

摘 要

在注塑成型过程中，当采用多浇口或型腔中存在孔洞、嵌件、以及制品厚度尺寸变化较大时，塑料熔体在模具内会发生两个方向以上的流动，当两股熔体相遇时，就会在制品中形成熔接线，尽管熔接线是在模具充填过程中形成的，但它们的结构、形状和性质与整个注塑成型过程相关。熔接线的存在不仅影响到制品的外观质量，而且对制品的力学性能影响很大。目前，大多数的研究者主要考虑成型工艺条件对熔接线和制品性能的影响，对熔体的流动形态的研究相对较少。本文的主要工作就是利用数值模拟和具体实验相结合，研究不同模具型腔几何、不同工艺条件对熔接线性质的影响。具体工作如下：

- (1) 在分析了熔接线形成机理的基础上，首先设计了不同嵌件形状如圆形、正方形、菱形等对熔接线形成过程的实验，并数值模拟了成型过程熔接线的形成过程。结果表明，熔接过程类似于熔体的对接过程，熔接后熔体几乎不再运动，泉涌引起的取向行为将无法松弛。
- (2) 一些稍微复杂的嵌件形状的变化将会在熔接区形成空洞，熔体也不会处于停止状态，这种行为将会有助于熔接线区域分子的穿越界面和分子的松弛，将极大的提高熔接线的强度。
- (3) 选用结晶高聚物 LDPE。通过 Taguchi DOE 方法来设计试验工艺参数(注射压力/熔体温度/保压压力/模具温度/注射速率)，了解注塑成型过程中哪些工艺参数对熔接线强度有更大的影响；利用信噪比(S/N)找出最优组合。在实际生产中，注射不同位置都采用信噪比(S/N)所找到的最优组合。
- (4) 选用非结晶高聚物 ABS。同样使用 Taguchi DOE 了解注塑成型过程中哪些工艺参数对熔接线强度有更大的影响；利用信噪比(S/N)找出最优组合。
- (5) 建立浇口附近扇形堆积物假设和不同注射速率下的模拟图形。

关键词：熔接线 工艺参数优化 注塑 模拟

ABSTRACT

In injection molding, weldlines form because of the presence of holes, inserts and multiple gates and an abrupt change in geometry that divide the polymer melt during flow in the mold and then the melt meet again. Despite weldlines form in filling, its construction, shape and property is related to injection processing. The weldlines can not only influence appearance of parts, but also markedly influence mechanics. At present, most researchers mainly take into account that processing conditions in molding have influence on weldlines and performance of parts, however, few researcher investigates flow morphology of melt. Mainly work of this dissertation is to study different geometry of mold cavity and processing conditions that have influence on performance of weldlines by numerical simulation method and experiment. The details of the dissertation are as followings:

- (1) We design diffom inserts, for instance, circle, square and diamond that form different weldlines based on analyzing weldlines formation mechanism, and then the forming process of weldlines in molding is studied by numerical simulation. Results indicate that the processes of meeting somewhat like two melt fronts directly impinge. Reunited melt almost can't move, the orientation that is induced by the fountain flow is unable to relax.
- (2) There is a hole behind inserts that have more complex shape when meeting of melt again, and then reunited melt can move slowly. That will help molecule at weldlines area to cross interface and relax, which can greatly increase the strength of weldlines.
- (3) The material we used is Low-Density Polyethylenecrystal (LDPE) that belongs to crystal polymer. We use Taguchi DOE to design experiment of processing parameters (Melt injection pressure/Melt temperature/Packing pressure/Mold temperature/Melt injection speed), and find out which processing parameters have more influence on the strength of weldlines for plastics injection molding. At last we make use of Signal-to-Noise (S/N) to

find out the combination of optimization of processing parameters. In injection molding, we choose the combination we gained from Signal-to-Noise (S/N) for every segment of injection.

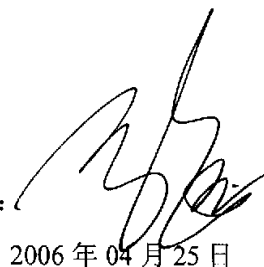
- (4) The material we used is acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) that falls into amorphous polymer. Also we use Taguchi DOE to find out which processing parameters have more influence on the strength of weldlines in molding and make use of Signal-to-Noise (S/N) to find out the combination of optimization of processing parameters.
- (5) Constitute the hypothesis of accumulation like sector near gate and draw the simulation graphs of different melt injection speed.

Key words: Weldlines, Optimization of Processing Parameters, Injection Molding, Simulation

郑 重 声 明

本人的学位论文是在导师指导下独立撰写并完成的，学位论文没有剽窃、抄袭等违反学术道德、学术规范的侵权行为，否则，本人愿意承担由此产生的一切法律责任和法律后果，特此郑重声明。

学位论文作者（签名）：



2006年04月25日

第一章 绪论

1.1 选题背景

随着各行各业的快速发展，聚合物材料制品已被广泛地应用于生产、生活的各个方面，而注射成型方法是塑料产品的一种很重要的成型方法，特别是在电器、电子工业和汽车制造业中，应用尤其广泛。但是注射成型有它自身无法克服的缺点，那就是当制件较大时需要多浇口或者由于嵌件、空洞、壁厚的变化而引起熔体分开再汇合时形成的熔接线或熔合线，由于熔接线是无法消除的，我们只能将它置于制件不重要的部位或选择好合适的材料、设计好制件的模具、改变各种工艺条件来使得损失减少到最少。因此，近些年来，对注塑制品熔接线的分析得到了普遍的关注，这一方面是由于大型复杂制件的逐渐增多，另一方面是人们对制品的外观和内在性能要求越来越高。

熔接线现象并非注塑成型特有，其他的塑料成型加工中如反应注射、吹塑、压铸等也会遇到熔接线问题。熔接线的存在不仅影响到制品的外观质量，而且对制品的力学性能（强度和刚度）影响很大。特别是对于多相材料，如纤维增强材料、多相共混聚合物等的影响更为明显。同时成型工艺条件对熔接线的性能影响巨大，在不同的工艺条件下，熔接线影响区的强度可以处于 10%-90% 的原始材料强度^[1]。

1.2 国内外研究概况

熔接线的研究正日益受到人们的重视，特别是国外在这方面研究得多，他们从各个方面对熔接线进行了研究。JIN KON KIM^[2]等对 PBT 熔接线进行了研究，他们发现 PBT 的最大拉伸应力并没有受到熔接线的影响；而纤维增强的 PBT 最大拉伸应力和伸长率都强烈的受到熔接线的影响，含有熔接线的拉伸强度只有不含有熔接线强度的一半。Tomari^[3]PS 熔接线试样研究发现，在熔接线的表面两侧有 0.2mm-0.3mm 的不良结合层。Mielewski^[4]对 PP（含有抑制酚类抗氧剂）熔接线形态进行了研究，发现由于添加剂少量或根本不溶于基体中，当两股熔体会合时，

熔体的喷泉流动使添加剂积聚在熔接处，并且绝大部分聚集在熔接缝区约 100mm 宽的范围内，引起熔接线的强度显著降低，但试样表面打磨 0.01-0.02mm 后，熔接缝的冲击强度有很大提高。Fellah^[5-6]研究了 HDPE/PA6 混合物熔接线结构，发现在熔接区域有很多好的细小分散相，同时也发现熔接区域的厚度大约是表层的 2 倍，由此他们推断出熔接线是熔接前沿熔体会合的结果。Son^[7]研究了 PS、PPO、PA 混合物的熔接线的形态，虽然混合物中有三种组分，但由于 PS 和 PPO 的互容性很好，所以混合物是两相的，PS 和 PPO 形成一个分散相，PA 形成基相，他们研究了两种混合物，每种包含 20%WT 的分散相和 80%WT 的母相，这两种混合物的不同在于分散相不同：一种是 90%WT 和 10%的 PPO，它的粘度低，形成低粘度聚合物。另一种是 10%WT 的 PS 和 90%WT 的 PPO，它的粘度高，形成高粘度聚合物，对于低粘度聚合物，从 V 型缺口到制件中心，存在有一层明显的熔接层，在熔接层中，可以观测到细小的分散相球状颗粒，它的形成是由于在流动前沿的拉伸流动中分散相强烈的变形以致于解体而形成的，在厚度方向上，靠近 V 型缺口的颗粒变形，在高注射速率和低注射温度下，接触层更明显。对于高粘度聚合物，在低粘度聚合物中细小分散粒子没有发现，只是在靠近制件表层处有一点轻微的变形，认为熔接线形态主要是由于分散相的变形、解体、松弛而形成的。

对于纤维增强注射成型制品，在熔接线区域，在整个厚度方向上，纤维取向几乎平行于熔接线方向，而在中心，纤维取向垂直于流动方向，中心层的比例随制品的厚度增加而增加。纤维取向与分子取向一样，是剪切流动和拉伸流动共同作用的结果。充模中，由于表层较高的剪切速率引起纤维沿流动排列，在中心层由于熔体前沿的泉涌效应取向垂直与流动方向（图 1.1）。

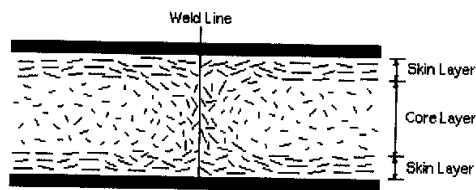


图 1.1 纤维增强注塑熔接线区域的纤维取向
Fig.1.1 Fiber distribution parallel to the weldline

Meddad^[8]对玻璃纤维增强的 PA66 中的熔接线研究中发现，在大约占厚度的 10%的中心层，纤维取向接近于垂直到流动方向，在大约 150 μ m 厚的表层，纤维取

向是随机的；而在表层和中心层之间大约占厚度的 80% 的中间层，纤维取向平行于流动方向。随着纤维含量的增加，熔接线的宽度也增加，但厚度的增加与纤维含量关系不大。而在熔接线的过渡区，纤维取向变化很快，纤维中的一部分实际上是弯曲的，这使制品中产生了微空洞，虽然微空洞所占的体积很少（大约 1%），但他们对熔接线力学性能影响很大。Fisa^[9]研究了玻璃纤维增强的聚丙烯的注射模的熔接线，他们用 SEM 观测到可见光中，熔接线好像一个区域有几个毫米透明度不如试样的其它部分，它的宽度不随纤维含量或嵌件的距离而变化，而依赖于腔的厚度和嵌件直径，在最薄的腔中发现最宽的熔接线区域，熔接线宽度随嵌件直径增大而增大。在板状模型中，在熔接线区域沿整个厚度方向上，纤维几乎取向平行于流动方向（和熔接线方向），离开熔接线，可以看到表层——中心结构，在这种情况下，表层纤维取向平行于流动方向，而在中心，纤维取向垂直于流动方向，中心层的比例随板的厚度增加而增加。

凡影响分子链缠结、结晶取向和分子热作用的因素都会影响到熔接线的强度。这些因素都和熔接线形成过程中分子活性有关，依赖于材料特征和工艺条件，材料特征主要包括松弛时间、结晶形貌等，而工艺条件包括注射速度、模具温度、熔体温度、压力等。而这些因素又是相互耦合和相互作用的，特别是对于不同的材料，这些作用机理又不尽相同，我们往往无法判定起决定性作用的影响因素。

从材料本身的松弛时间，黏度，取向，分子量分布等方面来考虑选择合适的材料。松弛时间对分子链段的缠结起很重要的作用，在缠结过程中，松弛时间相对短的聚合物能得到比较好的缠结，如 PC 的松弛时间一般比 PS 的短得多；而相对分子质量较低的高分子化合物有利于取向，也容易解取向，结晶型高分子取向结构稳定性优于无定型高分子，复杂结构的高分子化合物取向较难，但是解取向也难；对于结晶型，半结晶型聚合物，熔接线处的熔接强度还与结晶度有关，既与晶粒大小和晶粒的分布有关，小的晶粒且分布均匀会表现出较好地机械性能。Pispati^[10]通过对不同分子量 PS 熔接线试样的研究，利用应力松弛时间和再缠结时间来表达熔接线强度。Kim^[11]采用 Gibbs 自由能观点描述了熔接线处的宏观性质，认为熔接处的链接强度于分子穿越界面的密度成正比，基于扩散模型对熔接线进行了研究，并开发了关于无定型聚合物分子链的熔接线强度理论模型，

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_b} = 1 - \exp\left[-\frac{CD}{\kappa T} \left(2\gamma - \frac{0.98}{\sqrt{2}} \kappa T \delta n_0 \delta x\right) t\right] \quad (1.1)$$

$$D = \frac{G_0}{135} \left(\rho \frac{RT}{G_0} \right)^2 \cdot \frac{R_e^2}{M_w} \cdot \frac{M_{cr}}{M_w^2 \eta_{0,cr}} \quad (1.2)$$

其中, σ_w, σ_0 为具有熔接线和无熔接线时的强度, C 为熔接系数, D 为自扩散系数, κ 为 Boltzmann 常数, γ 为表面张力, δx_0 为扩散厚度, δn_0 为单位体积中的晶格数, $\rho, R, R_e^2, M_{cr}, M_w, G_0, \eta_{0,cr}$ 分别为密度、通用气体常数、均方端距、临界分子量、平均分子量、平稳模量以及临界分子量时的零剪切黏度。该模型假定熔接线处的分子扩散只是一种单纯的分子跨越界面的扩散, 界面由一个充分熔接区和一个非熔接区构成, 熔接线强度以熔接度表示。如果已知材料参数、成型条件、熔体温度, 很快就会预测出粘结度。在此基础上, Mekhilef^[12]对 PC/PE 混合物熔接缝的强度进行计算, 分别建立了 PC-PC, PE-PE, PC-PE 两个自扩散系数和一个互扩散系数, 建立了不相混聚合物熔接线强度随接触时间和熔体温度变化的理论预测模型。扩散模型包含过多的材料参数, 限制了它的使用, 特别是它没有考虑到材料常数随材料相态的变化。Hamada^[13]提出了“熔接线指数(weldline index)”的概念, 它是基于材料的黏弹性性质, 并利用松弛时间作为黏弹性质的表征。

