

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.01.006

# 基于 Fluent 烘房恒温区温度场模拟与优化

洪孝伟, 王栓虎, 张 宝

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:**烘房的恒温区温度的均匀性对印制铁皮的质量好坏有着决定性的影响,应使温差范围 $\leq 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,当温差大于 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,肉眼就可以明显地看出印制铁皮的色差。利用三维软件 Inventor 建立烘房模型,CFD 软件 Fluent 对烘房恒温区温度进行模拟,找出制约烘房温度均匀性的因素,并且设计几种不同喷嘴结构的烘房模型,分析比较不同喷嘴的烘房的内部温度分布情况,确定带有圆角过渡的圆形喷嘴的效果最优。

**关 键 词:**烘房;印制铁皮;喷嘴;温度分布;Fluent 软件

中图分类号:TS851 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2014)01-0022-06

## Simulation and Optimization Design of Temperature Field in Iron Printing Chamber Constant Temperature Area Based on Fluent

HONG Xiaowei, WANG Shuanhu, ZHANG Bao

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The quality of printed iron sheet is influenced by temperature uniformity in Iron Printing Chamber, the temperature variation should be below  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , when the temperature variation exceeds  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , it is obvious to find the color shading of iron sheet. Iron Printing Chamber, model was built through Inventor, Chamber temperature was simulated by CFD software Fluent to find out factors that influence temperature uniformity of the model. Iron Printing Chambers with several kinds of nozzle structure were designed and internal temperature distribution were analyzed and compared. It's proved that the Iron Printing Chamber with circular bead is optimized.

**Key words:** chamber; printed iron sheet; nozzle; temperature distribution; Fluent software

烘房是印铁生产线的一个重要组成部分,烘房保温区温度的均匀性是影响印铁质量的关键因素之一<sup>[1-2]</sup>。通常烘房分为入口气封区、升温区、保温区、出口气封区和冷却区,通过空气对流达到烘干的目的,因此空气在对流时不能确保每个铁皮的各个部位的接触温度都是相同的,烘房的恒温区难以保持在特定的恒温状态,不同位置温度的差异,会造成烘烤不足或者过烘烤,必然影响印刷铁皮的质量<sup>[3]</sup>。对于这种情况,本文通过对烘房的热气流喷嘴位置、分布问题,以及喷嘴形状等问题的研究与优化,使整个烘房内的温度能够尽量均匀,提高铁皮的烘干质量。

### 1 烘房建模

被干燥物为薄板,涂料均匀地涂在薄板上,热量主要被薄板吸收,根据公式

$$B_i = \alpha \cdot l / \lambda$$

式中: $\alpha$  为对流换热系数;

$l$  为铁皮厚度;

$\lambda$  为导热系数。

当  $B_i \leq 0.1$  时,为“薄板”,当  $B_i > 0.1$  时,为“厚板”。根据公式可以得出: $B_i = 50 \times 0.0005 \div 46.52 = 0.0054 \leq 0.1$ ,所以此为薄板受热问题,可以根据斯达尔科公式,计算受热时间,进而计算整个烘房的尺寸<sup>[4]</sup>。

收稿日期:2013-08-06;修回日期:2013-10-15

基金项目:江苏省科技支撑转换项目(BE2012174)

作者简介:洪孝伟(1989),男,安徽宣城人,硕士研究生,主要研究方向为烘房恒温区温度均匀性研究。E-mail:hongxw24@163.com

## 1.1 烘房保温区长度的确定

### 1.1.1 干燥时间的确定

由斯达尔科公式计算干燥时间

$$T = m \cdot \lambda \ln[(t_{\text{气}} - t') / (t_{\text{气}} - t)] / (\alpha \cdot f)$$

式中:  $m$ —物料的质量/kg;

$\alpha$ —干燥介质的对流换热系数/[kJ/(m<sup>2</sup>·h·℃)];

$f$ —材料的受热表面积/m<sup>2</sup>;

$t_{\text{气}}$ —干燥介质的温度/℃;

$t$ —物料的表面温度/℃;

$t'$ —物料的开始温度/℃。

### 1.1.2 运行速度的确定

整个干燥物料在套筒上棍子链上运行。可以得出运行速度

$$\Omega = P \cdot l_1 / 60$$

式中:  $\Omega$ —物料的运行速度/(m·min<sup>-1</sup>);

