A Seal Design for the Platinum Temperature Sensor*

*SUN Yan**, *HUANG Wenbin*
(*CRRC Transducer Measurement Technology R&D Center*, *Ningbo CRRC Times Transducer Technology Co. Ltd*, *Ningbo Zhejiang* 315021, *China*)

Abstract: In order to meet the sealing requirements for the platinum temperature sensor used in rail transport system, a study was conducted on the thermal stress states of the encapsulant during the potting process, the curing process and the temperature testing process by leveraging the method of ABAQUS finite element analysis. Meanwhile, by optimizing the physical and chemical properties of the encapsulant, the adhesion of encapsulant to substrate is strengthened while the consistency of the CTE of different components is increased. Thus, the thermal stress of the system is reduced to meet a higher sealing reliability for the sensor product.

Key words: temperature sensor; sealing reliability; finite element analysis; coefficient of thermal expansion; thermal stress

EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2020.07.008

一种铂电阻温度传感器的密封性设计*

孙 炎*, 黄文斌
(宁波中车时代传感技术有限公司, 中国中车传感测量技术研发中心, 浙江 宁波 315021)

摘 要: 为满足轨道交通用的铂电阻温度传感器的密封性要求, 结合 ABAQUS 有限元分析手段, 研究了灌封胶在灌封和高低温循环工况下的热应力状态, 并通过对灌封胶的优化, 缩小各个部件之间的热膨胀系数匹配差异, 提升胶对壳体基材的粘接性, 以降低体系的热应力, 从而实现传感器的可靠密封。

关键词: 温度传感器; 密封可靠性; 有限元分析; 热膨胀系数; 热应力

中图分类号: TB303 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2020)07-0967-07

铂电阻温度传感器因其精度高, 稳定性、抗振性能、耐高温耐压性能好, 在铁路行业应用广泛, 尤其是在机车系统中, 起着极其重要的监测和保护作用[1-2]。例如, 机车、地铁等的牵引电机需要通过铂电阻温度传感器来监测电机定子绕组温度; 动车组除了用铂电阻温度传感器监控电机绕组温度外, 还用其监控齿轮箱、轴箱温度[3-5]。

轨道交通装备工作环境恶劣, 且产品故障所产生的影响较大, 因此对传感器的可靠性要求极高[6]。由于受到实际使用过程中环境温度变化的影响, 传感器所用的密封胶容易产生热应力失效, 导致密封性能下降, 环境中的水汽、灰尘等会进入传感器的内部, 从而影响绝缘性能和热响应性能, 最终影响产品可靠性[7]。本文针对轨道交通铂电阻温度传感器的密封性要求, 借助有限元分析的方法, 研究了传感器的各个组成部分在工况过程中的热应力状态, 并在此基础上提出一系列提高密封可靠性的设计方案, 为解决实际问题提供了思路。

1 铂电阻温度传感器的探头结构

图 1 为一种铂电阻型温度传感器探头结构, 主要由四部分组成: 外壳(包括探头基座和探针)、铂电阻、导热胶、密封胶。对于铂电阻温度传感器, 铂电阻安装在探针部位, 一方面要保证绝缘, 一方面又不能影响其热响应速度, 为此铂电阻周围要使用绝缘好、导热快、耐高温性能稳定的导热材料, 一般选用有机硅导热胶。同时, 有机硅胶质软, 不宜作为外露表面, 因此必须在探头基座部位即导热胶上方再灌封一段耐高温的密封胶, 常用硬质环氧树脂, 以起到防护和密封的作用。

项目来源: 国家重点研发计划(2016YFB1200401); 宁波市工业重大科技专项攻关项目(2017B10017)
收稿日期: 2020-04-08 **修改日期**: 2020-06-19

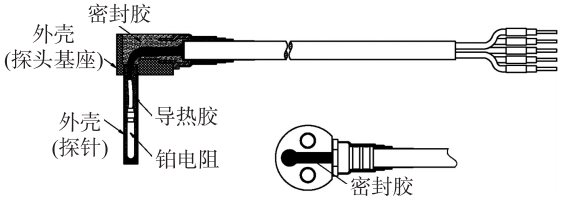


图 1 温度传感器的探头结构

图 1 中外壳部分的材料为 304 不锈钢,用于填充铂电阻与探针之间空隙的导热胶为一款有机硅胶,用于探头体表面的密封胶则是一款环氧树脂,将这两种胶分别命名为 Si 和 EP1。以上三种材料主要的热力学性能参数如表 1 所示。

