

基于 TRIZ 理论解决温度指示涂料测温精度不高问题的创新设计研究

田永丰, 谈 珍, 于 丽, 张晏云, 李建飞, 徐润斌, 胡进奔

(中昊北方涂料工业研究设计院有限公司, 兰州 730101)

摘要: 基于 TRIZ 理论, 对现有温度指示涂料系统进行了功能分析、因果分析、冲突区域确定、理想解分析和可用资源分析。针对 5 个问题关键点, 分别利用冲突解决理论、物质-场分析及 76 个标准解、效应等工具进行了问题求解, 并获得了 19 条创新解。通过对所有创新解的可用性评估, 确定了解决问题的最优方案为: 通过色板可变尺寸的设计来解决样板涂层和温度场的均匀性问题, 提高标定的准确性, 然后在多变色不可逆温度指示涂料中添加磷光体光致发光分子, 使涂层既可以通过颜色变化来直观地呈现被测物体表面的温度场分布信息, 又可以通过磷光体的激发光信息与温度的关系来测量和校准温度指示涂料, 从而提高温度指示涂料的测量精度。

关键词: TRIZ 理论; 温度指示涂料; 测温精度; 创新设计

中图分类号: TQ630.7

文献标志码: A

文章编号: 1007-9548(2025)09-0001-08

Innovative Design Research Based on TRIZ Theory to Solve the Problem of Low Temperature Measurement Accuracy of Temperature Indicating Paint

TIAN Yong-feng, TAN Zhen, YU Li, ZHANG Yan-yun, LI Jian-fei, XU Run-bin, HU Jin-ben

(North Paint & Coatings Industry Research and Design Institute Co., Ltd. of China Haohua, Lanzhou 730101, China)

Abstract: Based on the TRIZ theory, this article conducts functional analysis, causal analysis, conflict zone determination, ideal solution analysis, and available resource analysis on existing temperature indicating paint systems. We used conflict resolution theory, material field analysis, and 76 standard solutions, effects, and other tools to solve the 5 key points of the problem, and obtained 19 innovative solutions. Through the evaluation of the usability of all innovative solutions, the optimal solution to the problem was determined to be: by designing a color palette with variable dimensions, the uniformity of the sample coating and temperature field can be solved, improving the accuracy of calibration. Then, phosphor photoluminescence molecules can be added to the multi color irreversible temperature indicating paint, allowing the coating to visually present the temperature field distribution information of the measured object surface through color changes, and to measure and calibrate the temperature indicating paint through the relationship between the excitation light information of the phosphor and temperature, thereby improving the measurement accuracy of the temperature indicating paint.

Key words: TRIZ theory; temperature indicating paint; temperature measurement accuracy; innovative design

收稿日期: 2025-01-02

作者简介: 田永丰(1989—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事温度指示涂料及特种涂料的研究与开发工作。E-mail: 289022694@qq.com。

0 引言

温度指示涂料是一种特殊的功能涂料, 它利用涂层在加热后的颜色变化来指示被测物体表面的温度和温度分布。在加热过程中可以产生两种或多种不同颜色变化的温度指示涂料称为多变色不可逆温度指示涂

料。多变色不可逆温度指示涂料广泛应用于航空发动机燃烧室、燃烧室衬套、燃料喷射器、叶片、火焰管、涡轮盘和加力扩散器等军事领域,以及汽车发动机、涡轮发电机、大型风力涡轮机、热交换器和大型电炉等民用工业领域。

多变色不可逆温度指示涂料的变色原理是基于物质的物理和化学变化,如晶体转变、升华、熔化、热分解、氧化和固态反应等。当涂层受到来自外界的热量冲击而温度逐渐升高时,涂层的颜色就会随着时间的延长和温度的升高而发生不同的变化,当涂层自然冷却返回到室温后,涂层的颜色将不会再发生任何变化,并且这种颜色代表的是涂层所经历的最高温度。因此,只需要记录受热过程的时间就可以通过涂层的颜色来判断物体表面的受热情况。此外,由于受热后的涂层相邻两种颜色之间往往会形成一条清晰的颜色边界,并且边界上的温度是相等的。因此,可以通过颜色边界绘制出被测物体表面的温度分布等温图,以便于直接观察被测物体表面的温度分布规律。

