

基于有限元法的调模螺母热变形研究

黄书伟

(中化(福建)橡塑机械有限公司,福建三明365500)

摘要:本文主要研究硫化机调模螺母热变形规律。通过有限元对硫化机调模螺母进行热分析,应用响应面分析圆环热变形,得到圆环内约束模型的外径径向变形、外径轴向最大变形、外径最大总变形的热变形函数式,对比实验组、调模螺母数据与热变形函数式结果。结果表明:圆环热变形函数式不仅适用于圆环内约束模型,也适用于调模螺母梯形牙热变形计算,为工程中硫化机调模螺母的热变形提供简便高效的计算方法。

关键词:硫化机;调模螺母;热变形;有限元;圆环

中图分类号:TQ330.47

文献标识码:B

文章编号:1009-797X(2026)01-0008-08

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.01.002

圆环零件是机械行业中基本的一类零件,如轴套、轴瓦、轴承座、密封环、支撑环、导向环等,这类零件在使用过程中,往往不仅存在受力变形,也存在热变形,热变形在实际工程中早已引起众多学者、研究机构的重视和研究^[1~4];目前硫化机结构热分析主要集中在热板、模具、中心机构、蒸汽室^[5~9],硫化机调模机构是典型热力耦合问题,调模机构主要通过法兰螺柱、调模螺母、上固定板之间的梯形牙进行行程传递,在设计梯形牙时需要关注装配公差,过小的间隙可能导致调模机构整体受热膨胀后间隙过小而卡死,因此有必要研究梯形牙受热变形规律,为合理公差设计提供依据。本文通过有限元研究调模螺母梯形牙热变形规律,应用响应面分析圆环外径热变形规律,总结出圆环外径径向变形、外径轴向最大变形、外径最大总变形关于直径比 d/D 的热变形函数式,研究结果建立的热变形函数式,避免了复杂的有限元建模与计算过程,为工程中硫化机调模螺母的热变形预测提供了一种简便、高效的计算方法,可直接用于相关结构的设计优化与性能评估,具有较强的工程实用价值。

1 调模螺母热变形分析

1.1 有限元模型

图1调模螺母有限元模型,内梯形牙简化为圆柱,外梯形牙为Tr482×24(大径482 mm,小径469 mm),对内径施加无摩擦约束,整体施加温度载荷200 °C,为避免欠约束对整体施加弱弹簧约束。表1调模螺母有限元模型参数,表中壁厚 $B=(D-d)/2$,温度变化值

$$\Delta T=T_f-T_{0\circ}$$

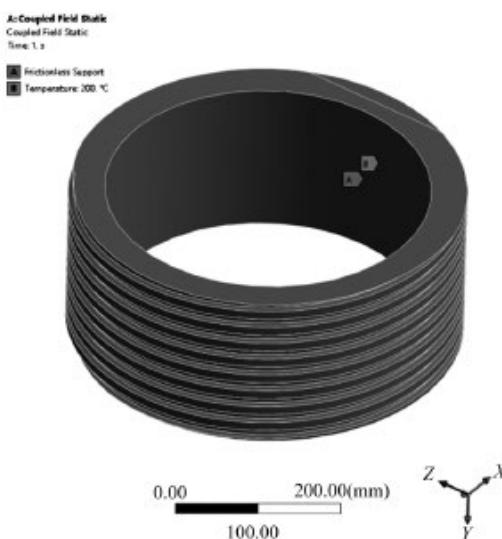


图1 调模螺母有限元模型

表1 调模螺母有限元模型参数

项目	代号	数值
调模螺母内径/mm	d	395
调模螺母外径/mm	D	482
调模螺母高度/mm	H	200
调模螺母壁厚/mm	B	43.5
初始温度/°C	T_0	22
实际温度/°C	T_f	200
温度变化值/°C	ΔT	178
弹性模量/MPa	E	110 000
泊松比	μ	0.34
热膨胀系数/°C ⁻¹	α	18×10^{-6}