表 1 材料主要热力学性能参数

性能	不锈钢	Si	EP1
热导率/($W\cdot m^{-1}\cdot ℃^{-1}$)	16.3	1.2	0.7
热膨胀系数/($10^{-6}\cdot ℃^{-1}$)	16.8	230	44
弹性模量/MPa	195 000	2.14	1 900

2 铂电阻温度传感器测量的允差与不确定度分析

工业铂电阻常用的有 Pt10、Pt100、Pt1000。其中,Pt100 铂电阻的激励电流范围为 0.1 mA~5 mA,在中低温区有较好的精度,在-70 ℃~400 ℃范围内能保证 B 级要求。轨道交通内 DCU 的供电电流一般为 5 mA,电机绕组的温度范围一般为-40 ℃~250 ℃,均在 Pt100 的工作范围内,因此,轨道交通的机车系统普遍采用 Pt100 铂电阻作为感温元件。为了使铂电阻温度传感器有良好的可替换性,机车车辆使用的 Pt100 铂电阻均需符合中华人民共和国国家标准《GB/T 30121-2013 工业铂热电阻及铂感温元件》要求。根据该标准,Pt100 铂电阻的允差等级如下:

A 级:$\pm(0.15+0.002|t|)$ ℃

B 级:$\pm(0.3+0.005|t|)$ ℃

其中:$|t|$=温度绝对值,单位是 ℃。

该标准所用铂电阻的电阻-温度关系是非线性的,其函数为:

$$R_t=R_0[1+At+Bt^2+C(t-100)t^3],(-200\sim0\ ℃)$$

$$R_t=R_0(1+At+Bt^2),(0\sim850\ ℃)$$

其中:R_t 为温度为 t 时的阻值;R_0 为 $t=0$ ℃时的阻值;式中常数为:$A=3.908\ 3\times10^{-3}℃^{-1}$,$B=-5.775\times10^{-7}℃^{-2}$,$C=-4.183\times10^{-12}℃^{-4}$。

本温度传感器所用铂电阻为铠装四线制输出阻值,A 级精度,符合传感器自身设计所需的 B 级精度要求。该温度传感器的阻值测试方式为,二等标准铂电阻与被检传感器同时在装置上直接进行量值比较。测试装置如图 2 所示,将二等标准铂电阻与万用表连接,与温度传感器同时浸入恒定温度的恒温槽介质中,待阻值持续稳定 1 min 后,分别读取数值。

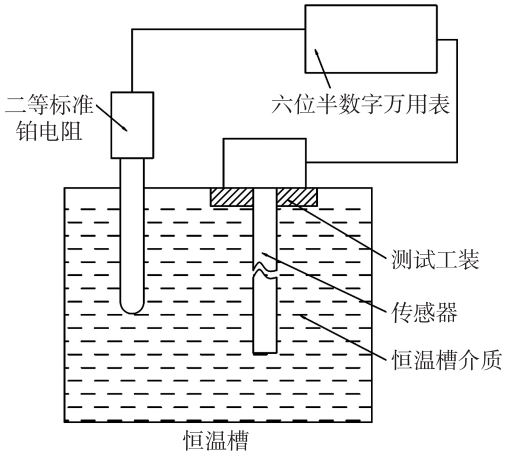


图 2 传感器测试装置

被测铂电阻温度传感器的标准不确定度来源主要有:测试重复性引入的标准不确定度 U_A、电测设备引入的标准不确定度 U_{B1}、温场不均匀引入的标准不确定度 U_{B2}、二等标准铂电阻的标准不确定度 U_{S1}。其中,U_A 采用 A 类评定方法,U_{B1}、U_{B2}、U_{S1}采用 B 类评定方法。

选择一只常规的被检温度传感器,分别在 0 ℃和 100 ℃两个检定点,对其阻值进行独立重复测量 10 次,结果见表 2。

表 2 铂电阻传感器重复性测量数据

测量次数	R(0 ℃)/Ω	R(100 ℃)/Ω
1	99.98	138.45
2	99.97	138.47
3	100.00	138.48
4	99.98	138.38
5	100.02	138.49
6	100.01	138.40
7	99.95	138.38
8	100.01	138.48
9	100.02	138.43
10	99.97	138.43