$P$ —产量/(张·h<sup>-1</sup>);

$l_1$ —套筒棍子链的节距/mm。

### 1.1.3 印铁烘房的长度

印铁烘房的长度可由烘干时间和运行速度确定,如下式

$$L = \omega \cdot T$$

## 1.2 烘房内截面高度确定

$$h = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5$$

式中:  $h$ —烘房的总高度/mm;

$h_1$ —底座高度,一般为 120 ~ 150 mm;

$h_2$ —轨道高度,一般为 40 ~ 70 mm;

$h_3$ —辊子高度,根据辊子型号选取/mm;

$h_4$ —支架高度,一般为 1 000 ~ 1 200 mm;

$h_5$ —上方富余,一般为 100 mm。

## 1.3 烘房内部截面宽度的确定

$$d = d_1 + 2d_2$$

式中:  $d$ —烘房的内截面宽度/mm;

$d_1$ —铁板的宽度/mm;

$2d_2$ —两侧富余,一般取 200 ~ 400mm。

根据以上数据建立烘房保温区的三维模型,如图 1 和图 2 所示。

## 2 划分网格及设定边界条件

### 2.1 划分网格

由于整个烘房结构具有对称性,为了减少计算机的运算量,节省时间,只建立烘房结构的四分之一作为计算模型<sup>[5-6]</sup>。

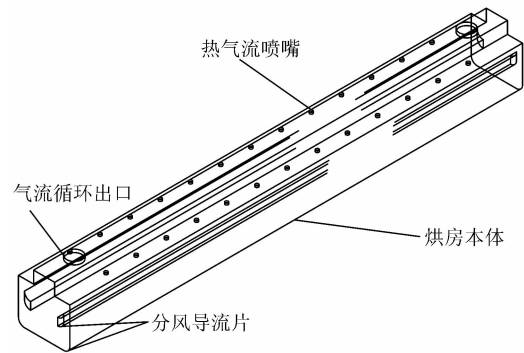


图 1 烘房三维简化线框模型

Figure 1 Simple 3-D drawing of chamber

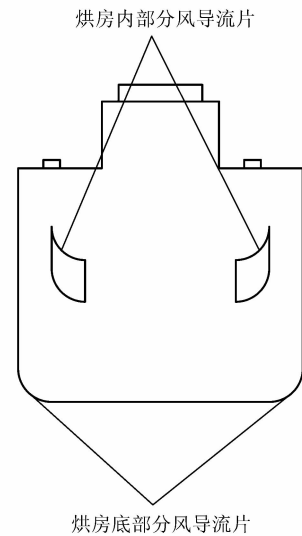


图 2 烘房截面线框视图

Figure 2 Section drawing of chamber

根据以上分析建立烘房分析模型,将三维模型保存成 STP 格式导入到 Gambit 中,划分网格,网格划分,如图 3 所示。

## 2.2 设定边界条件

### 2.2.1 对 inlet 的边界条件进行设置

设置进口速度为 30 m/s,温度为 493 K, Specification 中设置为 Intensity and Hydraulic Diameter<sup>[7]</sup>,并设置湍流强度为 4.45%,水力直径为 0.25 m。

### 2.2.2 对 outflow 边界条件进行设置

保持 outflow 的边界条件为默认值。

### 2.2.3 对 wall 的边界条件进行设置

由于烘房壁为保温材料设置,所以 wall 的边界条件需要进行相关计算才能得出结果。

烘房壁总厚度为 100 mm,两侧各有 1.5 mm 的钢

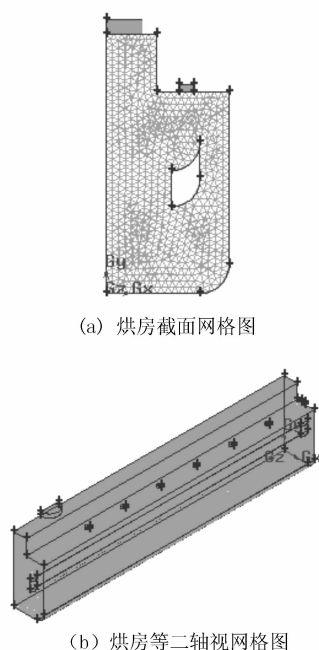


图3 烘房模型的网格划分

Figure 3 Gridding drawing of the chamber

板,中间层为超细玻璃纤维棉。要求烘房内部空气温度  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,烘房外部车间温度为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。已知内表面放热系数  $\alpha_i = 125.58\text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,外表面放热系数  $\alpha_o = 50.23\text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,材料的物理性能分别为:

