

doi: 10.7690/bgzdh.2020.10.015

基于 ProCAST 的 PBX 多腔捏合机传热过程仿真模拟与设计

杨治林, 郭进勇, 李全俊, 朱 强, 黄求安, 史慧芳

(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: 为实现某新型 PBX 捏合机的温度分区控制目的, 采用有限元模拟软件 ProCAST 对其传热效果进行仿真模拟研究, 探索其控温系统结构对 PBX 平衡温度分布的影响。结果表明: 初始结构下捏合机的恒温控制结构及分布不合理, 造成中间腔室内的平衡温度分布不均匀, 温度较低, 温差较大; 改进后的捏合机中间腔室内的温度接近理想温度, 平衡温度分布均匀, 过渡区温度梯度大, 梯度方向垂直于中心水平线, 整个捏合机在水平方向上的温度能实现从 50 °C 到 60 °C 再到 50 °C 的温度分区。

关键词: ProCAST; 温度场; 捏合机; 数值模拟

中图分类号: TP302.1 **文献标志码:** A

Simulation and Design of Heat Transfer Process of PBX Multi-cavity Kneader Based on ProCAST

Yang Zhilin, Guo Jinyong, Li Quanjun, Zhu Qiang, Huang Qiu'an, Shi Hui Fang

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

Abstract: In order to achieve the temperature zoning of certain type PBX kneader, the heat transfer effect of the kneader and the influence of temperature control system structure on the equilibrium temperature distribution of PBX is explored by finite element simulation software ProCAST. Result shows that the temperature control structure and distribution of kneader under the initial structure are irrational, resulting in low temperature, large temperature difference and uneven distribution of equilibrium temperature in the middle chamber. After the improvement, the equilibrium temperature is close to the ideal value with uniform distribution in the middle chamber of kneader. The temperature gradient in the transition zone becomes large, and the gradient direction is perpendicular to the central horizontal line, thus achieve the temperature zoning from 50°C to 60°C and then to 50°C in the horizontal direction.

Keywords: ProCAST; temperature field; kneader; numerical simulation

0 引言

高聚物粘结炸药(PBX)具有安全性好、易于加工成型和抗过载能力强等优点, 在武器装备中被广泛使用^[1]。它是由主炸药、粘接剂、增塑剂、钝感剂、催化剂和固化剂等组分组成的混合炸药, 其制备工艺主要包括混合、浇铸和固化过程。混合是浇铸和固化的前提和基础, PBX 的混合效果将直接影响其固化过程的交联反应速度、反应深度、热应力变化等行为。这些行为与炸药的宏观力学性能关系紧密, 关乎最终产品的感度以及对硬目标的侵彻能力^[2-3]。

目前 PBX 混合过程主要依赖于搅拌机、混合釜和捏合机等混合设备, 因此, 这些设备结构的合理设计是保证 PBX 混合效果的关键。在混合过程中, 对 PBX 进行适当的温度调整, 可改变高聚物的流变

性能, 合理的温度分布有利于提高 PBX 的混合均匀性、分散性以及包覆性^[4-5]。笔者对一种新型的 PBX 多腔捏合机的传热效果进行仿真模拟研究, 探索其控温系统的结构对 PBX 混合时的温度分布影响, 通过结构及布局优化, 实现了多腔捏合机腔室温度分区控制的目的。

1 多腔捏合机工作原理

如图 1 所示, 多腔捏合机的简化结构包括进料口(3 个)、捏合室(6 个)、出料口和恒温水箱(7 个)。工作时, PBX 的各原料组分分别从不同进料口进入捏合室, 捏合室内设有搅拌装置(图中已省略), 对原料进行混合, 各捏合室之间通过通道连接, 原料经过 6 个腔室反复混合最后从出料口挤出。为保证各组分原料充分混合, 通过控温结构(恒温水箱)对各腔室进行温度控制。根据原料热物理性能,

收稿日期: 2020-08-17; 修回日期: 2020-09-01

基金项目: 国防基础科研计划项目(JCKY2016209B005)

作者简介: 杨治林(1988—), 男, 四川人, 博士, 高级工程师, 从事材料科学与工程、计算机模拟与仿真研究。E-mail: yangzhilin0723@163.com。

