

doi: 10.7690/bgzd.2024.08.017

推进剂包覆层热收缩温控技术

韩浩宇, 郭进勇, 杨治林, 余海勇

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能制造事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为解决异形、大长径比固体推进剂装药因包覆材料的收缩温度过高导致包覆胶失活、固体推进剂软化变形, 使装药遭到致命性破坏的问题, 设计一种侧腔的水浴加热方式。根据温度场不均匀引起自然对流的原理形成温度差, 控制高温接触时间, 确保包覆装药的质量一致。对侧加热腔内流体对流加热的情况进行量纲分析及过程仿真分析, 结果表明, 包覆样机水浴加热的水箱内加热器布局比较合理。

关键词: 推进剂; 包覆; 侧加热腔体; 自然对流

中图分类号: TJ510.3⁺6 **文献标志码:** A

Temperature Control Technology for Thermal Shrinkage of Propellant Cladding

Han Haoyu, Guo Jinyong, Yang Zhilin, Yu Haiyong

(Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to solve the problem of fatal damage of special-shaped and large length-diameter ratio solid propellant charge caused by the inactivation of coating rubber and the softening and deformation of solid propellant due to the high shrinkage temperature of coating material, a water bath heating method with side cavity was designed. According to the principle of natural convection caused by uneven temperature field, the temperature difference is formed, the high-temperature contact time is controlled, and the quality of the coated charge is ensured to be consistent. The dimensional analysis and process simulation analysis of the fluid convection heating in the side heating cavity are carried out, and the results show that the layout of the heater in the water tank heated by the water bath of the coated prototype is reasonable.

Keywords: propellant; coating; side-heated cavity; natural convection

0 引言

绝热包覆层是固体推进剂装药的重要组成部分, 其性能和包覆效果直接影响发动机装药的可靠性。形状记忆包覆材料作为一种全新的包覆材料, 具有包覆层无搭接、一致性好、易实现自动包覆、可靠性高等优点, 可为解决现有异形、大长径比装药包覆的“短板”问题提供可靠、有效的解决方法。

包覆技术同包覆材料本身是对应关系, 针对其热收缩的包覆特性, 需为之设计一种全新的包覆工艺和包覆设备, 其中获得优良的包覆效果是难点。包覆加热方式对包覆效果有直接影响, 包覆技术不合理、包覆工艺参数不匹配, 轻者会使装药出现弱粘、胶块等缺陷, 重者会导致大面积脱粘; 因此, 该技术决定了形状记忆包覆材料能否成功应用于推进剂装药的包覆领域。

1 侧加热腔内自然对流的分析介绍

在包覆加热方式上, 通过热传递, 在水浴的环

境中对药柱进行加热。热传递的方式主要有传导、对流和辐射 3 种。在液体中, 热传导往往与热对流同时进行, 在术语上通常将热传导和热对流同时发生的现象称为——“对流”。对流又分为自然对流和强制对流。在本温控系统中, 水箱内的流体(水)与附近固体边界(加热器)存在温度差异, 流固间的传热使得靠近加热器的水温升高、靠近热交换器的水温降低, 进而产生加热器附近水的密度差并导致自然对流的出现。

Batchelor 于 20 世纪 50 年代, 基于建筑物双层玻璃有良好隔热效果的想法, 提出了侧加热腔内的自然对流模型, 如图 1 所示^[1-2]。

以前的研究表明, 不同温度两侧壁间的热量传递及腔内流动主要由 3 个无量纲参数控制, 即瑞利数(Ra)、普朗特数(Pr)和腔体高宽比(A)。定义如下:

$$Ra=g\beta(T_h-T_c)H^3/\nu k; \quad (1)$$

$$Pr=\nu/k. \quad (2)$$

收稿日期: 2024-04-22; 修回日期: 2024-05-25

第一作者: 韩浩宇(1997—), 男, 山西人。

$$A=H/L. \quad (3)$$

式中： g 为重力加速度； β 为热膨胀系数； ν 为运动黏性系数； k 为热扩散系数； T_h 和 T_c 分别为腔体冷热壁的温度； H 为腔体高度； L 为腔体宽度。