钢板,  $\gamma_1 = 7800\text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $\lambda_1 = 163.1\text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

超细玻璃纤维,  $\gamma_2 = 35\text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $\lambda_2 = 0.125\text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

单位面积的稳态流量

$$q = \frac{t_1 - t_0}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_o}}$$

$$= \frac{220 - 20}{\frac{1}{125.58} + \frac{0.0015}{163.25} + \frac{0.097}{0.125} + \frac{0.0015}{163.25} + \frac{1}{50.23}}$$

$$= 248.8\text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$$

利用热阻概念,各层材料内外层温差分别为

$$\text{内层钢板: } \Delta t_1 = 248.8 \times \frac{0.0015}{163.25} = 0.0023\text{ K}$$

$$\text{热绝缘层: } \Delta t_2 = 248.8 \times \frac{0.097}{0.125} = 193.03\text{ K}$$

$$\text{外层钢板: } \Delta t_3 = 248.8 \times \frac{0.0015}{163.25} = 0.0023\text{ K}$$

从以上计算可以看出钢板两侧的温差与壁的总温差相比,小到可以忽略不计的程度,所以烘房壁内外层

之间的温差为  $193\text{ K}$ ,车间温度为  $292\text{ K}$ ,所以可以设置 wall 边界条件中温度为  $485\text{ K}$ 。

将设置好的文件以 mesh 格式导出。

### 3 基于 Fluent 的烘房内部温度场的模拟

#### 3.1 求解设置及控制迭代

设置求解参数,依次展开 Solve  $\rightarrow$  Control  $\rightarrow$  Solution,在 Solution Controls 中设定流量和湍动能的基本参数<sup>[8]</sup>。设定压力和动量的松弛因子分别为  $0.3$  和  $0.7$ ,能量和宽度松弛因子保持为  $1$ ,激活 energy 选项,为了计算的准确性,在动量和能量的离散化模型的选择时,选取 Second Order Upwind 离散模型;采用 SIMPLECS 算法进行计算。依次展开 Solve  $\rightarrow$  Initialize,对全部仿真区域进行初始化。在残差控制器的设置中,加选 plot,目的是为了在迭代计算过程中能够动态显示计算的残差<sup>[9-10]</sup>。设置迭代步数为  $1500$  步,保存设置,进行迭代计算。

#### 3.2 结果和分析

在建立的模型中,铁皮在烘房内是沿  $z$  轴方向前进,烘房内部的温度均匀性主要是要求同一张铁皮上的各点处温度较小,同时为了便于观察,利用对称原理显示整个截面的温度云图,温度均匀性主要要求铁皮覆盖的区域温度差异尽量保持较小值。图4所示为铁皮在烘房内部时截面图形。

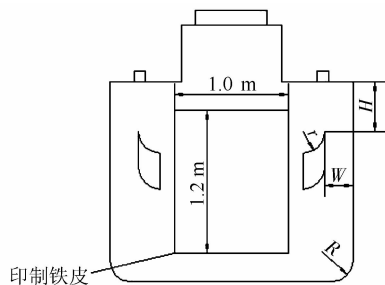


图4 烘房内部铁皮分布截面图

Figure 4 Iron layout in the chamber

对分析结果中,选择两个具有代表意义的截面作为观察对象:有喷嘴处截面( $z=0$ )和两个喷嘴的中间截面( $z=0.5$ ),依次展开 display  $\rightarrow$  contours  $\rightarrow$  temperature  $\rightarrow$  static temperature,显示  $z=0$ (热气流喷嘴截面)处和  $z=0.5\text{ m}$ ( $z$ 轴上两个喷嘴中间截面)处的温度场分布图,如图5和图6所示。

由图5可以看出在  $z=0$  处的温度分布差异性较大,从热气流喷嘴进入到烘房内部的气体在分风导流片的作用下流向烘房中间位置。由于湍流的现象较为剧烈,气流流过的区域温度比其他区域温度较高。由