目前,主要开发温度指示涂料的国家有德、英、美、日、俄。其中,美国的 TPTT 公司和英国的劳斯莱斯公司在多变色不可逆温度指示涂料的开发和应用方面表现最佳。他们的多变色温度指示产品具有与国内多色指示产品相当的性能水平。多变色不可逆温度指示涂料的温度测量精度为 $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,而在大多数情况下,温度测量精度为 $50\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。存在温度测量精度低、误差大的问题,已无法满足设计人员对温度测量精度日益提高的要求。目前关于这一问题的研究主要集中在通过基于颜色识别的自动读取系统提高多变色不可逆温度指示涂料的温度测量精度。然而,由于原材料的批次稳定性、加热速率、恒温时间、工作气氛、涂层厚度、光照条件和材料类型等各种因素对多变色不可逆温度指示涂料颜色变化的影响,很难建立自动颜色识别和测量技术的数据库,并且以此建立的系统普遍存在适应性较差的问题^[1-4]。

本文基于 TRIZ 理论(发明问题解决理论),对温度指示涂料存在的测温精度不高的问题进行系统分析,然后运用 TRIZ 工具对问题进行求解,并将所有的解决方案进行汇总及可用性评估,提出了最终的解决方案^[5-9]。

1 问题分析

针对温度指示涂料测温精度不高的问题分析过程主要包括问题提出、问题分析、工具选择和解的评价等四部分内容。其中,问题分析内容包括功能分析、因果分析、冲突区域确定、理想解分析和可用资源分析;选择的求解工具为发明原理或分离原理、效应和物质场

模型及 76 个标准解。问题分析过程如图 1 所示。

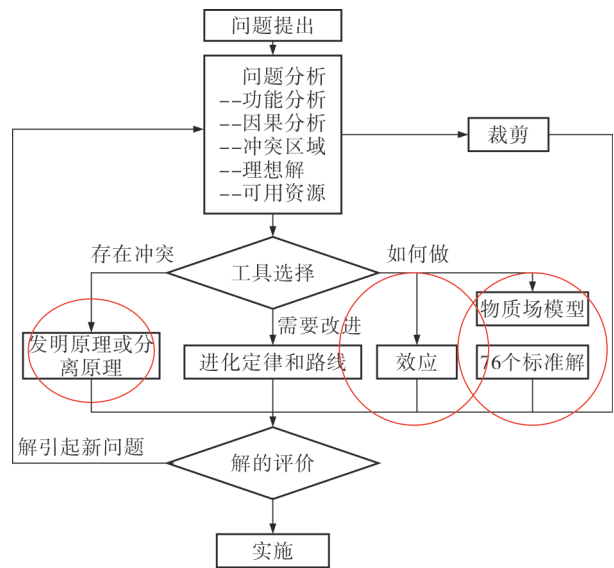


图 1 问题分析过程流程

1.1 功能分析

功能分析是从完成功能的角度分析系统,主要目的是将抽象的系统转化为具体的图表,以便于设计者了解产品所需要具备的功能与特征,或者通过定义与描述系统元件所需达到的功能,以及元件之间或与外界环境的相互作用来分析整体系统,能够协助设计人员化繁为简,合理地进行创新设计。系统是由功能元件及作用组成的功能网络,该网络与超系统及制品共同构成产品功能模型。

首先进行系统分析,确定系统的制品、功能元件和超系统元件,如表 1 所列。分析各元件之间的作用关系如表 2 所列。建立系统的功能模型如图 2 所示。

表 1 系统的制品、功能元件和超系统元件

项目	内容
制品	高温合金
系统元件	涂层,仪器
超系统元件	人员,空气

表 2 元件相互作用矩阵

元件名称	涂层	仪器	人员	空气	高温合金
涂层	/	-	-	-	+
仪器	+	/	-	-	-
人员	+	-	/	-	-
空气	+	-	-	/	+
高温合金	+	-	-	-	/