从工艺条件考虑, 影响熔接线处强度的工艺参数主要包括熔体温度, 模具温度, 注射压力, 和注射速度等。由于高分子运动强烈地依赖于温度, 升高温度能加速高分子的运动和松弛过程, 加速分子扩散和缠结, 同时使材料的黏度降低, 从而使分子链有较好的缠结, 提高熔接处的强度; 较高的模具温度能保证熔体在凝固以前不至于冷却得太快而有较充足的缠结, 能使熔接处强度提高, 对于结晶型聚合物来说, 它的影响更大, 因为在半结晶型, 结晶型聚合物中, 聚合物形态不只依赖于取向, 还取决于结晶程度, 而结晶程度又依赖于冷却速率; 高的注射压力和保压压力能使熔接线处材料更进一步压实, 能增加熔接处的强度, 对于某些聚合物像聚碳酸酯, 聚砜等, 高的注射压力能降低流动温度, 从而提高熔接强度; 应尽可能快的充模以便熔体前沿的冷却降到最低, 因为一旦熔体进入型腔中, 它便开始冷却, 当温度下降时, 在分子水平上愈合熔接区域将变得更加困难。Malguarnera^[14]考察了熔体温度、模具温度、注射速率、注射压力对一般商用 PS、耐冲击 PS、PP 等热塑性塑料熔接线拉伸强度的影响, 认为对于玻璃化聚合物和表现出屈服的无定型聚合物, 熔体温度和模具温度是影响熔接线拉伸屈服强度的主要因素, 而注射速率和注射压力影响不大, Malguarnera^[15]观察了 4 种 PP 树脂

熔接区域的微观结构，同时还考虑了制件的冷却和退火对熔接线强度的影响，发现提高熔体温度和模具温度可以改善熔接线屈服强度，提高注射速度尽管也可以改善熔接线熔接线屈服强度，但影响程度要比熔体温度和模具温度小得多，而冷却速率对熔接线性性能影响不大。Selden^[16]对 PA6(35%玻纤)、PPS(40%玻纤)、PP(40%滑石粉)、PPO 和 ABS 等五种材料在不同的：保压压力、注射速度、熔体温度和模具温度下的进行了弯曲、拉伸和冲击测试，发现对于不同的材料和不同的工艺条件，冷熔接线强度的变化范围为 25%~98%，而热熔接线强度的变化范围为 90%~100%，甚至超过无熔接线时的强度，这主要是由于强烈的各向异性所致。相同加工条件下，五种材料的各向异性程度各不相同。PPS 和 PA6 呈强烈的各向异性，沿流动方向上的强度是横向强度的 25~30 倍，PA 的横向强度甚至低于熔接缝的强度，ABS 和 PPO 的各向异性程度稍低，而 PP 几乎呈各向同性。概括起来说，提高熔体温度可以提高熔接线性性能，但有一个上限就是不能超过降解温度，另一个不利因素就是增加熔体温度势必增加成型周期。模具温度对熔接线的材料与材料有关，对于无定型聚合物，模具温度对熔接线的性能影响不大，甚至没有影响，而对于结晶性材料，熔接线的性能对模具温度非常敏感。Piccarolo^[17-18]等学者认为增加温度会增加熔接线强度，而有些研究者则得出了相反的结论，Worden^[19]，Wenig^[20]发现熔接线强度开始时随温度升高而增强，进一步升温则会下降。Titomanlio^[21]和 Piccarolo^[18]发现熔接线强度对注射时间（注射速度、注射体积流率、注射压力）的非常敏感，会随着注射时间的缩短而增强。Liu^[22]等采用 Taguchi 法对 PS 材料进行了实验，关注的工艺参数包括嵌件尺寸、注塑压力、熔体温度、保压压力、模具温度和注射速度，发现对熔接线强度影响最剧烈的因素是熔体温度，占到 67.46%，其次为模具温度和保压压力，分别占到 17.7%和 13.39%，而嵌件几何尺寸、注射压力以及注射速度的影响很小。Dairanich^[23]利用数值方法研究了黏度、密度、PVT 状态方程对熔接线的性能影响，黏度与熔接线强度之间的定量关系，以及用黏度来表征熔接线的强度。

目前主要通过两种途径来改善熔接线的性能，一是通过外部作用改善熔接线区域的混合状况如 Gardner^[24]和 Hallowell^[25]采用往复式钉销、Kazmer^[26]通过增加阀浇口来实现体积收缩动态控制；二是通过改变成型工艺条件和模具几何条件对熔接线性性能的影响。目前该领域国内外的研究仍面临一些共性的问题：熔体前沿“泉涌”流动的三维数值分析还不成熟；如何建立起熔接线强度与工艺条件（如

前沿熔体温度)的定量关系;如何建立起熔体前沿的宏观描述和微观结构的关系等。

1.3 论文的主要工作

本论文将主要讨论熔接线的形成机理、工艺参数、制品不同嵌件对熔接线性能的影响等。在数值模拟的基础上,预测在注塑成型中复杂的力场及热场作用下不同熔体前沿融合过程的动态变化规律和结构性能,结合实验验证讨论材料特征和工艺条件的变化对制品熔接线性能的影响,优化成型工艺条件以获取高性能的制品。主要工作包括:

- (1) 在分析了熔接线形成机理的基础上,首先设计了不同嵌件形状对熔接线形成过程的实验,并数值模拟了成型过程熔接线的形成过程。通过对于一些简单形状的嵌件如圆形、正方形、菱形等。结果表明,熔接过程类似于熔体的对接过程,熔接后熔体几乎将不再运动,泉涌引起的取向行为将无法松弛。
- (2) 一些稍微复杂的嵌件形状的变化将会在熔接区形成空洞,熔体也不会处于停止状态,这种行为将会有助于熔接线区域分子的穿越界面和分子的松弛,将极大的提高熔接线的强度。
- (3) 选用结晶高聚物 LDPE。通过 Taguchi DOE 方法来设计试验工艺参数(注射压力/熔体温度/保压压力/模具温度/注射速率),了解注塑成型过程中哪些工艺参数对熔接线强度有更大的影响;利用信噪比(S/N)找出最优组合。在实际生产中,注射的不同位置都采用信噪比(S/N)所找到的最优组合。
- (4) 选用非结晶高聚物 ABS。同样使用 Taguchi DOE 了解注塑成型过程中哪些工艺参数对熔接线强度有更大的影响;利用信噪比(S/N)找出最优组合。
- (5) 建立浇口附近扇形堆积物假设和不同注射速率下的模拟图形。

第二章 不同嵌件后的流动行为和熔接线形成

2.1 注塑制品熔接线的形成机理

在注塑成型过程中，当采用多浇口或型腔中存在孔洞、嵌件、以及制品厚度尺寸变化较大时，塑料熔体在模具内会发生两个方向以上的流动，当两股熔体相遇时，就会在制品中形成熔接线（weldline），并且熔接线现象并非注塑成型特有，其它的塑料成型中如反应注射、吹塑、压铸等也会遇到熔接线问题。尽管熔接线是在模具充填过程中形成的，但它们的结构、形状和性质与整个注塑成型过程相关。我们可以根据交汇角（图 2.1）把它们分为熔接线（weldline）和熔合痕（meldline）^[27]。按产生方式的不同，熔接线可分为热熔接线（hot weldline）和冷熔接线（cold weldline）^[28]。当注塑制品体积或尺寸比较大，为缩短注塑时间，常采用多注入的方式注入熔体，当两股面对面流动的熔体相遇后，不再产生新的流动，这时所产生的熔接线成为冷熔接线（图 2.2a）；当熔体流动中碰到障碍物（如嵌件）后分成两股或多股熔体，绕过障碍物，分开的熔体又重新汇合并继续流动，这时所形成的熔接线称热熔接线（图 2.2b）。

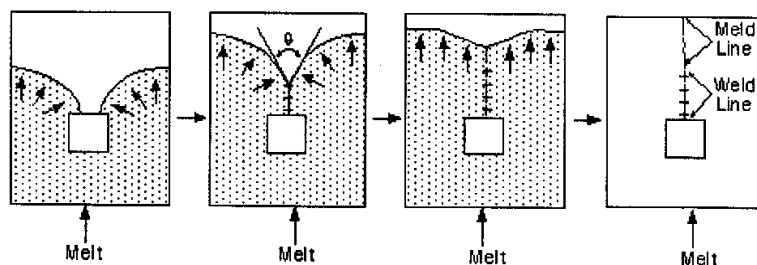


图 2.1 熔接线和熔合痕

Fig.2.1 Weld lines and Melt lines

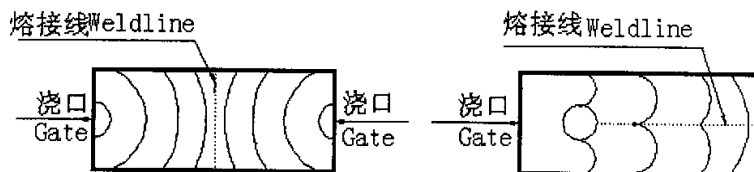


图 2.2 注射制品中的两种常见的熔接线

Fig.2.2 Two Common Cause of Weldline in Injection Molded Parts

我们说的熔接线，其实是一个区域，它的形态与基体不同，它的宽度有几个毫米，延伸到整个制品厚度，这取决于材料和熔接过程，影响熔接线有很多因素（图 2.3）。

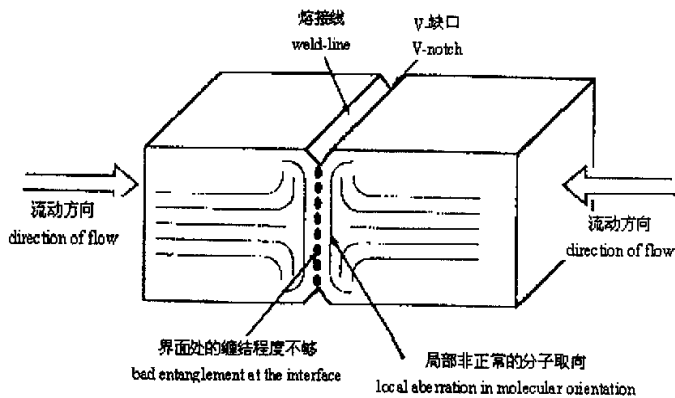


图 2.3 影响熔接线的主要因素

Fig. 2.3 The main factors affecting weld lines

熔接线的形成过程可以分成以下几个阶段：

- (1) 当两股熔体前沿尚未汇合以前（如图 2.4），熔体前沿的压力为零，而前沿的泉涌流动使熔体前沿的分子受到拉伸，前沿的分子链取向平行于流动方向。对于前沿的弧形表面，流动方向和分子取向沿自由表面的法向，它将会影响到界面融合后分子的扩散。同时，由于冷的模壁而形成的冷凝层中，取向被冻结而形成了各向异性结构。
- (2) 一旦熔体汇合（如图 2.5），熔体前沿的压力增加，流动停止，两个自由表面相互接触并发生非线性的粘弹性变形。
- (3) 由于扩散和分子运动，接触表面的分子链开始松弛、缠结和迁移，由于这种缠结和迁移的结果是为熔接线提供键接强度，因此熔接线熔体结合强度随着分子链的缠结程度的增加而增加。
- (4) 熔接处的取向由于受挤压作用而垂直于流动方向（如图 2.6）。
- (5) 在大多数情况下由于滞留在型腔中的空气或在充模过程中产生的挥发物来不及排出而往往会产生 V 型缺口（如图 2.7）。

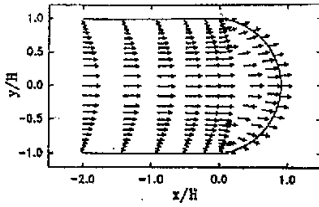


图 2.4 熔体流动前沿的泉涌流动
Fig.2.4 Fountain at melt front

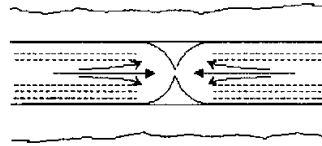


图 2.5 熔体流动前沿的相遇
Fig.2.5 The two melt front meeting

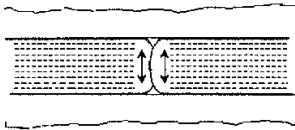


图 2.6 熔接线区域的分子取向

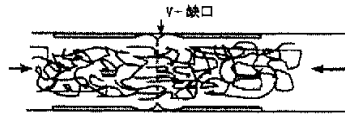


图 2.7 熔接线区域的 V 型缺口

Fig.2.6 The fiber or molecular orientation at weldline Fig.7 The V-notch at weldline

2.2 熔接线区域的流动行为实验与数值分析

上节主要讨论了熔接线的形成机理，在现有的文献中，大量的研究者在对熔接线的研究中，大多采用两点进胶的哑铃性（dumb-bell-shaped）试样来研究熔接线的性能。在这种情况下，两股相遇熔接后不再流动，或者说不再“愈合”（heal），熔体的泉涌现象和可能的温差流动形态下，熔接线的性能强烈与无熔接线性能不同。

