［研究·设计］

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.06.002

车灯面罩热板焊接温度场CAE模拟

刘　红[1]，胡文豪[1]，杨　梦[1]，庄文龙[2]

（1.浙江工业大学 机械工程学院，浙江 杭州　310014；2.浙江天翀车灯集团有限公司，浙江 台州　318027）

摘　要：针对塑件热板焊接中温度控制不精确影响焊接质量，且容易在塑料件上产生残余应力的情况，课题组对车灯面罩热板焊接的温度场进行了研究。基于ANSYS仿真平台对车灯面罩热板焊接进行温度场仿真分析，通过建立合理有效地温度场仿真模型得到了面罩热板焊接后的温度场分布，并通过实验验证了焊接过程中温度载荷、边界条件设置的合理性及仿真结果的正确性，最终得出车灯面罩热板焊接的仿真计算可行的结论。

关　键　词：车灯面罩；热板焊接；温度场；CAE；ANSYS仿真软件

中图分类号：TQ320.67　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005-2895(2018)06-0007-06

CAE Simulation for Temperature Field of Lens of Vehicle Lamp with Hot Plate Welding

LIU Hong[1], HU Wenhao[1], YANG Meng[1], ZHUANG Wenlong[2]

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;
2. Zhejiang Tianchong Vehicles Lamp Group Co., Ltd., Taizhou, Zhejiang 318027, China)

Abstract: The inaccurate temperature control of hot-plate welding for plastic parts will affect the welding quality and easily produce residual stress in the plastic parts, the research group conducted the temperature field of the hot plate welding of lamp masks. Based on the ANSYS simulation platform, the temperature field simulation analysis was carried out for the heat plate welding of the headlamp mask. By establishing a reasonable and effective temperature field simulation model, the temperature field distribution after the welding of the hot plate was obtained, and the simulation results were verified through experiments. Finally it is concluded that the simulation of hot plate welding of lamps masks is feasible.

Keywords: headlamp mask; hot plate welding; temperature field; CAE(computer aided engineering); ANSYS

热板焊接又称为热熔对接焊，是一种简单的塑料焊接技术。热板焊接的焊件冷却后具有一定的强度和密封性能，可保证热封后的塑件在使用中能承受一定的外力，不发生开裂和泄漏。热板焊接因为可应用于大小不同的工件，无面积限制，焊接面允许塑料余量补偿，保证了焊接强度，具有灵活方便、控制性强、精度高等优点而被广泛的应用于塑件的连接。

文献[1]研究了塑料热板焊接的过程，分析了加热过程中的焊件材料在垂直热力上的变化，提出了接触压力和热熔时间的规律方程。益小苏等[2]试验研究了2种聚乙烯煤气管材的热板环焊接性能，对管道矩形试样切片焊接后，通过拉伸试验评价焊接接头的强度与焊接质量。赵高明等[3]建立了模拟温度场的数学模型，提出热板最高平衡温度的理论计算公式，根据实际的情况设置参数得到近似模型解。谷侃锋等[4]对塑料热板焊接加热阶段传热进行了探讨，建立简化数学模型，并转化为双区域计算及熔化热数学模型。Helmut Potente等[5]建立了一种热板焊简单的理论温度和应力的计算模型。文献[6-7]在晶体结晶动力学的基础上，利用有限元差分法来模拟热板焊接过程中的热传导和挤压流动。

国内对热板焊接的研究基本都是针对塑料压力管

收稿日期：2018-07-20；**修回日期**：2018-08-17

基金项目：台州市黄岩区重大科技项目(2017020)。

第一作者简介：刘红(1960)，男，浙江杭州人，教授，博士，主要从事照明、模具CAE方面的研究。E-mail:14130474@qq.com

道的热板焊接,而涉及其他形状塑料制件则较少。由于热板焊接应用的广泛性,课题组基于 CAE 平台对热板焊接过程进行研究具有现实意义。

1 传热理论

车灯热板焊接温度场分析是一个典型的瞬态非线性热传导问题,其热传导偏微分方程及边界条件如下:

$$a\nabla^2 T + Q_i = \frac{\partial T}{\partial t},(x,y,z\in\Omega);$$

$$\begin{cases} T|_{t=0} = T_0, \\ T(x,y,z)_b = T_b(x,y,z), \\ -\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_v = h(T|_v - T_f), \\ -\lambda\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_w = q_f。 \end{cases}$$