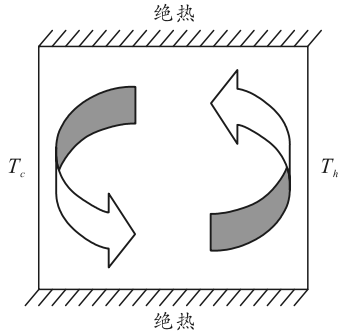


图 1 侧加热腔自然对流

Batchelor 的研究指出，在低瑞利数条件下 ($Ra < 1 \times 10^3$) 侧加热腔内的流动性很弱，侧壁间的传热由导热控制。随着瑞利数的增加，腔内对流会增强，流体出现分层结构，表现出清晰的非定常周期性流动特征^[2]。在实际的自然环境或工业设备中，自然对流更多地表现出瞬态特征，即流动的时间依赖；腔内自然对流的变化可以分为初始、过渡、定常或准定常 3 个阶段。

1.1 初始阶段

对于突然加热的侧壁，最初阶段，热量是通过热传导的方式由侧壁法向传导给相邻的流体，附近流体的受热不均匀进而导致密度不均匀，从而产生浮力，且浮力会驱动侧壁附近的流体流动。通常将侧壁附近形成的温差较大的流体层称为热边界，腔内由水平温差驱动的自然对流是时间依赖的^[3]。以 2 维为例，控制方程可表示如下：

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \\ & g\beta(T - T_0); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (7)$$

式中： u 、 v 为水平和垂直方向的流速； x 、 y 为水平和垂直方向的坐标； T 为温度； T_0 为初始温度； t 为时间； p 为压强； ρ 为密度。

在控制方程的数值求解过程中，通常采用无量纲形式，无量纲化方程采用的基本量纲通常为^[4]：

$$x, y \sim H; \quad t \sim H^2 / (kRa^{1/2}); \quad (T - T_0) \sim (T_h - T_c);$$

$u, v \sim kRa^{1/2} / H; \quad \rho^{-1} \partial p / \partial x, \rho^{-1} \partial p / \partial y \sim k^2 Ra / H^3$ 。通过量纲分析，可知在加热的最初阶段导热起主导作用，由式(7)可得热边界层的厚度量纲：

$$\delta_T \sim \sqrt{kt}. \quad (8)$$

厚度的量纲表明，热边界厚度的最初增长依赖时间和流体的扩散系数。

当流体为淡水时，在初始阶段 (30°C)， $Pr \approx 6.36$ 。通过量纲分析，当 $Pr > 1$ ，在最初阶段，浮力克服的反作用力主要是自身的黏性，根据式(6)中浮力与流体黏性间的平衡，可得到 $Pr > 1$ 时的速度量纲：

$$v \sim k^2 Ra t / H^3. \quad (9)$$

随着加热时间的增加，对流的速度会加快，来自热壁的热量会通过流体的对流被带走。侧腔加热时，侧壁边界层在初始阶段的对流变化可类似看作单一垂直热壁边界层的流动，且由于壁面附近的流体受热是由于热传导，所以壁面附近的温度场在流向上是均匀的。侧壁附近流体的温度升高，浮力驱动热流体沿着侧壁上行，当前缘附近的热流被对流带走后，为达到前缘区域内的质量平衡，压差可驱动水平的卷吸流动，这种流动现象称之为直壁的前缘效应 (leading edge effect, LEE)^[5]。如图 2 所示，将 LEE 的传播过程用温度—时间曲线来刻画，可以发现，在最初阶段，加热壁附近不同高度的温度与理论值吻合，随着时间的推移，温度逐渐偏离理论值，经过超调后，温度逐渐达到一个平衡态。