但在实际的注塑生产中，这种熔接线出现的机会很少，大部分的熔接线现象都会出现在嵌件的后面（熔体分开和再熔接），在这种情况下，熔接后的熔体会在一定时间内保持熔态，并且可以进一步流动和愈合，熔接线区域的取向会比简单对接时复杂的多。熔接线区域的性能也表现出多样性，甚至可以想象熔接区域的强度会大于熔和区域。本节的主要工作就是利用数值模拟和具体实验相结合，研究不同模具型腔几何条件下相同工艺条件下熔接过程的流动形态。为此，我们设计了实验模具，实验研究了不同形状的嵌件所产生的熔接线对制件性能的影响，实验材料选用 LDPE，相应的工艺条件见表 1.1。

表 1.1 实验工艺条件

Table 1.1 The processing conditions in experiments

熔体温度 Melt Temperature(°C)	200
模具温度 Mold Temperature(°C)	50
注射流率 Injection rate(%)	80
保压压力 Packing Pressure(MPa)	50
保压时间 Packing Time(s)	10

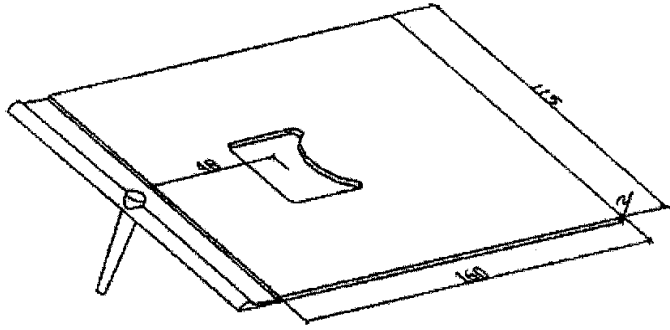


图 2.8 实验模具图
Fig.2.8 The experimental molder

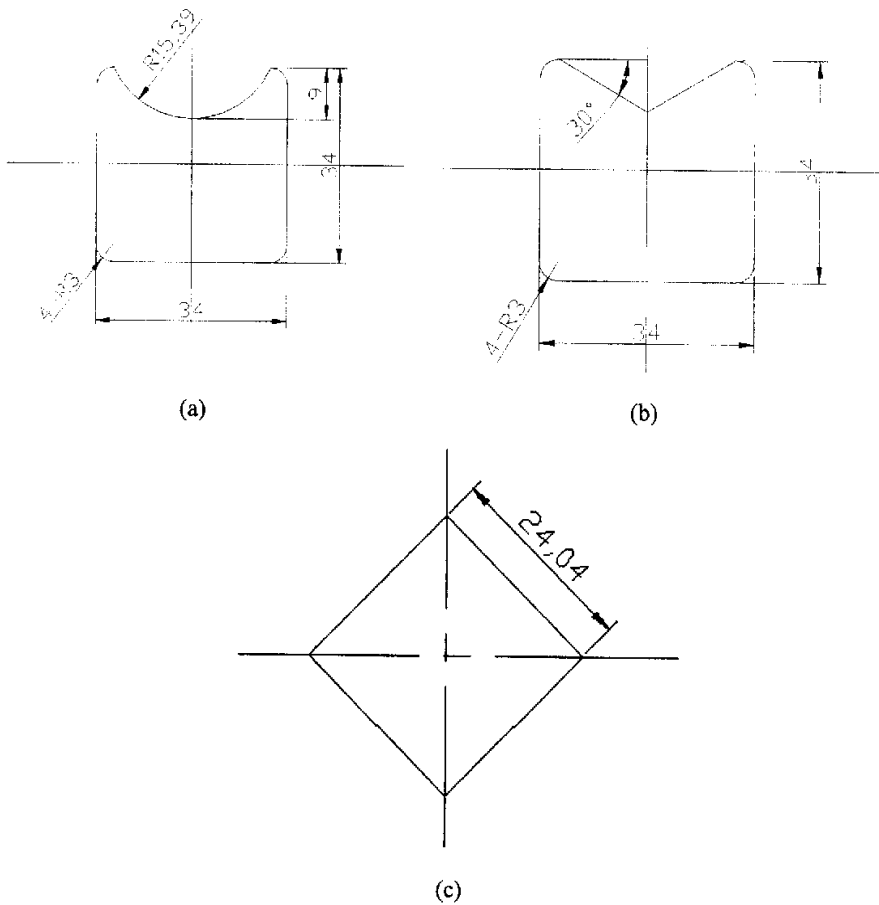


图 2.9 不同形状的嵌件
Fig. 2.9 The different shape of insert in molder

为了讨论熔接线区域的流动行为, 我们利用流动模拟程序(ZMOLD 软件)对不同实验工况下的成型过程进行了模拟, 塑料熔体在三维薄壁型腔内的流动属于带有运动表面的粘性不可压缩流体的流动, 可采用广义的 Hele—Shaw 流动模型来描述, 它们在三维空间的表达形式为:

$$\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) = 0 \quad (2.2)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial x} + u \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (2.3)$$

其中, u 、 v 是 x 、 y 方向的速度分量, P 、 T 、 ρ 、 C_p 、 η 分别是压力、温度、密度、比热和剪切粘度, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率。考虑到塑料熔体剪切变稀行为, 可采用与温度相关的 Cross 粘度模型[7]

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \frac{\eta_0(T)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau} \right)^{1-n}} \quad (2.4)$$

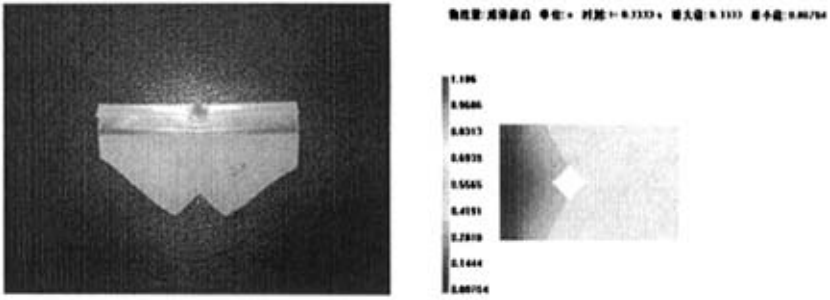
通过对方程(1)、(2)的积分并利用相应的边界条件可得到压力场求解的控制方程

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.5)$$

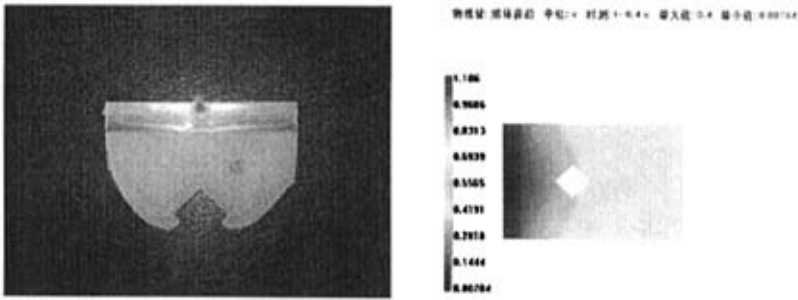
其中 $S = \int_0^b \frac{z^2}{\eta} dz$ 为流动率, b 是型腔半厚度。

为了处理任意三维空间中薄壁型腔流动状况, 沿用流动分析网络法(FAN)的基本思想, 利用控制体积法建立型腔面内压力场求解的有限元方程, 对时间和沿厚度方向差分建立温度场求解的差分方程, 耦合利用有限元/有限差分法求解, 并根据节点体积的充填状况更新流动前沿。通过流动模拟可以得到任意时刻模具型腔中熔体前沿的位置等值线图, 它准确而直观地给出了充模期间的整个流型, 以及压力、温度历史。

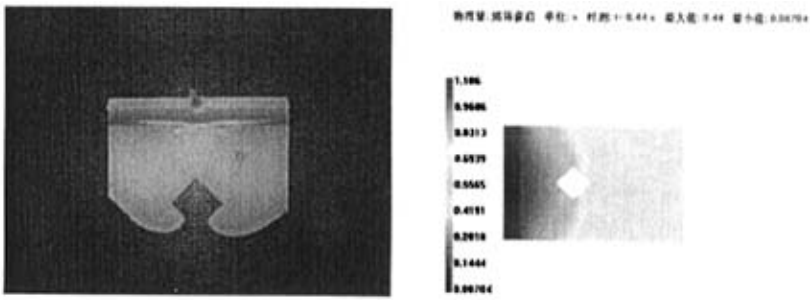
对于不同的嵌件形状, 利用缺料注射的方法得到了不同时刻的充填状态, 并利用 ZMOLD 软件分析了不同的工况。



(a) $t=0.33s$ 时的充填状况的实验与模拟图



(b) $t=0.4s$ 时的充填状况的实验与模拟图



(c) $t=0.44s$ 时的充填状况的实验与模拟图

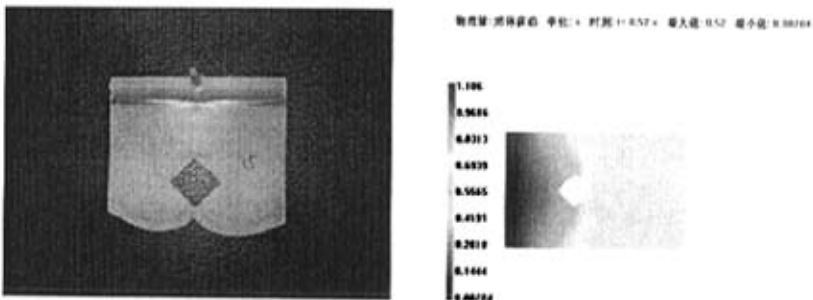


图 (d) $t=0.52s$ 时的充填状况的实验与模拟图

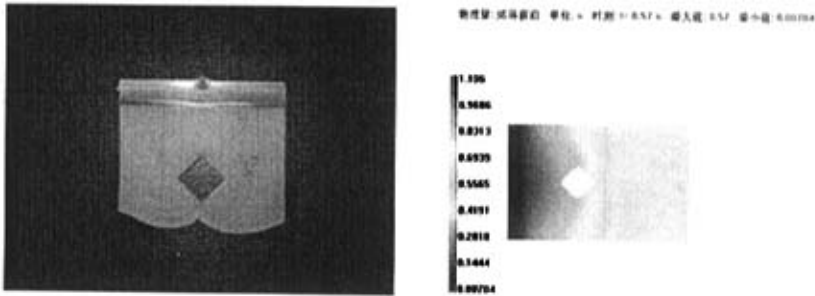


图 (e) $t=0.57s$ 时的充填状况的实验与模拟图

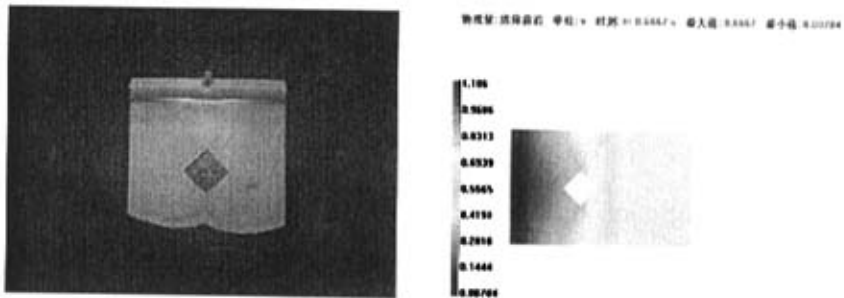


图 (f) $t=0.67s$ 时的充填状况的实验与模拟图

图 2.10 不同充填时刻的试验与模拟图

Fig.2.10 Picture of experiment and simulation at different time in filling

对于嵌件为菱形的制件，分别在 $t=0.33, 0.4, 0.44, 0.52, 0.57, 0.67s$ 六个阶段的充填状态和数值模拟结果，可以看到，菱形嵌件使得分割后的熔体沿菱形的边界往前充填，充填的弧度使得在 0.5 秒左右两股前沿的最低端最先熔接，从而不会出现空隙，熔接后的熔体几乎不再运动，熔接线的性能等同与冷熔接（哑铃式试样），从理论上讲，此处的熔接线强度会明显与无熔接线强度不同。在 0.5 秒后再经历 0.1-0.15s 后，熔体前沿重新呈现出典型的无嵌件时的流动形态，因此可以认为在 0.5-0.6s 时段内，嵌件后的状态仍处于熔接线区域，此后将处于熔和痕（melt line）区域，此区域的强度将优于熔接线区域。