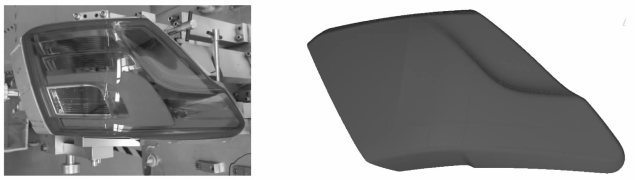
式中:$T=T(x,y,z)$是温度;∇是拉普拉斯微分算子;b 是第一类边界条件(指定温度);Ω是问题的定义域;v 表示第二类边界条件(对流换热);w 表示第三类边界条件(热源);h 为表面传热系数或对流换热系数;T_f是换热介质温度;Q_i 为热源;q_f 是热流密度;$a=\lambda/\rho c$,λ 是导热系数,ρ 为密度;c 为比热容。

求解上述方程,一般采用有限元方法对空间域离散、使用差分法对时间域进行离散的方法求解,求解的准确性依赖于仿真模型建立的有效性。

2 焊接仿真模型

2.1 模型的确定

课题组以某型号汽车后雾灯灯罩为例来讨论热板焊接温度场的计算,灯罩实物和简化后的三维模型如图 1 所示。



(a)实物 (b)三维模型

图 1 灯罩实物和三维模型

Figure 1 Object and 3D model of lens

2.2 材料热物理性能参数

PMMA 的热物理性能参数如表 1 所示,PMMA 密度ρ 为 1 180 kg·m^{-3},软化温度为 105 ℃,熔点为 130 ℃,分解温度为 200 ℃。其中 PMMA 材料的比热熔有[8]:

$$C_p = 1.278\ 94 + 0.003\ 99T。$$

PMMA 的导热系数 K 与温度 T 存在一定的线性关系,即

$$K = K_0(1+\beta T)。$$

式中:β 为传热膜系数;K_0为 0 ℃时的导热系数。

表 1 PMMA 热物理性能参数

Table 1 PMMA thermophysical parameters

温度 T/℃	导热系数 K/(W·m^{-1}·℃$^{-1}$)	比热容 C_p/(kJ·kg^{-1}·℃$^{-1}$)	热焓 H/(kJ·kg^{-1})
0	0.214	1.279	0
20	0.220	1.359	32
40	0.230	1.439	68
60	0.231	1.518	107
80	0.240	1.598	151
100	0.242	1.669	197
130	0.330	1.786	274
160	0.330	1.903	359
200	0.330	2.059	486
230	0.330	2.176	591

2.3 聚合物固液相变

PMMA 车灯面罩在整个热板焊接的过程中加热温度达到 200 ℃以上,远远高于其熔点 130 ℃,会产生相变,释放相变潜热[9]。课题组采用的是 ANSYS 软件热分析功能模块来分析焊接温度场。在 ANSYS 软件中是通过定义材料随温度变化而变化的焓来表示潜热。图 3 所示为材料从固态变为液态的相变过程中的焓的变化曲线。焓的变化 ΔH 可描述为密度、比热容及温度的函数:

$$\Delta H = \int \rho c(T)\,\mathrm{d}T。$$

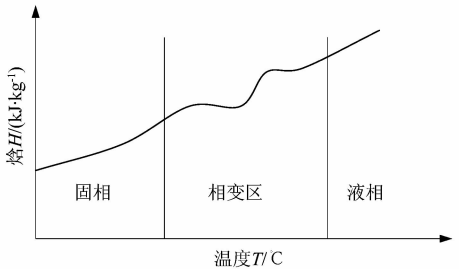


图 2 由固态到液态的相变过程中焓的变化曲线

Figure 2 Process of phase transition from solid to liquid enthalpy change curve

2.4 边界条件处理

热量传递的方式有 3 种:热传导、热辐射和热对流。课题组研究的车灯后雾灯热板焊接过程,车灯的四周为自然干燥的空气,车灯面罩的加热筋表面材料的熔化主要是依靠加热板的接触加热。加热板的热量传递给加热筋表面,使材料熔化,所以整个过程主要发生了热传导和热对流,可以忽略热辐射。

车灯热板焊接的过程为:加热、切换和焊接 3 个阶段。本案例的具体时间安排:加热阶段 8 s,切换阶段 4 s,焊接阶段 10 s。利用 ANSYS 软件的载荷步功能来模拟这 3 个阶段,即把焊接过程分为 3 个载荷步,每一个载荷对应于焊接的一个阶段,中间设置载荷子步来提高求解的精度。图 3 所示为面罩的装夹方式,假设被装夹的部分不与空气接触,未装夹的部分与空气接触,设置为对流。