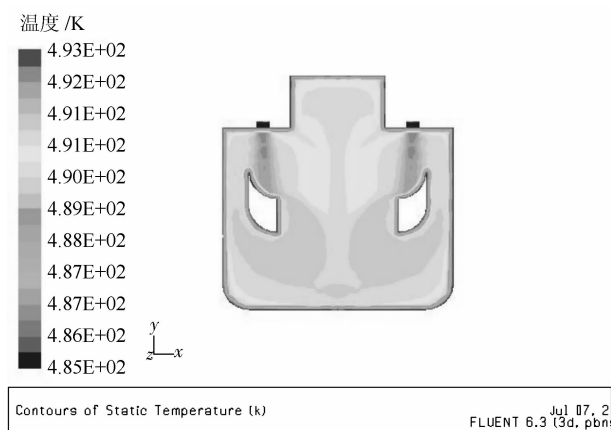
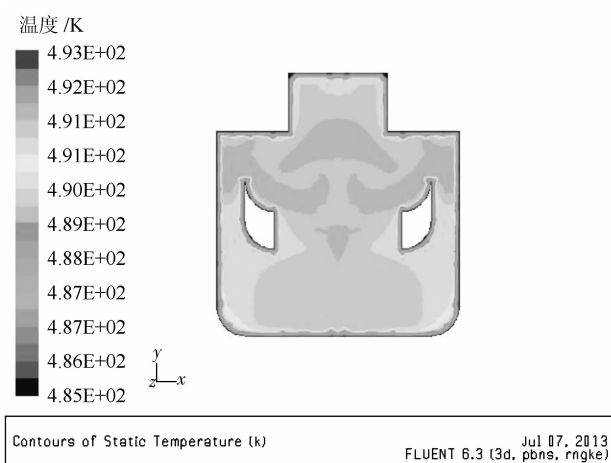
图5  $z=0$  处温度分布云Figure 5 Temperature nephogram at  $z=0$ 图6  $z=0.5$  m 处温度分布云图Figure 6 Temperature nephogram at  $z=0.5$  m

图6温度云图所示,在 $z=0.5$  m处,由于气流对流的影响,可以观察到中间上部位置温度明显高于下部位置。整个烘房内部湍流影响剧烈,温度没有特定的规律,处于紊乱状态。

## 4 烘房优化及仿真

### 4.1 建模与求解计算

由以上分析可以看出,温度的分布与热气流喷嘴有很大的关系。由于原烘房的单个喷嘴较大,而且各个喷嘴之间的间隔较大,这种设计不利于烘房温度的整体均匀,所以,针对以上情况,重新设计喷嘴的大小及布置位置。现设计一种较小的喷嘴,增加喷嘴的数量,并且使各个喷嘴之间的间距减小。重新设计的喷嘴所占的总面积与原喷嘴所占的总面积相等,在气流入射速度不变的情况下,烘房的气体流量保持不变。重新设计之后的烘房模型如图7所示。

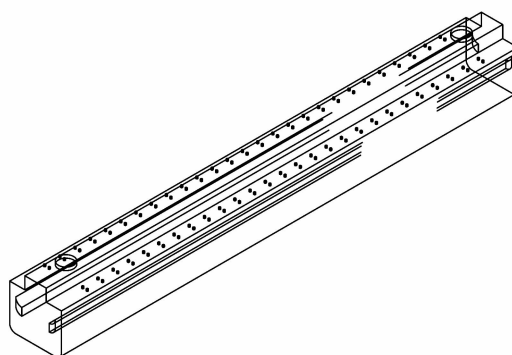


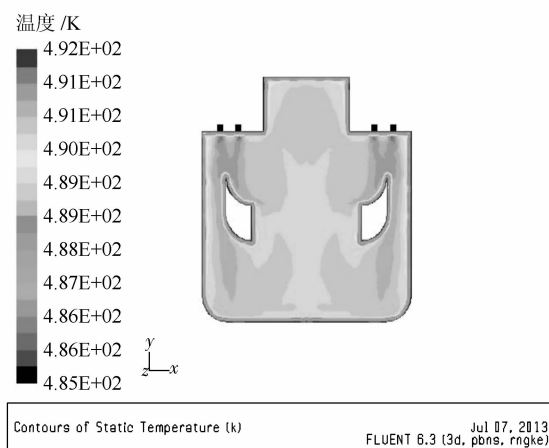
图7 优化后烘房三维简化线框图

Figure 7 Simple 3-D drawing of optimized chamber

将三维模型保存成 step 格式,导入到 Gambit 中,划分网格,并设置边界条件,然后以 mesh 格式导出。启动 Fluent6.3.26,读取 mesh 文件,进行迭代计算。

