-800-10					1	1	
CPET-300-5			1+1			1+1	
CPET-400-5			1+1			1+1	
CPET-500-3						1	
CPET-500-5						1	
CPET-300-3						1	
CPET-400-5						1	

3 试验结果分析

通过对上述 48 组不同隔热结构、不同密度及不同厚度的零部件隔热、耐热试验结果进行分析，得出以下结论。

3.1 耐热试验分析结果

通过对 48 组试验结果的统计分析, 分析出了 100~350℃下的机舱隔声垫零件的耐热、隔热技术方案。通过试验对比发现, 反射层增加铝箔时, 耐温等级可以提升 50~60℃, 反射层为铝板时, 耐温等级提升 120~130℃, 耐热层为碳纤维布时, 耐温等级提升 20~30℃, 如图 8 所示。

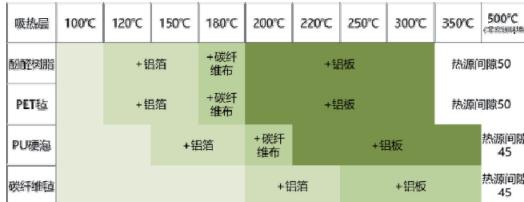


图 8 耐热试验分析结果

3.2 隔热试验分析结果

通过 48 组不同材料、不同密度及不同厚度的材料组合试验, 分别得出每种组合的零件在不同温度下的耐热、隔热性能, 建立了机舱隔热零部件耐热隔热性能数据库, 并同步得出如下结论:

- 对于选定的不同材料组合, 隔热量在 50~230℃之间, 且随着表面温度升高, 隔热量、隔热能力也随之提高。
- 在表面温度为 250℃以内时, 耐热层为 PU 硬泡和酚醛树脂毡的隔热量相对于 PET 毡和碳纤维毡高 30~40%, 如图 9 所示。

3.3 隔热敏感度分析

本文不仅对上述隔热能力进行了研究, 还对隔热敏感度

进行研究分析, 主要从零件克重、反射层铝箔形式及零件厚度进行分析总结, 受于试验样本的限制, 结果不一定非常准确, 但仍有一定的参考意义。

在相同温度下, 将相同材料零件按照不同厚度分组测试其隔热量, 通过对不同材料组合测试进行对比分析研究发现, 厚度对隔热量的影响较大, 厚度越厚, 零件的隔热性能越好, 如表 3、图 10 所示。



图 9 不同材质样件随温度变化的隔热量

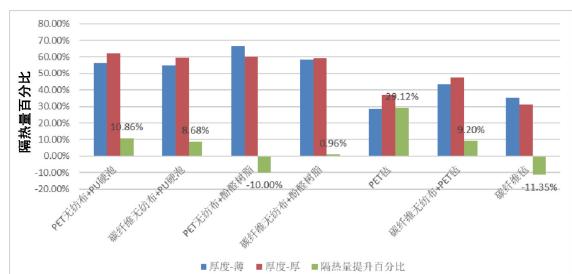


图 10 厚度式样-不同材料相同温度下样件隔热量百分比

表 3 厚度式样-不同材料相同温度下样件隔热量结果分析

样品类型	PET 无纺布 + PU 硬泡	碳纤维无纺布 + PU 硬泡	PET 无纺布 + 酚醛树脂	碳纤维无纺布 + 酚醛树脂	PET 毡	碳纤维无纺布 + PET 毡	碳纤维毡
厚度-薄	56.25%	54.75%	63.89%	53.33%	28.61%	43.50%	28.1%
厚度-厚	62.36%	59.50%	64.25%	59.17%	36.94%	47.50%	32.2%
隔热量提升百分比	10.86%	8.68%	0.56%	10.95%	29.12%	9.20%	14.8%
平均水平	55%	55%	60%	60%	35%	40%	30%

同样, 在相同温度下, 将相同材料零件按照不同克重进行分组测试其隔热量, 通过对不同材料组合测试进行对比分析研究发现, 密度对隔热量的影响较小, 密度越大, 零件的隔热性能略差, 如图 11 所示。

