http://pmse.scu.edu.cn

航天用氟塑料/金属密封件模压工艺的数值模拟

楼 爽[1]，马秀清[1]，任子初[2]，孔祥号[1]，安 瑛[1]
（1. 北京化工大学 机电工程学院，北京 100029；2. 航天材料及工艺研究所，北京 100076）

摘要：氟塑料/金属密封件在航天系统中应用广泛，氟塑料与金属间的连接质量决定了其密封效果，影响系统运行的可靠性。文中基于航天液氧阀密封件，分别简化得到氟塑料/金属密封件的压力场和温度场数值计算模型。对氟塑料填充燕尾槽过程中氟塑料的中心压力、燕尾槽周边压力及温度场进行分析，得到不同熔体温度时氟塑料的压力变化及不同初始熔体温度时氟塑料与金属模具的温度场变化。结果表明，氟塑料优先填充远离中心区域的燕尾槽外侧区域，最后填充靠近中心的燕尾槽内侧区域，导致燕尾槽区域的熔体压力场分布不均；各区域填充压力随熔体温度升高均有不同程度下降，结合实际加工情况，文中基于数值模拟方法对现有模压工艺进行完善，得到了模具压力从初始的2.2 MPa逐步提升至12.5 MPa的施压曲线。

关键词：氟塑料；模压成型；数值模拟；燕尾槽
中图分类号：V46 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）05-0087-12

氟塑料具有优异的抗介质渗漏性、耐化学腐蚀性和耐高低温性能，常作为密封材料应用于航天系统，如液氧阀阀瓣。液氧阀阀瓣是由氟塑料和金属2种材料黏结而成，其中金属件作为阀瓣骨架，氟塑料作为密封材料镶嵌在金属骨架中。

在加工液氧阀阀瓣时，氟塑料在模压成型的同时与金属骨架黏结。氟塑料极性低，与金属骨架的结合力弱；同时，氟塑料熔体黏度较高，在模压成型时容易产生填充缺陷，也会进一步导致氟塑料与金属骨架间的结合力下降，进而影响液氧阀的密封性能。现有增强氟塑料与金属结合力的方法是使用胶黏剂，再通过常规模压工艺来生产密封件。王立峰[1]和马海瑞[2]等先后用氟塑料胶黏剂来增强氟塑料与金属骨架的结合强度，结果表明，胶黏剂在一定程度上能提高两者的连接质量。虽然胶黏剂可提供一定的结合力，但制备和固化工艺繁琐且需要考虑密封件的工作环境。除使用胶黏剂外，还可以通过强化塑料与金属骨架的机械连接来增强两者的黏结，基于此，一部分研究人员对金属进行表面处理，以提高塑料与金属的结合力。如Kleffel等[3]利用电化学刻蚀处理来增强塑料与金属铝的结合强度，结果表明，经过刻蚀处理的金属表面粗糙度增加，与塑料间的结合强度明显提高；Huang等[4]利用等离子体处理金属表面，结果表明，等离子体处理能够增加塑料与金属的接触面积，提高两者的结合强度。

无论是采用胶黏剂还是增强两者的机械连接，在加工氟塑料/金属密封件时，均需要采用模压方式完成氟塑料填充金属骨架的过程。模压工艺会直接影响模压制品以及密封件的质量[5,6]，为了获得合理的模压工艺参数，研究人员利用数值模拟法进行了分析。如张德益[7]研究了塑料板材模压成型过程中的速度分布和压力分布，结果表明，当模具温度为160 ℃、熔体温度为60 ℃、模压速度为1.2 mm/s时，塑料板材的表面质量最好。Zhou等[8]研究了无定形

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0094
收稿日期：2023-07-14
通讯联系人：马秀清，主要从事高分子材料改性原理及设备等研究，E-mail: maxq@buct.edu.cn；
安瑛，主要从事聚合物加工数值模拟研究，E-mail: anying@buct.edu.cn

聚合物加工温度对成型制品质量的影响，结果表明，温度场的不均匀分布会影响聚合物黏度进而影响成型压力与质量，当熔体温度为382 ℃时，制品的质量较好。氟塑料/金属密封件对模压质量要求较高，因此生产密封件的模压工艺与常规的模压工艺有所区别，目前专门针对氟塑料/金属密封件模压工艺的研究较少。基于氟塑料的特性以及氟塑料/金属密封件的模压加工特点，本文利用数值模拟法分析了氟塑料填充金属骨架的过程，并对现有模压工艺进行完善，以期满足高黏度氟塑料高质量填充金属骨架的要求，得到高性能的氟塑料/金属密封件。

1 氟塑料/金属密封件的加工过程

Fig.1为氟塑料/金属密封件的示意图及生产该密封件对应简化模具的各部分名称。该模具由三部分组成，从上至下依次为动模具、外侧定模具和下侧定模具，其中型腔由动模具的下表面、外侧模具的内表面和金属骨架的上表面构成。

Fig.2为氟塑料/金属密封件的加工过程示意图。氟塑料的初始形态为粒料(Fig.2(a))，在模压机中受热熔融(Fig.2(b))，待充分熔融后，停止加热；动模具以“施压-保压”的形式逐步增加填充压力(Fig.2(c)和Fig.2(d))，熔融态的氟塑料被逐渐压实，最终黏结在金属骨架上，形成密封件(Fig.2(e))。本文针对氟塑料在金属骨架表面的填充过程进行氟塑料的压力场分析及氟塑料与模具的温度场分析。

针对上述模压加工氟塑料/金属密封件过程，Fig.3所示为基于数值模拟方法提出的针对该密封件

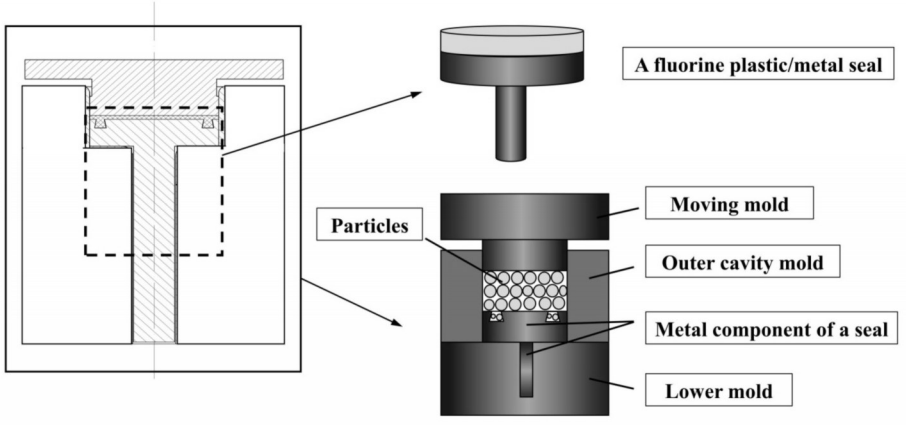


Fig. 1 Fluorine plastic/metal seal and simplified mold for the production of this seal