注: + 代表希望参数能被改善, - 代表希望参数不被恶化。

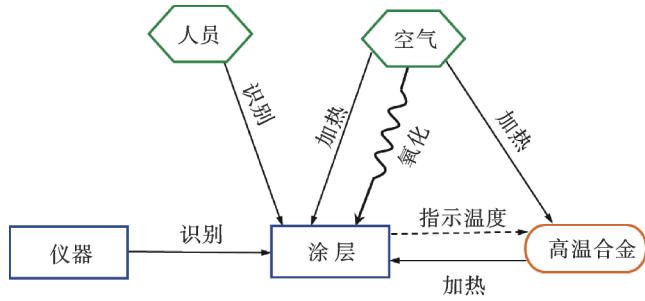


图2 现有系统的功能模型

通过功能模型分析,我们描述了系统元件及其之间的相互关系,并得出导致“测温精度不高”问题的功能因素。在建立的功能模型图中选择出目标问题为:涂层对合金温度指示不足。

1.2 根原因分析

应用因果链分析法可以确定产生温度指示涂料测温精度不高的关键原因,分析过程如图3~4所示。

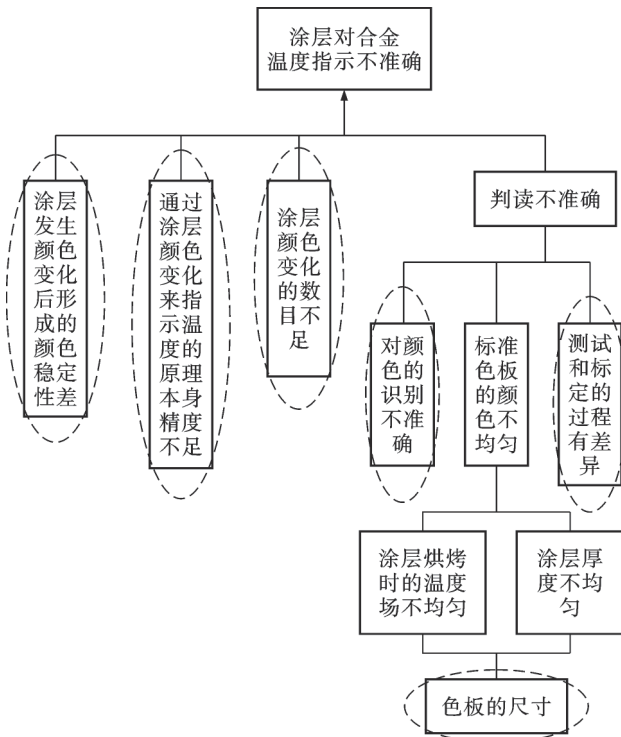


图3 因果链分析

通过因果链分析,找出了6个关键因素,并对得出的关键原因进行分析,分析结果如表3所列。

从表3可知,对于关键原因1、3、4、5、6都不能直接找到具体的解决方案,而对于关键原因2,可以通过搭建小型模拟标定装置来解决。

1.3 问题关键点确定

通过关键原因分析,确定了5个问题关键点,具体如下所述。

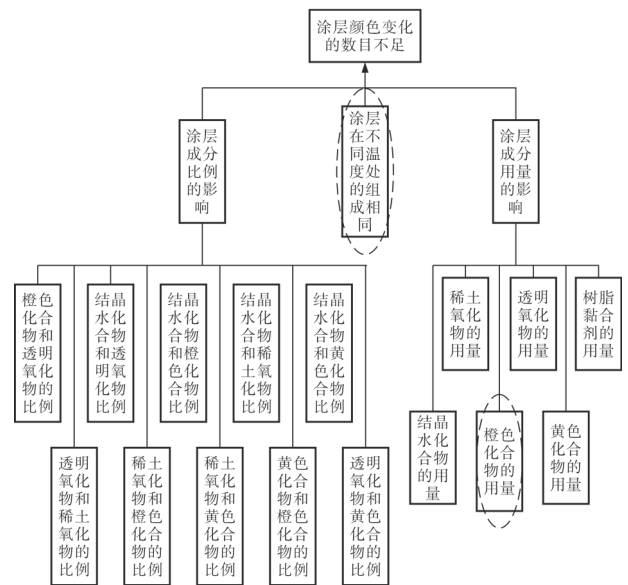


图4 因果链分析

表3 关键原因分析

关键原因	是否存在解决方案	具体方案
1 涂层发生颜色变化后形成的颜色稳定性差	否	无
2 试和标定过程有差异	是	搭建小型模拟标定装置
3 色板的尺寸	否	无
4 涂层的颜色变化数目不足	否	无
5 对颜色的识别不准确	否	无
6 涂层指示温度的原理不准确	否	无