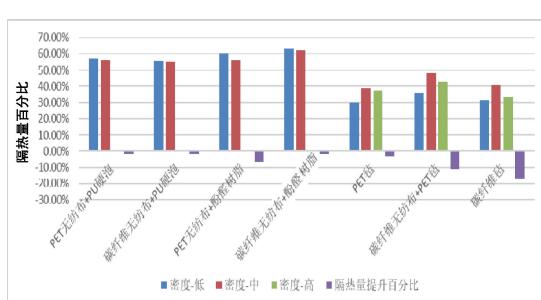


图 11 克重式样-不同材质相同温度下带铝箔样件隔热量百分比

在相同温度下, 将相同厚度、相同密度的零件按照反射层不同, 进行压花铝箔和镜面铝箔的隔热耐热试验数据分析, 测试其隔热量, 通过对不同材料组合测试进行对比分析研究发现, 压花铝箔隔热性能略优于镜面铝箔, 因为压花铝箔增加了热辐射的面积, 其隔热性能相对较好, 如图 12 所示。

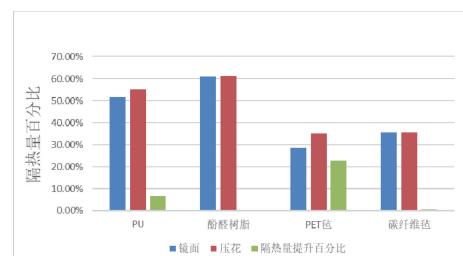


图 12 铝箔式样-不同材质相同温度下隔热量百分比

4 机舱隔热结构隔热耐热试验结论

4.1 建立应对机舱温场 100~300℃耐热隔热方案的技术货架

通过对 48 组试验结果的统计分析,建立了机舱隔热零部件耐热隔热性能数据库,同时总结出了 100~350℃下的机舱隔声垫零件的耐热、隔热技术方案,通过试验对比发现,反射层增加铝箔时,耐温等级可以提升 50~60℃,反射层为铝板时,耐温等级提升 120~130℃,耐热层为碳纤维布时,耐温等级提升 20~30℃。

如图 13 所示,四种不同材料的阻热层可以根据车型定义的成本、重量等性能等维度进行选择,比如燃油车在不同的温场环境下,可以采用反射层为铝箔或者铝板,耐热层为碳纤维布,阻热层为酚醛树脂,可以满足 120~300℃的温场要求;如果是纯电动汽车,在不同的温场环境下,可以采用只有耐热层——硬质 PU 的材料形式,可以满足 100~120℃的温场要求;电动汽车建议阻热层为硬质 PU 的材料形式,反射层为增加铝箔或者在温场高的情况下增加铝板的形式,耐热层为碳纤维布的材料组合形式,可以满足 120~350℃的温场要求。另外,热源间隙在此次试验中对试验结果也有一定的影响,可作为参考项,在非密闭的环境中,也大致验证了该试验台架热面温度最高可达到 500℃。

隔热层	100℃	120℃	150℃	180℃	200℃	220℃	250℃	300℃	350℃	500℃ (未达到)
酚醛树脂		+铝箔	+碳纤维布		+铝板					热源间隙 50
PET 布		+铝箔	+碳纤维布		+铝板					热源间隙 50
硬质 PU		+铝箔	+碳纤维布		+铝板					热源间隙 45
玻璃纤维			+铝箔		+铝板					热源间隙 45