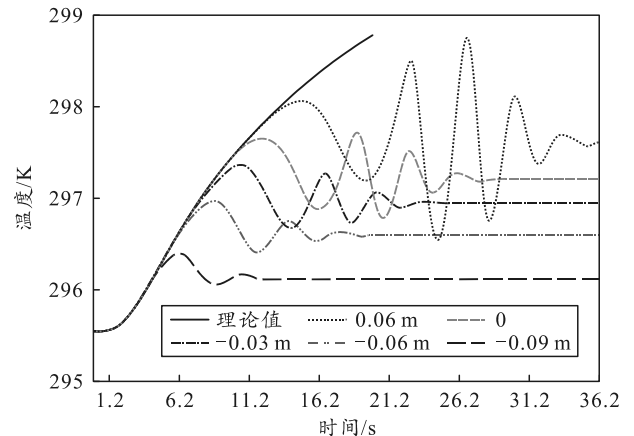


图 2 热边界层内不同高度的温度随时间变化曲线

1.2 过渡阶段

在过渡阶段，由于上层的水平壁(水平面)的存在，在热边界层的上方(下游)与水平壁交汇处出现水平入侵流，该水平入侵流会沿着水平壁流到对面侧壁处，并最终被对面的冷边界层卷入。相应的，

冷入侵流也会流动到对面侧壁的热边界层的下方(上游),并最终被对面的热边界层卷入。这些来自相对侧壁的冷、热入侵流的冲击会导致边界层内出现非定常流动现象。水平入侵流是侧加热过程的一个重要的现象,根据不同的动力机制,流动现象随时间表现出不同。如图 3 所示,在底部边界上形成的一个中心对称的水平冷入侵流。

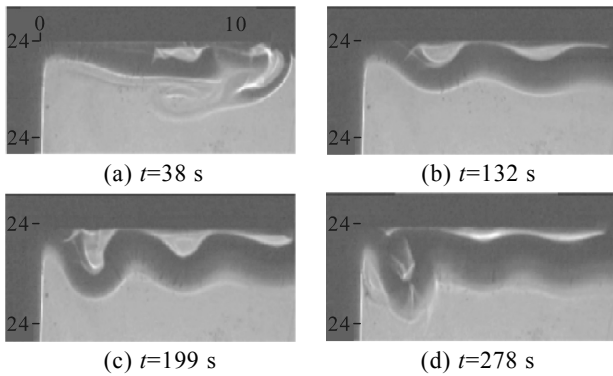


图 3 热侧壁上方入侵流早期演化过程

根据实验结果,抵达对面侧壁的水平入侵流可堆积在腔体另一侧的角部区域并被逐渐卷吸入垂直边界层内,或在浮力引起的水平差压下形成水平震荡。随着时间推移,来自垂直边界层排入的流体不断增加,腔体内分层得到强化,直至分层趋于准定常状态。

1.3 定常或准定常阶段

当腔体内的对流流动进入到定常或准定常阶段后,流动状态不受初始条件的影响,只由瑞利数、普朗特数、腔体高宽比等参数决定。

2 推进剂药柱包覆层热收缩技术

针对形状记忆包覆层的热收缩特性,主要需设计包覆层的加热方式。且为保证包覆层热收缩时可均匀、稳定贴合于药柱表面,拟采用水浴加热方式完成包覆层的热收缩。一方面水浴加热利于保证温度的恒定;另一方面,一定范围内水浴温度较为均匀,利于包覆层横向各处受热温度和收缩速度一致。药柱脱脂、涂胶后穿入预制包覆层,一端密封并浸入水浴使包覆层逐步收缩贴合于药柱表面,控制入水速度,以保证排气均匀通畅避免产生气泡^[6]。

包覆层热收缩工序作为包覆工艺的关键工序,热收缩控制技术是保障包覆工艺顺利进行、获得良好包覆效果的关键。因热致形状记忆包覆材料的收缩温度一般在 130 °C 左右,该温度已远远超出推进剂的玻璃化转变温度(30~50 °C),包覆时该温度