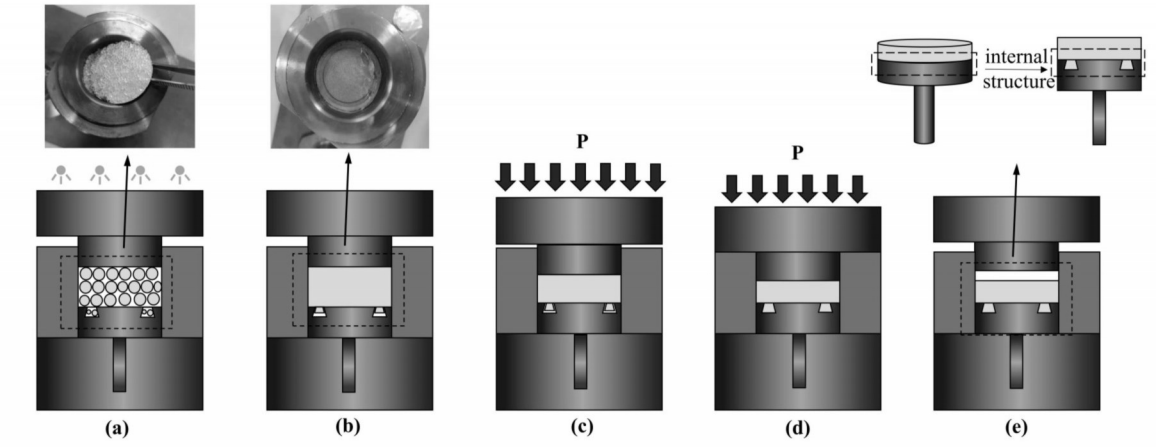


Fig. 2 Compression molding process of plastic/metal connectors and its corresponding simulation issues
(a): initial heating process; (b): fluoroplastic melting process; (c): mold downward movement; (d): further mold movement; (e): complete molding of the seal

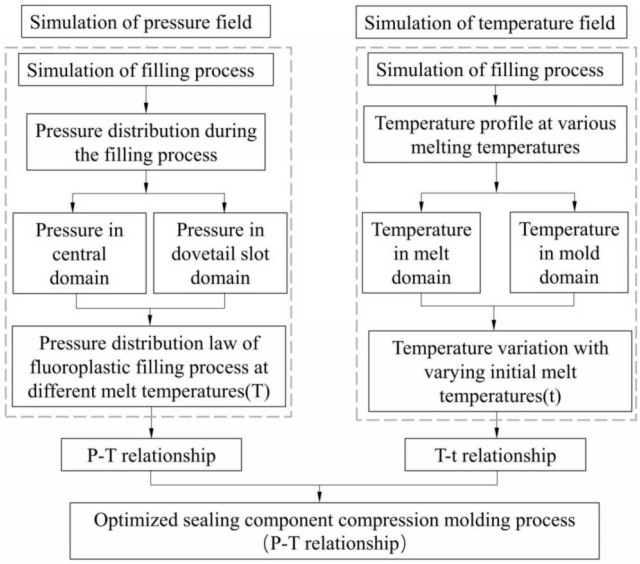


Fig. 3 Numerical simulation-based analysis process for compression molding process of plastic/metal sealing components

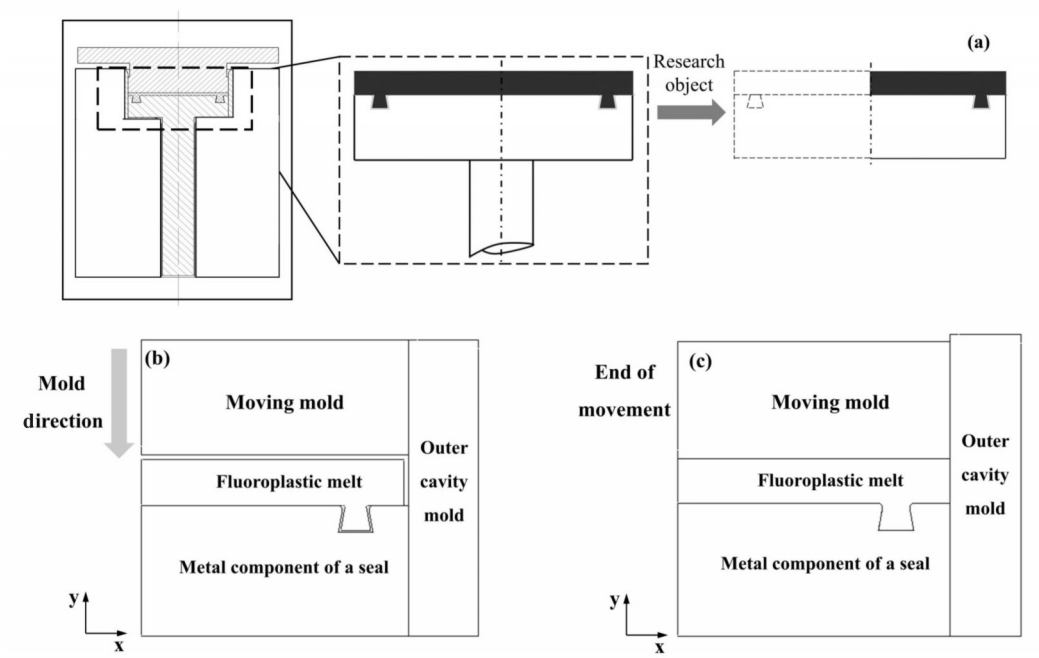


Fig. 4 Pressure field calculation model for fluoroplastic filling process in dovetail groove
(a): selection and simplification of the model; (b): calculation model of pressure field during the initial filling process; (c): calculation model of pressure field during the final filling process

模压工艺的技术路线。在动模具保持恒定速度向下运动的过程中,分析氟塑料在不同熔体温度、不同填充时刻的压力场分布、中心区域压力及环形燕尾槽区域压力变化;同时,分析不同初始熔体温度下模压过程中的温度场分布,氟塑料温度及模具的温度变化。在填充过程的不同阶段,熔体温度不断下降,因此,需要根据熔体温度来调整动模具压力,根据填充压力与熔体温度的关系(*P-T*关系)与熔体温度随时间变化的关系(*T-t*关系),得出氟塑料/金属密封件模压成型的填充压力曲线(*P-t*关系)。