### 4.2 结果分析

根据所建模型进行的数值模拟,得到热空气进入烘房内部的温度分布云图。如图8、图9为 $z=0$  (热气流喷嘴截面)处和 $z=0.25$  m( $z$ 轴上两个喷嘴中间截面)处的温度分布云图。

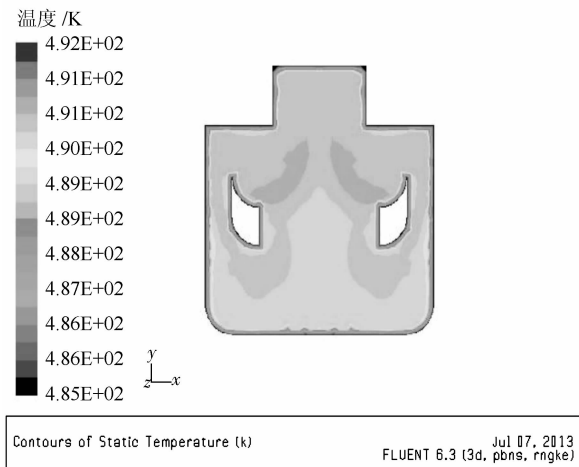
图8  $z=0$  处温度分布云图Figure 8 Temperature nephogram at  $z=0$ 

由以上分析结果的温度云图可以发现,采用优化之后的喷嘴,烘房内部气流对流更加剧烈,各个区域之间热量交换更加频繁,因此温度的均匀性相比之前有了一定的提高。

## 5 不同喷嘴结构烘房的分析比较

### 5.1 烘房模型的优化建模

通过前文对喷嘴大小及位置的布置,烘房内部温度均匀性有了一定的提高。热气流是烘房的唯一热源,热流的对流情况跟喷嘴的形状以及气流的入射角

图9  $z=0.25$  m处温度分布云图Figure 9 Temperature nephogram at  $z=0.25$  m

度也有很大的关系。因此根据实际情况,考虑生产需要等因素,设计了4种不同形状的喷嘴,如图10。

图10中将上述不同结构的4种结构的喷嘴的烘房模型划分网格,并导入到Fluent软件中分析计算。

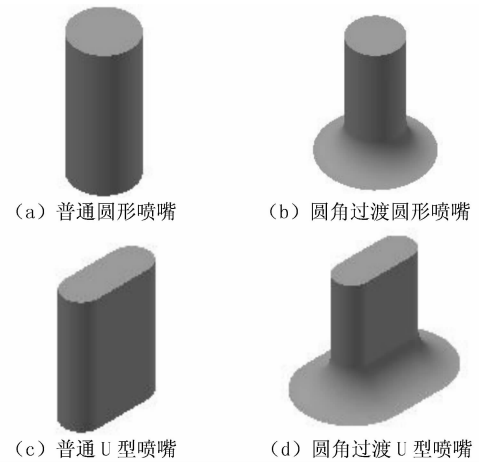
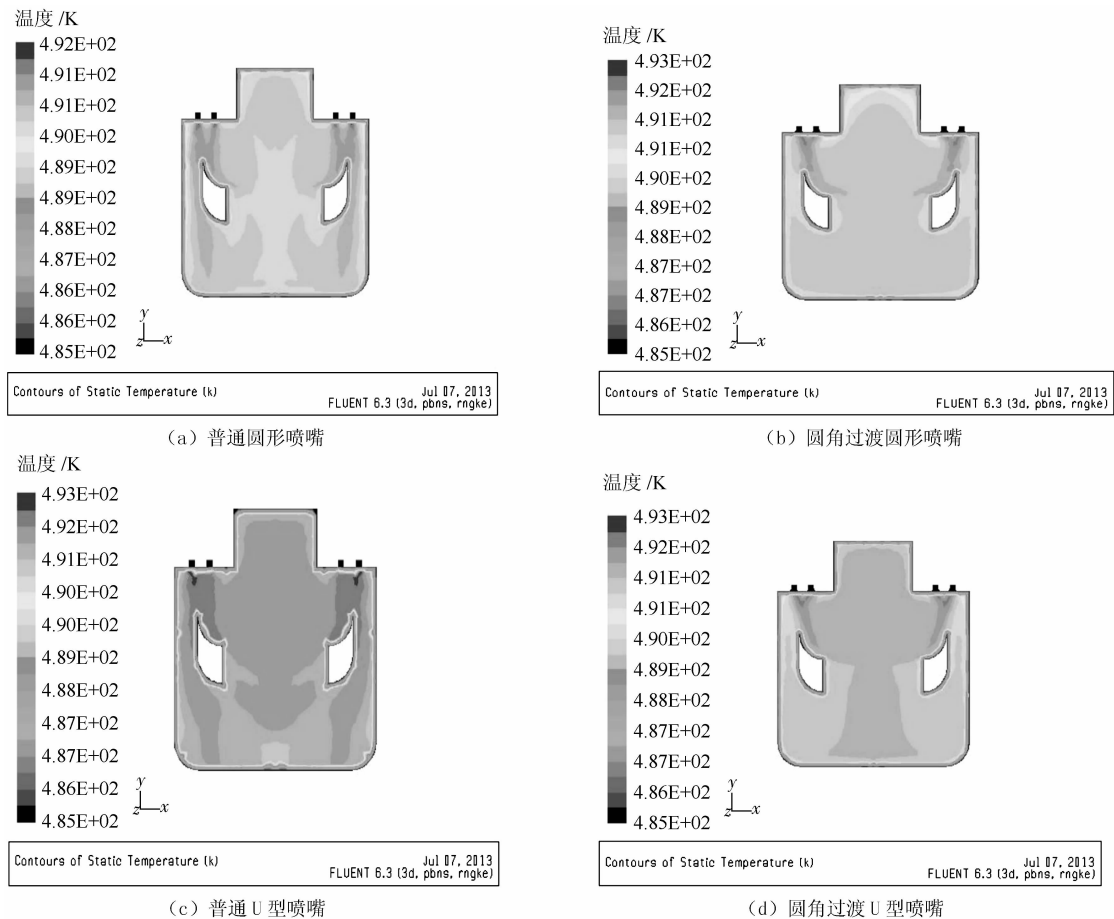