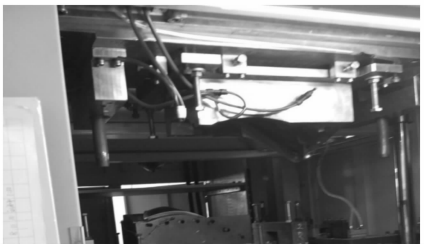


图 3　面罩装夹

Figure 3　Lens clamping

热板焊接机的温度设置为 400 ℃,而 PMMA 最初分解温度为 200 ℃,加热板的温度远远的高于 PMMA 的分解温度。为了准确地模拟车灯焊接筋的加热温度的变化情况,将最后未熔化的表面温度设置为面罩的分解温度,来模拟加热阶段的加热筋的温度分布情况。具体的过程以及边界条件的确定如表 2 所示。

表 2　车灯热板焊接过程温度场计算的条件

Table 2　Lamp hot plate welding process conditions for temperature field calculation

编号	时间/s	边界条件	加热面载荷	焊接阶段
载荷步 1	8	热传导	材料分解温度	加热
载荷步 2	4	对流、传导	空气对流	切换
载荷步 3	10	对流	绝热	焊接

3　温度场仿真结果分析

在 ANSYS 软件中导入车灯面罩的网格模型,设置参数,进行求解。车灯面罩的初始温度设置环境温度为 26 ℃。图 4 所示为焊接加热阶段完成后的车灯的温度分布情况。

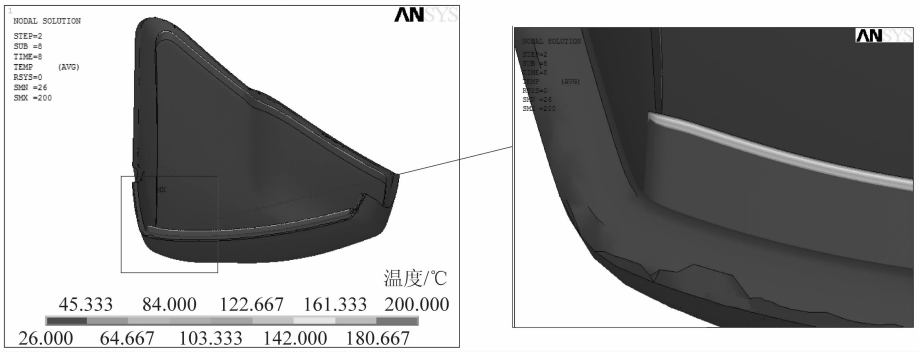


图 4　车灯焊接加热阶段温度场分布及加热筋局部放大

Figure 4　Lamp welding temperature field distributions of heating process and local amplification of heating rib

由图 4 可知,在加热阶段,等温面几乎是水平的沿着焊接筋的高度方向均匀的推进。由于 PMMA 材料随温度变化的导热系数较小,图 4 中可以看到,熔化的材料的高度方向上并不是很多。在沿着焊接筋高度方向定义路径如图 5 所示,得到如图 6 所示的温度分布情况。

由图 6 可以看到有超过 0.25 mm 的厚度被熔化(PMMA 材料的熔点约为 130 ℃)。由于 PMMA 材料的极小的导热系数,温度的梯度沿面罩焊接筋的高度方向深入的距离很短。PMMA 材料的软化温度为 105 ℃,在软化点以下的材料处于玻璃态,这种状态下高分子分子链被冻结,力学性能符合胡克定律,软化点与熔点温度范围之间的材料则处于高弹态,高分子聚合物材料的分子链处于解冻状态,在较小的外力的作用下能发生较大的变形。