2 数值模拟

2.1 几何模型

在模压过程中，氟塑料填充金属件所用时间较短，在剩余模压过程中，模具压力起到的作用更多是保压而不是填充作用；即模具施压不是贯穿模压成型氟塑料/金属件的整个过程，但温度变化将贯穿整个模压过程。基于此，本文将模压成型中氟塑料填充金属件上燕尾槽的过程（即压力分析）以及整个温度变化过程分开计算。

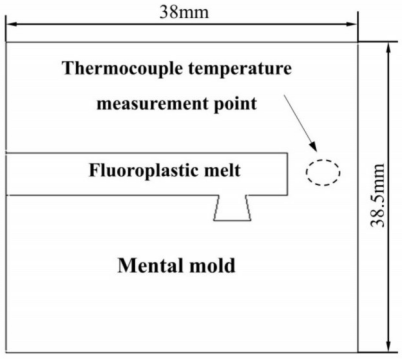


Fig. 5 Fluoroplastic and metal mold temperature field calculation model

2.1.1 压力场的计算模型：Fig.4所示为氟塑料/金属密封件模压成型的模具示意图(Fig.4(a))以及氟塑料填充燕尾槽的模压过程计算模型(Fig.4(b)和Fig.4(c))，为了提高计算效率，在模压成型数值模拟中，通常将对称的回转体三维模型简化为轴对称二维模型[9,10]。氟塑料熔体与外侧定模具间的缝隙宽度为0.5 mm，初始圆柱体的直径为61 mm，厚度为5.25 mm；充模完成后，氟塑料圆柱部分的直径为62 mm，厚度为5 mm。模压过程计算模型由氟塑料熔体、动模具、金属件（Metal component of a seal）及外侧定模具组成。其中氟塑料熔体的模型由上部分圆柱体和下部分环形燕尾槽组成。模具速度为200 mm/min，模压方向为-Y方向。

2.1.2 温度场的计算模型：温度场计算模型及热电偶的测温点位置如Fig.5所示，在温度场模拟计算中，有如下假设：(1) 氟塑料与金属模具无相对位移；(2) 动模具、金属件和外侧定模具的材料一致，统称为金属模具；(3) 假设熔体充满型腔，忽略外侧定模具与氟塑料熔体之间的空隙。

2.2 理论模型

假设氟塑料是不可压缩流体，忽略密度变化，考虑熔体重力。本文的模拟计算遵循流体力学运动一般规律，即质量守恒、动量守恒和能量守恒，分别如式(1)~(3)

$$\nabla \cdot V = 0 \tag{1}$$

式中：∇——哈密顿算子；V——流体速度，m/s。

$$\rho\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = \nabla \cdot \tau - \nabla P + \rho g \tag{2}$$

式中：P——静水压力，Pa；τ——应力张量，Pa；g——重力加速度，m/s^2。

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} = -\nabla \cdot \rho E V - \nabla \cdot q + \nabla(\sigma \cdot V) + \rho g \cdot V \tag{3}$$

式中：E——总能量，J；q——单位面积热通量，J/m^2；σ——应力，N/m^2。

在本构方程的选择中，由于氟塑料在模腔内受到的剪切力较小，因此材料模型选择黏度为定值的模型，即本构方程的选择为η=C。

Tab. 1 Viscosity of fluoroplastics varies with temperature

Temperature/℃	320	310	300	290	285	280
Viscosity/(kPa·s)	48.13	52.15	54.29	78.28	90.53	3699

Tab. 2 Other physical property of fluoroplastics (25 ℃)

Parameter	Density/(kg·m^{-3})	Thermal conductivity/(W·m^{-1})	Heat capacity per unit mass/(J·kg^{-1}·K^{-1})
Value	2150	0.25	2000

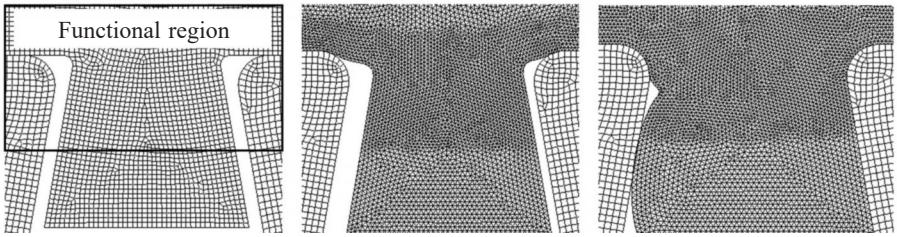


Fig. 6 Adaptive meshing method

2.3 材料属性

2.3.1 *氟塑料*:氟塑料/金属密封件中氟塑料的主要物性参数如Tab.1和Tab.2所示,其中Temperature,Viscosity,Density,Thermal conductivity和Heat capacity per unit mass分别为熔体温度、对应熔体温度下的黏度、密度、导热系数和比热。

2.3.2 *模具和金属件*:模具结构由动模具(动模板)、金属骨架(通常为铝制合金)和外侧定模具组成,假设金属件及模具的材料一致,密度为4700 kg/m^3,导热系数为50 W/m^2。

2.4 网格划分及边界设置

基于Polyflow的网格重置技术,实现氟塑料在填充燕尾槽过程中网格的重绘,由于在模压过程中,网格会发生较大形变,因此保持每一时刻的网格质量是十分必要的,同时为了避免在整个流体域内使用小尺寸网格,加剧计算过程的复杂度,基于Polyflow的适应性网格法(Adaptive meshing),对燕尾槽和矩形槽间隙区域进行网格加密,适应性网格的作用范围是如Fig.6所示,网格大小的设定值为0.06 mm,其他区域的网格大小的设定值为0.2 mm,网格类型均为三角形网格,网格质量的设定值为0.8。

氟塑料除靠近中心为对称轴边界条件外,其余边界均为自由边界条件(Free surface),其中靠近对称轴的区域称为中心区域,靠近燕尾槽的区域(包含燕尾槽)称为燕尾槽区域。

3 结果与讨论

3.1 氟塑料填充燕尾槽的压力场分析

为了避免高温时氟塑料受压溢出,实际模压过程中压力的建立是逐步完成的。考虑到氟塑料填充燕尾槽与氟塑料的冷却过程同时进行,在压力场模拟中,模拟结果主要反映不同填充状态下的氟塑料压力场,无法反映实际模压时间。此外,在实际制备密封件时,氟塑料颗粒受热熔融,熔体初始温度通常设定在300~320 ℃间。综上所述,在压力场分析中,熔体温度的讨论范围为285~320 ℃;在温度场分析中,初始熔体温度的讨论范围为300~320 ℃。