有导致包覆胶失活、固体推进剂软化变形和装药安全性的风险。除了降低形状记忆包覆材料的热收缩温度低于 95 °C,再就是改进包覆工艺,对药柱包覆的热缩时间、温度检测及控制等关键参数进行研究,为此研制了一种包覆自动热缩工序的原理样机,图 4 为此样机水浴加热的水箱。

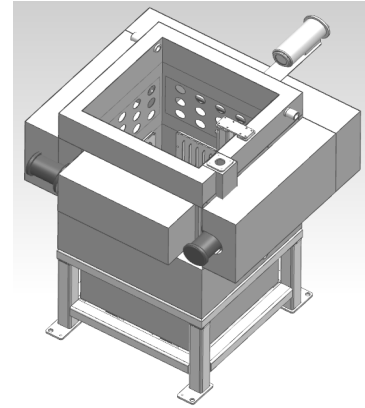


图 4 热缩样机水箱

加热装置布置在水箱内壁四周,其布置的位置和密度决定了水箱内不同高度的热水温度,不同高度位置的水温由布置于水箱中的温度传感器监控,根据水温的变化,及时反馈信号至控制系统,再由控制系统控制加热装置的传输热量。水箱四周壁采用隔热保温措施,以避免温度过快的散失。图 5 为水温层尺寸及温度检测点的分布。

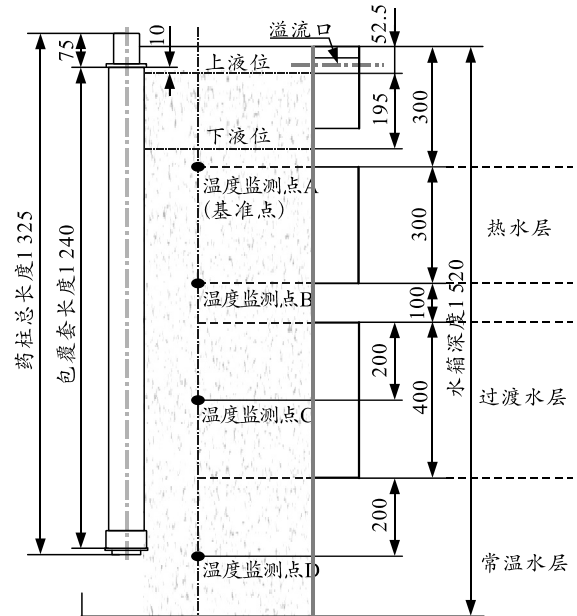


图 5 水温层尺寸及温度监测点

如图 6 所示,整个温控系统包含 4 件防爆电加热器,均匀分布在设备模型四周,对热水层进行加热;温度传感器实时监测水箱各温度层温度;热交

换热器通过外部循环工业常温水，带走水体热量，以达到过渡水层控温目的。整个水箱从上到下分为热水层、过渡水层、常温水层、试验样品，从水箱上部依次缓慢通过各温度层，到位并经过一段时间保温后，提升离开水箱，完成整个热收缩包覆工艺过程。

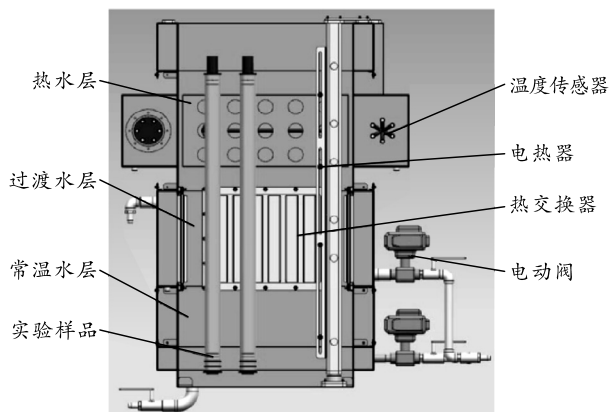


图 6 温控系统模型结构

在此温控系统中，将监测点 A 和 B 分别设置在加热壁的上、下边缘，监测点 C 和 D 分别设置在过渡水层和常温水层的中间位置。在长时间加热后，通过热传导可能会导致过渡水层温度升高，根据 C 点温度反馈控制热交换器，带走水体热量。