拟实现捏合室温度分区的目的,即前 2 个和最后 2 个捏合室温度控制在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,中间 2 个捏合室温度控制在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

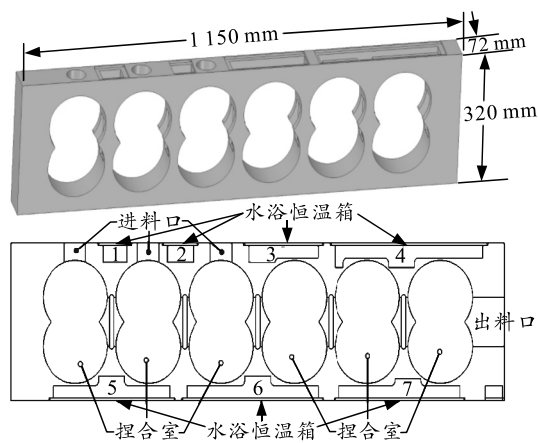


图 1 多腔捏合机主要结构

2 计算模型及参数

笔者重点探索恒温水浴箱的结构对捏合腔室温度分布的影响,以实现 PBX 混合过程温度控制的目的。由于 PBX 在混合时腔室内存在空气,同时混合物的黏度较大,绝大多数混合物料均存在腔室下部分且出料速度平稳。为简化计算,建立捏合机半充满状态的几何模型,模拟在静态条件下,腔室在达到传热平衡前后的温度分布变化。

2.1 有限元模型

相关几何结构包括捏合机外壳、空气、PBX 混合物和恒温水浴。采用有限元模拟软件 ProCAST 对其进行建模和计算,以四面体为主导的方式进行有限元网格划分,所有几何体的网格尺寸均为 10 mm ,整个模型的面网格单元数为 $38\ 986$,体网格单元数为 $246\ 914$,网格质量优异,整体模型的网格离散化结构如图 2 所示。

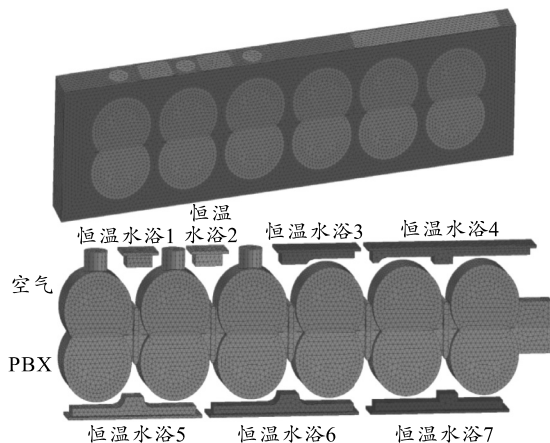


图 2 模型及组件有限元离散结构

2.2 材料参数

PBX 材料参数为自定义,具体数据如表 1 所示。捏合机主体材料采用不锈钢 GX8CrNi12,其他材料包括空气、水,均采用 ProCAST 自带材料数据库中的默认参数。

表 1 PBX 物性参数

材料	PBX
导热系数/($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	0.3
密度/(kg/m^3)	1 656
比热/($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	1.3
黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	$60(50\text{ }^{\circ}\text{C}), 45(60\text{ }^{\circ}\text{C})$

2.3 初始和边界条件

根据工艺及材料物性要求,PBX 的初始温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,捏合机和空气的初始温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,恒温水浴 1、2、4、5、7 的温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,3 和 6 为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,整个过程中水浴温度保持不变。

PBX 与捏合机腔体的换热系数为 $1\ 000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;PBX 与空气的换热系数为 $20\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;空气与捏合机腔体的换热系数为 $20\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;水浴与捏合机的换热系数为 $5\ 000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

计算的初始时间步长为 10^{-3} s ,最大时间步长为 1 s ,计算总步数设为足够大(10^8),总计算时间最大值设为 10^5 s ,以保证模型有足够时间达到热平衡。