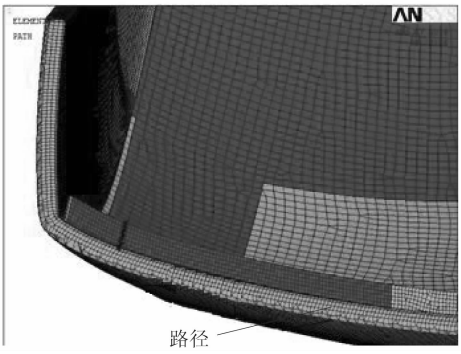


图 5　沿着加热筋高度方向的路径

Figure 5　Path along height of heating rib

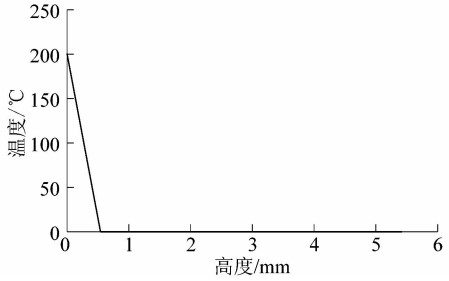


图 6 沿加热筋高度方向的温度分布

Figure 6 Temperature distributions along height direction of heating rib

加热阶段完成后,加热热板与灯罩的加热筋表面分开,然后再与灯体焊接在一起。根据实际测量,在有限元软件中设置切换时间以及热边界载荷条件,得到在切换阶段时的加热筋表面的温度分布如图 7 所示。

图 7 中可以看到,面罩加热筋表面的温度开始有所下降。这是因为在这段时间内,加热筋表面与热板分离,随即加热筋表面与周围的空气接触,发生空冷现象。虽然切换时间只有 4 s,但是可以看到表面温度下降了近 16 ℃,由此可以得知过长的切换时间对焊接是不利的。从图 7 可以看到,加热筋表面的温度仍然超过材料的熔点很多,进而保证焊接时有熔化的材料,达到焊接的目的。

切换阶段完后,热板焊接机上的装夹型具上下两个型具闭合,面罩与同样被加热的灯座进行焊接粘合,这个过程完成熔融材料的固化过程。焊接时间为 10 s,在有限元软件中的仿真模拟结果如图 8 所示。

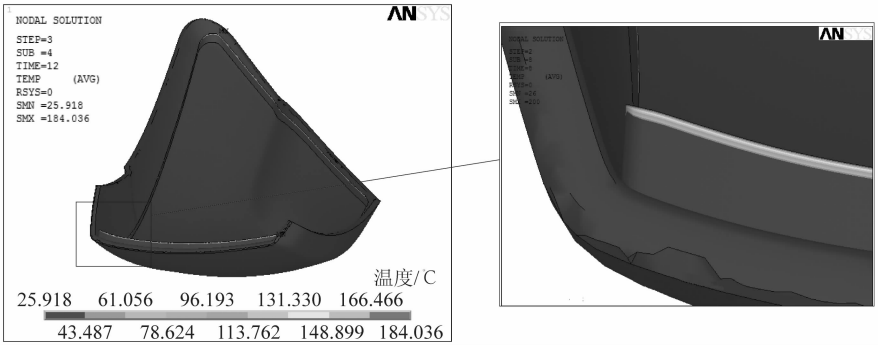


图 7 切换阶段加热筋表面温度分布

Figure 7 Surface temperature distribution of heating rib during switching stage

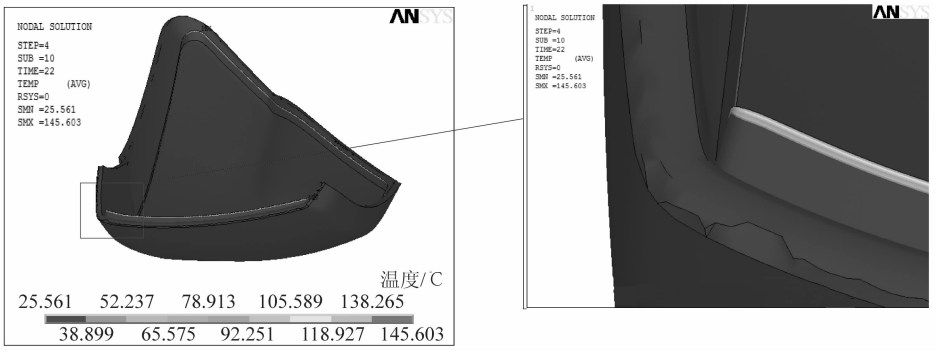


图 8 面罩焊接过程的温度分布及加热筋局部放大

Figure 8 Lens temperature distribution of welding process and local amplification of heating rib

从图 8 中可以看到,虽然焊接筋表面的温度依旧高于 PMMA 材料的熔点温度,但是高于熔点的材料高度非常的小,更多的温度分布在 108 ~ 118 ℃,低于熔点温度。在受到焊接压力与灯座挤压之后,更多的材料处于玻璃态和高弹态之间,此时可以将灯座与面罩看成是已经固化成一体。