作者简介:黄书伟(1990-),男,机械工程师,工学硕士学位,主要从事橡塑机械设计研发仿真工作。

采用直接耦合对调模螺母进行热变形分析，通过建立圆柱坐标系，得到调模螺母轴向变形、径向变形、总变形位移云图。

1.2 有限元结果

图 2 调模螺母径向 / 轴向 / 总变形云图，可以得

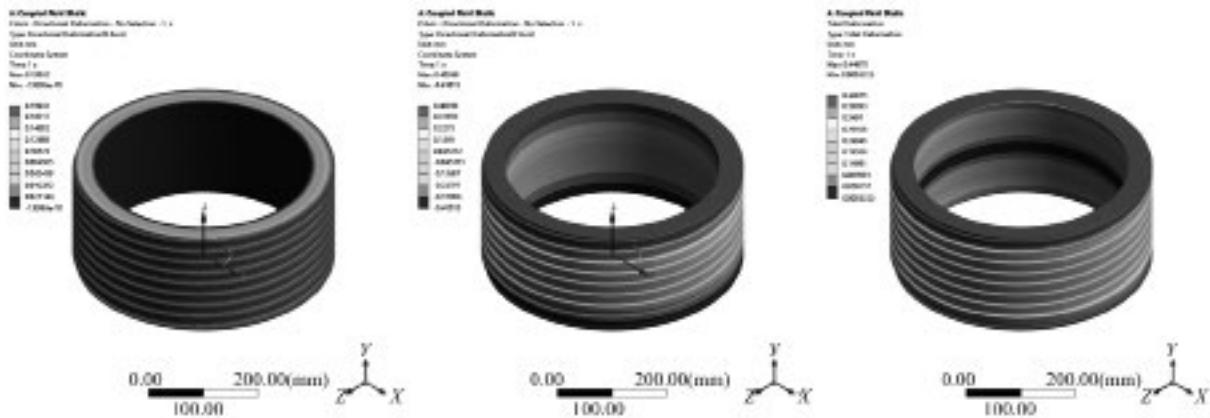


图 2 调模螺母径向 / 轴向 / 总变形云图

1.3 理论计算

根据热力学，有线性热膨胀公式^[10]：

$$\Delta L = L\alpha\Delta T \quad (1)$$

式中 ΔL 为长度变化， L 为物体在初始温度下的原长， α 为线膨胀系数， ΔL 为温度变化值。

理论圆环壁厚变形^[11]：

$$\Delta B = B\alpha\Delta T \quad (2)$$

理论圆环外径径向变形^[12~13]：

$$\Delta R = 0.5D\alpha\Delta T \quad (3)$$

2 圆环热变形分析

为了总结内约束圆环外径热变形规律，对圆环进行有限元分析，运用参数化和响应面工具进行实验，得出圆环内约束外径径向变形、轴向最大变形、最大总变形函数式，从而更方便地得到圆环类零件变形数值。

2.1 有限元模型

图 3 圆环有限元模型，对内径施加无摩擦约束，整体施加温度载荷 500 °C，为避免欠约束对整体施加弱弹簧约束，采用直接耦合对圆环热变形分析，得到圆环轴向变形、径向变形、总变形位移云图，表 2 圆环有限元模型参数。

图 4 圆环有限元分析项目流，将圆环内径、圆环

到调模螺母外径径向变形 0.190 32 mm，外径轴向最大变形 0.409 68 mm，外径最大总变形 0.448 75 mm；从外径变形可以看出，调模螺母外径整体呈“马鞍型”，即中间截面变形小，两端截面逐步增大。

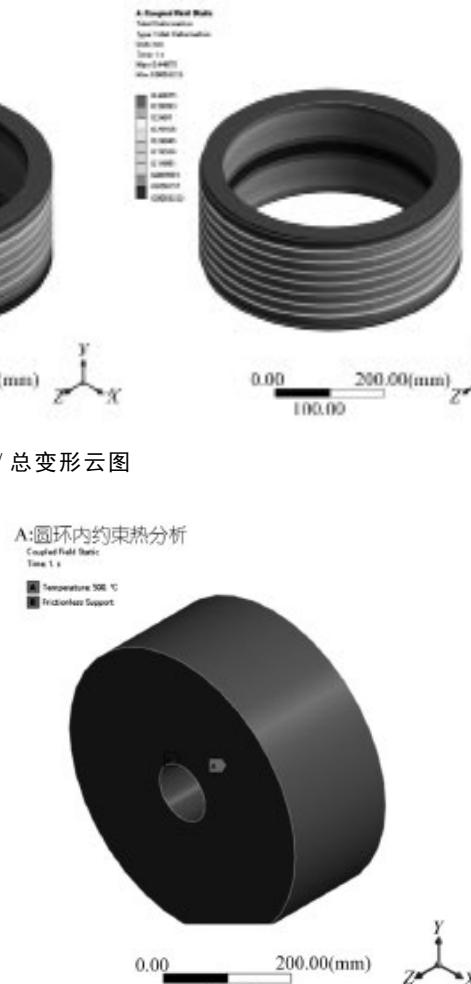


图 3 圆环有限元模型

表 2 圆环有限元模型参数

项目	代号	数值
圆环内径 /mm	d	100
圆环外径 /mm	D	500
圆环高度 /mm	H	200
圆环壁厚 /mm	B	200
初始温度 /°C	T_0	22
实际温度 /°C	T_f	500
温度变化值 /°C	ΔT	478
弹性模量 /MPa	E	200 000
泊松比	μ	0.3
热膨胀系数 /°C ⁻¹	α	12×10^{-6}

