橡胶密封模具设计参数的研究

武建军[1,2]，王　欢[1,2]，向　宇[1,2*]，邱召佩[1,2]

（1. 广州机械科学研究院有限公司，广东 广州　510535；2. 国家橡塑密封工程技术中心，广东 广州　510535）

摘要：以Y形密封圈为例，研究橡胶密封模具设计参数。模具壁厚主要取决于模具材料的屈服强度、橡胶密封制品胶料的硬度和流动性。模具热膨胀主要影响橡胶制品的直径，不会对模具型腔配合面造成不良影响，对模具断面尺寸的影响可以忽略不计。锁模力对橡胶制品尺寸的影响非常小，可以忽略不计。模具型腔内部压力主要影响橡胶制品的断面尺寸，严重时模具型腔配合面会产生缝隙。设计橡胶密封模具型腔尺寸时需重点考虑橡胶制品胶料的硬度、流动性、线膨胀系数和硫化温度以及模具材料的屈服强度和线膨胀系数。

关键词：橡胶密封制品；模具；设计参数；线膨胀系数；位移云图

中图分类号：TQ336.4^{+}2；TQ330.4^{+}1/$^{+}$6　　**文章编号**：2095-5448(2019)01-0045-05

文献标志码：A　　**DOI**：10.12137/j.issn.2095-5448.2019.01.0045

橡胶密封模具是指利用特定形状的型腔成型具有一定形状和尺寸精度的橡胶密封制品的工具。具有一定可塑性的胶料经预制成简单的形状后填入模具型腔，经加压、加热硫化后，即可获得所需形状的橡胶密封制品[1]。

根据结构划分，压制成型模具主要有3种：(1)开放式，适用于形状简单、胶料硬度较低并具有较好流动性的橡胶密封制品；(2)封闭式，适用于夹布或其他夹织物的制品，以及胶料硬度较高、流动性差的橡胶制品；(3)半封闭式，适用于上下模带有型腔、同轴度要求较高的单腔模具制品，也适用于内夹织物的制品[2]。

制造业的成本控制和效率要求日益提高，因此模具的合理设计尤为重要。本工作以Y形橡胶密封圈为例，研究橡胶密封模具设计参数，为相关模具设计提供参考。

1　Y形橡胶密封圈模具的结构

Y形橡胶密封圈模具结构型式的设计已经有比较成熟的设计方法和经验，常见的两种结构如图1和2所示。

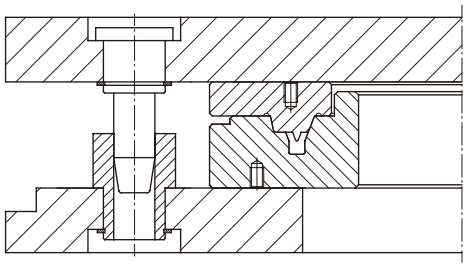


图1　Y形密封圈模具结构及装配示例1

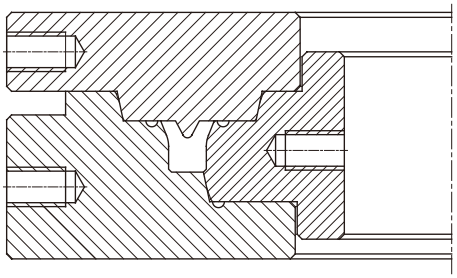


图2　Y形密封圈模具结构及装配示例2

两种结构均采用平面和锥面配合相结合的分型面，有利于型腔中气体排出，保证制品顺利脱模；每片模具之间采用圆柱面粗定位和圆锥面精定位的方式，模具组装采用螺钉和导柱导套定位，可防止模具碰伤，并能保证制品的同轴度[3-4]。经实践检验，这两种模具结构均具有较好的工艺可行性。

在确定模具结构形式的前提下，与制品尺寸密切相关的重要因素就是模具设计参数，其中的两个重要设计参数为模具壁厚和模具型腔尺寸。

基金项目：广州市珠江科技新星专项(201610010161)

作者简介：武建军(1980—)，男，河南新安人，广州机械科学研究院有限公司工程师，学士，主要从事橡塑密封件开发工作。

*通信联系人(xiangyu@gmeri.com)

