

# 四氧化二氮低温非稳态导热模型研究

焦天恕<sup>1</sup>, 信 聪<sup>1</sup>, 齐彦兴<sup>2</sup>

(1 中国酒泉卫星发射中心, 酒泉 732750; 2 中科院兰州化学物理研究所, 兰州 730000)

**摘 要:** 四氧化二氮在低温条件下容易凝结为固体而对航天发射产生难以预见的影响, 本文依据非稳态传热理论对低温环境中不同管径圆柱管道内的四氧化二氮导热情况进行了研究, 建立了圆柱管道四氧化二氮低温非稳态导热模型, 经验证与实际情况拟合较好。

**关键词:** 四氧化二氮; 低温; 非稳态导热

中图分类号: V511

文献标识码: A

文章编号: (2008) 06-0055-05

## Study on transient heat conduction model of dinitrogen tetroxide in low temperature

Jiao Tianshu<sup>1</sup>, Xin Cong<sup>1</sup>, Qi Yanxing<sup>2</sup>

(1 Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 732750, China;

2 Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Liquid dinitrogen tetroxide ( $N_2O_4$ ) tends to change to solid phase in low temperature which may affect the launch progress. Based on the theory of transient heat conduction, the transient heat conduction of  $N_2O_4$  in pipes of different diameters was researched, and the transient heat conduction model of  $N_2O_4$  in low temperature was established. Tests show that the experimental and the model results are in good accordance.

**Key words:** dinitrogen tetroxide; low temperature; transient heat conduction

### 0 引言

四氧化二氮 ( $N_2O_4$ ) 是一种液体火箭推进剂, 在航天发射中作为氧化剂应用。常温下四氧

化二氮为均相液体, 由于  $NO_2$  的存在而呈红棕色, 高于  $25^\circ C$  时为  $N_2O_4$  和  $NO_2$  的平衡混合物。四氧化二氮的冰点较高, 为  $-11.2^\circ C$ 。当温度低于  $-11.2^\circ C$  时, 液态四氧化二氮向仅由  $N_2O_4$  分子组成的无色结晶转变, 将对发射任务进程产生难

收稿日期: 2008-08-26; 修回日期: 2008-09-23。

作者简介: 焦天恕 (1974—), 男, 工程师, 研究领域为液体推进剂应用技术。

以预见的影响。

酒泉卫星发射中心地处沙漠深处, 春秋两季较短, 冬夏两季较长, 冬季寒冷时最低气温可达 $-32^{\circ}\text{C}$ 。另一方面, 航天发射场四氧化二氮转注等作业一般通过长圆柱形的管道进行转入或转出, 属于无内热源的非稳态传热方式, 外部环境为具有一定温度的空气。因而研究四氧化二氮在低温环境下的温度变化规律, 建立低温条件下的导热模型, 对于准确预测发射场加转注过程中的初始温度, 确保加转注准确性等具有重要的理论意义。

依据非稳态传热理论对低温条件下圆柱管道内四氧化二氮非稳态导热进行了研究, 建立了低温环境中四氧化二氮的非稳态导热模型, 经验证与实际情况拟合较好。

## 1 理论依据

物体温度随时间而变化的导热过程称为非稳态导热。根据物体温度随时间推移而变化的特性可分为两类非稳态导热: 一类是物体温度随时间推移逐渐趋于恒定; 另一类是物体温度随时间作周期性变化。四氧化二氮非稳态导热属于第一种类型。

非稳态导热过程中, 物体的温度分布存在两个阶段。第一阶段称为非正规状况阶段, 温度分布呈现出主要受初始温度分布控制的特性。当过程进行到一定深度时, 物体初始温度分布的影响逐渐消失, 物体中不同时刻的温度分布主要取决于边界条件及物性, 此时非稳态导热过程进入第二阶段, 即正规状况阶段。

由于非正规状况阶段时间很短, 因此本文主要研究正规状况阶段, 采用实验方法与理论解析相结合的方法进行。

发射场四氧化二氮转注等作业一般通过长圆柱形的管道进行, 四氧化二氮贮箱也为长圆柱形, 对长圆柱体中四氧化二氮的导热求解可按对流边界条件下的一维瞬态导热处理, 其求解公式写作

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n J_0 \left( \mu_n \frac{x}{\delta} \right) \exp(-\mu_n^2 F_0) \quad (1)$$

当 $F_0 > 0.2$ 时, 仅取无穷级数的第1项即可满足计算要求, 计算误差不大于1%。从而得到

$$\frac{\theta}{\theta_0} = C_1 J_0 \left( \mu_1 \frac{x}{\delta} \right) \exp(-\mu_1^2 F_0) \quad (2)$$