3.1.1 *氟塑料熔体的压力分布*:为了表达填充过程中不同时刻压力的变化,将氟塑料填充燕尾槽从开始填充到填充结束所用时间均分为5个时间段,6个时间点。起始点(第1个时刻点)为模具尚未接触氟塑料的时刻,即Starting point,随着填充过程的进行依次记作过程I至V(即第2个时刻点至第6时刻点),过程I作为动模具接触氟塑料的初始时刻,过程V作为氟塑料填充结束时刻。Fig.7和Fig.8所示分别为氟塑料熔体温度为320 ℃和300 ℃时,不同填充时刻的压力分布云图,从图中可知,在填充的前5个时刻,靠近中心一侧的环形燕尾槽壁面尚未与熔体接触,表明熔体较难填充至该区域。压力云图的数值结果表明,氟塑料熔体在圆柱形区域的压力高于环形燕尾槽区域的压力,最大压力在轴对称中心区域,沿径向递减。这种压力分布规律与氟塑料的流动有关,氟塑料熔体的填充方向是从上至下,从内至外,所以在圆柱形熔体(二维中为矩形)区域,压力的变化主要是沿径向方向,在进入环形燕尾槽的区域,压力的变化主要是轴向(-*Y*)方向。这种流动导致的压力分布能够解释燕尾槽靠近内侧区域难填充的现象,氟塑料填充环形燕尾槽靠近内侧的壁面时,需要向内流动,与初始填充过程中(过程I至IV)熔体的运动方向相反,因此熔体在接近填充结束时才与内侧壁面发生接触并受到压力作用。

对比不同温度下氟塑料的压力变化可以看出,氟塑料熔体温度不同时,填充压力也明显不同,这

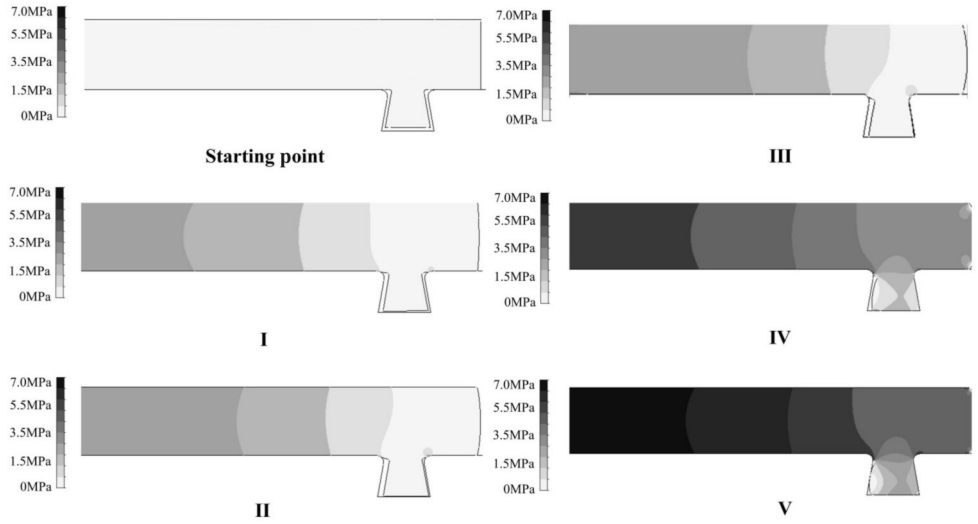


Fig. 7 Pressure distribution during the molding process of fluoroplastic (melt temperature: 320 ℃)

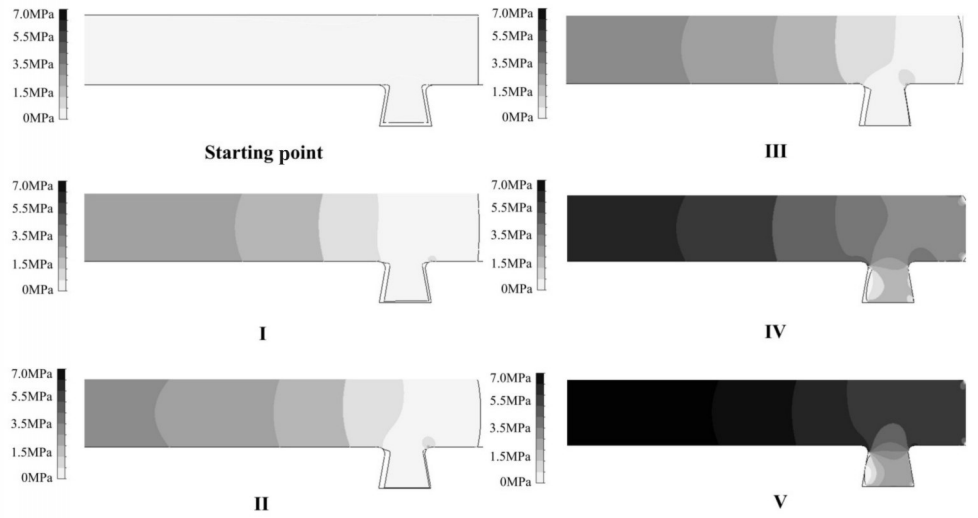


Fig. 8 Pressure distribution during the molding process of fluoroplastic (melt temperature: 300 ℃)

是因为氟塑料黏度受温度的影响较大，温度变化会显著影响氟塑料的流动性，进而影响填充压力；从图中可知，氟塑料熔体温度降低，填充压力的分布趋势没有变化，但填充压力增大；燕尾槽底部靠近对称轴的区域熔体压力较小，说明环形燕尾槽内侧难以填满压实，其中，环形燕尾槽内侧靠近底部的区域最难充满。

3.1.2 模压过程中燕尾槽区域的压力变化：氟塑料与金属骨架间连接是否可靠，是直接影响氟塑料/金属密封件密封性能的重要因素。而充模过程中，氟塑料与环形燕尾槽内表面的黏接力是影响氟塑料与金属连接性能的主要因素，因此需要了解充模过程中燕尾槽各表面（二维中为3条边）熔体的压力分布。环形燕尾槽表面三边的命名如Fig.9所示，对三边的熔体压力进行后处理：取每条边上等分的10个点的压力数值，再将10个点的平均压力作为该边的压力值，记作边1、边2、边3的压力。上述提取压力值的点与金属件燕尾槽三边的距离为0.12 mm。

Fig.10所示为不同熔体温度下，燕尾槽三边熔体的压力变化。从图中可知不同熔体温度下，氟塑料填充环形燕尾槽时，燕尾槽三边的压力均随温度升高而降低，这是因为氟塑料的黏度随温度升高而