外径、圆环外径径向变形、圆环外径轴向最大变形、圆环外径最大总变形进行参数化和响应面分析，从而

得到约束状态下圆环外径径向变形、外径轴向最大变形、外径最大总变形。

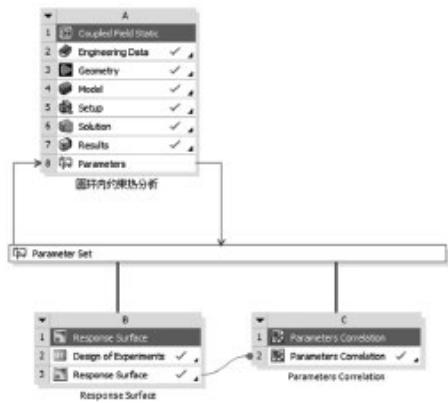


图 4 圆环有限元分析项目流

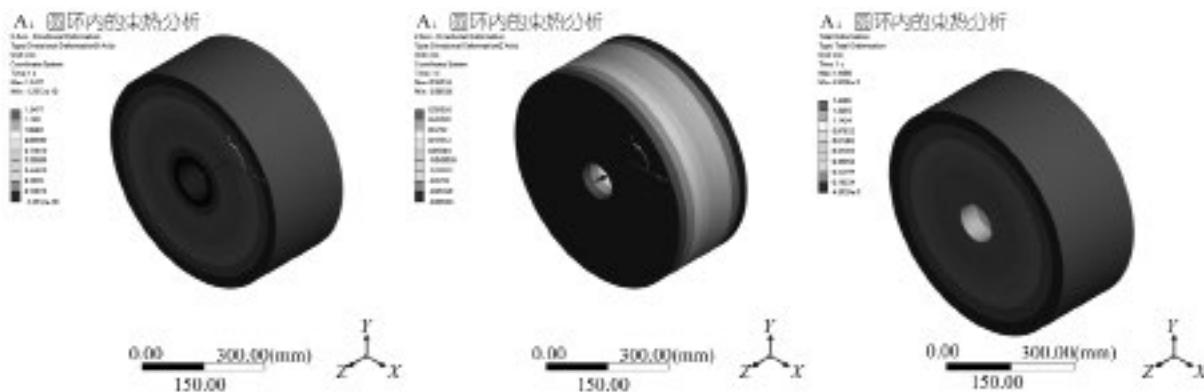


图 5 圆环径向 / 轴向 / 总变形云图

Table of Outline A2: Design Points of Design of Experiments							
	A	B	C	D	E	F	G
i	Name	Update Order	P1 - 外径 d (mm)	P2 - 外径 D (mm)	P3 - 圆环外径径向变形 UR (mm)	P4 - 圆环外径轴向最大变形 U_max (mm)	P5 - 圆环外径最大总变形 U_max (mm)
2	DP_15	5	300	900	1.3477	0.58936	1.4688
3	2	2	20	900	1.4309	0.57472	1.5418
4	3	9	300	900	1.1568	0.60803	1.3246
5	4	4	300	200	0.12965	0.62364	0.73724
6	5	6	200	800	2.2398	0.57911	2.3131
7	6	1	20	200	0.38513	0.57689	0.80711
8	7	7	300	200	0.076628	0.72295	0.72693
9	8	3	20	800	2.2924	0.5746	2.3631
10	9	9	300	800	2.1205	0.58703	2.2001

图 6 圆环热变形设计实验

最大变形 U_{\max} ，其值基本接近 1，说明量化响应面模型对实验设计采样点的拟合精度非常高，模型几乎能 100% 解释数据变异，可直接用于优化或可靠性分析。均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）用于衡量模型整体预测精度，值越小表示拟合越好，图中参数数值基本趋于 0，说明该模型的整体预测精度高。最大相对残差（Maximum Relative Residual, MRR）

反映模型在最差情况下的局部偏差，用于识别异常点或模型失效区域，图中参数数值基本趋于 0，说明该模型的局部偏差小。因此，使用设计实验中心复合方法得到的 9 组数据具有代表性，其模型得到的响应面具有整体和局部很好的精度。

2.2 响应面分析

对圆环进行响应面分析，参数化数据包含内径 d 、外径 D 、圆环外径径向变形 UR 、圆环外径轴向最大变形 U_{\max} 、圆环外径最大总变形 U_{\max} ，图 6 圆环热变形设计实验，采用中心复合的方法，获取 9 组实验数据。

对设计实验数据进行响应面分析，观察响应面的质量，图 7 响应面拟合优度水平，可以看出决定系数 R^2 (Coefficient of Determination) 相对于圆环外径径向变形 UR 、圆环外径轴向最大变形 U_{\max} 、圆环外径

反映模型在最差情况下的局部偏差，用于识别异常点或模型失效区域，图中参数数值基本趋于 0，说明该模型的局部偏差小。因此，使用设计实验中心复合方法得到的 9 组数据具有代表性，其模型得到的响应面具有整体和局部很好的精度。