由表 2 数据,根据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》,按以下公式进行计算:

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}{n-1}}$$

式中:y 为测试阻值。

计算得 0 ℃检定点的标准偏差 $S=0.024\ 2$ Ω,

100 ℃检定点的标准偏差为 $S=0.041\ 8\ \Omega$。

A 类不确定度 $U_A=S/\sqrt{10}$,同时根据 JJG 229-2010《工业铂、铜热电阻检定规程》,Pt100 的 $(\mathrm{d}R/\mathrm{d}t)_{t=0}=0.390\ 83\Omega/℃$,$(\mathrm{d}R/\mathrm{d}t)_{t=100}=0.379\ 28\ \Omega/℃$,换算得 0 ℃检定点的标准不确定度为 $U_A=0.019\ 6$ ℃,100 ℃检定点的标准不确定度为 $U_A=0.034\ 9$ ℃。

六位半数字万用表检定证书给出其不确定度 $U=0.003\ 4\ \Omega$,$k=2$,因此其标准不确定度 $U_{B1}=U/k=0.001\ 7\ \Omega$,换算得 0 ℃检定点的标准不确定度为 $U_{B1}=4.35\times10^{-3}$℃,100 ℃检定点的标准不确定度为 $U_{B1}=4.48\times10^{-3}$℃。

100 ℃检定点由恒温油槽提供,检定证书给出其不确定度 $U=0.01$ ℃,$k=2$,因此其标准不确定度 $U_{B2}=U/k=0.01$ ℃。

0 ℃检定点由制冷恒温槽提供,检定证书给出其不确定度 $U=0.01$ ℃,$k=2$,因此其标准不确定度 $U_{B2}=U/k=0.01$ ℃。

二等标准铂电阻检定证书给出其不确定度 $U=0.002$ ℃,$k=2$,因此其标准不确定度 $Us_1=U/k=0.001$ ℃。

以上不确定度彼此独立不相关,故合成标准不确定度 $U_C=\sqrt{U_A^2+U_{B1}^2+U_{B2}^2+U_{S1}^2}$。扩展不确定度由合成标准不确定度的倍数表示。包含因子 $k=2$ 时,置信区间具有的置信概率 $p=95\%$。此时,铂电阻温度传感器测量的扩展不确定度为 $U=2U_c$。

因此,0 ℃检定点,$U=0.044$,$k=2$;100 ℃检定点,$U=0.073$,$k=2$。

3　工况过程与有限元分析

铂电阻温度传感器所用灌封胶的工况分为灌封工况和工作工况两种。其中,灌封工况过程分两个阶段:第一阶段,使用导热胶 Si 填充温度传感器探针部位,100 ℃下高温固化;第二阶段,使用密封胶 EP1 填充探头体部分,130 ℃下高温固化。工作工况主要是传感器在-40 ℃~125 ℃的温度区间内进行高低温循环。

材料准确的力学性能参数是获得高精度计算结果至关重要的条件,在分析前制作标准的灌封胶样条,并测试其在 100 ℃、130 ℃、-40 ℃、125 ℃等温度下的力学性能参数(包括:弹性模量、密度、泊松比、应力-应变曲线),最终将详细的力学性能参数输入到 ABAQUS 中,计算所有工况(灌封工况与工作工况)的弹塑性过程。

建立精确的三维模型,然后进行网格设计,其中网格处理标准如下:壳体采用六面体(Hex)网格,灌封胶采用四面体(Tetra)网格,为了获得高精度的计算结果,保证六面体(Hex)网格在各个方向上的层数均≥3,四面体(Tetra)网格在各个方向上的层数均≥4,同时对局部应力集中的区域进行网格加密处理。

将处理好的网格模型导入有限元分析软件 ABAQUS 中进行边界条件设定,设置过程中遵循实际的灌封工况,具体如下:首先 Si 加入,此时将外壳与 Si 之间通过 Tie(绑定)连接;接着 EP1 加入,此时将 Si 与外壳求和,然后再将 EP1 与求和后的整体通过 Tie(绑定)连接。

接着利用 ABAQUS 中的热应力分析对工作工况进行计算,此次施加的是温度边界条件:"-40 ℃~125 ℃"的一个高低温循环过程。在整个过程中采用三点约束方式(模拟产品放在一个平面上进行自由膨胀或收缩)对模型施加约束边界条件。