式中,  $\theta$  为过余温度, 指环境温度与容器温度的差值;  $\theta_0$  为初始过余温度;  $x$  为管内测温点到管壁的距离;  $F_0$  为傅里叶数,  $F_0 = \frac{\alpha \tau}{\delta^2}$ ,  $\alpha$  为四氧化二氮承装容器的热扩散率,  $\tau$  为时间,  $\delta$  为长圆柱体的半径。

$$C_1 = \frac{2}{\mu_1} \frac{J_1(\mu_1)}{J_0^2(\mu_1) + J_1^2(\mu_1)}, \text{ 其中, } J_1(x) \text{ 为贝塞}$$

尔函数,  $\mu_1 \frac{J_1(\mu_1)}{J_0(\mu_1)} = Bi$ ,  $Bi = \frac{h\delta}{\lambda}$ ,  $\lambda$  为复合导热系数 (与四氧化二氮及容器材质的导热系数相关),  $h$  为对流换热表面传热系数 (与空气介质导热系数、风速、环境温度相关)。

对式 (2) 取对数, 得到

$$\ln \theta = -m\tau + \ln \theta_0 + f(Bi, x/\delta) \quad (3)$$

式中,  $m = \mu_1^2 \frac{\alpha}{\delta^2}$  称为冷却率, 该值在非稳态导热过程中对长圆柱体的任何地点都是相同的;

$f(Bi, x/\delta)$  是与非稳态导热时间进程无关的常数, 其值的大小与毕渥数  $Bi$  及位置有关。

令  $f(\theta_0, Bi, x/\delta) = \ln \theta_0 + f(Bi, x/\delta)$ , 则式 (3) 最终表示为

$$\ln \theta = -m\tau + f(\theta_0, Bi, x/\delta) \quad (4)$$

公式 (4) 表明,  $F_0 > 0.2$  后, 过余温度的对数与时间的关系成线性函数, 这是非稳态导热正规阶段的重要特征, 也是本文对试验数据进行处理理论依据。

## 2 试验部分

### 2.1 试验方案设计

由于发射场四氧化二氮转注等作业一般通过长圆柱形管道进行, 四氧化二氮贮箱也为长圆柱

形,因而本课题模拟火箭贮箱及推进剂加注管路,设计具有不锈钢外壳的不同内径的长圆柱体容器,研究不同内径容器中四氧化二氮在低温条件下的温度变化情况,建立四氧化二氮在长圆柱体容器中的低温导热模型。该容器截面如图1所示。

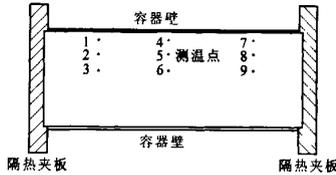


图1 试验容器设计截面图

Fig.1 Sectional view of experimental pipe

设计内径分别为100mm、150mm、200mm的管式不锈钢容器三套(依次简称为D100、D150、D200),长度均为1000mm,每套容器均预留推进剂加注口、压力表接口及底部卸料口。容器中间等距离分布3个测温区,各测温区内设置测温点,每个测温点埋设热电偶以测量温度。其中,

D100每个测温区内设2个测温点,分别在内壁和中心位置;D150、D200每个测温区内设3个测温点,分别在内壁、1/2半径处和中心位置。

由于四氧化二氮冰点为-11.2℃,据此选择-15℃、-20℃、-25℃、-30℃、-35℃五个恒温点对四氧化二氮温度变化规律进行测定,建立低温导热模型。整个低温试验在经过加入冷冻盘管改造并由冷冻机带动的冰柜中进行。

### 2.2 数据分析

按照100%容器装填量,采集不同容器各测温区域每个测温点在某一温度下四氧化二氮温度随时间变化的系列数值,采集时间不少于12小时。依据以下两个标准选择有效数据:(1)环境温度基本稳定;(2)介质温度变化范围在-10℃至21℃,以确保四氧化二氮介质在液态范围内。由于试验数据采集量及处理量很大,仅就-35℃ D200管径四氧化二氮导热情况为例,说明数据采集和处理的一般过程。表1为-35℃ D200管径条件下采集的有效数据。