2.3 计算外径径向变形

对图 6 中 9 组设计实验数据进行整理，将数据代

Table of Schematic B3: Response Surface				
	A	B	C	D
1		P3 - 圆环外径径向变形UR	P4 - 圆环外径轴向最大变形Uzmax	P5 - 圆环外径最大变形Umax
2	= Coefficient of Determination (Best Value = 1)			
3	Learning Points	★★★ 1	★★★ 1	★★★ 0.99972
4	Cross-Validation on Learning Points	★★★ 0.99998	★★★ 1	★★★ 0.99793
5	= Maximum Relative Residual (Best Value = 0%)			
6	Learning Points	★★★ 0.93266	★★★ 0	★ 3.2841
7	Cross-Validation on Learning Points	★ 4.2905	★ 1.5000E-05	- 9.1572
8	= Root Mean Square Error (Best Value = 0)			
9	Learning Points	0.0013692	1.5257E-08	0.010497
10	Cross-Validation on Learning Points	0.0035321	5.4789E-08	0.028712

图 7 响应面拟合优度水平

入式(2)、(3)得到以上9组实验的理论圆环壁厚变形 ΔB 和理论圆环外径变形 ΔR , 鉴于圆环外径径向变形不仅受直径的影响, 同时也受圆环壁厚的影响, 实际圆环热变形是考虑多方面因素综合而成^[14], 因此此

处定义形状系数 $K=(UR-\Delta B)/(\Delta R-\Delta B)$, 表3圆环外径径向变形表。

对表3的9组数据分析, 直径比 d/D 与形状系数 K 有一定相关性, 做直径比 d/D 与形状系数 K 的

表3 圆环外径径向变形表

内径 <i>d</i>	外径 <i>D</i>	直径比 <i>d/D</i>	圆环外径径向变形 <i>UR</i>	理论圆环外径变形 <i>ΔR</i>	理论圆环壁厚变形 <i>ΔB</i>	形状系数 <i>K</i>	
						方程	绘图
1 100	500	0.200	1.348	1.434	1.147	$y = \text{Intercept} + B1*x^1 + B2*x^2$	不加权
2 20	500	0.040	1.431	1.434	1.377		1.0089
3 180	500	0.360	1.167	1.434	0.918		-1.7109
4 100	200	0.500	0.379	0.574	0.287		0.6979
5 100	800	0.125	2.240	2.294	2.008		0.809
6 20	200	0.100	0.565	0.574	0.516		0.847
7 180	200	0.900	0.076	0.574	0.057		0.036
8 20	800	0.025	2.292	2.294	2.237		0.962
9 180	800	0.225	2.120	2.294	1.778		0.663

拟合关系, 图8直径比与形状系数拟合关系, 得到 $K=0.6979(d/D)^2-1.7109(d/D)+1.0089$, 决定系数 $R^2=0.9998$ 非常接近1, 说明拟合曲线精度高; 假设计算外径径向变形为 X , 则

$$X=[0.6979(d/D)^2-1.7109(d/D)+1.0089](\Delta R-\Delta B)+\Delta B$$

2.4 计算外径轴向最大变形

对图6中9组设计实验数据进行整理, 表4圆环外径轴向最大变形表。

对直径比 d/D 与圆环外径轴向最大变形 U_{zmax} 进行拟合, 图9直径比与圆环外径轴向最大变形拟合关系, 得到 $U_{zmax}=0.1333(d/D)^2+0.0491(d/D)+0.5715$, 决定系数 $R^2=0.9987$ 非常接近1, 说明拟合曲线精度高, 假设计算外径轴向最大变形 Z , 则 $Z=0.1333(d/D)^2+0.0491(d/D)+0.5715$ 。

2.5 计算外径最大总变形

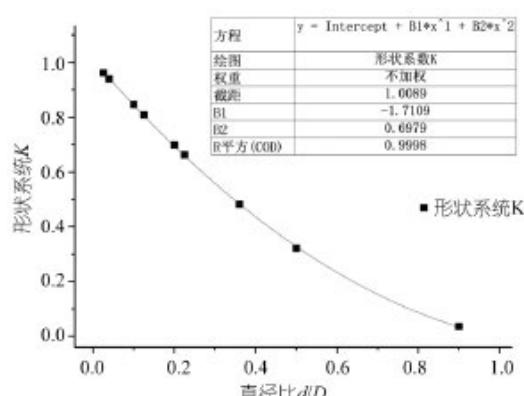


图8 直径比与形状系数拟合关系

由于外径的径向变形和轴向变形是属于不同维度的, 而周向变形极小, 假设计算外径最大总变形为 Y , 则定义 $Y=\sqrt{X^2+Z^2}$ 。

3 数据验证

表 4 圆环外径轴向最大变形表

	内径 <i>d</i>	外径 <i>D</i>	直径比 <i>d/D</i>	圆环外径轴向最大变形 <i>U_{zmax}</i>
1	100	500	0.200	0.585
2	20	500	0.040	0.575
3	180	500	0.360	0.606
4	100	200	0.500	0.633
5	100	800	0.125	0.579
6	20	200	0.100	0.577
7	180	200	0.900	0.723
8	20	800	0.025	0.575
9	180	800	0.225	0.587