在灌封工况过程的第一阶段,随着温度的升高,Si 的体积膨胀量不断增大。在 Si 受热膨胀和不锈钢外壳对 Si 体积限制的双重作用下,该阶段结束时导热胶的热应力达到最大,此时各个部分的应力分布和位移分布见图 3。导热胶的最大应力集中于 Si 的胶体顶部,同时所对应的变形量也最大,具体表现为 Si 胶体向外突出。

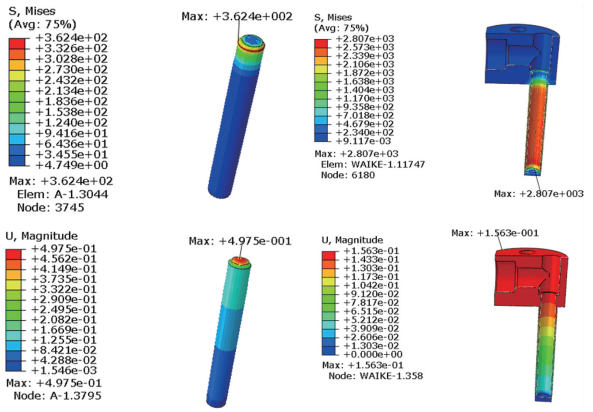


图 3　导热胶和外壳的应力分布和位移分布云图
(灌封工况第一阶段)

在灌封工况过程的第二阶段,由于温度继续升高,Si 和 EP1 的体积膨胀量同时增大,该阶段结束时热应力达到最大,此时各个部分的应力分布和位移分布云图见图 4。其中,导热胶的最大应力集中于 Si 的上表面中间,密封胶的最大应力集中于 EP1 与 Si 接触的表面。同时,导热胶与密封胶的最大变形也集中于相同的位置,且数值基本一致,具体的表

现为是 Si 体积突出的部分顶入 EP1 中。

在-40 ℃~125 ℃的高低温循环工作工况下,传感器各个部分的应力分布云图见图 5。传感器最大应力和最大变形均出现在高温区域,而非低温区。最大应力来自于不锈钢外壳,位于外壳与导热胶的接触面,最大变形则源于导热胶与密封胶,形变处位于二者的接触面中心区域,且为正向位移,具体表现为 Si 体积突出的部分顶入 EP1 中。

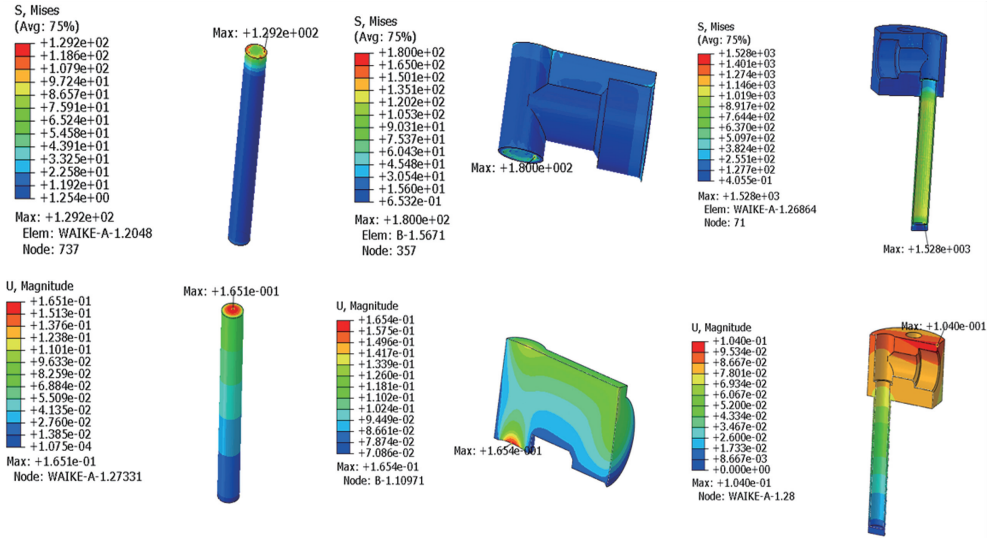


图 4 导热胶、密封胶、外壳的应力分布和位移分布云图(灌封工况第二阶段)