3 热收缩包覆过程仿真分析

针对此热收缩包覆工艺的温度控制系统，采用 Ansys workbench 中稳态和瞬态传热模块，对系统工作时内部各功能区域的温度分布进行了仿真模拟。

3.1 稳态热分析

稳态热分析用于分析稳定的热载荷对系统或部件的影响。在稳态传热系统中各点的温度仅随着位置的变化而变化，不随时间变化。通过稳态热分析，根据温度分布情况评估现有加热器位置布局形式的合理性，如图 7 和 8 所示。

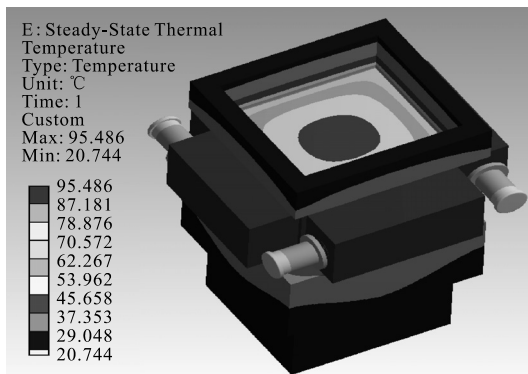


图 7 整个系统温度场分布

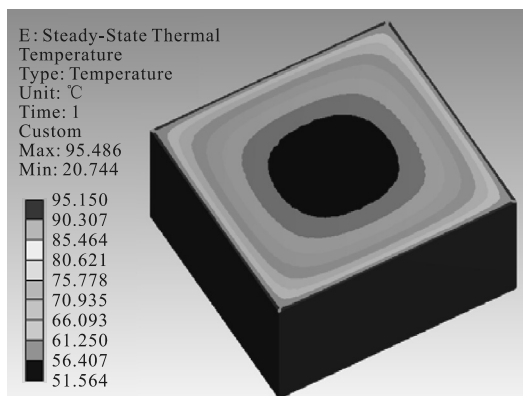


图 8 加热区温度场分布

取 4 个电热水器工作区域水温为 95 °C。从上图中可以看出，稳态条件下温度从四周高温向中间冷水区域以圆环状有规律逐步降低。

3.2 瞬态热分析

1) 理论加热时间计算。

以防爆电加热器总功率为 32 kW 为例(单个 8 kW，共 4 个)，需要加热的冷水重量为 296.81 kg，冷水温度为 20 °C，加热到最高温度 95 °C。根据热量的计算公式： $cm\Delta t = 9pT$ ，得到所需时间 $T=4182 \times 296.81 \times (95-20) / 95\% / 32000 = 3062$ s，约 51 min。

2) 仿真模拟。

瞬态加热过程温度变化曲线如图 9 所示。

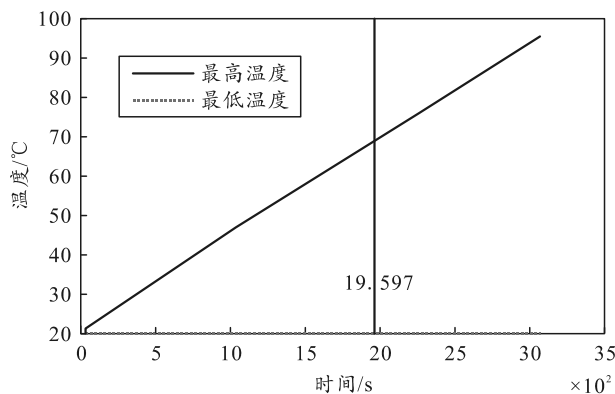


图 9 瞬态加热过程温度变化曲线

3) 中间水域达到 95 °C 时水箱内水域温度分布。

热水层(加热层)温度整体外部温度如图 10 所示，其外表面温度最高为 92.5 °C，位于水箱的流道口处。图 11 给出了其内部剖面的温度分布。由图可知：热水层顶部和底部温度较低，约 60 °C 左右，这是由于热水层上下都接触有低温水浴造成；但其表面向内 20 mm 左右后，中间水域温度达到 95 °C 左右，温度分布均匀，高温区域空间大，具备良好的加热性能。