问题关键点 1:解决因为涂层发生颜色变化后形成的颜色稳定性差,导致对涂层颜色识别不准确的问题。

问题关键点 2:解决因为色板的尺寸太小,导致标准色板的涂层颜色不均匀的问题。

问题关键点 3:解决因为涂层的颜色变化数目不足,导致涂层对合金温度指示精度不足的问题。

问题关键点 4:解决因为颜色的识别不准确,导致涂层对合金温度指示精度不足的问题。

问题关键点 5:解决因为测温原理不准确,导致涂层对合金温度指示精度不足的问题。

1.4 资源分析

系统内、外部资源分析如表4~5所列。

通过对系统的内部和外部资源进行分析,获得解决方案为:加强培训,使判读人员富有经验。

1.5 理想解分析

温度指示涂料测温精度不高问题的最终理想解为:高温合金自身可记录并显示其所经历的最高温度。

表 4 系统内部资源分析

类别	资源名称	可用属性参数	方案	可用性评估
物质资源	涂层	分解产物	无	/
		密度	无	/
		表面粗糙度	无	/
场资源	仪出器发的光	强度	无	/
		波长	无	/
	涂层重力	大小	无	/

表 5 系统外部资源分析

类别	资源名称	可用属性参数	方案	可用性评估
物质资源	空气	温度	无	/
		湿度	无	/
		流速	无	/
	人员	视觉判断力	加强培训,使判读人员富有经验	可用
	高温合金	表面粗糙度	无	/
场资源	空气	流动	无	/

次理想解:温度每升高 1 °C,涂层就会变成一种新的颜色,每一种颜色变化都是不可逆的,并且颜色的变化只是温度的函数。

本文设计的最终目的是测量合金所经历的最高温度。理想解是温度每升高 1 °C涂层就会变为一种新的颜色来记录合金表面的最高温度。达到理想解的障碍是物质之间的物理、化学变化不只是温度的函数,还与时间密切相关。出现这种障碍的结果是涂层随温度的颜色变化数目有限,指示温度不准确。而这种障碍始终存在,暂无可用资源创造条件去消除这种障碍。

依据理想解分析得到解决方案为:寻找新物质、新方法,使涂层的某一特性具备记录最高温度的功能。

2 运用 TRIZ 工具进行问题求解

2.1 冲突解决工具

2.1.1 以“涂层颜色变化后形成的颜色稳定性差”为入手点解决问题

冲突描述:为了增加涂层的“测温精度”,需要增加涂层的颜色变化数目,但这样做会因涂层颜色变化后形成的颜色稳定性差,导致对颜色的识别不准确。

转换成 TRIZ 标准冲突为:改善的参数是测温精度,恶化的参数是涂层颜色变化后形成的颜色稳定性。

查找冲突矩阵,得到发明原理,如表 6 所列。

表 6 查找冲突矩阵得到的发明原理

改善的参数	恶化的参数	对应的发明原理
测温精度	稳定性	13,32,35

依据 No.13 发明原理第 3 条“使物体、系统或过程倒置”,得到如下解:测试完毕,迅速涂上不同熔点的像蜡一样的物质,能熔化的就说明温度高于蜡的熔点,不熔化的就说明温度低于蜡的熔点。

依据 No.32 发明原理第 3 条“为了提高物体的可视度,添加有色添加物或发光元素”,得到如下解。

方案一:寻找一种性能不随温度而改变的发光物质引入到涂层中,它可通过涂层透明度或反射率的不同而使涂层变化后的颜色更容易区分、辨识。

方案二:寻找一种发光强度随温度规律性变化的发光物质,通过测量发光物质的光强信号来提高温度测量精度。

2.1.2 以“色板的尺寸”为入手点解决问题

冲突描述:为了提高涂层厚度的均匀性,需要参数“色板的尺寸”为“大”,但又为了提高涂层烘烤时温度场的均匀性,需要参数“色板的尺寸”为“小”,即,色板尺寸既要“大”又要“小”。

考虑到参数“色板的尺寸”在不同的“时间段”具有不同的特性,因此该冲突可以从“时间”上进行分离。

选用 4 条分离原理(空间分离、时间分离、基于条件的分离、整体与部分分离)当中的“时间分离”原理,得到解决方案为:制备一种可分离式的色板,使其在涂装涂料时具有较大的尺寸,在炉中进行标定前可以分离成较小的尺寸,如图 5 所示。