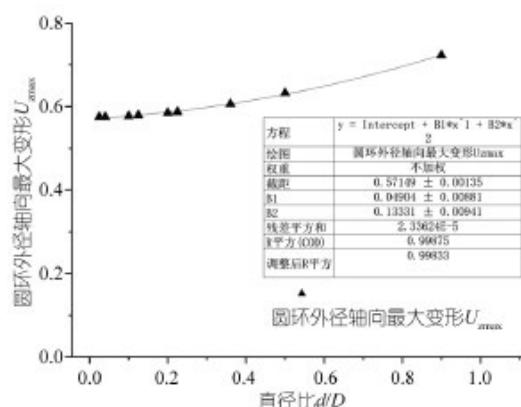


图 9 直径比与圆环外径轴向最大变形拟合关系

表 5 圆环实验组外径径向变形误差表

内径 <i>d</i>	外径 <i>D</i>	直径比 <i>d/D</i>	圆环外径径向变形 <i>UR</i>	理论圆环外径径向变形 <i>ΔR</i>	理论圆环壁厚变形 <i>ΔB</i>	形状系数 <i>K</i>	计算外径径向变形 <i>X</i>	误差 <i>E₁</i> /% (<i>X</i> - <i>UR</i>)/ <i>UR</i>
1	1	100	0.01	0.178 0	0.178	0.176	0.99	0.178 -0.002
2	4	100	0.04	0.177 6	0.178	0.171	0.947	0.178 -0.023
3	15	100	0.15	0.172 0	0.178	0.151	0.775	0.172 -0.111
4	35	100	0.35	0.146 8	0.178	0.116	0.500	0.147 -0.174
5	55	100	0.55	0.107 8	0.178	0.080	0.283	0.107 -0.321
6	70	100	0.70	0.072 5	0.178	0.053	0.153	0.072 -0.030
7	90	100	0.90	0.023 8	0.178	0.018	0.037	0.023 -1.878
8	95	100	0.95	0.019 1	0.178	0.009	0.060	0.011 -41.511
9	97	100	0.97	0.013 9	0.178	0.005	0.049	0.006 -54.105
10	12	1 200	0.01	2.135 8	2.136	2.115	0.99	2.136 0.003
11	300	1 200	0.25	1.937 3	2.136	1.602	0.628	1.936 -0.086
12	400	1 200	0.33	1.791 5	2.136	1.424	0.516	1.791 0.001
13	500	1 200	0.42	1.614 3	2.136	1.246	0.414	1.617 0.188
14	600	1 200	0.50	1.411 9	2.136	1.068	0.322	1.418 0.446
15	700	1 200	0.58	1.191 0	2.136	0.890	0.242	1.199 0.713
16	950	1 200	0.79	0.596 1	2.136	0.445	0.089	0.600 0.700
17	1 140	1 200	0.95	0.140 2	2.136	0.107	0.016	0.134 -4.410
18	1 164	1 200	0.97	0.083 8	2.136	0.064	0.010	0.076 -8.751

误差小。

表 7 圆环实验组外径最大总变形误差表，可以看出计算外径最大总变形相对于圆环最大总变形误差小。

3.1 调模螺母有限元结果

图 10 调模螺母梯形牙路径径向 / 轴向 / 总变形云图，可以看出随着梯形牙齿形厚度的减小轴向变形减小，径向变形与路径近似线性关系。表 8 调模螺母外

根据圆环热变形分析，可以得到内约束圆环计算外径径向变形 *X*、计算外径轴向最大变形 *Z*、计算外径最大总变形 *Y* 关于直径比 *d/D* 的热变形函数式。

3.1 圆环实验组数据

为了验证热变形函数式的普遍性，验证函数关系是否适用于不同加热温度、不同线膨胀系数、不同圆环大小，设计有限元实验组进行验证；更改加热温度 *T_f*=200 °C，线膨胀系数 $\alpha=20 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ，选择外径 *D*=100 mm、1 200 mm 的 18 组数据进行验证；将 *d/D* 代入计算外径径向变形 $X=[0.697 9(d/D)^2-1.710 9(d/D)+1.008 9](\Delta R-\Delta B)+\Delta B$ 、计算外径轴向最大变形 $Z=(0.133 3(d/D)^2+0.049 1(d/D)+0.571 5)/(5 736 \times 10^{-6}) \times \alpha \times \Delta T$ 、计算外径最大总变形为 $Y=\sqrt{X^2+Z^2}$ ，得到 *X*、*Y*、*Z* 值；将数据代入式 (2)、(3) 得到 ΔB 和 ΔR 。