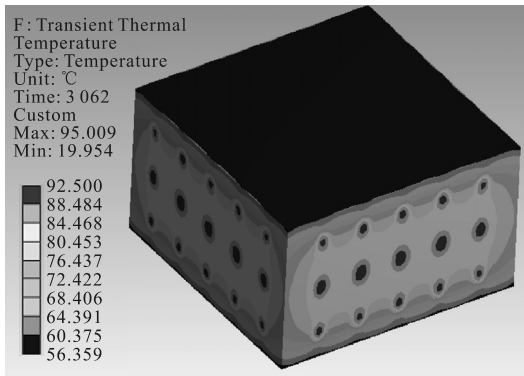


图 10 加热层温度分布

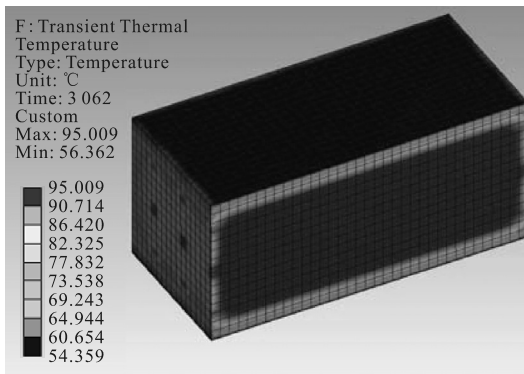


图 11 剖面温度分布

过渡水层顶部至底部常温水层间的温度分布如图 12—14 所示,其温度由上向下,由 60 °C 逐渐降低至 20 °C。

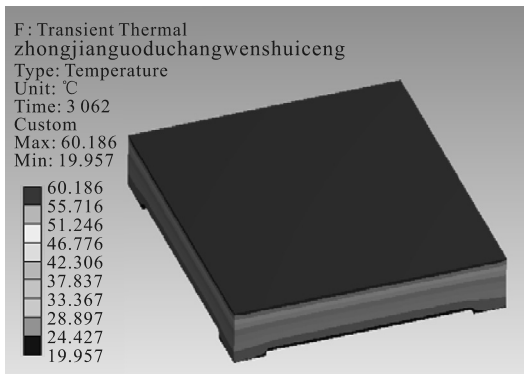


图 12 中间常温水层温度分布

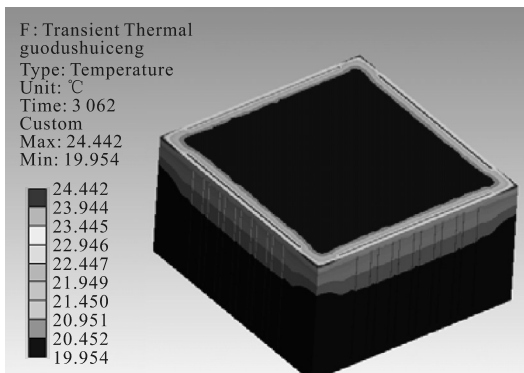


图 13 过渡水层温度

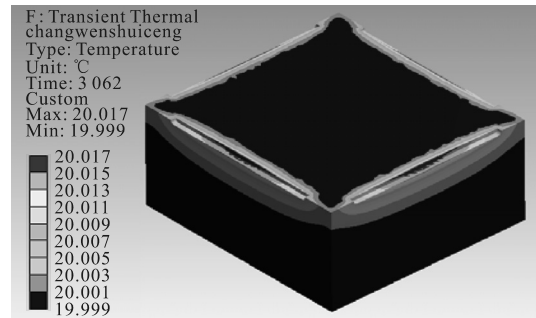


图 14 底部常温水层温度分布

4) 各温度监测点。

监测点 A 位于加热层顶部,其表面温度分布如图 15 和 16 所示,当时间到达 3 062 s 时,其温度最高值为 61.2 °C,最低温度为 57.3 °C,其升温曲线表明整个加热过程中,温度成线性快速上升,最高和最低温度的差值较小。