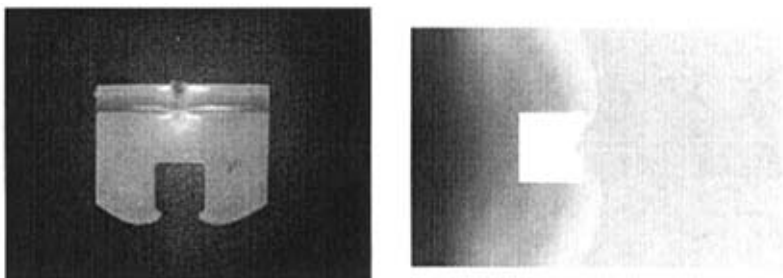


图 (a) $t=0.47s$ 时的充填状况的实验与模拟图

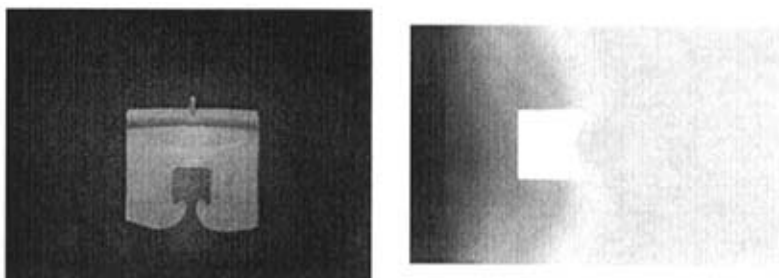


图 (b) $t=0.52s$ 时的充填状况的实验与模拟图

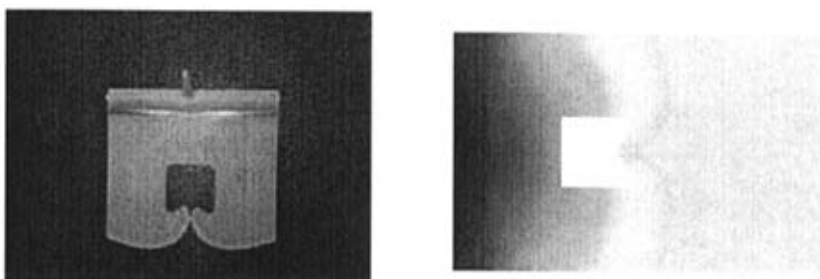


图 (c) $t=0.563s$ 时的充填状况的实验与模拟图

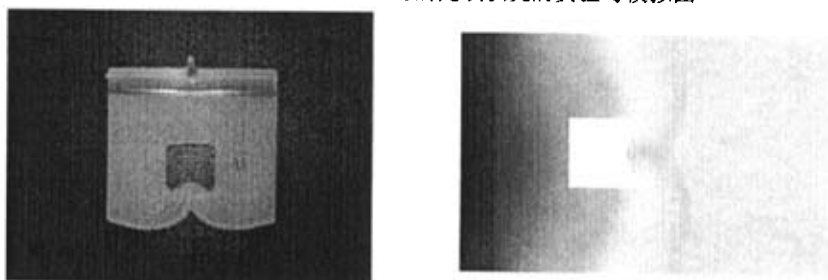


图 (d) $t=0.6s$ 时的充填状况的实验与模拟图

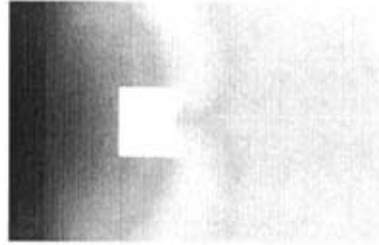


图 (e) $t=0.65\text{s}$ 时的充填状况的实验与模拟图

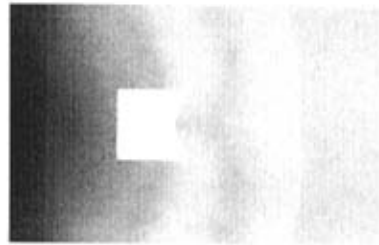
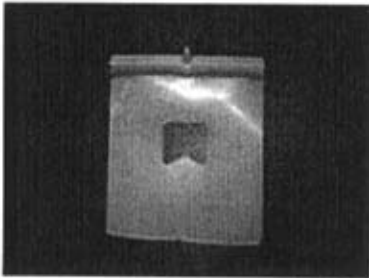


图 (f) $t=0.8\text{s}$ 时的充填状况的实验与模拟图

图 2.11 不同充填时刻的试验与模拟图

Fig.2.11 Picture of experiment and simulation at different time in filling

对于嵌件为方形和三角形的制件，分别在 $t=0.47, 0.52, 0.56, 0.6, 0.65, 0.8\text{s}$ 六个阶段的充填状态和数值模拟结果，可以看到，由于三角形的存在，沿三角形的边界，熔体前沿呈弧状，在 0.56s 时首先在三角形的中间先熔接，从而在底部会形成一个空洞，熔接后的熔体的流动行为将非常复杂，在两股熔体第一次相遇后，相遇点的上和下流动完全不同，下面的熔体将停止流动或缓慢流动（可以看到直到 0.8s 时，嵌件区域才完全呈三角形），而上面的熔体将随着充填过程继续流动，流动方向也逐渐改变为充填方向。

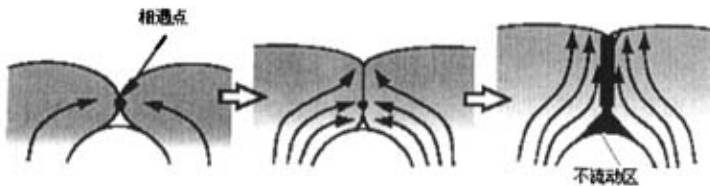


图 2.12 拉伸强度随熔接角的变化

Fig. 2.12 The flow pattern at weld line area

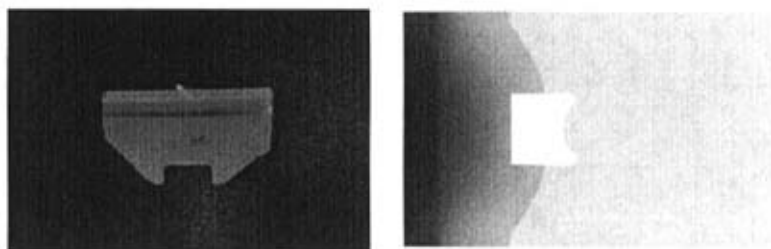


图 (a) $t=0.34s$ 时的充填状况的实验与模拟图

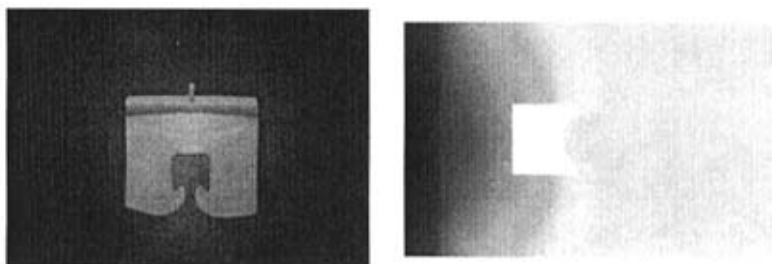


图 (b) $t=0.52s$ 时的充填状况的实验与模拟图

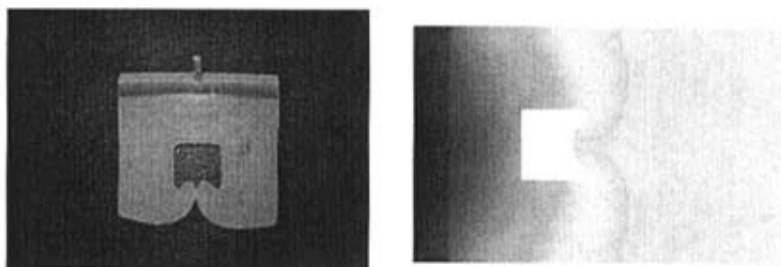


图 (c) $t=0.56s$ 时的充填状况的实验与模拟图

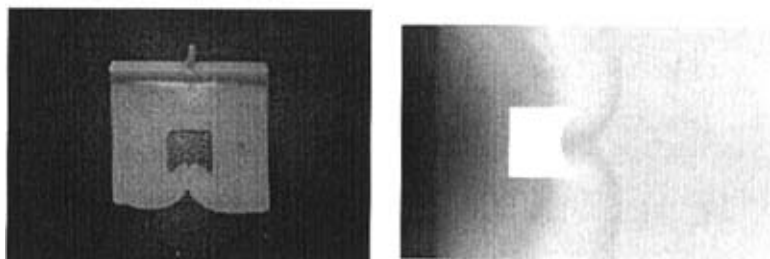


图 (d) $t=0.58s$ 时的充填状况的实验与模拟图

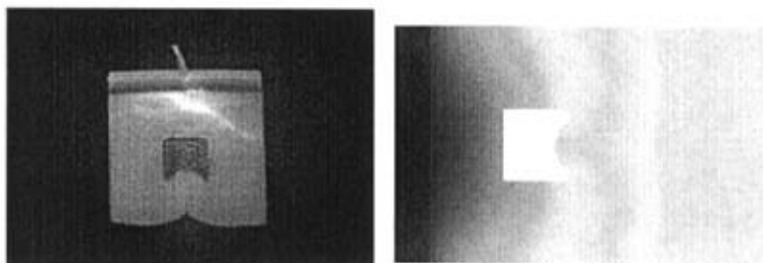


图 (e) $t=0.72s$ 时的充填状况的实验与模拟图

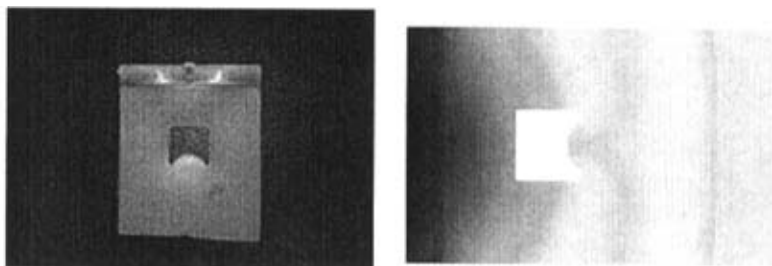


图 (f) $t=0.86s$ 时的充填状况的实验与模拟图

图 2.13 不同充填时刻的试验与模拟图

Fig.2.13 Picture of experiment and simulation at different time in filling

对于嵌件为方形和圆弧的制件，分别在 $t=0.34, 0.52, 0.56, 0.58, 0.72, 0.86s$ 六个阶段的充填状态和数值模拟结果，可以看到，结果与方形和三角形嵌件非常相似，沿圆弧的边界，熔体前沿呈弧状，在 $0.56s$ 时首先在圆弧的中间先熔接，从而在底部会形成一个空洞，与三角形相比，此时的空洞更大，空洞最终的弥和时间更长（ $0.72s$ 时仍有空洞的存在）。

通过这些实验和数值分析，可以发现，嵌件形状的变化所形成的空洞，将导致在熔接线区域的起点处流动行为将非常复杂，熔体也不会处于停止状态，这种行为将会有助于熔接线区域分子穿越界面和分子的松弛，将极大的提高熔接线的强度。

第三章 结晶高聚物熔接线分析研究

注塑成型中,熔接线强度强烈依赖于熔体充填过程,熔接线的存在明显降低注塑制品的力学性能和表观质量。粗糙的工艺参数制定,不合理的制品设计,即使性能再优良的高分子材料,也很难生产出有实际用处的合格产品。尤其当塑料制品作为工程件,需要承受较大的作用力时,作为工程技术人员,我们更应该考虑熔接线对力学性能的影响。一些学者指出^[29-32],熔接线强度的降低主要归因于分子形态结构的改变,局部的分子取向和表面缺陷的存在。熔接线不但影响外观,而且为应力集中区。但是完全让熔接线消失不存在总是不可能,它们在制品力学性能以及表观质量的负面影响只能有所削弱。而这可以通过两种方法实现:(a)试验和误差分析(b)模型预测^[33]。第一种方法包括工艺参数调整和修改模具直到熔接线的影响最小。第二种方法利用数学模型预测工艺参数和实际模具对熔接线的影响,从而找到最优的条件使之影响最小。我们希望通过两种方法的协同使用,互为补充,共同优化工艺参数。同时,从得到的试验数据结合一定的理论和实践,更深刻理解高分子熔体流动过程中在不同位置的不同形态结构。当我们实际生产时,结合制品的不同位置而进行有目的性的工艺参数优化。

除了工艺条件和熔接行为外,材料对熔接线性能影响也很大,材料的不同对熔接性能有很大的影响,按材料性质的不同可以将塑料分为三类^[34]:①无定型脆性聚合物,如PS、PVC、SAN等这类塑料,熔接线对制件的性能影响剧烈;②无定型韧性聚合物,如PC、ABS等,这类塑料的熔接线对塑件损害小,在最有利成型条件下,熔接线对制件的损害可以忽略;③半结晶型聚合物,如PA、POM、PP、热塑性聚脂PET、PBT等,这类塑料的熔接线对塑件的强度损害也比较小。

下面分别对于结晶高聚物LDPE和无定形高聚物ABS开展研究,讨论工艺条件和模具设计对熔接线性能的影响。

3.1 模具设计

大多数文献采用对立两浇口哑铃型试样进行熔接线强度测试,两个浇口处于试样的两端,利用不同浇口产生两股对立的塑料熔体,然后相撞而形成熔接线。

通过上面熔接线分类介绍，我们知道由对立的两个浇口形成的熔接线为“冷”熔接线，而由嵌件等形成的熔接线叫做“热”熔接线。“热”熔接线拉伸强度较“冷”熔接线拉伸强度高^[36-37]。本论文采用平板模具扁平浇口，利用嵌件使塑料熔体分割后再次融合而产生熔接线。同时在嵌件后面不同位置截取哑铃型试样，分析不同工艺参数对嵌件后不同位置熔接线强度的影响。文献指出，在嵌件之后的试样，其强度随着距离嵌件的不同位置而改变，距离嵌件越远，其强度越大，因为随着熔体的不断向前填充，熔接线界面的分子不断的松弛、渗透、穿越，熔体好像没有被嵌件分开，熔接线也好像消失了。从而使抗张强度不断增加，但总体强度不会超过嵌件之前试样的抗张强度^[38-41]。本论文通过 Taguchi DOE 方法发现，对于结晶高聚物和无定形高聚物，在嵌件之后的熔接线强度随距离并不是单纯降低或升高。结晶高聚物 LDPE 随距离的增加，强度反而下降；无定形高聚物 ABS 随距离的增加，强度先增大后降低。制品形状及试样截取位置如图 3.1：