3 结果分析与讨论

3.1 初始结构传热过程温度分布变化

6 个不同时刻捏合机中间竖直剖面的温度分布云图如图 3 所示。由图可知:传热开始后,捏合室内空气温度迅速上升,3 min 后绝大部分空气温度达到 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,PBX 温度大部分仍维持在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,各腔室连接处 PBX 温度略有下降,20 min 后中间腔室的空气温度达到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,通过界面传导开始对 PBX 进行加热,随后中间腔室连接处的温度首先达到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,随后缓慢向两边传热,时间达到 430 min 时,温度分布趋于稳定,当时间达到 750 min 后,整个系统热传导达到平衡,温度分布不再发生变化。从平衡后的温度分布图可以看出:中间腔室温度大部分区域达到了 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,但仍有较多区域温度仍处于 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,特别是中间腔室左侧以及与两侧腔室连接的通道处,中间腔室和两边腔室的过渡区域也较大,温度分布未达到分区的效果。

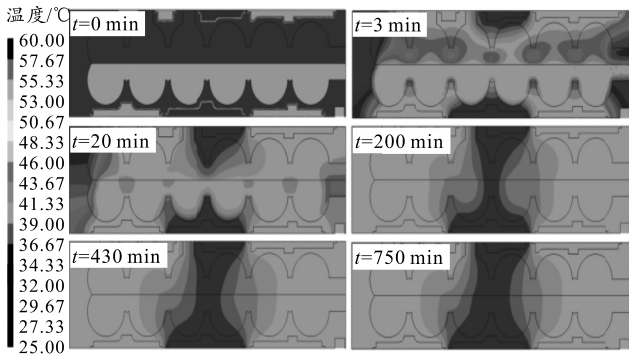


图 3 不同时刻捏合机内部温度分布云图

为进一步定量研究腔内不同区域的温度随时间的变化规律,选取 PBX 上表面 7 个不同位置的监测点,给出了各个点的温度时程曲线如图 4 所示。监测点 4 对应的曲线开始阶段的斜率最大,温度提升最快,其次是点 2 和点 7。这些点均位于各腔室的连接通道内,初步推测是由于此区域内 PBX 与捏合机接触表面较近有关。所有曲线在 750 min(45 000 s)后均趋于平衡,但中间腔室对应的 5 个点(点 2—点 6)出现明显温度差,点 4 的温度达到 59.6 °C,而点 2 的温度为 52.7 °C,温差达到 6.9 °C。这表明中间腔室的温度仍然较低且分布不均,加热结构对腔室的温度控制效果不佳。

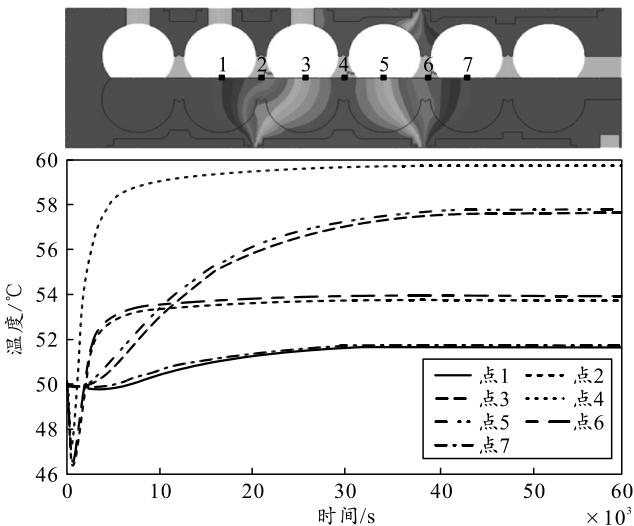


图 4 不同监测点的温度时程

3.2 水浴温度调整后的捏合机温度分布

考虑到中间腔室的平衡温度仍然较低,特别是左侧部分,将恒温水浴 2 的温度调整为 60 °C,观察其热平衡时的温度分布及各监测点的温度曲线。如图 5 所示,监测点 2 到监测点 3 之间的温度明显上升,对应的曲线稳定值从 52.7 °C 上升到 58 °C,加热效果明显提升;但监测点 4 到监测点 6 之间的温度变化很小,仍然存在 5 °C 左右的温度差。从温度

分布图中可以发现:中间腔室温度存在温度差是因为与两侧腔室连接处得不到足够的热量,导致温度始终较低造成的,表明当前结构下的恒温水浴槽的结构无法保证中间腔室温度均一性,需进一步调整改进。