2 模具壁厚的计算

模具壁厚可根据制品直径、模具材料性能等参数进行计算，计算公式如下：

$$t = r\times(\sqrt{\frac{\sigma}{\sigma-2q}}-1)$$

式中，t为模具壁厚，mm；r为型腔半径，mm；q为型腔压力（与胶料硬度及流动性有关，一般为25～35 MPa）；σ为模具材料的许用应力，$\sigma=\sigma_s/n$（σ_s为模具材料的屈服强度，MPa；n为安全系数，一般取1.8～2）。

计算示例：模具型腔半径为300 mm，模具材料的屈服强度极限为800 MPa，安全系数为2，当型腔压力为35 MPa时，模具的安全壁厚为30.3 mm。

3 模具型腔尺寸的确定

模具型腔尺寸决定了制品在常温下的尺寸。与确定模具型腔尺寸相关的参数有模具材料的线膨胀系数、橡胶材料的线膨胀系数和收缩率、锁模力和型腔压力对模具变形量的影响等，这些参数对橡胶密封制品成品尺寸有不同程度的影响。

3.1 温度对模具型腔尺寸的影响

橡胶材料的线膨胀系数范围较大，相比模具材料线膨胀系数对橡胶密封制品成品尺寸的影响较大。线膨胀系数可通过专用线膨胀系数测量仪测定。

橡胶材料的线膨胀系数一般为(100～150)×10^{-5} ℃$^{-1}$，碳钢的线膨胀系数(20～200 ℃)为(11.3～13)×10^{-6} ℃$^{-1}$。在不考虑模具弹性变形量的情况下，橡胶制品的实际收缩率(e)可以通过橡胶材料和模具材料的线膨胀系数以及橡胶制品的硫化温度推导出来，计算公式如下：

$$e=\frac{D_c-D_s}{D_c}\times100\%=(a_N-a_c)(T_L-T_c)\times100\%$$

式中，D_c为橡胶密封制品的模具型腔尺寸，D_s为橡胶密封制品的成品尺寸，a_N为橡胶材料的线膨胀系数，a_c为模具材料的线膨胀系数，T_L为密封制品的硫化温度，T_c为室温。

为确保模具设计尺寸的准确性，选取3副不同尺寸的模具进行实际测量验证，测量和计算模具的实际线膨胀系数，并结合有限元软件分析进行对比和验证。

选用的3副模具（规格）为Y1-13031029（Y-185×200×9）、Y1-0704687（Y-530×560×18）和Y1-2000510（Y-1 110×1 140×18），分别记为模具A，B，C。试验条件：车间温度为20 ℃，模具温度为160 ℃。

模具温度由室温（20 ℃）升至160 ℃，模具型腔尺寸实际测量结果如表1所示。

表1 模具型腔尺寸实际测量结果

项 目	模具A	模具B	模具C
模具型腔直径(20 ℃)/mm	202.32	535.30	1 124.32
模具型腔直径(160 ℃)/mm	202.68	536.28	1 126.26
线膨胀系数×10^6/℃$^{-1}$	12.9	13.0	12.3

室温下模具状态如图3所示。加热至硫化所需温度160 ℃时，模具明显发生了热膨胀，因为热膨胀对高度方向影响不大，所以下文主要考虑模具在X轴方向的变形量，变形量为单边变形量。

图4为160 ℃时模具热膨胀X轴方向位移云图。

测量3个测量点的变形量作为判断的参考依据。3个测量点及其位移如图5所示。

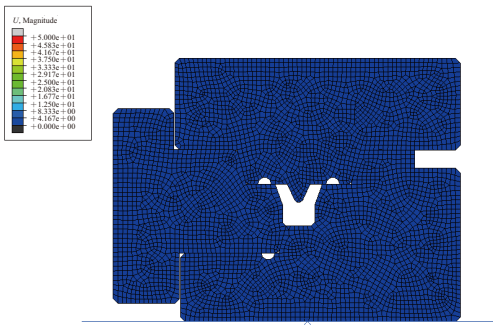


图3 室温下初始状态的模具形状

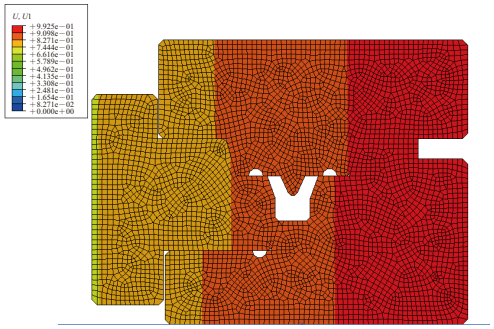
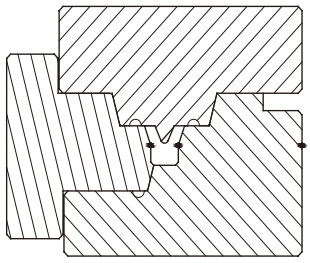