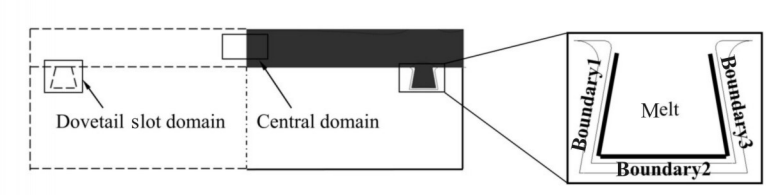


Fig. 9 Boundary delimitation in the tailrace channel region

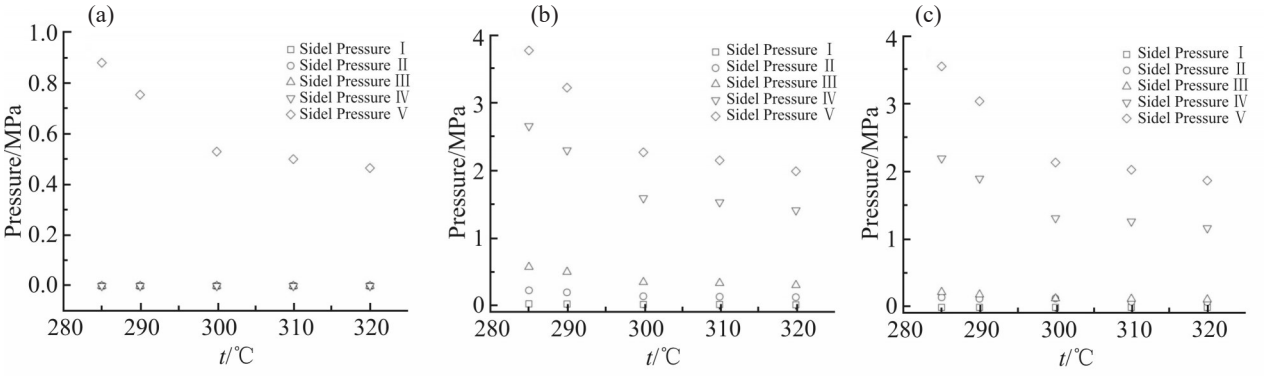


Fig. 10 Pressure variation in the dovetail region at different processing temperatures

(a): relationship between pressure at boundary 1 of the dovetail groove and processing temperature; (b): relationship between pressure at boundary 2 of the dovetail groove and processing temperature; (c): relationship between pressure at boundary 3 of the dovetail groove and processing temperature

下降,氟塑料的黏度较低时,流动性好,在较小的动模具压力下就能填充环形燕尾槽区域。由Fig.10(a)可知,边1附近的压力较小,仅在最后过程产生压力,285 ℃下的平均压力为0.88 MPa,320 ℃下的平均压力为0.46 MPa,这也说明环形燕尾槽靠近中心的内侧最难充满,即边1附近是可能产生缺陷的位置,实际加工中,内侧边存在与金属黏结较差的可能性。结合边1在填充过程Ⅰ至Ⅳ时的压力云图可知,氟塑料未与边Ⅰ发生接触;由Fig.10(b)和Fig.10(c)可知,边2(环形燕尾槽底部)和边3(远离中心的环形燕尾槽一侧)附近的压力较大,其中燕尾槽底部氟塑料熔体的压力较大,说明燕尾槽底部已经填充了一定体积的熔体;比较3个图,当燕尾槽中的氟塑料达到相同填充状态时,熔体温度越低,所需要的模板压力越高;边2和边3附近熔体的压力数值基本一致,在285 ℃下的平均压力分别为3.78 MPa和3.59 MPa,在320 ℃下的平均压力分别为1.99 MPa和1.89 MPa。

3.1.3 模压过程中中心区域的压力变化:由Fig.7和Fig.8的压力分布云图可知,氟塑料熔体中心区域的压力最大,当温度为280 ℃时,氟塑料熔体黏度是3.699 GPa·s,是285 ℃时的40倍,此时熔体基本不再流动,因此本节仅分析讨论熔体温度为285~320 ℃范围内的压力变化。为了得到模压过程中动模具施加的具体压力值,对中心区域压力进行后处理:提取的计算点与对称边界和氟塑料上表面的距离为0.4 mm,由于参考点紧贴氟塑料熔体的中心与表面,因此其数值可以反映氟塑料中心压力的变化。

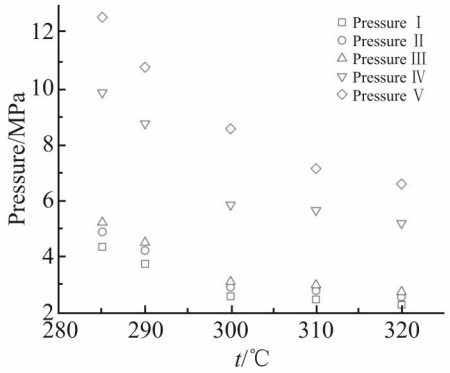


Fig. 11 Temperature-pressure relationship in the central region

Fig.11所示为氟塑料熔体中心区域不同时刻压力随温度的变化曲线,其中压力Ⅰ至Ⅴ分别对应了填充过程Ⅰ至Ⅴ中参考点处的压力数值。从图中可知,在同一温度下,随着填充过程的进行,中心压力不断

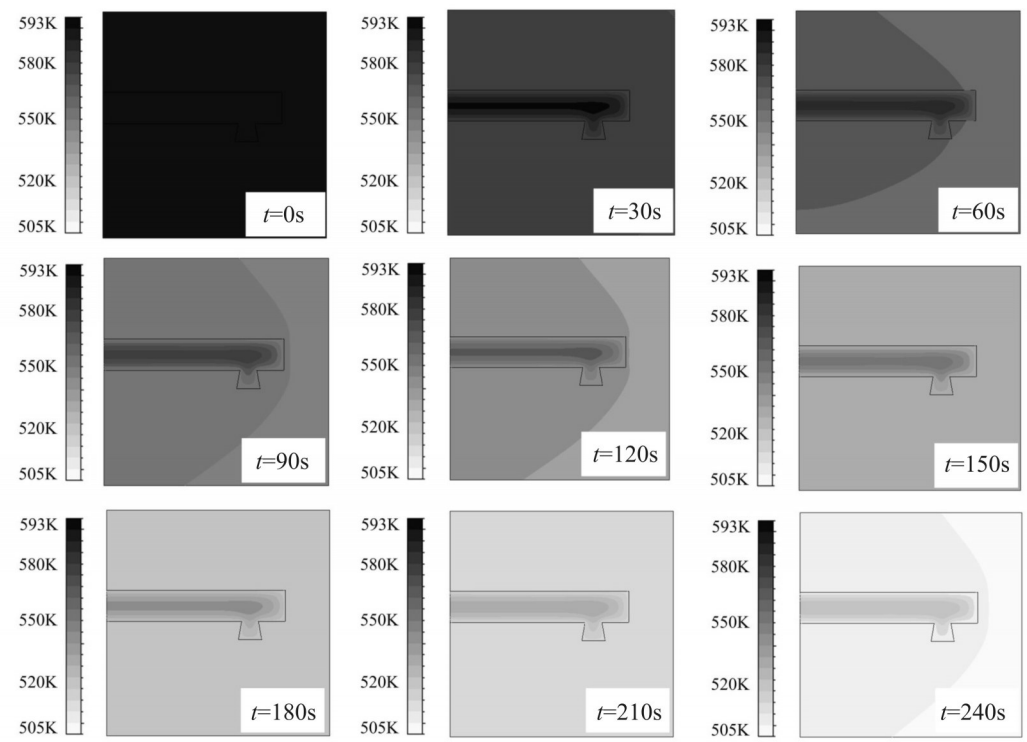


Fig. 12 Temperature field variation of fluoroplastic and mold (initial temperature: 320 ℃)