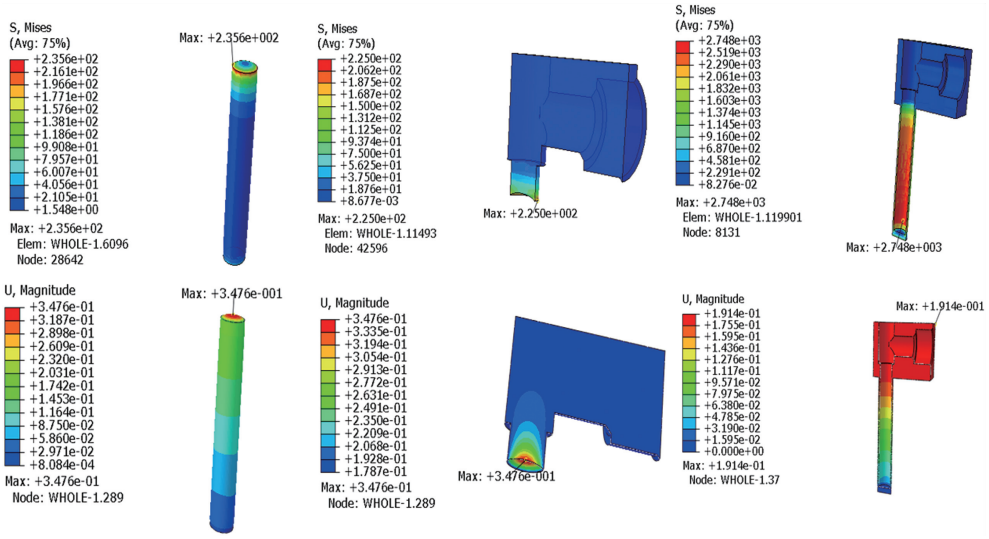


图 5 导热胶、密封胶、外壳的应力分布云图(高低温循环工况)

两种工况的有限元分析结果见表 3。从结果可知,被分析对象整体的最大应力都来自于外壳,最大变形都来自于胶。灌封导热胶 Si 时,Si 的弹性模量仅为 2.14 MPa,抵抗变形能力弱;线性膨胀系数为 230×10^{-6}/℃,胶的尺寸受温差的影响较大。胶的最大位移发生在其自由端,值为 0.497 5 mm;通过位移可以看出,导热胶和外壳之间发生的是一个剪切的作用,并且胶上的最大应力值为 362.4 MPa,远远超过了胶和不锈钢之间的剪切结合强度,此时导热胶与外壳发生分离的风险极大。而灌封密封胶之后,EP1 的弹性模量为 1 900 MPa,胶抵抗变形的能力相对 Si 强很多;线性膨胀系数为 44×10^{-6}/℃,证明 EP1 尺寸受温差影响相对 Si 要小,所以整个产品会向好的方向进行发展。对于灌封工况,第二阶段的最大应力和最大变形量均比第一阶段有所降低,环氧树脂密封胶 EP1 对导热胶 Si 引发的热应力失效起到了一定的缓解作用。

表 3 工况的有限元分析结果

性能	灌封工况第一阶段	灌封工况第二阶段	高低温循环工况
导热胶最大应力/MPa	362.4	129.2	235.6
导热胶最大变形/mm	0.4975	0.165 1	0.347 6
密封胶最大应力/MPa	—	180.0	225.0
密封胶最大变形/mm	—	0.165 4	0.347 6
不锈钢最大应力/MPa	2087.0	1 528.0	2 748.0
不锈钢最大变形/mm	—	0.104 0	0.191 4

根据热胀冷缩原理,并从高低温循环过程对比于 Si 和 EP1 胶变形趋势来看,高温过程中发生的是膨胀现象,两种胶的结合面发生“凸”的变形;低温过程中发生的是收缩现象,两种胶的结合面发生“凹”的变形。由于应力和变形都与温度变化有关,而高低温循环工况时的温差是最大的,达到 165 ℃,所以高低温循环工况时体系受到的最大应力和变形量都比灌封工况时大。并且,热膨胀系数最大的 Si,对应力和变形起到了关键主导作用:应力集中于外壳与 Si 的接触面,变形发生在 Si 和 EP1 的接触面。

另外,虽然密封胶 EP1 的加入一定程度上缓解了热应力失效,但由于该灌封工况的两个阶段都使用了高温固化,因此它们可被视为两个高温过程,温差对产品的性能起了主导作用,所以,不管是 EP1 还是 Si,它们与不锈钢发生分离的风险都很大。