图 13 对应机舱温场 100~350℃耐热隔热方案的技术货架

4.2 建立机舱耐热隔热策略应用方法

通过上述研究,建立机舱耐热隔热策略应用流程及方法示意,如图 14、图 15 所示。

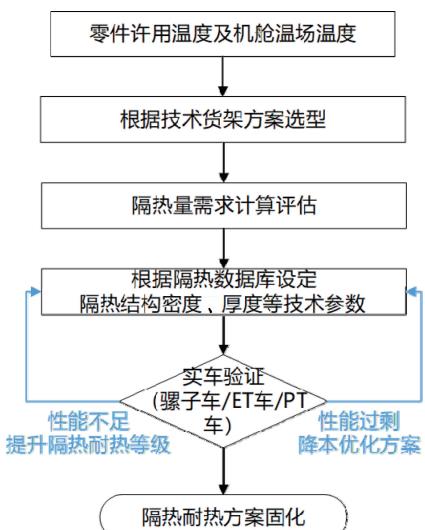


图 14 机舱耐热隔热策略应用流程

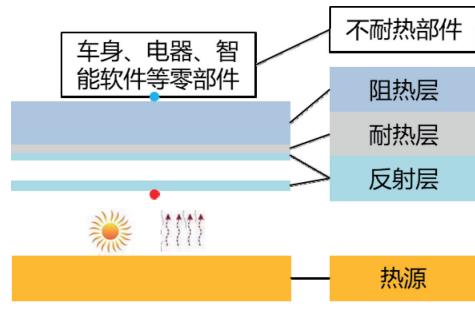


图 15 机舱耐热隔热策略应用方法示意

5 隔热耐热零件设计策略应用实例介绍

根据某车型机舱前围隔声垫搭载实车双离合器变速器 (Dual-Clutch Transmission, DCT) 车型、混合动力汽车 (Hybrid Electric Vehicle, HEV) 车型及 DCT 降成本发动机试验情况,结合上述 4.1 小节建立应对机舱温场 100~350℃ 耐热隔热方案的技术货架和 4.2 小节建立的机舱耐热隔热策略应用方法,提出机舱隔声垫的隔热耐热优化方案,并提出降成本路径,如图 16 所示。

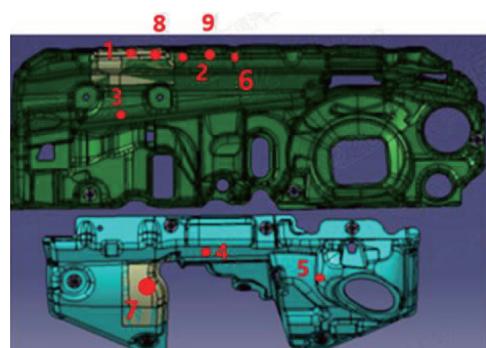


图 16 发动机舱隔声垫表面温度测试点

通过对机舱隔声垫下述 9 个点在不同路况、不同速度的发动机舱内温度进行测试,相关点温度情况见表 4、表 5。三种不同型号的发动机所设定的机舱隔声垫零件的长时和短时许用温度均为 150℃,通过测试结果不难看出,热浸工况下的温度远高于行驶过程中的温度,堵车情况下怠速时的温度与低速行驶过程中的温度相当,DCT 车型的机舱温度最高点是在 60km/h 8.7% 爬坡过程中的热浸工况下,最高温度 136.6℃,小于设定的许用温度。而在 HEV 车型中,机舱隔声垫表面温度最高时出现在 120km/h 3% 坡度及 140km/h 爬坡过程中的热浸工况,最高温度 155.8℃。通过上述两个不同类型的发动机舱温场测试,优化机舱隔声垫的材料类型,降成本取消反射层的铝箔,采用酚醛树脂毡,在保证零件的隔热耐热性能满足要求的同时,降低零件成本。

DCT 降成本发动机机舱内各工况表面温度分布见表 6,机舱隔声垫的长时和短时许用温度前期都设定为 150℃,机舱最高温度出现在测试点 2,分别对应 60km/h 8.7% 坡度热浸工况和 140km/h 爬坡时的热浸工况,堵车时、行驶时的机舱温度与怠速时机舱温度相当。

表 4 DCT 车型发动机舱内各工况表面温度分布 (单位:℃)

测点	许用温度		60km/h 8.7%爬坡		120km/h 3%爬坡		140km/h爬坡		0~40km/h堵车	
	长时	短时	行驶MAX	热浸MAX	行驶MAX	热浸MAX	行驶MAX	热浸MAX	行驶MAX	怠速MAX
前围隔声垫-2	150	150	71.2	136.6	62.3	126.2	66.0	131.1	84.2	89.2
前围隔声垫-4	150	150	80.8	124.1	69.0	117.0	70.1	117.7	97.9	100.3
前围隔声垫-6	150	150	73.8	128.7	67.1	124.3	68.9	124.9	85.6	88.9
前围隔声垫-7	150	150	64.9	72.5	57.5	66.2	62.0	68.8	76.3	79.5
前围隔声垫-8	150	150	71.4	121.5	63.1	115.3	64.5	123.7	85.3	91.2
前围隔声垫-9	150	150	66.7	111.1	61.1	105.0	63.1	106.8	76.8	80.0