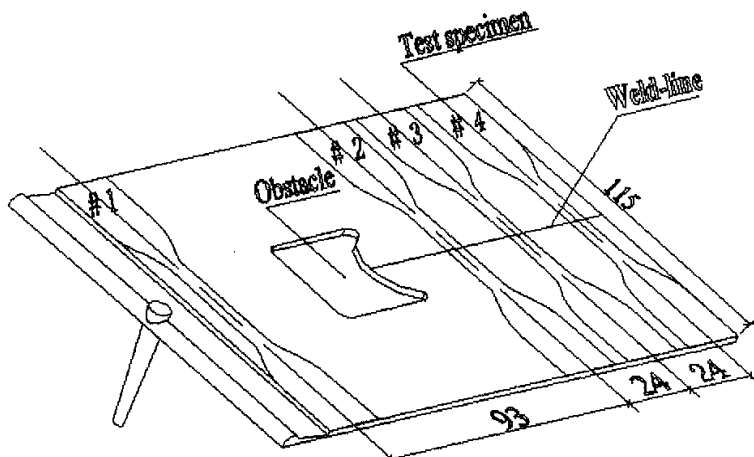


图 3.1 制品以及试样截取位置(单位: mm)

Fig.3.1 Filled article and location of tested bars (unit: mm)

制品流道和浇口尺寸如图 3.2:



图 3.2 制品流道和浇口尺寸

Fig.3.2 Dimension of runner and gate of part

3.2 试验设计

在实际注塑生产过程中，影响熔接线的工艺参数众多，注射压力、熔体温度、保压压力、模具温度、注射速率以及嵌件形状都对熔接线的力学性能造成影响。如何在众多影响因素中找出主影响因子，次影响因子，以及在此基础上的工艺参数优化。我们在寻找主次影响因子和工艺参数优化的过程中，都需要事先做大量试验，而试验总要花费时间，消耗人力物力，因此人们总希望做试验的次数尽量少，而得到的结果尽可能好，要达到这个目的，就必须事先对试验作合理的安排，也就是要进行试验设计。本论文采用 Taguchi DOE 方法，利用 6 因素 3 水平正交表进行试验。同时采用信噪比 (S/N) 作为工艺优化的分析方法^[42]。信噪比的概念首先是在无线电通信中提出来的，而在试验设计中采用信噪比是由田口玄一于 1957 年提出的，它可以解决许多不同特征值的综合功能评价问题。

注塑机采用广东顺德震得塑料机械有限公司生产的 CJ80-E，拉伸试验是在 Instron 5585 落地型全数字化控制电子万能材料试验机上进行的，试验标准采用 ASTM-D638，拉伸速率为 50mm/min. 具体试样尺寸大小如图 3.3。

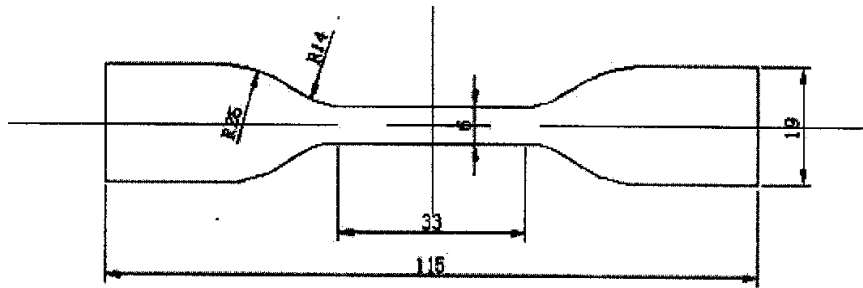


图 3.3 试样尺寸
Fig. 3.3 Dimension of tested bar

3.3 Taguchi DOE 分析

结晶高聚物我们选用 LDPE，具体工艺参数如表 3.1：

表 3.1: 试验中的所选的因素和水平

Table 3.1 Factors and levels selected in the main experiment

因素 位 级	注射压力 / MPa	熔体温度 /°C	保压压力 /MPa	模具温度 /°C	注射速率 / %
1	60	190	40	40	70
2	70	200	50	50	80
3	80	210	60	60	90

试验按 Taguchi DOE 分为 18 组，每一组试验从平板制品不同位置截取 4 个试样。最大拉伸应力对比如图 3.4, 3.5 所示，

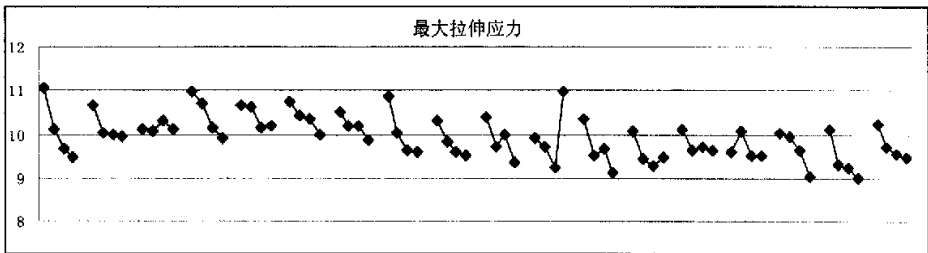


图 3.4 不同组不同位置拉伸强度对比

Fig.3.4 Tensile strength at different location of every team

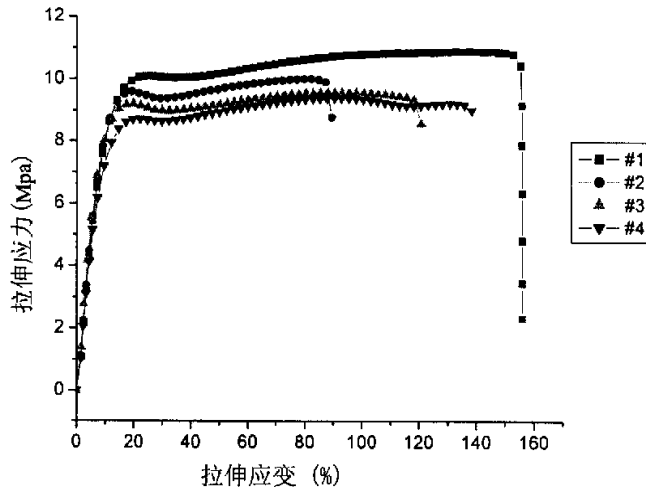


图 3.5 同组不同位置拉伸强度对比

Fig.3.5 Tensile strength at different location one of team

根据图 3.4, 3.5, 我们看出:

- 含有熔接线试样的抗张强度都比不含有熔接线试样的抗张强度低。
- 在嵌件之后熔接线抗张强度随距离增加而降低。
- 不含有熔接线试样的伸长率比含有熔接线试样的伸长率高。

对于结晶高聚物，力学性能主要受到结晶度高低以及结晶尺寸大小的影响。通常将高分子在等温条件下的结晶称为静态结晶过程。但实际上高分子加工过程大多数情况下结晶都不是等温的，而且熔体还要受到外力的作用，产生流动和取向等。这些因素都会影响结晶过程。温度是高分子结晶过程中最敏感的因素，过冷度愈大，结晶时间愈短，结晶度降低，并使达到最大结晶度的温度下降。熔化温度与在该温度的停留时间会影响聚合物中可能残存的微小有序区域或晶核的数量。高分子在纺丝、薄膜拉伸、注射、挤出、模压和压延等成型加工过程中受到高应力作用时，有加速结晶作用的倾向。这是应力作用下高分子熔体取向产生了诱发成核作用所致，使晶核生成时间大大缩短，晶核数量增加，以致结晶速度增加。应力对晶体结构和形态也有影响。在剪切或拉伸应力作用下，熔体中往往生成一长串的纤维状晶体，随应力或应变速率增大，晶体中伸直链含量增多，晶体熔点升高。压力也能影响球晶的大小和形状，低压下能生成大而完整的球晶，高压下则生成小而形状很规则的球晶。结晶过程分子链的敛集作用使高分子体积收缩、比容减小和密度增加，密度增大意味着分子链之间引力增加，所以结晶高分子的力学性能、热性能和化学稳定性等相应提高。

LDPE 的玻璃化温度是 $-120^{\circ}\text{C} \sim -125^{\circ}\text{C}$ ^[43]，而拉伸试验温度为室温 25°C ，在该温度下，LDPE 处于玻璃化温度以上，其非晶区处于橡胶态，结晶度的增加使分子间的作用力增加，因而抗张强度提高。LDPE 是结晶高聚物，熔接线区域的结晶度由于两股熔体再次融合存在的界面原因较其他部分有所降低；同时熔接线区域分子取向更大，各向异性更强，垂直于熔接线方向的抗张强度增加，而平行于熔接线方向抗张强度降低。所以含有熔接线的试样较不含有熔接线的试样，在抗张强度上都降低。至于在嵌件之后熔接线抗张强度随距离增加而降低，这是因为试样#2 正好处于两股料流相撞区域，更有利于分子在界面间的穿越、渗透，同时随着后面熔接线的形成，在此之前的熔接线区域界面分子可以有充分的时间松弛。试样#4 位置的熔接线区域界面分子拥有最少的松弛时间，因而抗张强度最低。

下面，我们对不同的位置进行 Taguchi DOE 分析，具体分析如下：

表 3.2 试样 #1 的拉伸强度

Table 3.2 Tensile strength at #1 in the main experiment

标示 序号	注射压力 /Mpa	熔体温度 /°C	保压压力 /Mpa	模具温度 /°C	注射速率 /%	空列	实验结果 /Mpa
1	1	1	1	1	1	1	11.069
2	1	2	2	2	2	2	10.660
3	1	3	3	3	3	3	10.096
4	2	1	1	2	2	3	10.972
5	2	2	2	3	3	1	10.671
6	2	3	3	1	1	2	10.736
7	3	1	2	1	3	3	10.490
8	3	2	3	2	1	1	10.868
9	3	3	1	3	2	2	10.311
10	1	1	3	3	2	1	10.387
11	1	2	1	1	3	2	9.917
12	1	3	2	2	1	3	10.318
13	2	1	2	3	1	2	10.073
14	2	2	3	1	2	3	10.118
15	2	3	1	2	3	1	9.589
16	3	1	3	2	3	2	10.004
17	3	2	1	3	1	3	10.112
18	3	3	2	1	2	1	10.218
1 位级和	62.448	62.996	61.970	62.548	63.178		
2 位级和	62.160	62.347	62.431	62.412	62.667		
3 位级和	62.003	61.268	62.210	61.651	60.767		
极 差	0.445	1.727	0.461	0.897	2.411		

Taguchi DOE 分析结果表明:

嵌件之前没有熔接线试样的力学性能主要与注射速率有关。高聚物 LDPE 的熔体流动行为表现为假塑性——流体的表观粘度随剪切速率的增加而降低，而且 LDPE 高分子链是柔性链，相对于温度对粘度的影响来说，LDPE 的粘度对剪切速率更加敏感。本模具采用扁平浇口，熔体通过仅有 0.6mm 厚的浇口时会受到比较强的剪切作用力。当注射速率较大时，由于 LDPE 的流动性非常好，又受到较强的剪切，熔体粘度进一步降低，熔体将会冲出主流道附近的扁平浇口流向模具型腔，由于模具冷却系统的冷却，在模具型腔中形成扇形堆积物，增大了主流道附近熔体向塑料制品流动的阻力。从而使熔体料流沿分流道向两端流动，当注射压力增加时，在分流道全部填充完毕后，熔体才会在注射压力下从整个扁平浇口填充制品。此种情况下，由于较大的注射速率而在模具型腔内形成的扇形堆积物，它处于料流前端，温度较低，同时最先进入型腔中受到较强的冷却，形成较厚的冷凝

层，在此后的注射填充过程中，冷凝层附近的分子受到最大的剪切作用力。当制品完全定型时，受到高剪切作用力的分子来不及完全松弛，因而此处的残余应力最大。

下面我们利用 PS 进行短射试验，来进一步论证扇形堆积物的存在。图 3.6，3.7，3.8 中所示 I、II、III 注射速率是由大到小的。我们可以看出注射速率大形成的扇形堆积物就越大；注射速率小，则熔体是先充满分流道，然后推动熔体一起向型腔填充，基本没有扇形堆积物的存在。