综上可知,应力与变形的主要来源是各个组件之间热膨胀系数(CTE)的匹配程度。其中,由于有机硅导热胶的 CTE 最大,所以它所带来的影响最大。同时,不锈钢外壳的约束作用也会显著影响整体应力和变形,当应力大小超过胶与壳体之间的粘接强度时,胶体与金属壳体脱离,整体表现为胶层向自由端形变(本文中形变表现为凸出),且胶面与壳体之间产生缝隙,潮气和灰尘等由此进入,最终导致防护效果下降。

4　密封性优化设计

针对铂电阻温度传感器的灌封胶与外壳因热应力而分离、导致密封不良的问题,可通过以下方法加以解决:

首先,缩小各个部件之间热膨胀系数即 CTE 的匹配差异[8]。材料的热膨胀系数是材料的物理特性之一,指材料在温度变化时尺寸随之变化的特性。一般来说,高分子材料的 CTE 范围大概是 $50\times10^{-6}\sim300\times10^{-6}$/℃,金属的则为 $3\times10^{-6}\sim20\times10^{-6}$/℃。材料的 CTE 不同,因此而导致温变条件下膨胀不一致,产生的应力也会越大[9]。CTE 差异越小,适配度越好,在界面处因 CTE 引发的热应力和形变越小[10-11]。

常用的电子灌封胶,它们的 CTE 数值排序为:有机硅胶>聚氨酯>环氧树脂。故在此产品结构中,为缩小 CTE 差异,可以从两个方面进行:第一,探针部位选择用环氧树脂导热胶替代原有机硅导热胶;第二,探针与探头基座均选用 CTE 尽可能小并相互接近的环氧树脂作为密封胶。最理想的状态,整个传感器使用同一种低 CTE 的环氧树脂,既作为导热胶又作为密封胶,以保持整体热膨胀的一致性。

获得导热型环氧树脂的常用途径是在环氧体系里加入高导热填料,如 $Al(OH)_3$ 等[12],导热填料的加入会大大降低环氧树脂的 CTE。但同时,由于导热填料与环氧基体在分子结构、物理性能等方面仍存在着极大差异,并且体系的分散性越差[13],灌封胶的热导率提升越难,因此高导热的环氧树脂一般粘度也高。粘度是用于表征液体流动性质相关的阻力因子,直接反映了灌封胶的流动性好坏。粘度过高,胶体流动性差,导致在传感器壳体内流动不到位而产生气泡,气体的 CTE 远大于固体,胶体内有气泡反而更容易导致 CTE 失配造成应力损伤。而在实际应用中,环氧树脂灌封胶很难做到高导热、低 CTE 与低粘度兼得。

其次,提高灌封胶与不锈钢外壳之间的粘接强度。因为环氧树脂对金属的粘接能力要强于有机硅胶,故全部使用环氧树脂有助于灌封胶与不锈钢外壳的结合。在对环氧树脂的配方进行改性时,选择分子链较短的聚合物、增加胺类固化剂的比例、适当增加增韧剂含量、引入柔性链段、更换新型的胺类固化剂等方案,均可以调整出较高粘接性能的环氧体系[14-17]。

根据以上解决方法,最终选定了两种以胺类为固化剂的环氧树脂作为该温度传感器的用胶方案,环氧树脂的代号分别为 EP2 和 EP3,其中,EP2 为导热胶,EP3 为密封胶,它们各自的常规性能参数如表 4 所示。

表 4　两种环氧树脂的性能参数对比

性能	环氧树脂 EP2	环氧树脂 EP3
热导率/($W\cdot m^{-1}\cdot ℃^{-1}$)	1.8	0.7
热膨胀系数/($10^{-6}\cdot ℃^{-1}$)	39	47
弹性模量/MPa	14 600	5 180

同时,本文测定了不同灌封胶对不锈钢材料的粘接性能,结果见表 5。由表 5 可知,EP3 对不锈钢的粘接能力很强(远高于 EP1 和 EP2),表明它在一定程度上可以抵抗热应力带来的胶与不锈钢界面之间的剪切分离。