表 5 HEV 车型发动机舱内各工况表面温度分布 (单位:℃)

测点	许用温度		60km/h 8.7%		120km/h 3%		140km/h		堵车	
	长时	短时	行驶MAX	热浸MAX	行驶MAX	热浸MAX	行驶MAX	热浸MAX	行驶MAX	怠速MAX
前围隔热垫-2	150	150	65.2	141.6	61.9	139.1	57.0	150.3	65.9	72.4
前围隔热垫-4	150	150	111.6	126.6	84.9	130.3	77.5	130.9	107.6	108.3
前围隔热垫-6	150	150	60.4	105.2	50.2	109.6	61.1	104.1	69.5	73.2
前围隔热垫-7	150	150	82.1	104.4	67.4	108.4	65.5	101.5	86.7	91.2
前围隔热垫-8	150	150	69.3	106.3	57.4	110.9	57.6	109.0	76.4	86.3
前围隔热垫-9	150	150	73.9	147.8	61.8	151.9	58.7	155.8	79.0	79.0

表 6 DCT 降成本发动机机舱内各工况表面温度分布 (单位:℃)

测点	长时许用温度	短时许用温度	60km/h 8.7%		120km/h 3%		140km/h		堵车	
			行驶	热浸	行驶	热浸	行驶	热浸	行驶	怠速
前围隔声垫2	150	150	84.0	158.3	62.7	146.1	65.0	178.0	79.9	87.5
前围隔声垫6	150	150	76.6	137.0	63.8	139.6	67.5	140.7	82.3	100.7

从图 2 和图 3 所示机舱温度随时间的变化关系可以看出, DCT 降成本发动机在 60km/h 8.7% 爬坡工况温度超过 150℃ 的时长约 3.5min; 140km/h 高速工况温度超过 150℃ 的时长约 9min, 通过前期 4.1 小节建立的应对机舱温场 100~350℃ 耐热隔热方案的技术货架可以明确看出, 机舱隔声垫阻热层除了更换为碳纤维毡可以保证耐 150℃ 以上的工况外, 其他材料类型必须增加铝箔才能满足机舱隔热耐热要求。虽然设计定义增加了铝箔, 但可以通过优化铝箔的面积来保证在满足机舱零件的隔热耐热性能要求, 并且也达到降成本的目的, 同时也验证了上述试验策略及技术货架的可行性。

6 结论

综上所述, 本文通过对机舱温场热传递方式、机舱隔热耐热零件隔热结构进行研究, 自主设计了一款模拟发动机舱内热浸工况下零件的隔热耐热试验台架, 并通过不同材料反

射层、耐热层、阻热层在不同温度、不同密度及不同厚度的组合方案, 筛选出了 48 种隔热耐热技术方案进行试验, 通过试验验证及对试验结果的总结分析, 建立了应对机舱温场 100~350℃ 隔热耐热方案的技术货架, 同时建立了机舱隔热零部件耐热隔热性能数据库, 确定了机舱隔热零部件试验方法, 对隔热敏感度初步进行了分析研究, 并将总结的隔热耐热零件的设计策略应用于某量产车型, 优化了机舱隔声垫的设计, 在保证满足机舱隔热耐热性能要求的前提下, 达到了降成本的目的。本文对于机舱热害的隔热零件的结构设计有很好的参考意义, 同时弥补了机舱零部件耐热害技术储备的短缺, 为今后应对更加恶劣的机舱热害温度提供了强有力的数据支撑, 也在前期设计阶段很好地避免了后续机舱零件炭化、烧熔、烧焦等热害现象带来的损失, 避免了性能过剩导致的成本增加, 也为各车企技术降成本工作提供了行之有效的方法, 具有很强的实用性及推广价值。

参 考 文 献

[1] 孙宝芝, 杨龙滨. 热传递理论、实践与应用 [M]. 哈

尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2020.