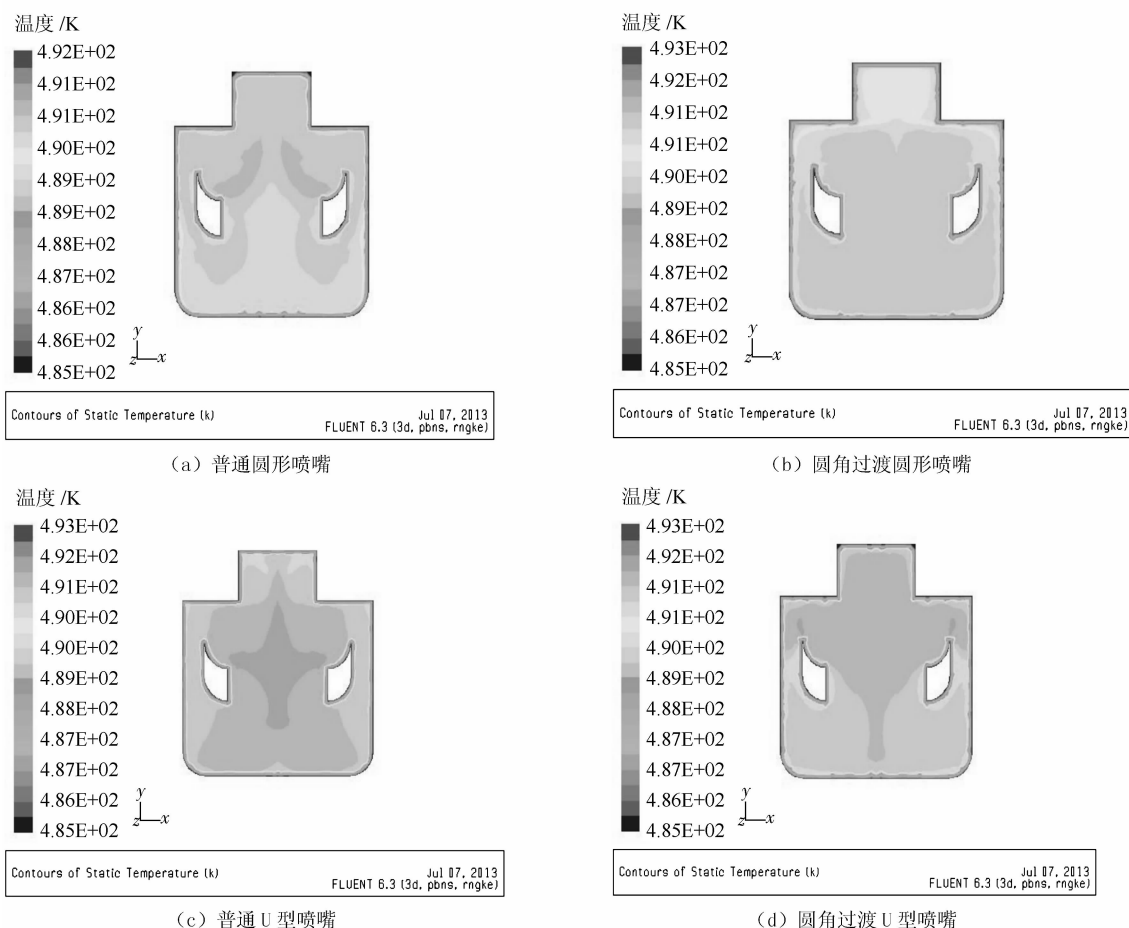
图10 热气流喷嘴的4种不同结构

Figure 10 Four kind different inlet

## 5.2 分析结果与讨论

以上模型经过1500次迭代后分析完成,将计算结果保存,显示 $z=0$ (热气流喷嘴截面)处和 $z=0.25$  m( $z$ 轴上两个喷嘴中间截面)处的温度分布云图如图11和图12所示。

图11 4种不同喷嘴烘房的 $z=0$ 处温度分布图Figure 11 Temperature nephogram about chamber with different inlet at  $z=0$

图 12 4 种不同喷嘴烘房的  $z=0.25$  m 处温度分布云图Figure 12 Temperature nephogram about chamber with different inlet at  $z=0.25$  m

通过对上述 4 种不同结构喷嘴烘房的仿真分析,从图 11 和图 12 不同截面的温度云图可以发现采用普通圆角过渡喷嘴的烘房温度分布更加均匀,可以作为优化之后的烘房喷嘴。

## 6 结语

文章从实际情况出发,根据热气流的人射位置,大小以及风量等影响因素,对烘房的热气流喷嘴进行仿真优化。对于原来的大而且间距比较大的喷嘴进行重新设计,采用一种小喷嘴,且喷嘴分布较为集中,采用此种优化之后,在一定程度上可以提高烘房恒温区的整体温度均匀性。然后,在优化的基础上,设计 4 种不同结构的喷嘴,分析各个喷嘴的烘房内部温度分布情况,在分析结构中找出一种温度均匀性最优的喷嘴。