图 5 色板尺寸方案示意

2.2 物质-场标准解工具

以“涂层的颜色变化数目不足”为入手点解决问题,建立问题的物质-场模型,如图 6 所示,其中 S1 为高温合金, S2 为涂层, F_{Ch} 为化学场。

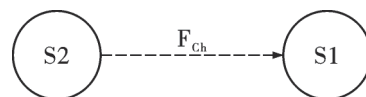


图 6 物质-场模型

根据所建问题的物质-场模型,应用标准解解决

流程,得到标准解为:No.2, No.3, No.47, No.58。标准解 的求解流程如图 7 所示。

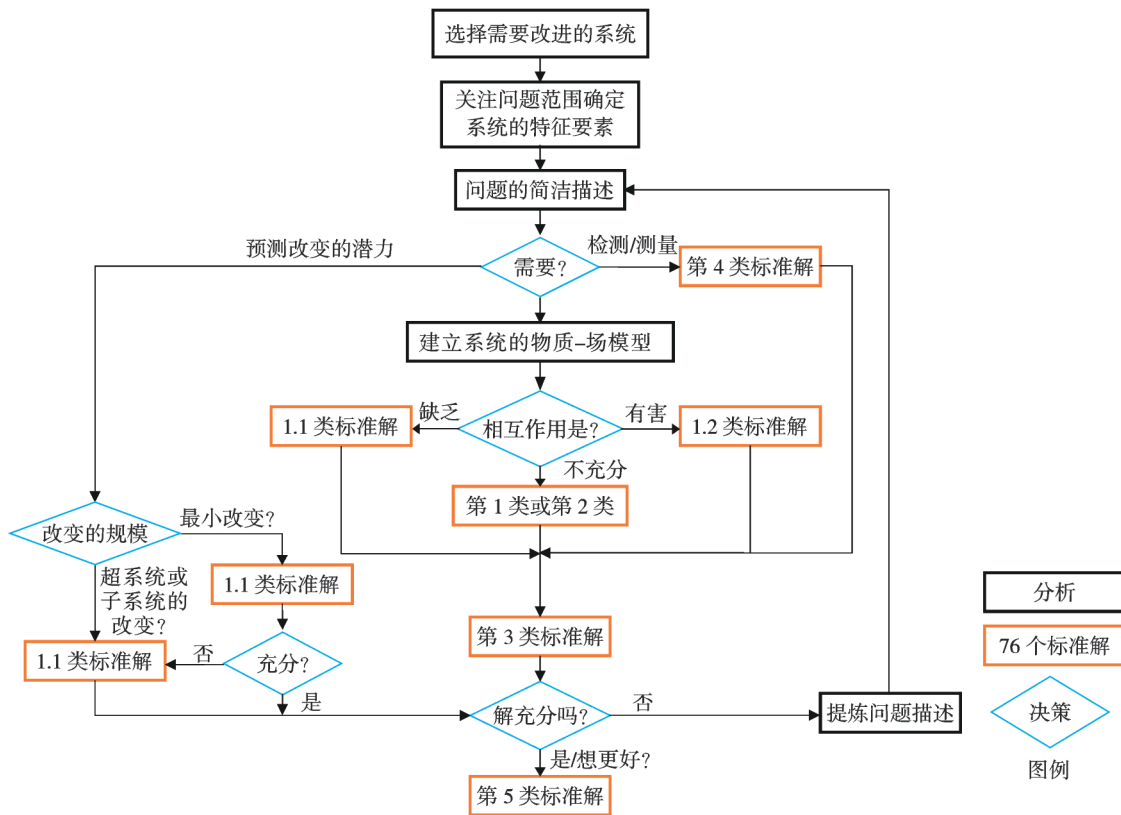


图 7 标准解的求解流程

选定的标准解 No.2 为:系统不能改变,但是允许添加一个永久或暂时的内部附加成分。在 S1 或 S2 内添加一个附加成分。选定的标准解 No.3 为:系统不能改变,但允许使用一个永久或暂时的外部附加成分 S3 改变 S1 或 S2。选定的标准解 No.47 为:测量—引入的附加物。引入的附加物在原系统中变化,测量附加物的这种变化。选定的标准解 No.58 为:传递到双或多系统。

方案一:依据标准解 No.2 得到问题的解,采用高精度的点测温技术,在合金表面均匀地布置测温点,最后用测温点的数据来校准涂层的测温结果,从而提高测量精度。

方案二:依据标准解 No.3 得到问题的解,在测温后引入一种物质,涂上去像显影剂一样,能清晰地呈现出更多不同的颜色。

方案三:依据标准解 No.47 得到问题的解,在涂层中引入一种物质,其本身在高温下不和涂层反应,但其某一性质(光学、磁学、化学)随温度的升高而发生不可逆的变化,可通过测量引入物质的这一特性变化来提高涂层的测温精度。