表1 -35℃ D200管径条件下采集的有效数据

Tab.1 Available data of D200 at -35℃

试验时间: 2006.12.20

φ200mm

环境温度: -36℃

时间	环境温度/℃	第一测温区/℃			第二测温区/℃			第三测温区/℃		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
11:10	-35	3	11	11	3	11	12	4	11	12
11:20	-37	2	10	10	2	10	11	3	10	11
11:30	-37	1	9	9	1	9	10	2	9	10
11:40	-34	1	7	8	0	7	8	1	8	8
11:50	-36	0	6	7	0	7	7	0	7	7
12:00	-36	-1	5	6	-1	6	6	0	6	6
12:10	-35	-1	4	4	-2	4	5	-1	5	5
12:20	-36	-2	4	4	-2	4	5	-1	4	5
12:30	-37	-3	2	3	-3	3	3	-2	3	3
12:40	-37	-4	1	2	-4	2	2	-3	2	2
12:50	-36	-5	0	1	-5	1	1	-4	1	1
13:00	-37	-6	0	0	-6	0	1	-5	0	0
13:10	-35	-6	-1	-1	-7	-1	0	-6	-1	0
13:20	-36	-7	-1	-1	-7	-1	0	-6	-1	0
13:30	-37	-8	-2	-2	-8	-2	-1	-7	-2	-1
13:40	-36	-9	-3	-3	-9	-3	-2	-8	-3	-2
13:50	-35	-9	-4	-4	-9	-4	-3	-8	-4	-3
14:00	-37	-10	-5	-5	-10	-5	-4	-9	-5	-4

依据表1对第一测温区测温点1得到的数据做过余温度对数  $\ln\theta$  与时间  $t$  的关系曲线, 得到  $\ln\theta$  与  $t$  的关系方程  $\ln\theta = -0.0024t + 3.676$ , 与式(4)比较可知, 这里有  $m = 0.0024$ ,  $f(\theta_0, Bi, x/\delta) = 3.676$ 。

依次对同条件下其它8个测温点的数据进行处理, 共得到9个拟合方程及分别对应的  $R^2$  (归一化系数)、 $\theta_0$  和  $x/\delta$ 。同理, 可计算出  $-30^\circ\text{C}$ 、 $-25^\circ\text{C}$ 、 $-20^\circ\text{C}$  和  $-15^\circ\text{C}$  的拟合数据, 如表2所示。

表2 D200 低温环境试验数据处理汇总表  
Tab.2 Data processing sheet of D200 at low temperature

测温点	$m$	$f(\theta_0, Bi, x/\delta)$	$R^2$	$\theta_0$	$x/\delta$
1	0.0024	3.676	$R^2=0.9905$	39	0
2	0.0023	3.8398	$R^2=0.9899$	47	0.5
3	0.0024	3.853	$R^2=0.9963$	47	1
4	0.0024	3.6692	$R^2=0.9918$	39	0
-35°C	5	0.0024	$R^2=0.9951$	47	0.5
6	0.0023	3.8608	$R^2=0.9898$	48	1
7	0.0023	3.6903	$R^2=0.9911$	40	0
8	0.0024	3.8555	$R^2=0.9978$	47	0.5
9	0.0023	3.8605	$R^2=0.9876$	48	1

为将上述方程合并为一个, 我们对表2中  $m$  取平均值得到  $\bar{m} = 0.00224$ , 结合  $f(\theta_0, Bi, x/\delta) = \ln\theta_0 + f(Bi, x/\delta)$  可分别得到  $x/\delta$  为 0、0.5、1 处的  $\bar{f}(Bi, x/\delta)$  分别为 0.0043、 $-0.005$ 、 $-0.003$ 。

按照上述对 D200 管径的处理方法, 分别对 D150、D100 的数据进行处理并对数据进行汇总, 得到表3。

表3 不同管径公式拟合数据表  
Tab.3 Datasheet of different pipes

序号	半径, $\delta/\text{mm}$	$\bar{m}$	$\bar{f}(Bi, x/\delta)$
			0.0043 ( $x/\delta=0$ )
1	100	0.00224	-0.005 ( $x/\delta=0.5$ ) -0.003 ( $x/\delta=1$ )
			0.001 ( $x/\delta=0$ )
2	75	0.00345	-0.007 ( $x/\delta=0.5$ ) -0.016 ( $x/\delta=1$ )
			-0.032 ( $x/\delta=0$ )
3	50	0.00585	-0.012 ( $x/\delta=1$ )

结合  $m = \mu_1^2 \times \frac{\alpha}{\delta^2}$  的表达式可以知道,  $m$  值的大小与半径、热扩散率及毕渥数有关。在较小的温

度范围内, 可以认为热扩散率、传热系数及对流换热系数为定值。因此,  $m$  可表示为  $\delta$  的函数。依据表3作  $\ln m$  与  $\delta$  的关系曲线, 如图2所示。