表 5 圆环实验组外径径向变形误差表，可以看出计算外径径向变形相对于圆环外径径向变形误差小，仅对 *d/D* > 0.95 时候，误差较大。

表 6 圆环实验组外径轴向最大变形误差表，可以看出计算外径轴向最大变形相对于圆环外径轴向变形

径变形误差表，其中表 8 中第 1 组数据为图 2 数据，表 8 中第 2~12 组数据为图 10 数据，可以看出用热变形函数式计算调模螺母的外径径向变形、外径轴向最大变形、外径最大总变形与有限元计算结果误差小，避免了复杂的有限元建模，适用于工程快速计算。

4 结论

表 6 圆环实验组外径轴向最大变形误差表

	内径	外径	直径比	圆环外径轴向最大变形	计算外径轴向最大变形	误差 $E_2/\%$
	d	D	d/D	U_{zmax}	Z	$(Z-U_{zmax})/U_{zmax}$
1	1	100	0.01	0.356	0.355	-0.33
2	4	100	0.04	0.357	0.356	-0.14
3	15	100	0.15	0.360	0.361	0.33
4	35	100	0.35	0.375	0.375	0.02
5	55	100	0.55	0.400	0.396	-0.88
6	70	100	0.70	0.420	0.417	-0.82
7	90	100	0.90	0.449	0.449	0.08
8	95	100	0.95	0.461	0.458	-0.58
9	97	100	0.97	0.475	0.462	-2.66
10	12	1 200	0.01	0.356	0.355	-0.34
11	300	1 200	0.25	0.366	0.367	0.39
12	400	1 200	0.33	0.373	0.374	0.21
13	500	1 200	0.42	0.382	0.382	-0.10
14	600	1 200	0.50	0.392	0.391	-0.41
15	700	1 200	0.58	0.403	0.401	-0.66
16	950	1 200	0.79	0.433	0.431	-0.54
17	1 140	1 200	0.95	0.456	0.458	0.55
18	1 164	1 200	0.97	0.459	0.462	0.76

表 7 圆环实验组外径最大总变形误差表

	内径	外径	直径比	圆环外径最大总变形	计算外径最大总变形	误差 $E_3/\%$
	d	D	d/D	U_{max}	Y	$(Y-U_{max})/U_{max}$
1	1	100	0.01	0.398	0.397	-0.22
2	4	100	0.04	0.398	0.398	-0.06
3	15	100	0.15	0.399	0.400	0.30
4	35	100	0.35	0.403	0.403	0.06
5	55	100	0.55	0.414	0.411	-0.72
6	70	100	0.70	0.426	0.423	-0.78
7	90	100	0.90	0.449	0.450	0.08
8	95	100	0.95	0.461	0.458	-0.55
9	97	100	0.97	0.475	0.462	-2.67
10	12	1 200	0.01	2.165	2.165	0.00
11	300	1 200	0.25	1.972	1.970	-0.07
12	400	1 200	0.33	1.830	1.830	0.01
13	500	1 200	0.42	1.659	1.662	0.17
14	600	1 200	0.50	1.465	1.471	0.38
15	700	1 200	0.58	1.257	1.265	0.57
16	950	1 200	0.79	0.737	0.739	0.27
17	1 140	1 200	0.95	0.477	0.477	0.13
18	1 164	1 200	0.97	0.466	0.468	0.47