焊接完成之后,面罩放在空气中自然冷却至室温。由于车灯面罩厚度比较小,且温度变化区域也比较小,所以冷却时间很短。这个过程有 5 ~6 min。计算模拟时,取冷却时间为 5 min,冷却方式为自然对流。通过 ANSYS 计算得到冷却 5 min 之后的温度场分布如图 9 所示。

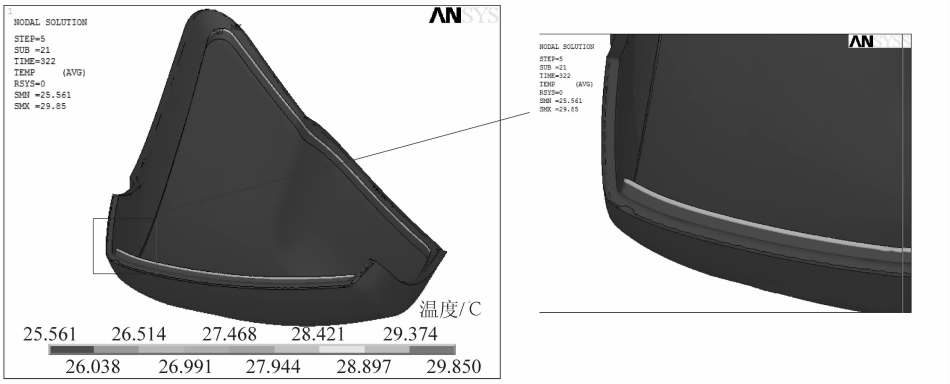


图 9　面罩冷却过程的温度场分布及加热筋局部放大

Figure 9　Lens temperature distribution of cooling process and local amplification of heating rib

从图 9 中可以看到,5 min 之后整体面罩的温度约为环境温度 26 ℃,只有焊接筋加热面部位温度稍高。这是因为焊接筋与在焊接完成之后与空气的接触比较小,说明 5 min 的冷却时间是足够的。

4　温度场的实验验证

4.1　实验方案

由于车灯面罩热板焊接时车灯制件几乎全程都在装夹的夹具中,且各个阶段的切换时间较短,所以,只能测量其中的部分阶段的温度分布情况。课题组通过 FLUKE Ti200 红外热成像仪来测量车灯在加热过程以及焊接完成过程中的温度分布来验证温度场仿真模拟的结果的准确性。具体的实验步骤如下:

1)车灯面罩完成加热过程后,在车灯面罩与加热板分离时,用热成像仪迅速对加热筋表面进行拍照,读取加热筋表面的温度,获得加热筋表面的温度分布情况。

2)面罩完成焊接工步,但不与灯体粘结,用热成像仪来对面罩加热面进行温度检测和读取,获得焊接后的温度分布情况。

4.2　实验结果与讨论

运用红外热成像仪对车灯面罩加热后的焊接筋面进行拍照,进而获取加热筋在经过热板加热之后的温度分布情况。加热后的车灯面罩焊接筋的表面温度分布情况如图 10 所示。

因为实验在现场加工车间内进行,在加热完成后面罩经由焊接机的运动机构升高,然后运用红外热成像仪对面罩加热筋的加热部位进行拍照,从对焦到最后得到表面的温度分布情况,实际得到的温度场其实更接近切换阶段的温度场分布。由图 7 可知,在切换阶段焊接筋表面温度为 184 ℃,而实际得到的温度显示为最高 180 ℃。考虑到实际拍照时需要进行对焦操作,所以温度分布具有一定的合理性。焊接完成之后的温度分布情况如图 11 所示。

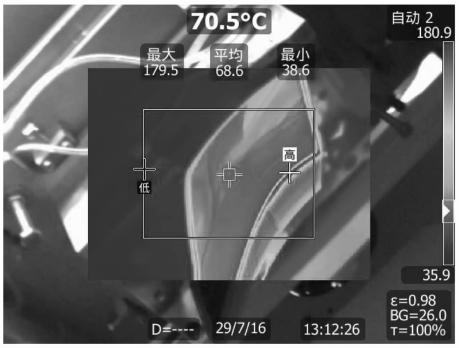


图 10　加热后车灯焊接筋表面的温度分布

Figure 10　Temperature distributions after heating on surface of welded rib

图 11　车灯面罩焊接完成后的温度分布

Figure 11　Temperature distributions of welded lens

从图 11 可以看到,在焊接完成后,灯罩加热面的温度焊接的部位约为 139 ℃。在仿真的温度显示为最高 145 ℃,但是最高温度区域很小,其余的温度分布都

(下转第 19 页)