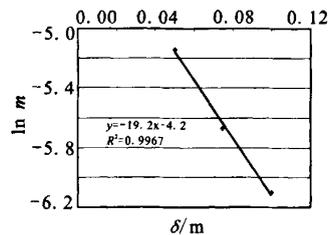


图2 冷却率与半径关系曲线图  
Fig.2 Relationship between  $\ln m$  and  $\delta$

从而有

$$\ln m = -19.2\delta - 4.2 \quad (5)$$

将式(5)代入式(3), 得到

$$\ln\theta = -\exp(-19.2\delta - 4.2) \times \tau + \ln\theta_0 + f(Bi, x/\delta) \quad (6)$$

结合表2与表3可以看出,  $f(Bi, x/\delta)$  的值与  $\ln\theta_0$  相比较小, 在简化计算中可以忽略不计。因而可将式(6)简化为

$$\ln\theta = -\exp(-19.2\delta - 4.2) \times \tau + \ln\theta_0 \quad (7)$$

公式(7)也即简化的四氧化二氮在不锈钢圆柱体中正规阶段的低温导热模型, 适用条件为:

环境温度-10~-35℃, 容器半径 0.05~0.1m。

2.3 试验验证

以 D150 容器为例, 取外界温度-28℃, 进行验证试验。试验数据与计算数据对比见表 4。

由表 4 可以看出, 以 15min 时的温度为初始温度起点, 计算结果与实测结果符合较好, 最大温度差值为 1.2℃, 最大  $\overline{\Delta T}$  为 0.5℃, 说明模型与实际情况拟合较好。

3 结论

通过对低温条件下圆柱管道内四氧化二氮非

稳态导热进行研究, 得到如下结论:

(1) 本文研究了不同容器中四氧化二氮在低温条件下的温度变化情况, 建立了恒温空气介质、恒风速环境下的四氧化二氮低温导热模型, 即

$$\ln\theta = -\exp(-19.2\delta - 4.2) \times \tau + \ln\theta_0$$

(2) 验证了该模型, 得到的温度误差最大不超过 2℃, 与实际情况拟合较好。

(3) 积累的大量试验数据, 可为进一步建立四氧化二氮高温导热模型及开展四氧化二氮其他理化性质的研究提供素材。

表 4 实测数据与低温导热模型计算数据对比表

Tab.4 Comparison of experimental result and result of the model

时间/min	壁温实测值/℃	壁温计算值/℃	$ \Delta T_0 $ /℃	1/2 半径实测值/℃	1/2 半径计算值/℃	$ \Delta T_{1/2} $ /℃	中心实测值/℃	中心计算值/℃	$ \Delta T_1 $ /℃
0	14.0			14.0			13.7		
5	11.3			13.3			13.7		
25	4.7	4.5	0.2	10.7	10.6	0.1	11.3	11.6	0.3
45	2.7	2.3	0.4	8.0	8.0	0	9.0	8.9	0.1
65	0.7	0.2	0.5	5.3	5.5	0.2	6.0	6.3	0.3
85	-1.3	-1.7	0.4	3.0	3.2	0.2	4.0	4.0	0
105	-2.7	-3.5	0.8	1.0	1.1	0.1	1.7	1.8	0.1
125	-4.3	-5.2	0.9	-1.0	-0.9	0.1	0.0	-0.3	0.3
145	-6.3	-6.8	0.5	-3.0	-2.8	0.2	-2.0	-2.2	0.2
165	-8.3	-8.2	0.1	-4.7	-4.5	0.2	-4.0	-3.9	0.1
185	-10.0	-9.6	0.4	-6.0	-6.1	0.1	-5.7	-5.6	0.1
205	-11.3	-10.8	0.4	-8.0	-8.3	0.3	-8.0	-7.9	0.1
225	-12.0	-12.0	0	-9.0	-9.0	0	-8.3	-8.6	0.3
245	-13.0	-13.1	0.1	-10.0	-10.3	0.3	-10.0	-9.9	0.1
$\overline{\Delta T}$			0.5			0.21			0.20

参考文献:

[1] 邹利鹏, 何斌, 罗兴炳, 等. 液体推进剂[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.  
 [2] 布拉特柯夫 A A. 火箭燃料和喷气燃料发动机化学[M]. 北京: 中国石化出版社, 1992.  
 [3] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.  
 [4] 赵镇南. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.  
 [5] 刘庆才, 周彦煌, 刘东尧. 130 火箭推进剂非稳态温度场特性数值研究[J]. 弹箭与制导学报, 2002, 22(2): 64-67.

(编辑: 王建喜)