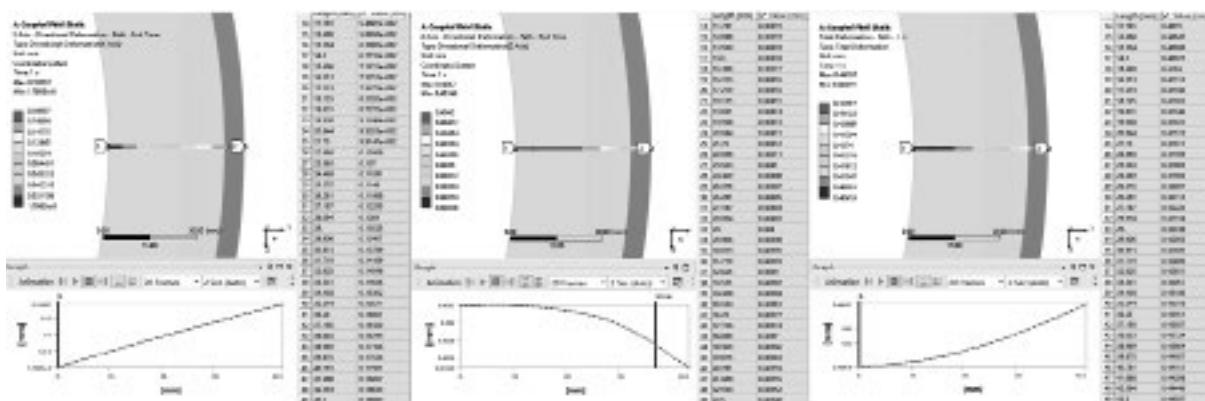


图 10 调模螺母梯形牙路径径向 / 轴向 / 总变形云图

表 8 调模螺母外径变形误差表

内径	外径	直径比	圆环外径 径向变形	计算外径 径向变形	误差 $E_4/\%$	圆环外径轴 向最大变形	计算外径轴 向最大变形	误差 $E_5/\%$	圆环外径最 大总变形	计算外径最 大总变形	误差 $E_6/\%$
d	D	d/D	UR	X	$(X-UR)/UR$	U_{zmax}	Z	$(Z-U_{zmax})/U_{zmax}$	U_{max}	Y	$(Y-U_{max})/U_{max}$
1	395	482	0.820	0.190	0.187	-1.662	0.410	0.392	-4.39	0.449	0.434
2	395	463.876	0.852	0.156	0.153	-2.155	0.404	0.397	-1.80	0.432	0.425
3	395	465.688	0.848	0.160	0.157	-2.098	0.404	0.396	-1.92	0.433	0.426
4	395	467.5	0.845	0.164	0.161	-2.038	0.404	0.396	-2.03	0.435	0.427
5	395	469.312	0.842	0.168	0.164	-1.987	0.404	0.395	-2.15	0.436	0.428
6	395	471.126	0.838	0.171	0.168	-1.939	0.404	0.395	-2.26	0.437	0.429
7	395	472.938	0.835	0.175	0.172	-1.892	0.404	0.394	-2.37	0.439	0.430
8	395	474.75	0.832	0.179	0.175	-1.847	0.404	0.394	-2.49	0.440	0.431
9	395	476.562	0.829	0.182	0.179	-1.805	0.404	0.393	-2.60	0.442	0.432
10	395	478.376	0.826	0.186	0.183	-1.769	0.404	0.393	-2.70	0.443	0.433
11	395	480.188	0.823	0.190	0.186	-1.730	0.404	0.392	-2.81	0.444	0.434
12	395	482	0.820	0.190	0.190	0.190	0.403	0.392	-2.92	0.446	0.435

本文对调模螺母梯形牙进行有限元分析, 得到梯形牙热变形规律, 为硫化机调模螺母热变形分析提供借鉴意义。通过对圆环有限元模型的设计实验和响应面分析, 得到内约束圆环热变形轴向、径向、最大总变形关于直径比 d/D 的热变形函数式, 圆环计算外径径向变形 $X=[0.697\ 9(d/D)^2-1.710\ 9(d/D)+1.008\ 9](\Delta R-\Delta B)+\Delta B$, 圆环计算外径轴向最大变形 $Z=(0.133\ 3(d/D)^2+0.049\ 1(d/D)+0.571\ 5)/(5\ 736\times 10^{-6})\times \alpha \times \Delta T$, 圆环计算外径最大总变形 $Y=\sqrt{X^2+Z^2}$, 以上关系式可以应用于不同变化温度、膨胀系数, 当 $100 < d < 1\ 200$, $0.05 < d/D < 0.95$ 时候, 得到数值相对于有限元计算结果误差小于 5%。研究结果建立的热变形函数式, 避免了复杂的有限元建模与计算过程, 为工程中硫化机调模螺母的热变形预测提供了一种简便、高效的计算方法, 为轮胎硫化机调模螺母梯形牙热变形的分析以及公差设计提供了非常实用的意义, 可直接用于相关结构的性能评估与设计优化, 具有较强的工程实用价值。

参考文献 :

- [1] 胡鹏浩. 非均匀温度场中机械零部件热变形的理论及应用研究 [D]. 合肥工业大学, 2001.
- [2] Erick Matezo-Ngoma, Abderrazak El Ouafi, Ahmed Chebak. Numerical Investigation of Thermal Behavior of

CNC Machine Tool and Its Effects on Dimensional Accuracy of Machined Parts[J]. Journal of Software Engineering and Applications, 2024, 617–637.

- [3] 梁允奇, 机械制造中的传热与热变形基础 [M], 机械工业出版社, 1982
- [4] Liu, Z, Chen, W, Li, D, et al. Theoretical Analysis and Experimental Study on Thermal Stability of High-Speed Motorized Spindle[J]. Industrial Lubrication and Tribology, (2017) 69 (6):1 049–1 065.
- [5] 张正罗, 功达, 于晓东, 等. 轮胎硫化机电磁热板磁场分布仿真分析 [J]. 橡塑技术与装备, 2020, 46(11):45–50.
- [6] 孙艳梅. 基于电磁感应生热的轮胎直压硫化内模具温度控制研究 [D]. 北京化工大学, 2023.
- [7] 樊若男. 轮胎硫化机内外模电磁加热装置研究 [D]. 山东大学, 2023.
- [8] Hynek M, Votapek P. Thermal analysis of tyre curing process[J]. Engineering mechanics, 2011:223–226.
- [9] Jirasko J, Kottner R. Computational model for heat transfer in a tyre curing press[J]. Engineering mechanics, 2016.
- [10] Zheng Wei-Tao, Ding Tao, Zhong Feng-Lan, Zhang Jian-Min, Zhang Rui-Lin. A Study on Calculation of the Linear Thermal Expansion Coefficients of Metals[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1994, 8(4):302–305.
- [11] 罗柱, 龙婧. 基于 OpenCV 图像识别技术的金属环热胀冷缩实验研究 [J]. 物理通报, 2024,(03):107–110.
- [12] 罗哉, 费业泰, 苗恩铭. 稳态温度场中孔形零件受热变形研究 [J]. 材料热处理学报, 2004,(02):24–27.
- [13] 金少搏, 赵凤霞, 李纪峰. 典型零件形体的热变形模型及其有限元仿真 [J]. 机械设计与制造, 2018,(07):9–12.
- [14] 马泳涛, 陈五一. 基于有限元法的圆筒零件热变形研究 [J]. 矿山机械, 2006,(07):35–36.

