

背景介绍

飞行器在超声速、高超声速状态下的冷却一直是研究人员关注的重点问题。目前应用最广泛的飞行器冷却方式之一是再生冷却循环系统,即在航空煤油进入燃烧室之前,先将其用作冷却剂去吸收机体的热量。在实际工作过程中,航空煤油往往工作在超临界压力下,因此,准确地获取超临界状态下航空煤油的热物性对换热研究具有重要的意义。

由于实际碳氢燃料的组成极为复杂,因此目前常采用选取代表性组分组成替代模型的方法,去模拟实际燃料的性质。针对国产航空煤油 RP-3,目前已有的替代物模型在计算其超临界状态下各热物性往往存在以下问题:

- ▶ 整体相对误差仍然较大,且往往在预测某一种物性上表现很好,而无法准确预测另一种物性。
- ▶ 模型计算结果在温度较高时和实验值偏离加大

本文旨在构建能够较准确预测在超临界压力下, 320 K ~ 770 K 温度范围内, RP-3 密度、粘度、比热容和热导率的热物性替代模型。模型的构建方法如右所示。

广义对应态法则

对应态法则揭示了不同流体之间的相似性,基于该理论,未知流体的热物性可以由参考流体的热物性计算得到。广义对应态法则在两参数对应态法则的基础上引入了新的参数偏心因子 ω ,以反映不同分子结构对物性计算的影响。本文中替代模型的热物性调用 supertrapp 软件来计算。

对应态法则

$$h_x = \rho_r^c / \rho_c^c; f_x = T^c / T_r^c$$

$$\rho_r = h_x \rho; T_r = T / f_x$$

$$Z_x(T, \rho) = Z_r(T_r, \rho_r)$$

偏心因子

$$\omega = -\log\left(\frac{P_s}{P_c}\right) - 1, \text{ when } T_r = 0.7$$

形状因子

$$h_x = (\rho_r^c / \rho_c^c) \varphi(T / T_c, \rho / \rho_c, \omega)$$

$$f_x = (T^c / T_r^c) \theta(T / T_c, \rho / \rho_c, \omega)$$

MWBR 状态方程

$$P = \sum_{n=1}^9 a_n(T) \rho^n + \sum_{n=10}^{15} a_n(T) \rho^{2n-17} e^{-r\rho^2}$$

优化过程

Algorithm 1: deterministic crowding

随机生成 n 个个体;

Repeat for g generations:

Do $n/2$ times:

随机选取两个个体, p_1, p_2 ;

交叉、重组,生成两个子代 c_1, c_2 ;

if $d(p_1, c_1) + d(p_2, c_2) \leq [d(p_1, c_2) + d(p_2, c_1)]$ then

if $f(c_1) > f(p_1)$ then 用 c_1 替换 p_1 ;

if $f(c_2) > f(p_2)$ then 用 c_2 替换 p_2 ;

else

if $f(c_2) > f(p_1)$ then 用 c_2 替换 p_1 ;

if $f(c_1) > f(p_2)$ then 用 c_1 替换 p_2 ;

个体

不同摩尔分数分配的模型。

适应度函数 f

各压力、温度下物性计算值和实验值的相对误差之和的倒数。

距离 d

若两个个体所代表的摩尔分数分别为:

$$p = (p_1, p_2, p_3, p_4) \text{ 及 } c = (c_1, c_2, c_3, c_4)$$

则:

$$d(p, c) = \sqrt{\sum_i (p_i - c_i)^2}$$

模型构建方法

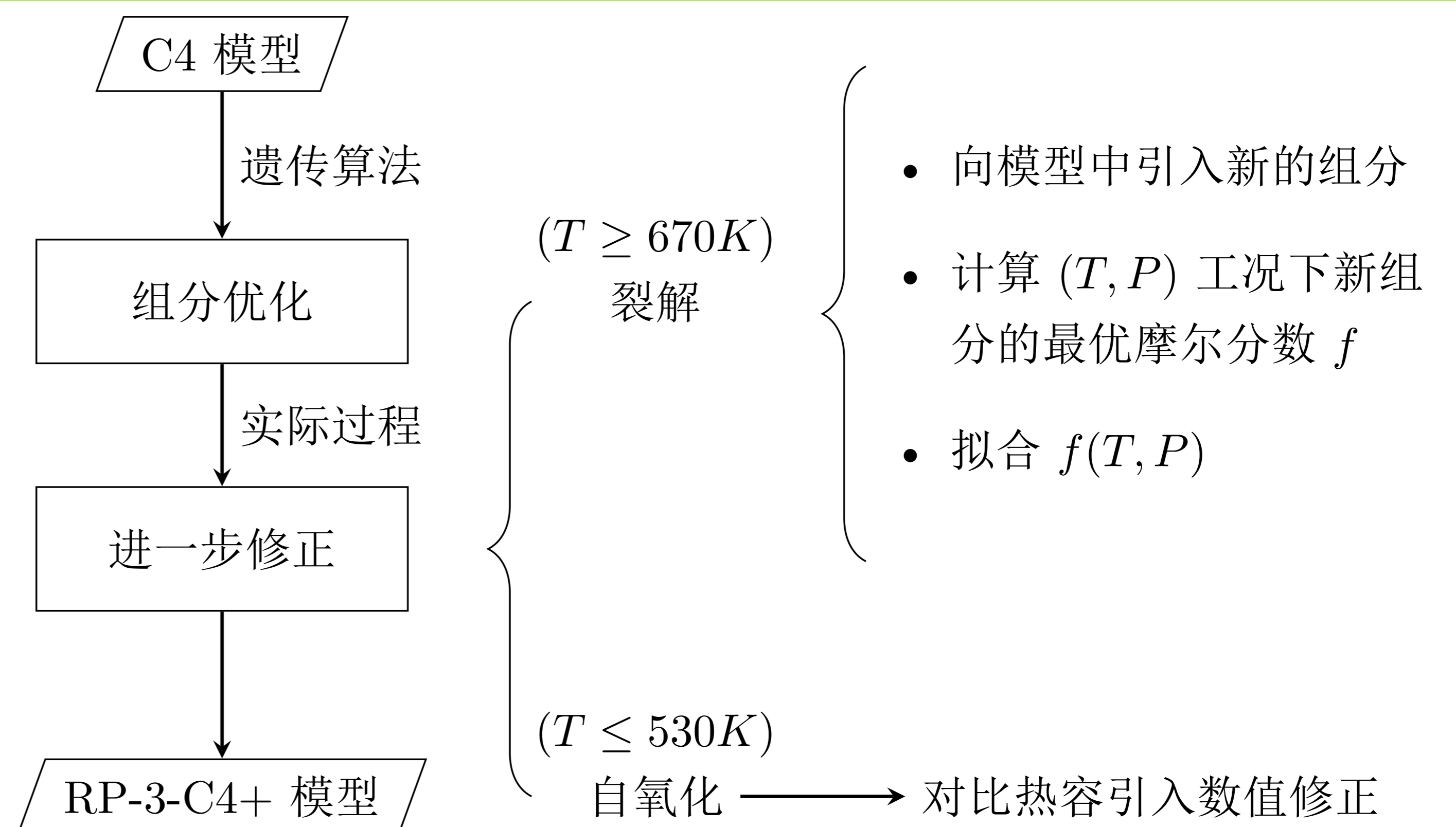


Figure 1: RP-3-C4+ 模型构建流程示意图

模型构成

Table 1: RP-3-C4+ 模型和原始 C4 模型组分对比

Species	Chemical formula	Surrogate model components in mole fraction				
		C4 Model	μ	ρ	λ	C_p^a
n-decane	C10H22	0.2030	$0.6320 \times (1 - f(T, P))$	$0.6220 \times (1 - g(T, P))$	0.1430	0.6850
n-dodecane	C12H26	0.3810	$0.1520 \times (1 - f(T, P))$	$0.1100 \times (1 - g(T, P))$	0	0.2913
methylcyclohexane	C7H14	0.1470	$0.2160 \times (1 - f(T, P))$	0	0	0.0237
n-butylbenzene	C10H14	0.2690	0	$0.2680 \times (1 - g(T, P))$	0.8570	0
cyclohexane	C6H12	0	0	$g(T, P)$	0	0
octadecane	C18H38	0	$f(T, P)$	0	0	0

^a Multiply calculation result by $(7.78 \times 10^{-4}T + 0.7104)$

^b $f(T, P) = \max(0.0054T - 0.19P - 2.97, 0)$

^c $g(T, P) = \begin{cases} 0 & T < 690 \text{ K} \\ \min(1, \max(0.68P - 1.44, 0)) \times (0.01T - 6.9) & T \geq 690 \text{ K} \end{cases}$