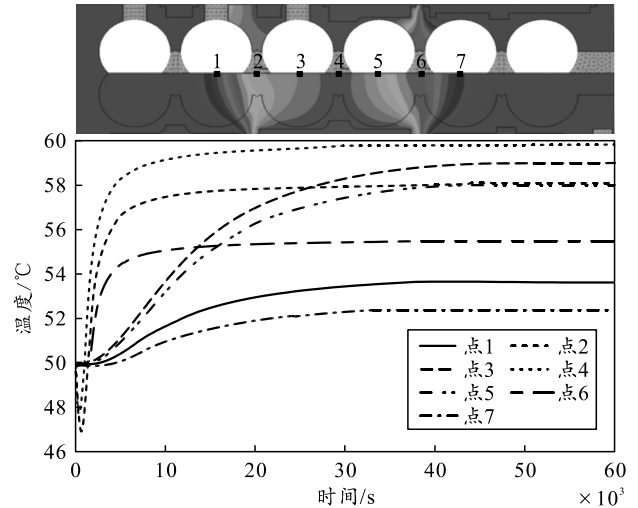


图 5 温度调整后不同监测点的温度时程

3.3 结构调整后的捏合机温度分布

调整恒温水浴槽 2, 3, 6 的结构,将其槽底部两端下移,结合倒角结构,使其尽量靠近中间腔室和两侧腔室的连接通道处。图 6 给出了结构改进后捏合机平衡温度分布及各监测点的温度。温度分布图显示整个中间腔室的温度都接近 60 °C。从温度时程曲线看,中间腔室的所有监测点温度的稳定值均在 59 °C 以上,温度分布均匀。两侧腔室的温度变化不大,监测点 1 和监测点 7 温度也略有上升,但均低于 54 °C。此结果表明:当前结构下的捏合室温度分区控制良好,中间腔室的温度接近理想温度,分布均匀。

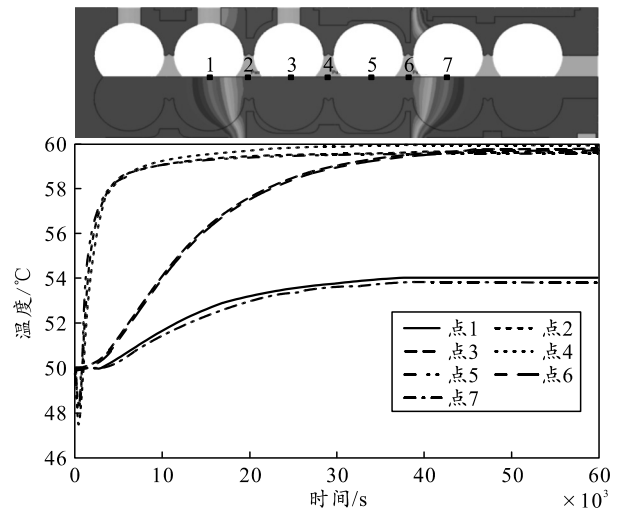


图 6 水浴槽结构调整后不同监测点的温度时程

3.4 改进前后捏合机温度分布对比

图 7 给出了恒温水浴槽 2 次改进前后，捏合机整体结构平衡温度分布变化。图中 A 为初始结构，中间腔室接近 60 °C 的区域较少，温度分布不均匀，存在较大温度差。图中 B 显示将恒温水浴槽 2 改为 60 °C 后，中间腔室的温度有一定提升，特别是左侧区域，但仍存在一定的温度差，温度分布仍不够均匀。图中 C 是进一步改进恒温水浴槽后的结构。中间腔室的温度明显提升，其内部几乎所有区域的温度均达到 59 °C 以上，温度分布均匀，温差较小。整个拟合机的 6 个腔室温度在水平方向上分区明显，得到了捏合腔室温度 50 °C—60 °C—50 °C 的分区控制效果。