Research on thermal deformation of die-adjusting nuts based on finite element method

Huang Shuwei

(Sinochem (Fujian) Rubber & Plastic Machinery Co. LTD., Sanming 365599, Fujian, China)

Abstract: This paper investigates the thermal deformation patterns of the die-adjusting nut of the curing press. By utilizing the finite element method, a thermal analysis is conducted on the die-adjusting nut of the curing press, and the thermal deformation of the circular ring is analyzed using response surface methodology. Subsequently, thermal deformation function formulas for the outer diameter radial deformation, outer diameter axial maximum deformation, and outer diameter total maximum deformation of the circular ring internal constraint model are derived. Meanwhile, experimental group data, die-adjusting nut data, and the calculation results of the thermal deformation function formulas are compared. The results show that the circular ring thermal deformation function formula is not only applicable to the circular ring internal constraint model but also to the calculation of thermal deformation of the trapezoidal tooth of the die-adjusting nut, providing a simple and efficient method for calculating the thermal deformation of the die-adjusting nut of the curing press in engineering.

Key words: curing press; die-adjusting nut; thermal deformation; finite element;ring

(R-03)

oo

年销 466 亿，中国轮胎之都如何为大而不强？

Annual sales of 46.6 billion yuan: why is china's tyre capital big but not strong?

日前，东营市贸促会对广饶轮胎产业做了详细、深入报道——东营市广饶县，一个常住人口不足 60 万的县城，正上演着中国制造业转型升级的经典样本。

从家庭作坊到全球之都

2024 年，广饶橡胶轮胎产业交出亮眼成绩单：实现工业总产值 466.7 亿元，同比增长 13.1%；出口额突破 259.5 亿元，8 家本土企业跻身全球轮胎 75 强。这组硬核数据的背后，是一条完整的县域产业集群突围路径。

以轮胎生产为核心，广饶已构建起覆盖合成橡胶、橡胶助剂、骨架材料、炭黑、模具等完整产业链的生态网络。这种“家门口”的配套模式，不仅降低了 15%~20% 的物流成本，更让企业摆脱了供应链波动的焦虑。

2025 年，广饶谋划实施总投资 93.1 亿元的 14 个橡胶轮胎产业重点项目，全部建成后子午胎总产能将突破 2.4 亿条，预计占全省 1/2、全国 1/4。

智能化改造在广饶已超越简单的“机器换人”阶段。按照《制造业智能化改造和数字化转型三年行动实施方案》，到 2025 年，全县重点轮胎企业的设备数控化率将达 90%，70% 以上的主装备达到国际先进水平。

广饶的“软肋”

不过，与外资一线品牌和国内上市龙头企业相比，广饶轮胎仍存在一些结构性短板。

当下，广饶轮胎品牌形象仍以“性价比”、“制造能力强”为主，缺乏高端标签。绝大多数企业仍以代工和替换市场为主，直接面向终端消费者的品牌影响力弱，导致利润率偏低，抗风险能力较差。

广饶多数为未上市的民营企业，融资高度依赖银行信贷和地方金融创新产品，但难以支撑动辄数十亿的海外建厂、大型并购等战略性投资，限制了其全球化扩张的速度和模式。

同时，广饶产业技术研发更多集中于现有产品改进、工艺优化和成本降低。虽然与高校合作紧密，但在原创性、基础性研究方面投入不足，缺乏对“下一代轮胎”的定义能力。研发的体系化和全球化布局相对滞后。

在国际化方面，仍以“产品出口”为主，销售渠道多依赖当地进口商或批发商，对终端渠道和品牌掌控力弱。海外本土化运营、团队建设、合规管理等方面经验相对缺乏，面临更高的地缘政治和贸易壁垒风险。

综合而言，广饶的优势是无与伦比的产业集群效率和制造韧性，未来的挑战在于，如何培育出数家具备独立品牌、核心技术、全球运营能力和资本优势的企业。这不仅需要企业的远见与勇气，更需要地方政府以更长远的眼光和更创新的政策，提供系统性的战略支持。

摘编自“车辕车辙”