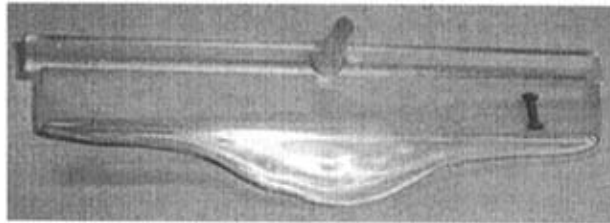


图 3.6 高注射速率下注塑成型

Fig.3.6 Injection molding at high melt injection speed

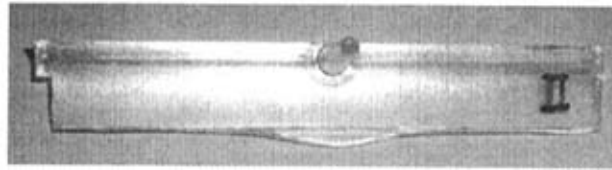


图 3.7 高注射速率下注塑成型

Fig.3.7 Injection molding at middle melt injection speed

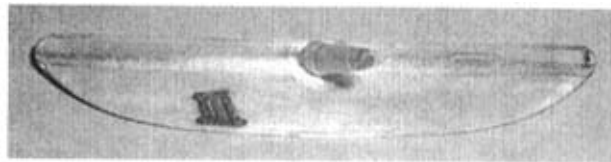


图 3.8 高注射速率下注塑成型

Fig.3.8 Injection molding at low melt injection speed

对于结晶聚合物 LDPE 来说，其结晶度也会随着低结晶温度和高冷却速率而降低，而取样时扇形堆积物刚好处于试样 #1 中间。因此在高的注射速率注射成型中，试样 #1 的力学性能有所降低。相反，以较低的注射速率注射成型时，熔体通过主流道附近的扁平浇口时没有因受到较大的剪切速率而变稀，由于模具的冷却而凝固，从而增大该处的流动阻力，使得熔体先沿着分流道充满整个分流道，随着注射压力的增大，熔体将沿整个扁平浇口向模腔填充。试样 #1 的力学性能和整体制品的力学性能一样。同时我们从上表 DOE 分析中可以看出三种注射速率

下的平均拉伸强度分别是：10.53Mpa，10.44Mpa，10.13Mpa。试验数据表明注射速率大，平均拉伸强度低。这进一步印证了我们的理论分析。

其次与熔体温度有关。本试验熔体温度采用的三水平分别是 190℃，200℃，210℃。在这三种不同温度下试样平均拉伸强度分别是 10.50Mpa，10.40Mpa，10.21Mpa。随着加工温度的提高，试样拉伸强度反而降低。加工温度高，高分子中原有的结晶结构破坏愈多，残存的晶核愈少。在熔融温度低和熔融时间短，则体系中存在的晶核将引起异相成核作用，故结晶速度快，结晶尺寸小而均匀，并有利于提高制品的力学强度、耐磨性和热畸变温度。

同时我们后面利用 CAE 分析软件，以不同的注射速率进行流动模拟，进一步了解高分子在该处的形态结构。

表 3.3 试样#2 的拉伸强度
Table3.3 Tensile strength at #2 in the main experiment

标示 序号	注射压力 / Mpa	熔体温度 /℃	保压压力 /Mpa	模具温度 /℃	注射速率 / %	空列	实验结果 / Mpa
1	1	1	1	1	1	1	10.116
2	1	2	2	2	2	2	10.015
3	1	3	3	3	3	3	10.051
4	2	1	1	2	2	3	10.688
5	2	2	2	3	3	1	10.628
6	2	3	3	1	1	2	10.420
7	3	1	2	1	3	3	10.179
8	3	2	3	2	1	1	10.010
9	3	3	1	3	2	2	9.823
10	1	1	3	3	2	1	9.688
11	1	2	1	1	3	2	9.686
12	1	3	2	2	1	3	9.514
13	2	1	2	3	1	2	9.440
14	2	2	3	1	2	3	9.632
15	2	3	1	2	3	1	10.067
16	3	1	3	2	3	2	9.941
17	3	2	1	3	1	3	9.320
18	3	3	2	1	2	1	9.694
1 位级和	59.070	60.052	59.700	59.726	58.820		
2 位级和	60.874	59.290	59.470	60.235	59.540		
3 位级和	58.968	59.569	59.741	58.950	60.552		
极差	1.906	0.762	0.271	1.285	1.732		

Taguchi DOE 分析结果表明：

试样#2 的熔接线力学性能主要与注射压力和注射速率有关。注射压力大小能

影响球晶的大小和形状，低压下能生成大而完整的球晶，高压下则生成小而形状很规则的球晶。注射速率高；而当注射速率高时，则当熔体经嵌件后再次融合时，两股熔体经激烈的碰撞，高分子在融合界面上可以很好的渗透、穿越，减少结晶或者取向的高度各向异性，从而增强拉伸方向上熔接线强度。同时提高模具温度，可以进一步增加高分子活性，可以使过冷度降低，从而提高结晶度，使得熔接线强度提高。

表 3.4 试样 #3 的拉伸强度
Table3.4 Tensile strength at #3 in the main experiment

序号	标示 / Mpa	注射压力 / Mpa	熔体温度 / °C	保压压力 / Mpa	模具温度 / °C	注射速率 / %	空列	实验结果 / Mpa
1	1	1	1	1	1	1	1	9.679
2	1	2	2	2	2	2	2	9.994
3	1	3	3	3	3	3	3	10.292
4	2	1	1	1	2	2	3	10.155
5	2	2	2	2	3	3	1	10.126
6	2	3	3	3	1	1	2	10.352
7	3	1	2	2	1	3	3	10.163
8	3	2	3	3	2	1	1	9.634
9	3	3	1	1	3	2	2	9.566
10	1	1	3	3	3	2	1	9.962
11	1	2	1	1	1	3	2	9.235
12	1	3	2	2	2	1	3	9.668
13	2	1	2	2	3	1	2	9.270
14	2	2	3	3	1	2	3	9.694
15	2	3	1	1	2	3	1	9.491
16	3	1	3	3	2	3	2	9.639
17	3	2	1	1	3	1	3	9.219
18	3	3	2	2	1	2	1	9.564
1 位级和	58.831	58.869	57.345	58.687	57.822			
2 位级和	59.088	57.902	58.784	58.582	58.936			
3 位级和	57.784	58.933	59.574	58.435	58.946			
极差	1.304	1.031	2.229	0.251	1.123			

Taguchi DOE 分析结果表明：

试样 #3 的熔接线强度与保压压力有较大的关系. 试样 #2 中熔接线主要是两股熔体经碰撞而形成的, 所以界面间的分子穿越与注射压力和速率有较大的关系。而试样 #3 的熔接线是熔体经碰撞后, 在后续熔体的填充推动下形成的, 没有激烈的碰撞。注射压力和速率对熔接线界面分子穿越没有太大影响。在熔体填充到试样 #3 位置时, 试样 #1 和 #2 一直处于冷却过程, 对试样 #3 的注射过程, 从

某种意义上说, 试样#1和#2一直处于冷却保压过程, 此时的注射压力对试样#1和#2来说相当于保压压力。当后续熔体填充到试样#4的位置时, 试样#3也处于保压状态。由于试样#4位置的制品一直是由熔体前锋组成的, 而熔体前锋的熔体温度比较低, 加上模具的冷却, 当真正意义上的保压阶段到来时, 试样#4已经冷却成型了, 不能因保压而进行补缩了。所以当熔体填满整个型腔时, 整个制品处于成型过程中真正意义上的保压阶段时, 保压压力只对试样#3位置起比较大的作用。而较高的保压压力可以使分子在熔接线界面上很好的渗透、穿越, 可以提高结晶度, 同时减少结晶和取向的高度各向异性, 从而提高拉伸方向上的熔接线强度。

表 3.5 试样#4的拉伸强度

Table3.5 Tensile strength at #4 in the main experiment

序号	标示	注射压力 / Mpa	熔体温度 /°C	保压压力 /Mpa	模具温度 /°C	注射速率 /%	空列	实验结果 / Mpa
1		1	1	1	1	1	1	9.448
2		1	2	2	2	2	2	9.921
3		1	3	3	3	3	3	10.085
4		2	1	1	2	2	3	9.887
5		2	2	2	3	3	1	10.183
6		2	3	3	1	1	2	9.981
7		3	1	2	1	3	3	9.847
8		3	2	3	2	1	1	9.597
9		3	3	1	3	2	2	9.523
10		1	1	3	3	2	1	9.350
11		1	2	1	1	3	2	10.989
12		1	3	2	2	1	3	9.120
13		2	1	2	3	1	2	9.471
14		2	2	3	1	2	3	9.605
15		2	3	1	2	3	1	9.493
16		3	1	3	2	3	2	9.046
17		3	2	1	3	1	3	8.971
18		3	3	2	1	2	1	9.448
1 位级和		58.913	57.049	58.311	59.318	56.588		
2 位级和		58.620	59.266	57.991	57.065	57.735		
3 位级和		56.433	57.650	57.664	57.583	59.643		
极差		2.481	2.217	0.647	2.253	1.909		

Taguchi DOE 分析结果表明:

试样#4的熔接线强度与除保压压力以外的工艺参数都有较大的关系。从上

面工艺参数对试样#3的影响可以看出,保压压力相对于整个制品来说,只是对试样#3有最大的影响。在熔体填充到试样#4位置时,提高除保压压力之外的其他工艺参数,都能间接或直接减少熔体到达试样#4位置的时间,使得熔体温度提高。这有利于熔接线区域的分子的松弛,降低熔接线区域各向异性,从而提高试样#4的熔接线强度。

3.4 信噪比 (S/N)

当我们运用信噪比进行注塑过程中工艺参数优化时,信噪比属于静力学问题中的越大越好类型。在这里,质量特征数是连续的、非负的。我们希望它尽可能的大,且没有任何调整因子。该问题可用考虑质量特征数倒数的办法变换越小越好类型问题,目标函数的信噪比由下式给出:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left[\left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{y_i^2} \right) \right] \quad (3.1)$$

首先,我们对 LDPE 进行 S/N 分析:

表 3.6 试样#1 的信噪比 (S/N)

Table 3.6 Signal-to-Noise at #1 in the main experiment

序号	1 (Mpa)	2 (Mpa)	3 (Mpa)	4 (Mpa)	5 (Mpa)	S/N (dB)
1	10.852	10.619	10.559	10.508		20.532
2	10.112	10.552	10.885	10.918	10.835	20.544
3	10.113	10.095	10.080			20.083
4	10.890	10.793	11.342	10.863		20.801
5	10.689	10.074	11.034	10.889		20.549
6	11.039	10.760	10.410			20.610
7	10.123	10.771	10.295	10.769		20.405
8	11.034	10.965	10.584	11.048	10.710	20.719
9	10.090	10.531				20.260
10	10.200	10.657	10.384	10.308		20.327
11	10.048	10.610	8.690	10.499	9.736	19.859
12	10.622	11.228	9.587	10.023	10.132	20.235
13	10.044	10.033	10.055	10.311	9.922	20.061
14	10.047	10.363	9.945			20.098
15	9.326	9.632	9.657	9.741		19.632
16	10.352	9.881	9.855	9.670	10.262	19.995
17	10.049	10.262	9.925	10.443	9.883	20.092
18	9.898	10.258	10.499			20.180

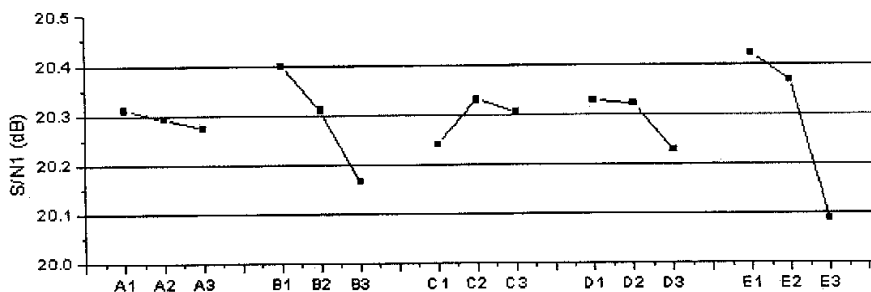


图 3.9 试样 #1 最佳工艺参数组合

Fig.3.9 Combination of optimization processing parameters at #1

根据图 3.9, 试样 #1 位置最佳工艺参数是 A1/B1/C2/D1/E1. 由于最优化的工艺参数并不包含在 Taguchi DOE 主体试验中, 我们需要通过一定的公式来计算最佳工艺参数的信噪比^[39]. 假定选择的各工艺参数之间没有交互作用, 预测的 LDPE 在次工艺参数条件下的信噪比是:

$$\begin{aligned} \eta_{A1/B1/C2/D1/E1} &= \eta_m + (\eta_{A1} - \eta_m) + (\eta_{B1} - \eta_m) + (\eta_{C2} - \eta_m) + (\eta_{D1} - \eta_m) + (-\eta_m) \\ &= \eta_{A1} + \eta_{B1} + \eta_{C2} + \eta_{D1} + \eta_{E1} - 4\eta_m \end{aligned}$$

其中 η_m 是 18 组试验中平均信噪比, η_{FN} 是因素 F 和水平 N 的信噪比。

$$\begin{aligned} \eta_{A1/B1/C2/D1/E1} &= 20.31 + 20.4 + 20.329 + 20.329 + 20.421 - 4 * 20.292 \\ &= 20.618 \end{aligned}$$

表 3.7 试样 #2 的信噪比 (S/N)

Table 7 Signal-to-Noise at #2 in the main experiment

序号	1 (Mpa)	2 (Mpa)	3 (Mpa)	4 (Mpa)	5 (Mpa)	S/N (dB)
1	9.94	9.978	10.429			20.094
2	10.039	9.848	9.891	10.28		20.009
3	10.162	9.929	9.932	10.181		20.042
4	10.157	11.904	10.153	10.538		20.524
5	10.66	10.835	10.516	10.5		20.527
6	10.079	11.224	10.497	10.039	10.259	20.336
7	10.108	9.857	10.582	10.284	10.064	20.147
8	9.848	10.475	9.745	10.094	9.888	20.000
9	9.798	9.774	9.899			19.845
10	9.59	9.449	9.82	9.874	9.707	19.721
11	10.143	10.068	10.166	8.369		19.632
12	9.459	9.547	9.537			19.567
13	9.489	9.377	9.455			19.499
14	9.682	9.498	9.656	9.831	9.491	19.672
15	9.834	9.45	10.917			20.010