图4 160 ℃时模具热膨胀X轴方向位移云图



Part Instance	Node ID	Orig. Coords	Def. Coords	Elements	U, U1
ZM-1	42				0.854747
XM-1	31				0.894547
XM-1	388				0.992465

图5　160 ℃时模具热膨胀3个测量点在*X*轴方向的位移

模具型腔尺寸有限元分析结果如表2所示。

表2　模具型腔尺寸有限元分析结果

项　目	模具测量点		
	ZM-1(42)	XM-1(31)	XM-1(388)
模具型腔直径(20 ℃)/mm	1 124.32	1 152.70	1 280.00
变形量(160 ℃)/mm	0.855×2	0.895×2	0.992×2
线膨胀系数×10^6/℃$^{-1}$	10.9	11.1	11.1

对比表1和2可以看出，模具温度由室温升至160 ℃，模具线膨胀系数实际测量结果与有限元分析软件推算结果相差不大。

从以上数据和图4可以看出，160 ℃时3片模具的型腔接缝处配合良好，未产生缝隙。因此，对于硫化加热模具，同一副模具有必要采用同种材料，模具材料热膨胀系数一致才能保证加热后模具型腔结合面配合良好，否则室温下配合精度很高的模具可能会在加热后由于热膨胀系数不同导致模具型腔配合面产生不必要的间隙。

夹布制品尺寸通常会大于常温下的模具尺寸，原因是夹布的线膨胀系数小于模具钢材的线膨胀系数，这也是夹布类制品经常出现直径偏大的原因。对于尺寸要求精准的夹布制品，模具设计时需综合考虑模具材料和夹布材料的线膨胀系数。从常温(23 ℃)升至硫化温度(165 ℃)时，采用40Cr为材料的模具型腔尺寸会膨胀1.6‰～1.8‰，夹布制品直径比常温下模具型腔直径大0.5‰～0.7‰(夹布的线膨胀系数约为8×10^{-6} ℃$^{-1}$)。夹布制品模具尺寸可按照下式计算：

$$D_m=D_B\times[1-(\alpha_c-\alpha_B)\times\Delta T]$$

式中，D_m为夹布制品模具型腔直径，D_B为夹布制品成品外径，a_B为夹布的线膨胀系数，ΔT为温度变化值。在其他材料模压制品模具设计中也可以参考该公式。

3.2　锁模力对模具型腔尺寸的影响

图6为加载258 t锁模力的模具位移云图。

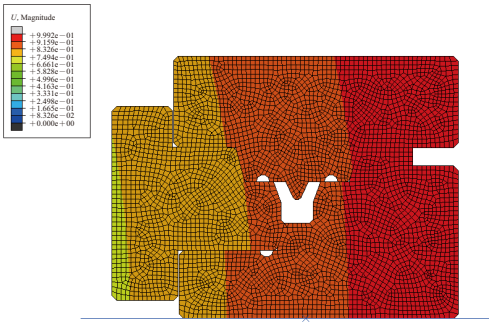


图6　加载258 t锁模力的模具位移云图

从图6可以看出，锁模力不会对模具型腔配合面产生明显的影响。

160 ℃加载258 t锁模力时模具3个测量点在*X*轴方向的位移如图7所示。

Part Instance	Node ID	Orig. Coords	Def. Coords	Elements	U, U1
ZM-1	42				0.852858
XM-1	31				0.891995
XM-1	388				0.990582

图7　160 ℃加载258 t锁模力时模具3个测量点在*X*轴方向的位移

对比图5和7可知，在升温至160 ℃的同时加载锁模力，模具3个测量点在*X*轴方向的位移略微减小，但影响较小，因此锁模力在模具设计时可以不作考虑。

3.3　型腔压力对模具型腔尺寸的影响

硫化橡胶制品时模具受压变形，橡胶材料受热交联反应时产生的热应力对模具造成弹性变形。一般中碳钢的弹性模量为2.1×10^5 MPa，而硫化时模具型腔所受的力为25～35 MPa，二者相差3～4个数量级。