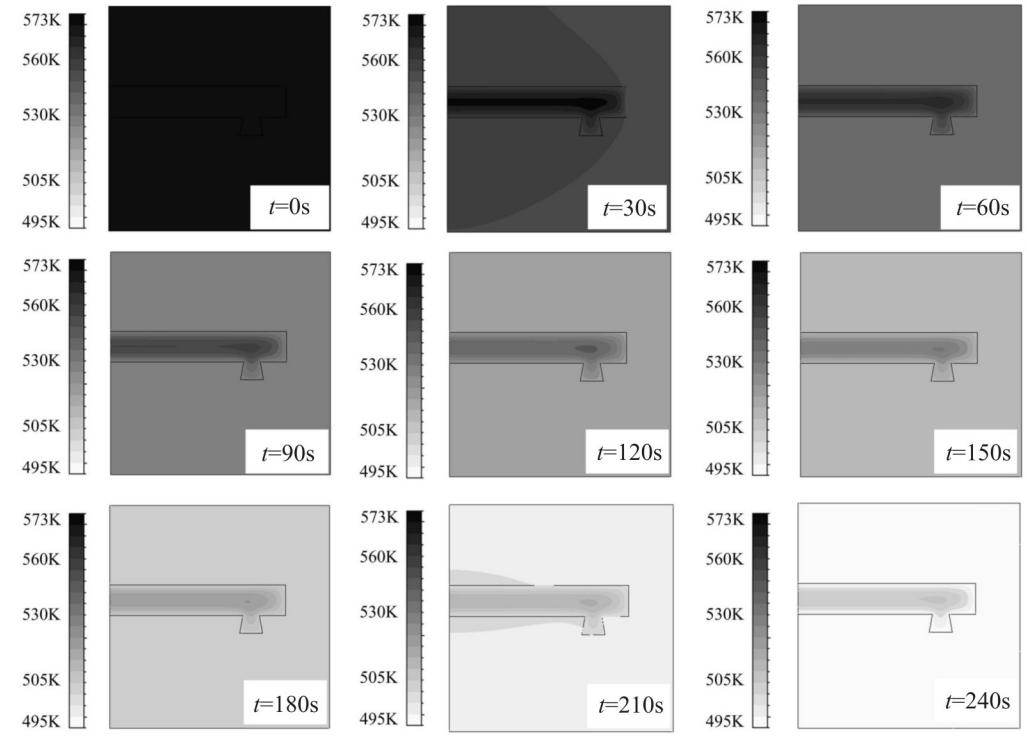


Fig. 13 Temperature field variation of fluoroplastic and mold (initial temperature: 300 ℃)

增加,说明需要有更大的填充压力才能使氟塑料熔体充满燕尾槽。在285~320 ℃的熔体温度范围内,随熔体温度升高,氟塑料熔体内的中心压力在填充各个过程中均呈现下降趋势,当熔体温度分别为300 ℃,310℃和320 ℃时,所需要的最大压力分别为7.5 MPa,7.2 MPa和6.6 MPa。当熔体温度为285 ℃和290 ℃时,所需要的最大压力为12.5 MPa和10.7 MPa。从成型所需的中心压力和氟塑料熔体温度的关系上看,在氟塑料熔体填充燕尾槽时,将温度控制在300~320 ℃是较为合理的,其中选用320 ℃的熔体温度更好。

3.2　模压成型过程中氟塑料/金属密封件的温度场分析

3.2.1　*氟塑料与金属模具的温度分布*:氟塑料加热熔融后进行模压工序,在该过程中,熔体温度会随时间不断降低。当熔体温度下降至280 ℃以下时,由于氟塑料的黏度增大到熔体无法流动,氟塑料无法继续进行充模。因此在计算得到氟塑料在关键温度点(320 ℃,310 ℃,300 ℃,290 ℃和285 ℃)下所需的成型压力后,还需要得出上述温度与时间的关系。

Fig.12所示为模压过程中氟塑料及模具的温度场分布。从图中可以看出,氟塑料熔体与金属模具的温度变化不同,在初始模压(冷却)阶段,由于金属的导热系数高,与环境直接接触,且金属与环境的温差较大,金属模具的降温速率较快,氟塑料的温降速率较慢。对比初始熔体温度不同的温度场云图(Fig.12和Fig.13)可知,对于不同的初始温度,温度场分布规律基本相同。在冷却的初始阶段,氟塑料熔体内最高温度与初始温度相同,当金属温度场分布均匀后,氟塑料温度场呈现"中间温度高、四周温度低"的分布,且在与金属接触的面上以及环形燕尾槽的底部区域的冷却速度较快,前者是因为氟塑料熔体与金属接触处的温度随金属模具的温度变化快速冷却,后者除了与金属模具温度同时变化外,还与附近高温熔体体积相对少有关。氟塑料温度场的分布规律表明氟塑料温度变化受氟塑料与金属导热系数的差异影响显著。

3.2.2　*模压成型过程中氟塑料熔体温度与测温点温度的关系*:由于在实际加工过程中,温度传感器的测温探头安装在模具中,温度测量数值是对模具温度的反映,无法准确测量得到氟塑料的温度,因此有必要讨论氟塑料温度与测温点温度的关系。Fig.14为熔体最高温度与模具测温点处的温降曲线及其温差变化曲线。

由模拟结果可知,在t=30 s及以后,测温区域的温度分布均匀,测温区的温度可以用一个温度数据表示。由两者温差分析(Fig.14(a))可知,在t=30 s之前,氟塑料降温较慢,模具降温较快,实际测得温度与氟塑料熔体实际温度差异较大;此后两者的温差逐渐减小,当时间达到50 min后,两者的温差保持在1 ℃以内,此时氟塑料与金属模具的温度逐渐接近环境温度。