方案四:依据标准解 No.58 得到问题的解,制备两种或多种相同温度段的多变色不可逆温度指示涂料。

改进之后的物质-场模型如图 8~11 所示。

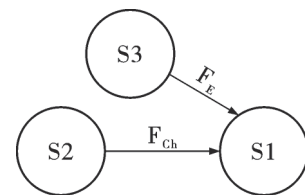


图 8 依据 No.2 改进的物质-场模型

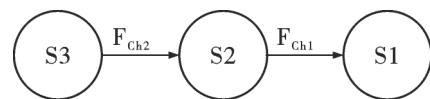


图 9 依据 No.3 改进的物质-场模型

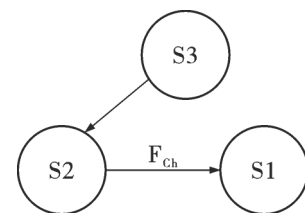


图 10 依据 No.47 改进的物质-场模型

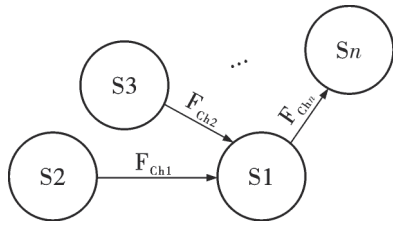


图 11 依据 No.58 改进的物质-场模型

2.3 效应工具

2.3.1 以“对颜色的识别不准确”为入手点解决问题

1) 确定问题要实现的功能为：“测量颜色”（动词+

名词）。以“测量颜色”为要实现的功能，查找效应知识库 http://wbam2244.dns-systems.net/EDB_Welcome.php 共获得 21 条效应，查询结果如表 7 所列。

2) 查找效应知识库，得到可用的效应及问题的解决方案如表 8 所列。

3) 确定问题要实现的功能为：“改变颜色”（动词+名词）。以“改变颜色”为要实现的功能，查找效应知识库 http://wbam2244.dns-systems.net/EDB_Welcome.php 共获得 137 条效应，查询结果如表 9 所列。

4) 查找效应知识库，得到可用的效应及问题的解决方案如表 10 所列。

表 7 以“测量颜色”为实现功能的效应查找结果

吸收式滤波器	法布里珀罗干涉仪	光电导性	全光相机	人工光合作用	光学滤光器	薄膜
衍射	布拉格衍射	光解离	布儒斯特偏振角	光生伏特效应	多孔透镜	波带板
聚焦	光电效应	半导体发光二极管	二向色滤光片	图像处理	摄影术	光导纤维

表 8 可用效应和问题解决方案

可用效应	问题解决方案
图像处理	通过相机获得涂层变化后的颜色图像，利用图像中的颜色信息(RGB 值,XYZ 值等)进行数学运算来处理图像
全光摄像机	使用微透镜阵列捕捉场景的 4D 摄像机，获得涂层变化过程的完整信息，先做视频分析再进行图像处理

表 9 以“改变颜色”为实现功能的效应查找结果

消融	电泳	静电沉积	朴金耶效应	磨损	电镀	液晶
吸收	发光二极管	光热偏转	负折射率超材料	倍频效应	氧化还原反应	法布里-珀罗干涉仪
使潮湿	波带片	薄膜技术	风化	玻璃化	腐蚀	利奥滤光器
乳状液	爆炸	阳极氧化	稀释	消泡剂	泡沫	气溶胶化学气相沉积
缩小	微乳液	结晶作用	图像处理	爆燃	克尔效应	光学晶体
折射	微球	生物发光	力致发光	二向色滤光片	多孔透镜	压电发光
反射	氧化	漂白	辐射	电解	光源	等离子体
分散	纳米复合材料	布拉格衍射	波浪的频散	衍射光	栅压力降	全光相机
阴影	胶体	泡沫	荧光	铁磁流体	孔	多色现象
吸收滤光片	负折射效应	阴极发光	光学滤光器	多普勒效应	干涉	极化
沉淀物	喷雾	烟尘	凝胶	电弧	包覆	孔隙度
闪烁	絮凝作用	化学发光	铁磁粉末	电光效应	彩虹色	化学沉淀
离子注入	荧光测温法	胆甾型液晶	化学气相沉积	电化学发光	红外辐射	有机发光二极管
太阳能	发光	克里斯琴森效应	菲涅耳透镜	电致变色	层压	压力增加
溶胶	臭氧	涂层	加热	衍射	透镜	棱镜
空间滤波器	乌佐效应	咖啡环效应	热变色涂料	电致发光	激光烧蚀法	压敏涂料
牛顿环	磷光现象	射线发光	引力红移	电沉积	白热	净化
悬浮	光致变色	胶体结晶	光波导	热致变色	水合作用	全反射
热辐射	光弹性	合成材料	外差法	热致发光	富勒烯	丁达尔效应
感应加热	光致发光	电传导	过氧化氢			