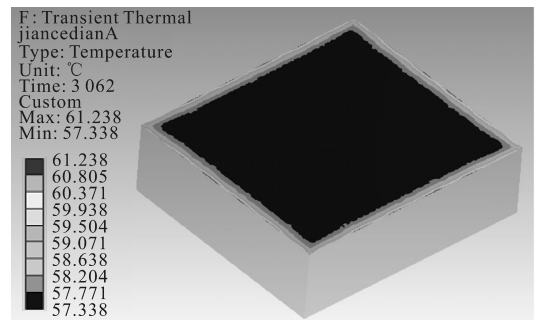


图 15 监测点 A 所在平面温度分布

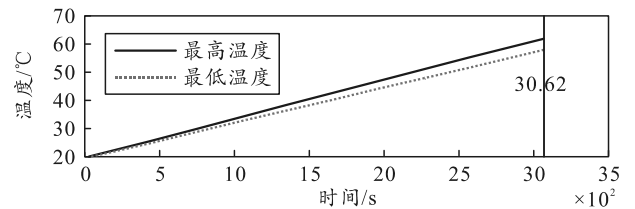


图 16 监测点 A 所在平面水温变化曲线

监测点 B 位于加热层和过渡水的接触面上,其表面温度分布如图 17 所示,当时间到达 3 062 s 时,其温度最高值为 59.6 °C,最低温度为 56.4 °C。