由Fig.14(b)可知,氟塑料熔体初始温度是320 ℃时,当模具测温点处的温度达到290 ℃,所用时间约为60 s,此时氟塑料的温度约为310 ℃,说明氟塑料仍处于可加工温度范围内。由于金属模具与塑料导热系数的差异导致熔体降温速率的不一致性,因此不能用模具温度直接反映熔体温度,即不能

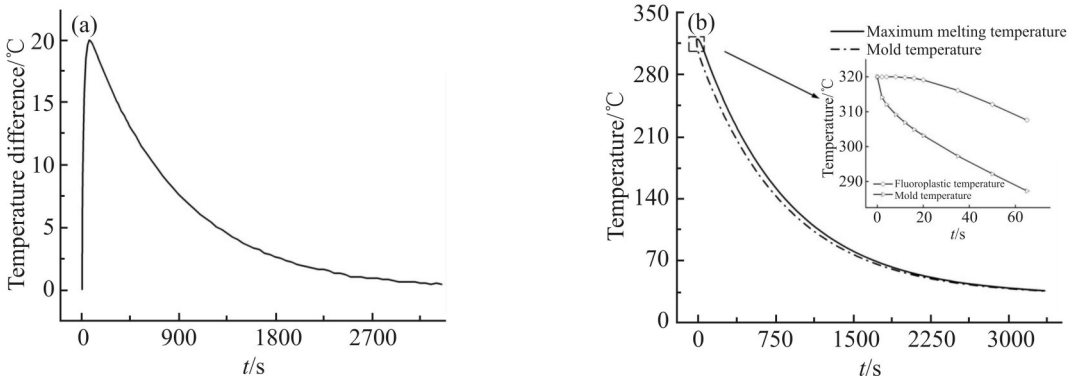


Fig. 14 Cooling curve of fluorine plastic and mold

(a): temperature difference between fluorine plastic and mold; (b): cooling curve of fluorine plastic and mold

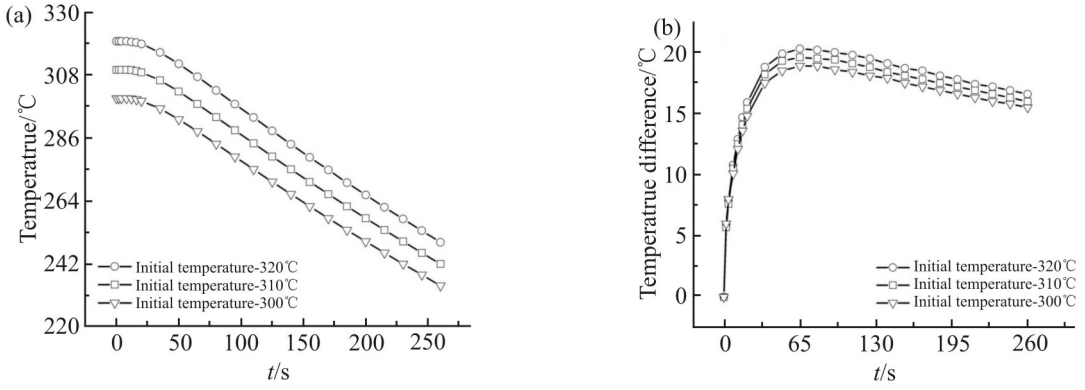


Fig. 15 Cooling curves of fluorine plastic at various processing temperatures and its temperature difference variation with the mold
(a): cooling curve of fluorine plastic at different initial temperatures; (b): temperature difference variation between fluorine plastic and mold at different initial temperatures

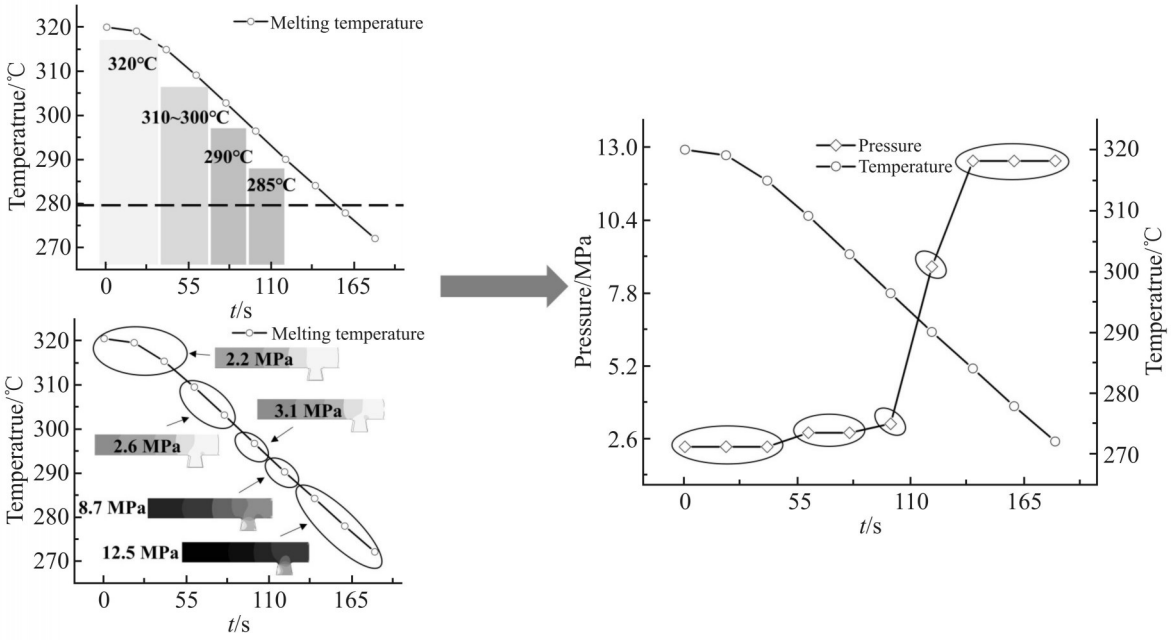


Fig. 16 Forming process of fluoroplastic/metal connectors based on temperature field and pressure field variation laws

用模具温度判断氟塑料的填充时间。

3.2.3 模压成型过程中氟塑料的温度变化：氟塑料初始温度不同时，对整个冷却过程及填充过程的工艺条件均有一定影响，基于此，对氟塑料初始温度分别为320 ℃，310 ℃和300 ℃时的冷却过程进行了模拟分析。