表 5　不同材料与不锈钢粘接性能对比

性能	有机硅胶 Si	环氧树脂 EP1	环氧树脂 EP2	环氧树脂 EP3
粘接强度/MPa	0.1	9.1	5.6	24.6

此时,借助 ABAQUS 模拟了经换胶优化后的温度传感器,在-40 ℃~125 ℃的高低温循环工作工况下,各个部分的热应力变化,模拟结果如图 6。

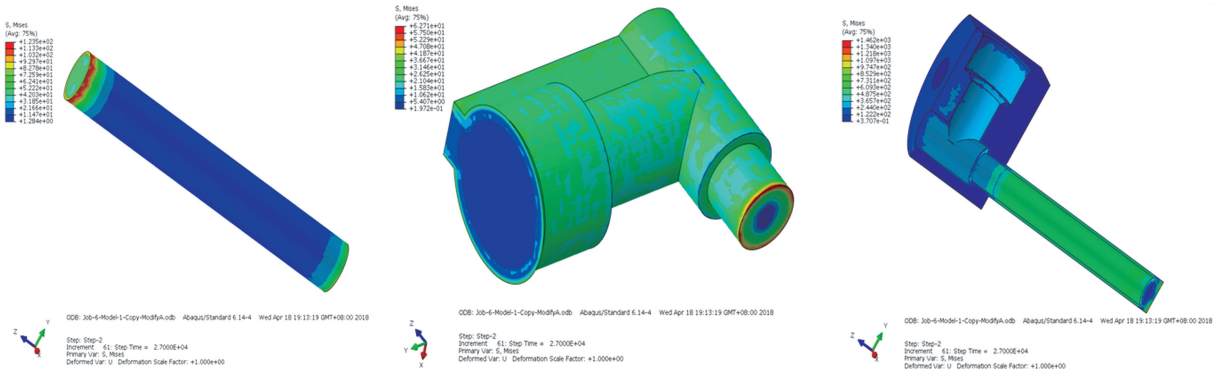


图 6 优化后各个部分的等效应力分布云图(高低温循环工况)

高低温循环工况下,温度传感器各个部分在优化前后的最大热应力结果如表 6。从有限元分析结果可见,经换胶优化后,传感器的热应力状况得到了较大的改善,最大热应力显著降低。

表 6 优化前后温度各个部位的最大热应力(高低温循环工况)

性能	外壳	导热胶	密封胶
优化前热应力/MPa	2 748.0	235.6	225.0
优化后热应力/MPa	1 462.0	123.5	62.7

换胶方案优化前后的温度传感器,经高低温循环试验,其胶面状态结果见图 7。

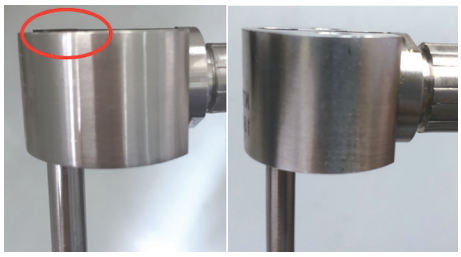


图 7 换胶方案优化前后的温度传感器

从图 7 可见,使用原方案(Si+EP1)的传感器胶面有明显的凸出,胶层与壳体分离,水汽等易从分离出进入产品内部,引发失效。而经优化后(EP2+EP3)的传感器胶面无凸出,胶体与探头体结合紧密,能保持良好的密封效果。

验证试验采用了 20 只温度传感器产品,经 10 周期-40 ℃~125 ℃的高低温后,进行累计 24 d 常温常压水密测试、绝缘测试和耐压试验。参照中华人民共和国国家标准《GB/T 25119-2010 轨道交通机车车辆电子装置》,该传感器要求的绝缘测试的合格判据为:直流 500 V 电压,所有芯线短接与外壳之间、屏蔽线与外壳间进行绝缘电阻测试,阻值>550 MΩ;要求的耐压试验的合格判据为:所有芯线短接与外壳之间、屏蔽线与外壳间进行耐压试验,应能承受 50 Hz 的交流 2 500 V 电压、保持 1 min 的测量,芯线对探头漏电流<0.5 mA,芯线对屏蔽线漏电流<2.5 mA,无击穿或闪络现象。其验证结果见表 7。从表 7 可见,验证产品的水密测试结果表现优异,进一步证明了换胶优化方案的可行性。

表 7 验证产品的水密测试结果

	绝缘电阻	耐压/V	芯线对探头漏电流(样品总数/测试合格数)	芯线对屏蔽线漏电流(样品总数/测试合格数)
出厂例行测试	无穷大	2 500	20/20	20/20
高低温测试	无穷大	2 500	20/20	20/20
3 d 常温常压水密测试	无穷大	2 500	20/20	20/20
6 d 常温常压水密测试	无穷大	2 500	20/20	20/20
9 d 常温常压水密测试	无穷大	2 500	20/20	20/20
24 d 常温常压水密测试	无穷大	2 500	20/20	20/20