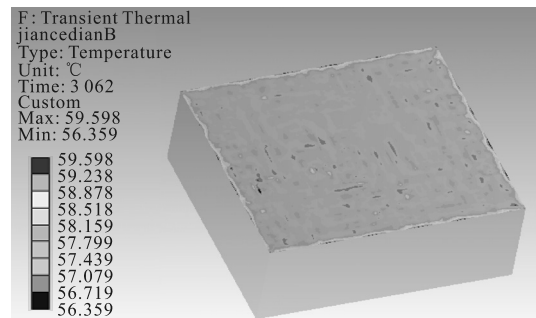


图 17 监测点 B 所在平面温度分布

监测点 C 位于过渡水层中间处,其表面温度分布如图 18 和 19 所示,当时间到达 3 062 s 时,其温

度最高值为 24.4 °C，最低温度为 20 °C，其升温曲线表明整个加热过程中，最低温度几乎保持不变，最高温度缓慢上升。

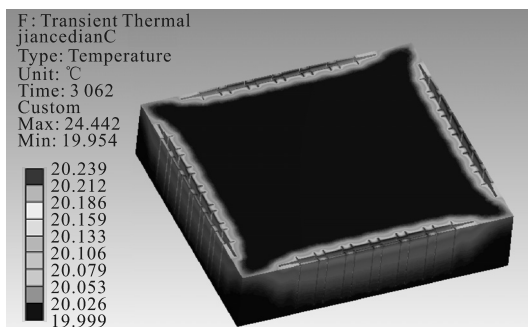


图 18 监测点 C 所在平面温度分布

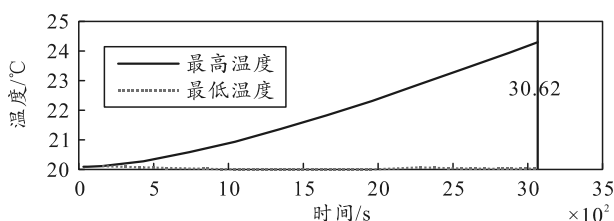


图 19 测点 C 所在平面水温变化曲线

监测点 D 位于底部常温水层中间处，其表面温度分布如图 20 和 21 所示，整个加热过程中温度几乎没有发生变化。

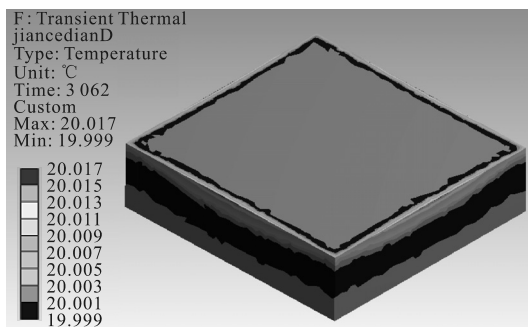


图 20 测点 D 所在平面温度分布

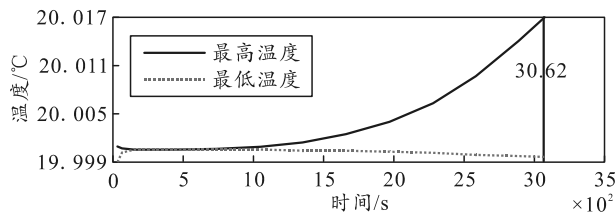


图 21 测点 D 所在平面水温变化曲线

4 结束语

笔者对侧加热腔内流体对流加热的情况进行量纲分析及过程仿真分析，结果表明：包覆样机水浴加热的水箱内加热器布局比较合理；按照现有加热器位置布局对水浴进行加热，其中间加热层绝大部分区域的温度可达到 95 °C，过渡水层温度在 20~25 °C 之间，常温水层温度为 20 °C。

参考文献：

[1] 徐丰, 崔会敏. 侧加热腔内的自然对流[J]. 力学进展, 2014, 44(1): 98-136.

[2] 马佳. 侧加热腔内自然对流的翅片位置和瑞利数的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.

[3] 陶文栓. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 218-236.

[4] 武威. 粘性强、抗硝化甘油迁移的双基推进剂包覆层设计与研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.

[5] ELATAR A, TEAMAH M A, HASSAB M A. Numerical study of laminar natural convection inside square enclosure with single horizontal fin[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 99: 41-51.

[6] LIU Y, LEI C, PATTERSON J C. Plume separation from an adiabatic horizontal thin fin placed at different heights on the sidewall of a differentially heated cavity[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2015, 61: 162-169.

(上接第 63 页)

[3] 冯丽辉. 企业管控一体化的系统集成技术[J]. 自动化仪表, 2003, 24(6): 55-58.

[4] 张开升, 陈玮, 孙延明, 等. 一种分布式制造信息系统的控制性能的研究方法[J]. 华南理工大学学报, 2006, 34(11): 72-75.

[5] 万军, 赵不贿. 基于自控网系统的混杂控制[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(9): 162-169.

[6] 林宝成, 李若琼. 基于混杂自动机的多负载 ICPT 系统建模方法研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(8): 712-720.

[7] 刘志强, 冒金堂, 陈林. 基于混杂理论的电磁与摩擦集成制动方法[J]. 中国公路学报, 2019, 32(9): 183-190.

[8] 尹逊和, 崔庆权, 宋永端, 等. 基于层次结构模型的 LLP 控制算法设计[J]. 控制工程, 2009, 16(S2): 24-27, 31.

[9] 姬莉霞, 马建红, 周清雷. 混杂系统的扩展时间自动机模型及验证研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(8): 73-78.

[10] ALUR R, DILL D L A. Theory of timed automata[J]. Theoretical Computer Science, 1994, 126: 183-235.

[11] ALUR R. Timed Automata[A]. NATO-AST 1998 summer school on verification of digital and hybrid systems[C], 1998.

[12] 林宝成, 李若琼. 基于混杂自动机的多负载 ICPT 系统建模方法研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(8): 712-720.