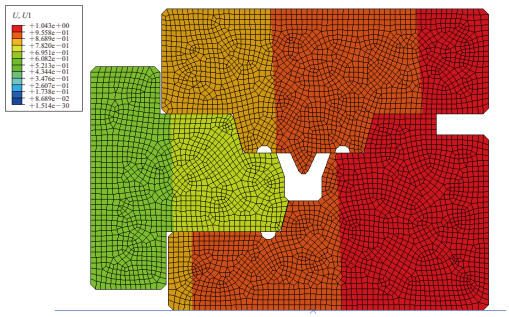
模具弹性变形可以按照下式计算：

$$\delta=F\times L/(M\times A)$$

式中，δ为弹性变形，F为外载荷，L为长度，M为模具材料的弹性模量，A为面积。以模具高度为25～85 mm计算，模具的弹性变形为4.2～14.2 μm。下面通过有限元分析模具受压时的变形量，分析在160 ℃下进行。

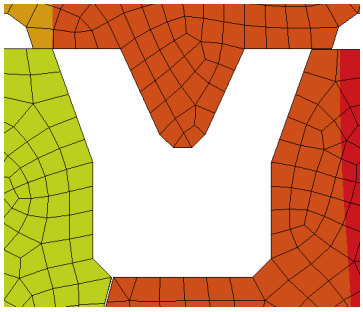
型腔压力为25 MPa时模具位移云图和测量点位移如图8所示，中模与下模之间的缝隙如图9所示。

由图9可知，在25 MPa型腔内部压力的作用



Part Instance	Node ID	Orig. Coords	Def. Coords	Elements	U, U1
ZM-1	42				0.761641
XM-1	31				0.947673
XM-1	388				1.04268

图8　型腔压力为25 MPa时模具位移云图和测量点位移



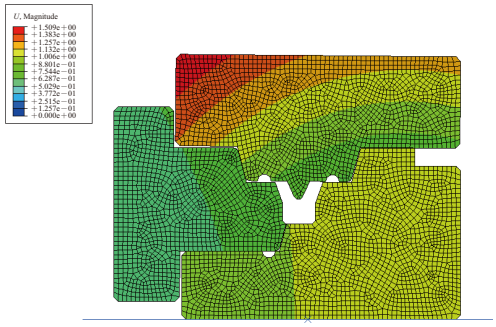
Part Instance	Node ID	Orig. Coords	Def. Coords	Elements	U, U1
XM-1	37				0.926656
ZM-1	38				0.764511

图9　型腔压力为25 MPa时中模与下模之间产生的缝隙

下，中模直径比承压前小0.09 mm，下模直径比承压前大0.05 mm，中模与下模的间隙为0.16 mm。

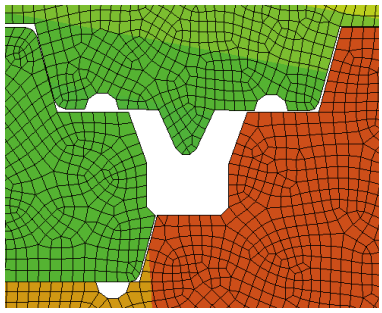
型腔压力为35 MPa时模具位移云图和测量点位移如图10所示，中模与下模之间的缝隙如图11所示。

由图11可知，在35 MPa型腔内部压力的作用下，中模直径比承压前小0.18 mm，下模直径比承



Part Instance	Node ID	Orig. Coords	Def. Coords	Elements	U, U1
ZM-1	42				0.674682
XM-1	31				1.02439
XM-1	388				1.11554

图10　型腔压力为35 MPa时模具位移云图和测量点位移



Part Instance	Node ID	Orig. Coords	Def. Coords	Elements	U, U1
XM-1	37				1.00267
ZM-1	38				0.675077

图11　型腔压力35 MPa时中模与下模之间产生的缝隙

压前大0.13 mm，二者之间的间隙为0.33 mm。

通过有限元分析计算的模具受压变形大于采用模具弹性变形公式计算得到的变形，但从中模与下模之间的间隙来看，该间隙值与实际生产中制品飞边厚度比较吻合。

模具型腔内的最大实际压力≈锁模力/型腔投影面积，且最大压力为瞬时状态，模具型腔内的压力一旦超过机台的最大承受压力，上下模会在压力作用下分开，压力马上被卸载，对于开放式和半开放式模具来说，只要模具流胶槽设计合理，模具型腔实际压力就小于理论计算值，因此在模具设计时可根据制品的公差和外观等级适当考虑模具的受压变形量。在实际生产过程中，经常出现飞边过厚或撕边等缺陷，原因是模具的配合间隙过大，这主要与模具材料性能和排气状况有关，为避免以上缺陷，可选择适当的模具材料性能，并在模具上设置泄压孔或者阻尼孔，以释放过高的型腔压力。