5 结论

借助 ABAQUS 有限元分析手段,对基于“导热硅胶+环氧树脂”灌封方案的铂电阻温度传感器,在灌封和高低温循环两种工况中灌封胶的热应力状态进行了研究,并提出了一种基于“导热环氧树脂+粘接环氧树脂”的灌封方案,以缩小各个部件之间的热膨胀系数匹配差异、提升胶对壳体基材的粘接性。通过有限元分析、产品测试,对新灌封方案进行了分析和验证,结果表明,该方案能有效地降低体系的热应力,提高灌封胶对温度传感器的密封可靠性。

参考文献:

[1] 于海波,刘芳铭,王波,等. 中国标准化动车组轴温检测系统[C]//第十届中国智能交通年会优秀论文集. 2015:359-363.

[2] 赵亚辉,朱琴跃,申朝旭,等. 高速动车牵引传动监测系统硬件设计[J]. 测控技术,2012,31(10):66-72.

[3] 张波,陆阳,王志峰,等. 城轨列车牵引系统热容量实验方案研究[J]. 中国铁道科学,2013,34(3):98-104.

[4] 高枫,夏菲,郑雪洋,等. 高速动车组牵引传动单元温度监控技术研究[J]. 铁道机车车辆,2013,33(4):23-26.

[5] 张文忠,哈大雷,王 乾.新一代高速动车组 CRH380C 轴温监测系统[J]. 机车电传动,2012,10(6):71-73.

[6] 杨光,吴宁.CRH3 高速动车组轴温监控系统安全可靠性研究[J]. 铁道机车车辆,2011,31(4):91-94.

[7] 李元利,程斌.动车组轴温传感器故障分析及解决措施探讨[J]. 铁道车辆,2015,53(10):37-40.

[8] 吉新阔,肖革胜,刘二强,等. 高温下不同银含量微电子胶连点的力学性能及膨胀系数不匹配热应力[J]. 复合材料学报,2017,34(11):2455-2462.

[9] 刘加凯.多层薄膜结构中的热应力分析[J]. 传感技术学报,2016,29(7):994-999.

[10] 李洪美,孙云娜,段 力,等. 高温复合多层膜结构传感器的热机械可靠性[J]. 仪表技术与传感器,2015,11:7-10.

[11] 李平,石云波,郭涛,等. MEMS 高 g 加速度传感器封装热应力的研究[J]. 传感技术学报,2010,23(12):1695-1699.

[12] 裴昌龙,贺英,张瑶斐,等. 高导热环氧/有机硅杂化封装胶的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工厂,2012,28(4):140-143.

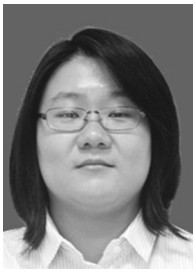
[13] 任凤梅,黄艳娜,宋远周,等. ZnO 在 Al2O3/导热环氧树脂灌封胶中的应用研究[J]. 热固性树脂,2014,29(4):34-37.

[14] 胡孝勇,袁晓玲.耐高温环氧树脂胶黏剂研究进展[J]. 化学与黏合,2009,31(5):49-52.

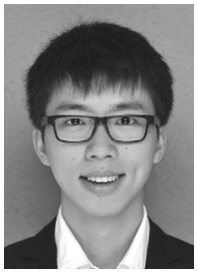
[15] 陈泽明,王文博,曹先启,等. 机械表面处理铝合金粘接用环氧胶黏剂的制备与性能研究[J]. 化学与黏合,2019,41(3):178-181.

[16] 孔志祥,邹路丝,张洋,等. 含柔性链段环氧树脂的合成与性能[J]. 粘接,2015,11:44-47.

[17] 曹骏,李诚,范宏.新型有机硅多元胺环氧树脂固化剂结构与性能[J]. 粘接,2014,6:33-37.



孙　炎(1983—),女,高级工程师,博士,主要研究领域为传感器设计,sunyan2@ csrzic.com;



黄文斌(1991—),男,工程师,硕士,主要研究领域为传感器设计,huangwb2@ csrzic.com。