Fig.15所示为不同初始温度下氟塑料降温曲线及其与测温点间的温差变化曲线。从Fig.15(a)中可知，不同初始温度对氟塑料在冷却过程中的降温规律没有影响。氟塑料熔体温度小于或等于280 ℃时，流动困难，不易加工，将达到该温度的时间定义为完成填充的时间（即加工时间）。当初始熔体温度为320 ℃时，氟塑料流动性较好，充填加工时间为160 s；当初始熔体温度在310 ℃时，氟塑料的加工时间为120 s；当初始熔体温度在300 ℃时，氟塑料的加工时间为90 s，与初始熔体温度为320 ℃相比，减少了70 s，加工时间减少了43 %。从Fig.15(b)可知，初始熔体温度不同会影响氟塑料与测温点的温差，初始温度越高，加工时间内，氟塑料熔体与测温点的温差越大，当初始温度为320 ℃时，氟塑料与测温点的

最大温差为20.3 ℃;当初始温度为310 ℃时,氟塑料与测温点温差的最大值为18.9 ℃。选择不同的熔体初始温度时,熔体与测温点温差的波动在2 ℃左右。综上所述,氟塑料填充燕尾槽过程中的填充与保压的时间不能过长也不能过短,从不同熔体温度对氟塑料加工时间的影响来看,初始熔体温度选择320 ℃较好。

3.3　氟塑料/金属密封件的模压成型工艺

通过氟塑料压力分布的模拟结果得到了氟塑料填充压力与熔体温度的关系,温度分布的模拟结果得到了温度与氟塑料模压时间的关系(模压时间包括氟塑料处于具有流动和形变能力的加工时间和低于流动黏度的保压时间);由此可以建立填充压力与填充时间的关系,即分段施加压力的模压工艺曲线。Fig.16所示为氟塑料初始温度为320 ℃时的施压曲线,从图中可以看出,在初始时,选用2.2 MPa左右的压力,保持约40 s后,再将模具压力先后提升至2.8 MPa和3.1 MPa,分别保持40 s和20 s,当熔体温度接近285 ℃时,将模具压力提高至12.5 MPa。分步施压工艺可避免氟塑料溢料的同时提高压力,使温度降低的氟塑料仍能继续填充燕尾槽,进而确保氟塑料与金属件间的黏结。

4　结论

本文以航空用塑料/金属密封件(液氧阀阀瓣)为研究对象,建立了氟塑料填充燕尾槽的压力场、温度场计算模型,研究了不同熔体温度下氟塑料熔体在模具中的流动及充满型腔的过程中所需要的压力,得到以下结论:

(1)氟塑料熔体压力从中心区域向外递减,方向从中心指向四周,氟塑料熔体不易充满环型燕尾槽内侧且熔体温度越低越容易形成缺陷。

(2)氟塑料熔体温度在285~320 ℃区间时,氟塑料充满燕尾槽所需模压压力不同,氟塑料熔体温度升高,所需成型压力降低,所需压力范围为6~12.5 MPa。

(3)氟塑料与测温点的最大温差为20.3 ℃,根据氟塑料与金属模具的温差曲线以及热电偶测温值可以得到氟塑料在填充过程中的温度,从而调整工艺参数。

氟塑料在模压成型中随加工时间的延长,黏度升高,因此采用了逐步加压的方法。本文提出了基于成型压力与熔体温度随模压时间变化规律的分步施压工艺(*P-T*关系),该模压工艺对生产高黏度塑料制品具有一定指导作用。

参考文献:

[1] 王立峰, 段蓉. 聚全氟乙丙烯塑料和金属连接试验研究[J]. 宇航材料工艺, 2003, 33(1): 49-52.
Wang L F, Duan R. A study of the joint between fluoroethylenepropulene(FEP) and metal[J]. Aerospace Materials & Technology, 2003, 33(1): 49-52.

[2] 马海瑞, 张万卿, 姜潮. 氟塑料-阀芯黏结工艺[J]. 火箭推进, 2020, 46(2): 92-96.
Ma H R, Zhang W Q, Jiang C. Research on bonding process of fluoroplastic-valve spool[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(2): 92-96.

[3] Kleffel T, Drummer D. Investigating the suitability of roughness parameters to assess the bond strength of polymer-metal hybrid structures with mechanical adhesion[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 117: 20-25.

[4] Huang B, Sun L, Li L, *et al*. Experimental investigation of the strength of polymer-steel direct adhesion (PSDA) joints with micro-structures ablated by laser[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249: 407-414.

[5] 刘学东, 薛松, 杨涛, 等. 工艺参数对玻纤增强硅树脂复合材料模压成型制品热稳定性与力学性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(4): 94-102.
Liu X D, Xue S, Yang T, *et al*. Effect of compression molding process parameter on thermostability and mechanical properties of fiberglass reinforced silicone resin composites bobbin[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022,38(4): 94-102.

[6] Xiong X, Li M, Ji S, *et al.* An effective friction spot joining method for plastic and aluminum alloy[J]. Advanced Engineering Materials, 2019, 21: 1900510.

[7] 张益德. 汽车内饰件压制成型工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
Zhang Y D. Investigation of the compression molding process for automotive interior components[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.

[8] Zhou T, Zhou Q, Xie J, *et al*. Surface defect analysis on formed

chalcogenide glass $Ge_{22}Se_{58}As_{20}$ lenses after the molding process [J]. Applied Optics, 2017, 56: 8394.

[9] Zhou J, Li M, Hu Y, *et al*. Numerical evaluation on the curve deviation of the molded glass lens[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136: 051004.

[10] Ananthasayanam B, Joseph P F, Joshi D, *et al.* Final shape of precision molded optics: part II—validation and sensitivity to material properties and process parameters[J]. Journal of Thermal Stresses, 2012, 35: 614-636.

Numerical Simulation of Compression Molding Process for Aerospace Fluorine Plastic/Mental Seals

Shuang Lou[1], Xiuqing Ma[1], Zichu Ren[2], Xianghao Kong[1], Ying An[1]

(*1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China*)

ABSTRACT: Fluorine plastic/metal seals are widely used in aerospace systems, and the quality of the connection between fluorine plastic and metal determines its sealing effect and affects the reliability of system operation. In this paper, based on the aerospace liquid oxygen valve seals, the pressure field and temperature field of fluoroplastic/metal seals were simplified to obtain the numerical calculation model respectively, and the central pressure of fluorine plastic, pressure around the dovetail groove and temperature field were analyzed during the process of filling the dovetail groove with fluorine plastic. The pressure changes of fluoroplastics at different melt temperatures and temperature field changes of fluoroplastics/metal parts at different initial melt temperatures were obtained. The results show that fluoroplastics preferentially fill the outer dovetail groove region away from the center region and finally fill the inner dovetail groove region close to the center, resulting in uneven distribution of the melt pressure field in the dovetail groove region; the filling pressure in each area decreases to a different extent with the increase of melt temperature; according to the actual processing situation, the mold pressure is gradually increased from the initial 2.2 MPa to 12.5 MPa.

Keywords: fluorine plastic; compression molding; numerical simulation; dovetail groove