4　结论

本工作以Y形密封圈为例，对橡胶密封模具设计参数进行研究，得到以下结论。

(1)模具壁厚的设计主要取决于模具材料的屈服强度、橡胶密封制品胶料的硬度和流动性。

(2)模具热膨胀主要影响橡胶制品的直径，不会对模具型腔配合面造成不良影响，且对模具断面尺寸的影响基本可以忽略不计。

(3)锁模力对橡胶制品尺寸的影响非常小，可以忽略不计。

(4)模具型腔内部压力主要影响橡胶制品的断面尺寸,严重时模具型腔配合面会产生缝隙,影响橡胶制品外观质量。

因此,在设计橡胶模具型腔尺寸时,需重点考虑橡胶制品胶料的硬度、流动性、线膨胀系数和硫化温度,以及模具材料的屈服强度和线膨胀系数等参数。

参考文献:

[1] 阎琛. 橡胶密封件模具的实用设计[J]. 石油机械,1988,16(12):6-11.

[2] 马东江. 骨架式橡胶油封模具的收缩率浅探[J]. 特种橡胶制品,2008,29(4):38-39.

[3] 胡华南. 橡胶模具的设计及应用[J]. 模具技术,2006(3):25-27.

[4] 赵敏. 一种用于加工圆柱型硫化橡胶试件的易开模具[J]. 橡胶工业,2016,63(6):371.

收稿日期:2018-08-27

Study on Design Parameters of Rubber Seal Mold

WU Jianjun[1,2], *WANG Huan*[1,2], *XIANG Yu*[1,2], *QIU Zhaopei*[1,2]

(1. Guangzhou Mechanic Engineering Research Institute, Guangzhou 510535, China; 2. National Engineering Research Center of Rubber and Plastic Sealing, Guangzhou 510535, China)

Abstract: Taking Y-shaped sealing ring as an example, the design parameters of rubber seal mold were studied. The mold wall thickness mainly depended on the yield strength of mold materials, the hardness and fluidity of rubber compounds. The thermal expansion of mold mainly affected the diameter of rubber product, and had no adverse effect on the fitting surface of mold cavity, and the influence of thermal expansion on the cross dimensions of mold could be neglected. The influence of clamping force on the size of rubber products was very small and could be neglected. The cavity pressure of mold mainly affected the cross dimensions of the rubber product, and caused cracks in the fitting surface of the mold cavity in severe cases. The hardness, fluidity, coefficient of linear thermal expansion, vulcanization temperature of rubber compounds, as well as the yield strength and coefficient of linear thermal expansion of mold materials should be taken into account in the design of size of mold cavity.

Key words: rubber sealing product; mold; design parameter; coefficient of linear thermal expansion; displacement nephogram

横滨橡胶开发生物异戊二烯合成技术

日本横滨橡胶公司开发出用生物质高效生产异戊二烯的技术。据称,该突破是横滨橡胶在与日本Riken研究所和瑞翁公司的合作研究中取得的。

异戊二烯是合成橡胶的原料之一,目前是作为石脑油的热解副产品生产的。横滨橡胶、Riken研究所和瑞翁于2013年开始合作研究异戊二烯合成技术,并采用基于计算机的代谢设计技术,开发了一种新的异戊二烯合成工艺。横滨橡胶表示,这项新技术基于一种新的人工合成且高度活跃的酶培育出的具有极好异戊二烯合成能力的细菌。该细菌具有在体内由生物质(通常是糖)生成异戊二烯的能力,将生成的异戊二烯聚合起来,便实现了聚异戊二烯橡胶的合成。

横滨橡胶在解释这一过程时表示,人们普遍认为异戊二烯是由戊酸(一种由糖形成的中间物质)通过5段反应自然生成的,但通过三方联合研究构建的新人工通道可使此过程减少为2段。

横滨橡胶称,这种高度活跃的酶具有天然酶所无法达到的惊人的异戊二烯生成能力,如果将这种人工途径及酶引入大肠杆菌,即可使细菌具备生成异戊二烯的能力,而这种能力在自然界中是没有的,从而能够高效地合成异戊二烯。

横滨橡胶称此技术也可用于丁二烯合成橡胶以及其他二烯类橡胶。

(安　琪)