从仿真分析的结果上可以看出,热气流喷嘴在优化之前,烘房内部温差较大高温区域主要集中在烘房上端,优化之后的模型无论从温度的均匀性以及恒温覆盖的范围都有很大的提高。

## 参考文献:

- [1] 冯利民,王国恒. 包装用连续式印铁涂料烘房的设计计算[J]. 中国包装,2003,22(4):95-96.
- [2] 林昭基. 烘房升温过程中壁面的吸热量[J]. 华东纺织学院学报,1984(3):95-97.
- [3] 刘九强. 印铁、涂料隧道式烘房热平衡及风量分布[J]. 上海食品科技,1983(2):11-15.
- [4] 孙学军,苏志国,丁国良,等. 轿车空调车室内空气流动数值模拟[J]. 上海交通大学学报,1996,30(2):19-22.
- [5] 吴俊云,童灵,陈芝久. 空调客车室内三维紊流流动与传热数值研究[J]. 上海交通大学学报,1999,33(3):331-334.
- [6] 杜子学,申储兵,刘应清. 微型面包车室内温度场计算机模拟方法研究[J]. 中国制造业信息化,2003,32(4):68-70.
- [7] 程雪涛,徐向华,梁新刚. 温度场与温度梯度场的均匀化[J]. 中国科学:E 辑 技术科学,2009,39(10):1730-1735.
- [8] 李鹏飞,徐敏义. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京:人民邮电出版社,2012.
- [9] 宋海洋. 基于 Fluent 的电动汽车空调匹配及仿真分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
- [10] 杜苗林,王栓虎,胡晓冬. 薄膜流涎机边料移除装置的数值模拟与优化[J]. 机械设计与制造,2013(1):194-200.