16	9.919	9.47	9.928	10.448	19.933
17	9.348	9.37	9.289	9.272	19.388
18	9.578	9.732	9.772		19.729

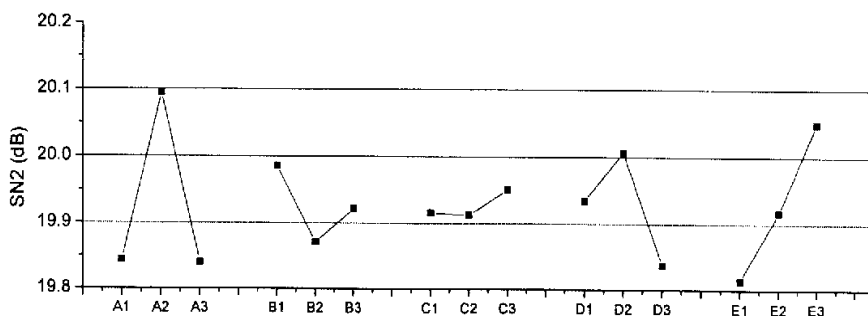


图 3.10 试样#2 最佳工艺参数组合

Fig.3.10 Combination of optimization processing parameters at #2

根据图 3.10，试样#2 位置最佳工艺参数是 A2/B1/C3/D2/E3.

$$\begin{aligned} \eta_{A2/B1/C3/D2/E3} &= \eta_{A2} + \eta_{B1} + \eta_{C3} + \eta_{D2} + \eta_{E3} - 4 \eta_m \\ &= 20.095 + 19.986 + 19.951 + 20.007 + 20.048 - 4 * 19.926 \\ &= 20.383 \end{aligned}$$

表 3.8 试样#3 的信噪比 (S/N)

Table3.8 Signal-to-Noise at #3 in the main experiment

序号	1 (Mpa)	2 (Mpa)	3 (Mpa)	4 (Mpa)	5 (Mpa)	S/N (dB)
1	9.489	9.712	10.209	9.537	9.449	19.706
2	9.944	10.428	9.823	9.747	10.030	19.988
3	9.410	10.170	10.421	10.169		20.017
4	10.146	10.165				20.134
5	10.218	9.937	10.222			20.106
6	9.954	10.166	9.773	10.515		20.078
7	10.368	10.085	9.766	10.195	10.399	20.133
8	9.597	9.573	9.777	9.402	9.822	19.673
9	9.420	9.712				19.611
10	9.619	10.152	10.515	9.562		19.947
11	8.952	8.878				19.002
12	9.407	9.432	10.284	9.644	9.572	19.693
13	9.402	9.242	9.202	9.235		19.341
14	10.111	9.362	9.610			19.717
15	9.400	9.502	9.387	9.402	9.764	19.543
16	10.079	9.410	9.383	9.409	9.915	19.669
17	9.152	9.215	9.051	9.458		19.290
18	9.363	9.634	9.791	9.466		19.609

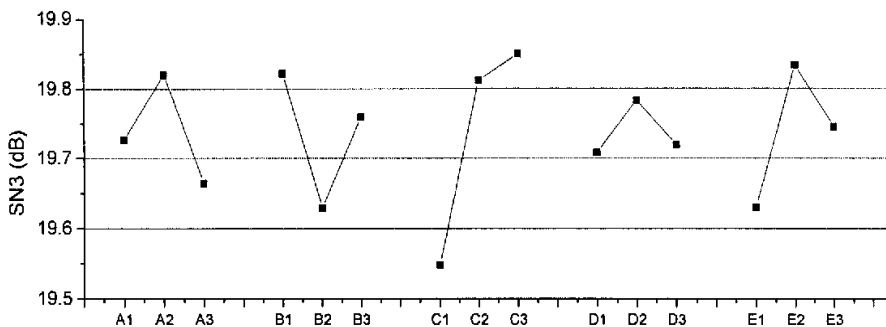


图 3.11 试样 #3 最佳工艺参数组合

Fig.3.11 Combination of optimization processing parameters at #3

根据图 3.11，试样 #3 位置最佳工艺参数是 A2/B1/C3/D2/E2.

$$\eta_{A2/B1/C3/D2/E2} = \eta_{A2} + \eta_{B3} + \eta_{C3} + \eta_{D2} + \eta_{E3} - 4\eta_n$$

$$= 19.820 + 19.822 + 19.850 + 19.783 + 19.834 - 4 * 19.737$$

$$= 20.163$$

表 3.9 试样 #4 的信噪比 (S/N)

Table 3.9 Signal-to-Noise at #4 in the main experiment

序号	1 (Mpa)	2 (Mpa)	3 (Mpa)	4 (Mpa)	5 (Mpa)	S/N (dB)
1	9.623	9.366	9.355			19.505
2	9.920	9.594	10.250			19.922
3	10.078	9.925	10.252			20.071
4	9.859	9.668	10.033	9.989		19.899
5	9.753	10.285	9.924	10.772		20.139
6	10.344	10.418	10.125	9.548	9.470	19.962
7	9.859	9.722	9.960			19.865
8	9.600	9.678	9.514			19.642
9	9.717	9.291	9.314	9.772		19.569
10	9.326	9.461	9.262			19.415
11	10.715	9.309				19.946
12	9.289	8.907	9.053	9.104	9.247	19.197
13	9.322	9.461	9.836	9.263		19.521
14	9.992	9.776	9.046			19.626
15	9.232	9.414	10.038	9.287		19.533
16	9.210	8.563	9.247	9.165		19.116
17	9.453	8.590	8.869			19.036
18	9.358	9.755	9.239	9.439		19.501

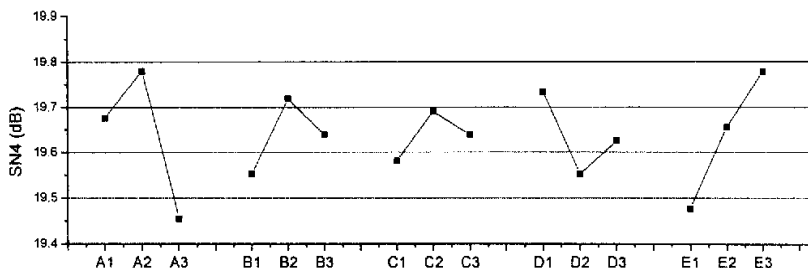


图 3.12 试样 #4 最佳工艺参数组合

Fig.3.12 Combination of optimization processing parameters at #4

根据图 3.12，试样 #4 位置最佳工艺参数是 A2/B2/C2/D1/E3。

$$\begin{aligned} \eta_{A2/B2/C2/D1/E3} &= \eta_{A2} + \eta_{B2} + \eta_{C2} + \eta_{D1} + \eta_{E3} - 4\eta_m \\ &= 19.780 + 19.719 + 19.691 + 19.734 + 19.778 - 4 \times 19.637 \\ &= 20.154 \end{aligned}$$

本章小结

本章介绍了试验所采用的模具，试验大小以及在制品中的截取位置，利用 Taguchi 进行试验设计，然后对试验结果进行 DOE 和信噪比 (S/N) 分析，得到不同位置工艺参数中最大影响因子和最佳工艺组合，如表 3.10：

表 3.10 不同位置的最佳工艺参数组合

材料: LDPE

Fig.3.10 Combination of optimization processing parameters at different location Material:LDPE

位置	主要影响因素	最优工艺参数组合
试样 #1	注射速率/熔体温度	A1/B1/C2/D1/E1
试样 #2	注射压力/注射速率	A2/B1/C3/D2/E3
试样 #3	保压压力	A2/B1/C3/D2/E2
试样 #4	除保压压力之外其他工艺参数	A2/B2/C2/D1/E3

第四章 非结晶高聚物熔接线性能研究

非结晶高聚物我们选择 ABS AF (LG Chemical)。ABS 塑料是在改性聚苯乙烯基础上发展起来的一种热塑性工程塑料，它是由丙烯腈、丁二烯、苯乙烯三种组分组成的，每一种组分在体系中都起着固有的作用，它同时具有三种组分综合性能的特点。

4.1 Taguchi DOE 分析

注塑成型工艺参数的因素和水平如图：

表 4.1 试验中所选的因素和水平

Table 4.1 Factors and levels selected in the main experiment

因素 位级	注射压力 / MPa	熔体温度 / °C	保压压力 /MPa	模具温度 /°C	注射速率 / %
1	70	210	50	40	80
2	80	220	60	50	86
3	90	230	70	60	92

试验也按 Taguchi 分为 18 组，每一组试验从制品不同位置取 4 个试样。具体试样尺寸大小和试样截取位置均与 LDPE 相同。试验结果如图 4.1, 4.2 所示：

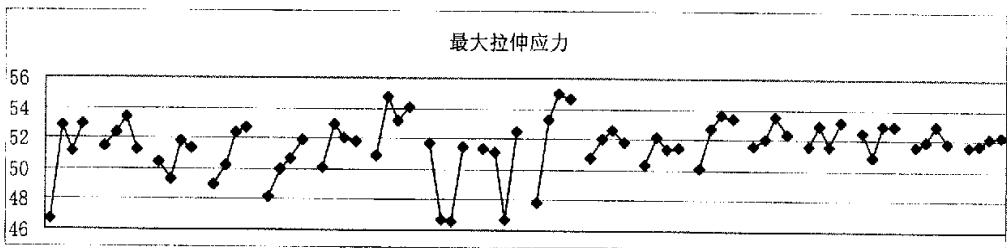


图 4.1 不同组不同位置拉伸强度对比

Fig.4.1 Tensile strength at different location of every team

我们可以看出，含有熔接线试样的抗张强度并不是都比不含有熔接线试样的抗张强度高。相反，大的趋势是嵌件之后试样的强度比嵌件之前的试样强度高。实际在 INSTRON 拉力机上进行拉伸试验时，除试样 #1 在中间断裂外，其余试样大部分并不从含有熔接线区域断裂。如图 4.3 所示。这也就从试样断裂位置上说明了熔接线强度并不是都是降低的。实际拉伸和我们从试验得到结果是吻合的。

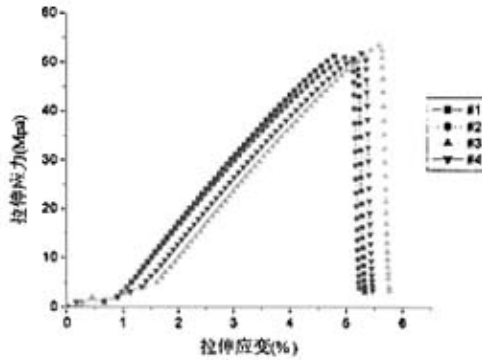


图 4.2 同组不同位置拉伸强度对比

Fig.4.2 Tensile strength at different location one of team

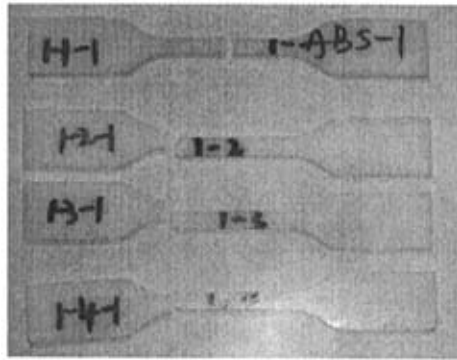


图 4.3 同组不同位置试样断裂位置

Fig.4.3 Break position at different location of every team

ABS 属于无定形高聚物。在制品的成型过程中，分子在注射成型过程中随熔体流动方向取向，沿流动方向抗张强度增加，而垂直于流动方向抗张强度降低，从而使制品各向异性。从制品整体上来看，纵向拉伸强度高于横向拉伸强度。大量文献指出含有熔接线的试样强度低于不含有熔接线的试样强度。但本论文试验则发现含有熔接线的试样强度高于不含有熔接线试样强度。这是因为试样 #1 中心的残余应力最大，嵌件之前试样由于扇形堆积物的存在，冷凝层比其他部分厚，熔体再次流经扇形堆积物区域的冷凝层时，受到的剪切作用力最大，分子取向严重，而分子取向垂直于拉伸方向，相对于整个制品，试样 #1 位置的纵横各向异性更强，因而在拉伸方向上抗张强度降低。但在嵌件之后，熔体在注射压力和注射速率共同作用下发生激烈的碰撞旋转，熔接线界面分子能够很好的渗透、穿越。降低了熔接线区域纵横各向异性，抗张强度反而比嵌件之前的抗张强度大。而在

嵌件之后因位置不同抗张强度有所升高、有所降低，没有太大的规律性。这可能与注射过程中存在着偶然性有关。

下面，我们对不同的位置进行 Taguchi DOE 分析，具体分析如下：

表 4.2 试样 #1 的拉伸强度
Table4.2 Tensile strength at #1 in the main experiment

序号	标示 注射压力 / Mpa	熔体温度 /°C	保压压力 /Mpa	模具温度 /°C	注射速率 /%	空列	实验结果 / Mpa
1	1	1	1	1	1	1	46.646
2	1	2	2	2	2	2	51.510
3	1	3	3	3	3	3	50.423
4	2	1	1	2	2	3	48.981
5	2	2	2	3	3	1	48.165
6	2	3	3	1	1	2	50.059
7	3	1	2	1	3	3	50.871
8	3	2	3	2	1	1	51.655
9	3	3	1	3	2	2	51.332
10	1	1	3	3	2	1	47.792
11	1	2	1	1	3	2	50.797
12	1	3	2	2	1	3	50.317
13	2	1	2	3	1	2	50.129
14	2	2	3	1	2	3	51.515
15	2	3	1	2	3	1	51.610
16	3	1	3	2	3	2	52.445
17	3	2	1	3	1	3	50.270
18	3	3	2	1	2	1	51.545
1 位级和	297.484	296.864	299.635	301.432	299.076		
2 位级和	300.459	303.911	302.537	306.518	302.674		
3 位级和	308.117	305.285	303.888	298.110	304.310		
极差	10.633	8.421	4.253	5.085	5.234		