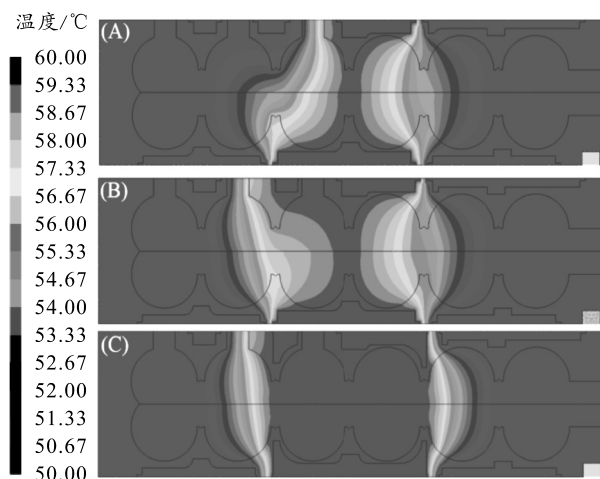


图 7 改进前后捏合机内部温度分布云图对比

进一步分析捏合机改进前后 7 个监测点的平衡温度，计算出中间腔室的平均温度以及中间腔室与两侧腔室过渡区的温度梯度，结果如表 2 所示。改进前的拟合机中间腔室的平均温度 T_2-T_6 为 56.3 °C，最大温度差为 6.9 °C (T_4-T_2)，与两侧腔室过渡区域的温度梯度为 $D_{T_2-T_1}=12.5 \text{ °C}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $D_{T_6-T_7}=27.5 \text{ °C}\cdot\text{m}^{-1}$ ，而经过 2 次改进后的腔室平均温度为 59.4 °C，最大温度差为 0.9 °C (T_4-T_6)，与两侧腔室过渡区域的温度梯度为 $63.8 \text{ °C}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $65 \text{ °C}\cdot\text{m}^{-1}$ 。改进后的腔室平均温度与理想温度

60 °C 仅差 0.6 °C，温度分布均匀，过渡区域的温度梯度比改进前提高了 3~5 倍，梯度方向垂直于中心水平线。

表 2 改进前后捏合机热平衡时不同检测点的温度值对比

NO.	A	B	C
$T_1/\text{°C}$	51.7	53.6	54.0
$T_2/\text{°C}$	52.7	58.0	59.1
$T_3/\text{°C}$	57.6	59.0	59.5
$T_4/\text{°C}$	59.6	59.9	59.9
$T_5/\text{°C}$	57.8	58.1	59.4
$T_6/\text{°C}$	53.9	55.5	59.0
$T_7/\text{°C}$	51.7	52.3	53.8
$\bar{T}_{2-6}/\text{°C}$	56.3	58.1	59.4
$D_{T_2-T_1}/(\text{°C}\cdot\text{m}^{-1})$	12.5	55.0	63.8
$D_{T_6-T_7}/(\text{°C}\cdot\text{m}^{-1})$	27.5	40.0	65.0

表中：A 为初始结构下的温度；B 为温度调整后的温度；C 为结构调整后的温度； \bar{T}_{2-6} 为 T_2-T_6 的平均温度(中间腔室)； $D_{T_2-T_1}$ 为 T_2 与 T_1 间的温度梯度。

4 结论

笔者针对某新型的 PBX 多腔捏合机的传热效果进行仿真模拟研究，研究其控温系统的结构对 PBX 捏合室温度分布的影响，得出结论：改进前的捏合机中间腔室内的平衡温度分布不均匀，温度较低，温差较大；改进后的捏合机中间腔室内的平衡温度分布均匀，温度接近理想温度，过渡区温度梯度大，梯度方向垂直于中心水平线，在水平方向上达到了良好的分区效果。

参考文献：

- [1] 张百磊, 常双君, 欧亚鹏. 浇注钝感 PBX 的研究进展及发展趋势[J]. 化学推进剂与高料, 2015, 13(1): 42-45.
- [2] 陈春燕, 王晓峰, 徐洪涛, 等. 固化温度对浇注 PBX 固化应力的影响[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 371-375.
- [3] 郭昕, 南海, 齐晓飞, 等. 浇注 PBX 固化行为的实验与模拟[J]. 火工品, 2014, 36(2): 46-49.
- [4] 吴凯, 刘玉存, 刘仕瑞. PBX 炸药概述及其发展与前景[J]. 山西化工, 2012, 32(2): 36-39.
- [5] 孙业斌. 爆炸作用与装药设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987: 19-23.