表 10 可用效应和问题解决方案

可用效应	问题解决方案
光致变色	在可见光以外光源的照射下观察涂层变化后的颜色
牛顿环	通过不同波长的单色光去观察涂层变化后的颜色
多色性	使用偏振光,在不同的角度观察涂层变化后的颜色

2.3.2 以“涂层指示温度的原理不准确”为入手点解决问题

1)确定问题要实现的功能为:“测量温度”(动词+名词)。以“测量温度”为要实现的功能,查找效应知识库 :http://wbam2244.dns-systems.net/EDB_Welcome.php 共获得 67 条效应,查询结果如表 11 所列。

表 11 以“测量温度”为实现功能的效应查找结果

双金属带材	图像处理	赛贝克效应	热冲击	电阻	光纤	弦振动
对流	红外辐射	难熔物质	热电子发射理论	结冰	相变	表面声波
胆甾型液晶	膨胀性材料	橡皮筋热力学	热敏电阻器	易熔合金	蒸汽压力	热收缩
电传到	逆珀尔帖效应	热电偶	热毛细管对流	热机原理	荧光测温法	热膨胀性
热传导	液晶	阴影图技术	温阻效应	热通管原理	摄影技术	热霍尔效应
惠斯通电桥	磁性形状记忆	记忆合金	热声	霍普金森效应	热电效应	热辐射
居里点(铁磁性)	记忆海绵	形状记忆高分子	热变色涂料	光学滤光器	能斯特效应	声速
居里点(压电)	微电子机械系统	烟尘	热致变色	热致发光	汤普森效应	蒸汽爆炸
完全干燥	辐射	焊接	海市蜃楼	热电堆	欧姆表	沸腾
多普勒效应	奈耳温度	音波式风速计	热成像技术			

2)查找效应知识库,得到可用的效应及问题的解决方案如表 12 所列。

表 12 可用效应和问题解决方案

可用效应	问题解决方案
相变	使用恒定熔点的合金粉制备多个单变色不可逆温度指示涂料
热辐射	利用物体表面的辐射量与温度的变化关系测量温度
霍普金森效应	利用铁磁材料在低场强下的磁导率与温度的关系测量温度
磷光体	利用磷光体在特定光源激发下发射光强与温度的关系测量温度

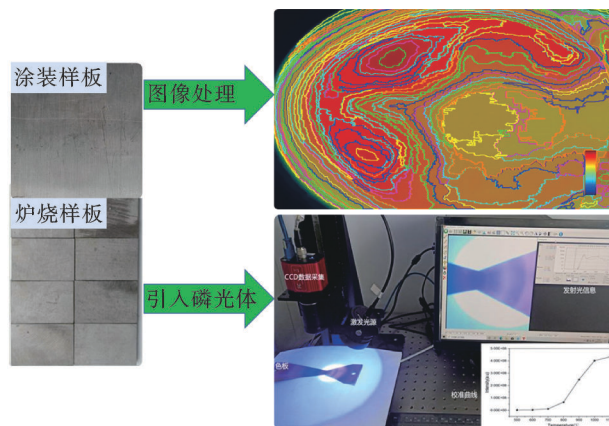


图 12 方案示意

3 解决方案

3.1 解决方案汇总

解决方案汇总如表 13 所列。

3.2 最终解决方案

依据表 13 得到的 19 条创新解,通过评价,确定最优解为:通过色板可变尺寸的设计来解决样板涂层和温度场的均一性问题,提高标定的准确性;通过相机采集颜色图像,利用图像中的颜色信息设计图像处理软件,提高对涂层颜色识别的准确性;最后,在体系中引入温敏磷光体,通过磷光体的激发光信息与温度的关系来测量和校准温度指示涂料,从而提高温度指示涂料的测量精度。方案如图 12 所示。

4 结语

本文针对温度指示涂料测温精度不高的问题,运用 TRIZ 理论对现有温度指示涂料系统进行了功能分析、因果分析、冲突区域确定、理想解分析和可用资源分析。针对 5 个问题关键点,分别利用冲突解决理论、物质-场分析及 76 个标准解、效应等工具进行了问题求解,并获得了 19 条创新解。通过对所有创新解的可用性评估,确定了解决问题的最优方案,为高精度温度指示涂料的研制指明了方向。