计算结果

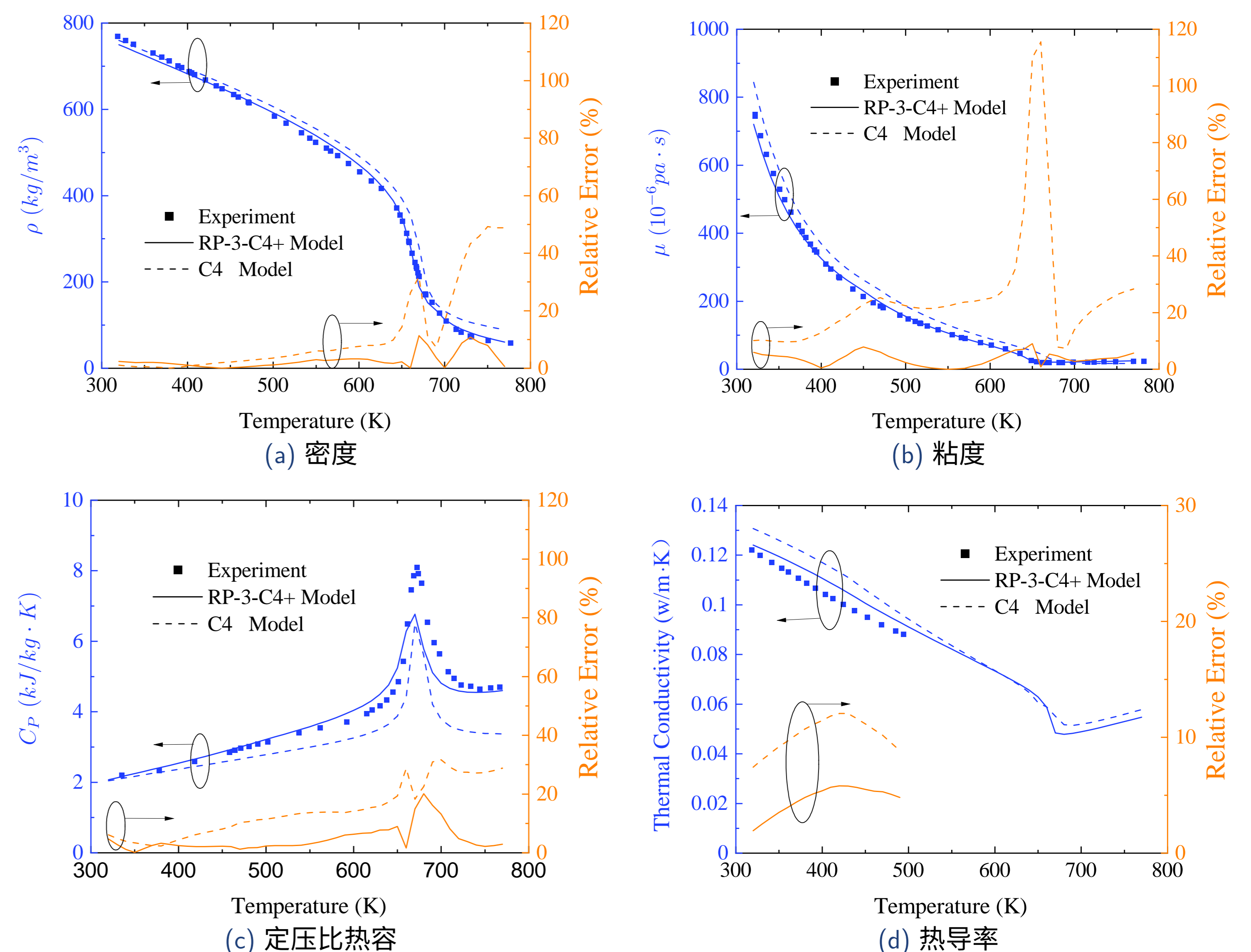


Figure 2: 3 Mpa 下 RP-3-C4+ 模型与 C4 模型对于不同物性计算值与实验值对比

相对误差

Table 2: 各温度、压力下对于不同物性 RP-3-C4+ 模型和 C4 模型计算值与实验值平均与最大相对误差之比

替代模型 物性	2.33Mpa		3Mpa		4Mpa		5Mpa	
	Ave Err (%)	Max Err (%)	Ave Err (%)	Max Err (%)	Ave Err (%)	Max Err (%)	Ave Err (%)	Max Err (%)
C4	7.87	140.10	11.43	49.22	17.56	108.06	10.73	99.25
RP-3-C4+	3.35	21.34	3.26	13.44	3.16	13.76	4.05	12.16
C4	23.29	122.6	25.44	115.54	23.74	56.66	21.35	45.90
RP-3-C4+	5.23	56.84	3.70	9.06	3.23	7.46	3.11	7.41
C4	14.38	31.86	14.00	27.96	15.06	28.40	14.86	28.89
RP-3-C4+	3.24	13.98	3.65	12.06	3.19	7.91	1.74	5.79
C4	8.94	11.75	9.94	12.06	10.05	12.65	10.65	13.34
RP-3-C4+	3.27	5.67	4.21	5.80	4.26	6.29	4.76	6.88