TRIZ 理论是解决复杂技术问题的一套系统方法,现已广泛应用于机械设计、工程、产品设计、管理、营销等多个领域,能够帮助工程师和设计师在产品开发过

表 13 解决方案汇总

序号	方案	所用创新原理	可用性评估
1	测试完毕,迅速涂上不同熔点的像蜡一样的物质,能熔化的就说明温度高于蜡的熔点,不熔化的就说明温度低于蜡的熔点	冲突解决理论	不可用
2	寻找一种性能不随温度而改变的发光物质引入到涂层中,它可通过涂层透明度或反射率的不同而使涂层变化后的颜色更容易区分、辨识	冲突解决理论	不可用
3	寻找一种发光强度随温度规律性变化的发光物质,通过测量发光物质的光强信号来提高温度测量精度	冲突解决理论	可用
4	制备一种可分离式的色板,使其在涂装涂料时具有较大的尺寸,在炉中进行标定前可以分离成较小的尺寸	冲突解决理论	可用
5	采用高精度的点测温技术,在合金表面均匀地布置测温点,最后用测温点的数来校准涂层的测温结果,从而提高测量精度	物质-场分析及 76 个标准解	可用
6	在测温后引入一种物质,涂上去像显影剂一样,能清晰地呈现出更多不同的颜色	物质-场分析及 76 个标准解	不可用
7	在涂层中引入一种物质,其本身在高温下不和涂层反应,但其某一性质(光学、磁学、化学)随温度升高而发生不可逆变化,可通过测量引入物质的这一特性变化来提高涂层的测温精度	物质-场分析及 76 个标准解	可用
8	制备两种或多种相同温度段的多变色不可逆温度指示涂料	物质-场分析及 76 个标准解	可用
9	通过相机获得涂层变化后的颜色图像,利用图像中的颜色信息(RGB 值,XYZ 值等)进行数学运算来处理图像	效应	可用
10	使用微透镜阵列捕捉场景的 4D 摄像机,获得涂层变化过程的完整信息,先做视频分析再进行图像处理	效应	不可用
11	在可见光以外光源的照射下观察涂层变化后的颜色	效应	可用
12	通过不同波长的单色光去观察涂层变化后的颜色	效应	可用
13	使用偏振光,在不同的角度观察涂层变化后的颜色	效应	可用
14	使用恒定熔点的合金粉制备多个单变色不可逆温度指示涂料	效应	不可用
15	利用物体表面的辐射量与温度的变化关系测量温度	效应	不可用
16	利用铁磁材料在低场强下的磁导率与温度的关系测量温度	效应	不可用
17	利用磷光体在特定光源激发下发射光强与温度的关系测量温度	效应	可用
18	寻找新物质、新方法使涂层的某一特性具备记录最高温度的功能	理想解分析	可用
19	加强培训,使判读人员富有经验	资源分析	可用

程中找到创新的解决方案,减少试错成本,提高开发效率。希望化工行业的同行们能够积极将 TRIZ 理论的核心思想和工具运用到实际工作当中,有朝一日形成属于化工行业的 TRIZ 理论。

参考文献:

[1] LP R, M A. Thermal history analysis on a hot surface using temperature indicating paints[J]. International Journal of Ambient Energy, 2020:1-5.

[2] YANG L, ZHI-MIN L. The research of temperature indicating paints and its application in aero-engine temperature measurement[J]. Procedia Engineering, 2015, 99(C): 1152-1157.

[3] WATSON L M H. Irreversible temperature indicating paint: US20 050144603[P]. 2009-03-10.

[4] WATSON L M H, HODGKINSON C E. Method of analysing a

temperature indicating paint using a marker paint: US200802 13844[P]. 2008-10-30.

[5] 姜涛. 浅析 TRIZ 创新理论在方剂配伍实验研究中的应用[J]. 科技与创新, 2024(22): 165-168.

[6] 王芳兰, 张博峰. 基于 TRIZ 理论的训练用发烟设备的创新设计研究[EB/OL]. 火工品 [2024-12-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1179.TJ.20241114.1810.004.html>.

[7] 李治宇, 宋昊天, 闫金良, 等. 基于 TRIZ 理论的造纸黑液解聚物催化提质中催化剂的设计与应用[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(31): 30-33.

[8] 姜竹英, 王繁业. 基于 TRIZ 理论的酶催化制备手性仲醇工艺改进[J]. 化工设计通讯, 2024, 50(9): 65-68.

[9] 张焕高. 创新设计: TRIZ 系统化创新教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.