Taguchi DOE 分析结果表明：

高聚物 ABS 试样 #1 的抗张强度主要与注射压力有关。同等条件下，相对于 LDPE，ABS 的熔体粘度比 LDPE 高，同时对于剪切速率的敏感程度没有柔性链 LDPE 高。因此，剪切速率大小对于主流道附近经扁平浇口注入型腔的扇形堆积物大小没有太大影响，从而对试样抗张强度没有太大影响。而注射压力比较大时，熔体经主流道进入分流道，主流道中心熔体流动速率比较快，可以通过主流道附近的扁平浇口注入型腔。同时由于型腔的较强冷却，增加了熔体流动的阻力，使得熔体顺着分流道向两端流动，当熔体全部充满分流道时，在注射压力的作用下，推动熔体整体向型腔填充。由于先进入型腔的扇形堆积物受到较高的冷却速率，

制品成型后, 在此有大的残余应力, 从而影响该处的抗张强度。而截取试样#1时, 扇形堆积物处于试样的中间。因此试样#1的力学性能主要受注射压力的影响。注射压力越大, 先进入型腔中的堆积物就越大, 试样#1的中间部分全部由堆积物组成时, 由于堆积物周围有最大的残余应力, 此时的试样#1的力学性能最差。相反, 注射压力比较小时, 形成的扇形堆积物比较小或者基本没有, 截取试样时, 堆积物占试样一部分或者基本不存在。而此时的试样力学性能会有所提高。

试样抗张强度还与熔体温度有关, 熔体温度越高, 则熔体粘度变小, 越有利于形成扇形堆积物, 同时, 熔体温度越高, 分子的松弛的越快, 从而降低堆积物周围的残余应力。因而, 熔体温度对于试样抗张强度有积极因素, 也有消极因素。

由于嵌件后实际拉伸试样断裂部位并不是在熔接线区域, 以下的 Taguchi DOE 分析中提到的熔接线强度指的不一定是熔接线区域的抗张强度, 而是指整个试样的抗张强度。同时, 因为我们进行的是熔接线强度试验, 所以嵌件后含有熔接线试样的断裂强度我们还称之为熔接线强度, 各种工艺参数优化只是进一步增大了熔接线抗张强度。

表 4.3 试样#2 的拉伸强度

Table4.3 Tensile strength at #2 in the main experiment

序号	标示 / Mpa	注射压力 /°C	熔体温度 /Mpa	保压压力 /°C	模具温度 / %	注射速率 空列	实验结果 / Mpa
1	1	1	1	1	1	1	52.765
2	1	2	2	2	2	2	52.364
3	1	3	3	3	3	3	49.274
4	2	1	1	2	2	3	50.203
5	2	2	2	3	3	1	49.942
6	2	3	3	1	1	2	52.890
7	3	1	2	1	3	3	54.720
8	3	2	3	2	1	1	46.670
9	3	3	1	3	2	2	51.153
10	1	1	3	3	2	1	53.270
11	1	2	1	1	3	2	52.005
12	1	3	2	2	1	3	52.090
13	2	1	2	3	1	2	52.649
14	2	2	3	1	2	3	52.062
15	2	3	1	2	3	1	52.944
16	3	1	3	2	3	2	50.936
17	3	2	1	3	1	3	51.885
18	3	3	2	1	2	1	51.652

1 位级和	311.769	314.543	310.954	316.093	308.950
2 位级和	310.690	304.928	313.417	305.209	310.703
3 位级和	307.016	310.004	305.103	308.173	309.821
极 差	4.753	9.615	8.314	10.885	1.753

表 4.4 试样 #3 的拉伸强度

Table4.4 Tensile strength at #3 in the main experiment

序号	标示 / Mpa	注射压力 /°C	熔体温度 /Mpa	保压压力 /°C	模具温度 /°C	注射速率 / %	空列	实验结果 / Mpa
1	1	1	1	1	1	1	1	49.381
2	1	2	2	2	2	2	2	53.423
3	1	3	3	3	3	3	3	51.792
4	2	1	1	2	2	3	3	52.317
5	2	2	2	2	3	3	1	50.663
6	2	3	3	3	1	1	2	51.989
7	3	1	2	1	1	3	3	53.108
8	3	2	3	2	2	1	1	46.586
9	3	3	1	3	3	2	2	46.648
10	1	1	3	3	3	2	1	55.011
11	1	2	1	1	1	3	2	52.598
12	1	3	2	2	2	1	3	51.324
13	2	1	2	2	3	1	2	53.668
14	2	2	3	3	1	2	3	53.465
15	2	3	1	2	2	3	1	51.619
16	3	1	3	3	2	3	2	52.952
17	3	2	1	1	3	1	3	52.893
18	3	3	2	2	1	2	1	52.108
1 位级和	313.529	316.437	305.456	312.649	305.842			
2 位级和	313.721	309.628	314.294	308.222	312.972			
3 位级和	304.295	305.481	311.796	310.674	312.731			
极 差	9.426	10.957	8.838	4.427	7.130			

表 4.5 试样 #4 的拉伸应力

Table4.5 Tensile strength at #4 in the main experiment

序号	标示 / Mpa	注射压力 /°C	熔体温度 /Mpa	保压压力 /°C	模具温度 /°C	注射速率 / %	空列	实验结果 / Mpa
1	1	1	1	1	1	1	1	52.937
2	1	2	2	2	2	2	2	51.250
3	1	3	3	3	3	3	3	51.397
4	2	1	1	2	2	3	3	52.725
5	2	2	2	2	3	3	1	51.881
6	2	3	3	3	1	1	2	51.818

7	3	1	2	1	3	3	54.120
8	3	2	3	2	1	1	51.417
9	3	3	1	3	2	2	52.510
10	1	1	3	3	2	1	54.641
11	1	2	1	1	3	2	51.845
12	1	3	2	2	1	3	51.505
13	2	1	2	3	1	2	53.411
14	2	2	3	1	2	3	52.420
15	2	3	1	2	3	1	53.135
16	3	1	3	2	3	2	52.880
17	3	2	1	3	1	3	51.835
18	3	3	2	1	2	1	52.204
1 位级和	313.574	320.714	314.987	315.343	312.923		
2 位级和	315.390	310.648	314.371	312.912	315.750		
3 位级和	314.965	312.569	314.572	315.674	315.258		
极差	1.816	10.066	0.615	2.762	2.827		

Taguchi DOE 分析结果表明:

试样 #2、#3、#4 熔接线强度都主要与熔体温度有关。ABS 属于无定形高聚物, 相对于结晶聚合物, 影响结晶度的工艺参数均对 ABS 无效, ABS 只对熔体温度敏感, 熔体温度高, 分子活性大, 松弛时间短, 则熔接线强度大。

4.2 信噪比(S/N)

其次, 我们对无定形聚合物 ABS 进行 S/N 分析:

表 4.6 试样 #1 的信噪比 (S/N)

Table 4.6 Signal-to-Noise at #1 in the main experiment

序号	1 (Mpa)	2 (Mpa)	3 (Mpa)	4 (Mpa)	5 (Mpa)	S/N (dB)
1	45.333	47.825	45.239	48.188		33.365
2	49.707	48.530	51.145	49.806	58.362	34.183
3	52.353	50.410	50.300	49.399	49.652	34.047
4	48.823	48.120	48.529	50.451		33.796
5	50.055	45.852	48.916	49.479	46.523	33.639
6	49.303	50.659	50.043	51.059	49.229	33.987
7	50.242	50.088	51.692	51.462		34.127
8	50.006	52.337	52.622			34.255
9	50.976	52.089	49.436	51.181	52.976	34.201
10	47.843	48.490	46.369	48.465		33.583
11	51.028	51.223	50.139			34.116
12	49.413	51.221				34.030
13	50.068	50.224	50.136	50.393	49.825	34.002
14	50.890	51.752	51.902			34.238

15	51.475	51.814	51.543	51.609		34.255
16	53.258	52.768	52.532	53.190	50.476	34.389
17	49.271	50.637	50.096	51.074		34.024
18	50.921	50.467	52.170	51.939	52.228	34.241

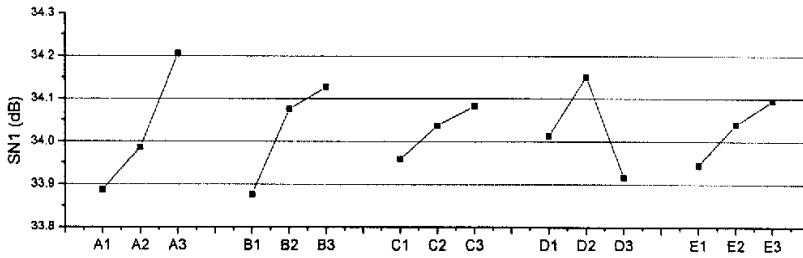


图 4.4 试样#1 最佳工艺参数组合

Fig.4.4 Combination of optimization processing parameters at #1

根据图 4.4，试样#1 位置最佳工艺参数是 A3/B3/C3/D2/E3.

$$\eta_{A3/B3/C3/D2/E3} = \eta_{A3} + \eta_{B3} + \eta_{C3} + \eta_{D2} + \eta_{E3} - 4\eta_0$$

$$= 34.206 + 34.127 + 34.083 + 34.151 + 34.095 - 4 \times 34.026$$

$$= 34.556$$

表 4.7 试样#2 的信噪比 (S/N)

Table4.7 Signal-to-Noise at #2 in the main experiment

序号	1 (Mpa)	2 (Mpa)	3 (Mpa)	4 (Mpa)	5 (Mpa)	S/N (dB)
1	52.878	52.098	52.735	52.748	53.367	34.446
2	49.808	50.879	53.515			34.208
3	45.580	49.467	52.776			33.805
4	51.280	51.648	51.197			34.215
5	49.186	50.188	49.544	49.292	51.500	33.966
6	52.870	52.622	52.842	52.890	53.228	34.467
7	54.203	53.067	57.900	52.530	55.899	34.746
8	46.436	46.845	45.963			33.332
9	47.926	52.140	51.659	52.061	51.978	34.163
10	47.570	55.749	52.654	55.738	54.639	34.483
11	52.966	51.562	51.486			34.319
12	53.584	51.632	51.951	52.487	50.798	34.331
13	49.301	56.232	51.501	50.836	55.373	34.394
14	53.490	49.581	53.323	51.853		34.318
15	51.947	52.500	53.487	52.934	53.853	34.474
16	49.720	51.036	50.607	52.383		34.136
17	50.394	53.376				34.290
18	50.826	51.262	52.906	52.788	50.475	34.257

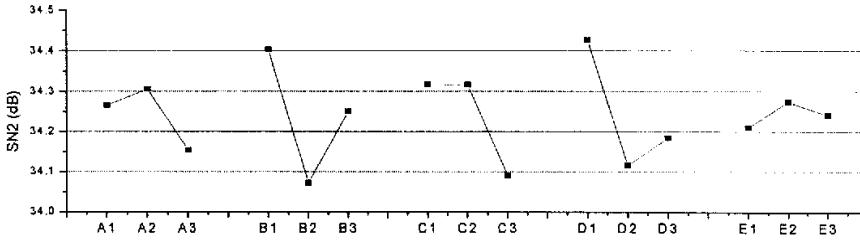


图 4.5 试样#2 最佳工艺参数组合

Fig.4.5 Combination of optimization processing parameters at #2

根据图 4.5，试样#2 位置最佳工艺参数是 A2/B1/C1/D1/E2。

$$\begin{aligned} \eta_{A2/B1/C1/D1/E2} &= \eta_{A2} + \eta_{B1} + \eta_{C1} + \eta_{D1} + \eta_{E2} - 4\eta_m \\ &= 34.306 + 34.403 + 34.318 + 34.426 + 34.274 - 4 \times 34.242 \\ &= 34.76 \end{aligned}$$

表 4.8 试样#3 的信噪比 (S/N)

Table 4.8 Signal-to-Noise at #3 in the main experiment

序号	1 (Mpa)	2 (Mpa)	3 (Mpa)	4 (Mpa)	5 (Mpa)	S/N (dB)
1	52.988	49.693	50.115	51.644		34.162
2	59.124	53.338	52.783	48.448		34.490
3	52.970	50.222	45.284			33.835
4	50.881	52.376	52.325	53.686		34.368
5	51.007	47.298	48.924	52.869	53.213	34.067
6	54.232	50.718	52.881	52.542	49.573	34.305
7	52.342	54.761	52.364	53.737	52.333	34.499
8	47.972	44.411	47.375			33.350
9	45.707	46.680	48.308	45.898		33.371
10	52.426	53.581	55.144	56.590	57.314	34.795
11	53.229	52.548	50.504	54.110		34.411
12	51.607	50.849	52.050	50.791		34.205
13	54.151	54.730	53.757	52.035		34.590
14	54.839	53.401	54.152	51.648	53.285	34.556
15	53.058	53.276	51.299	54.699		34.492
16	53.352	52.508	53.457	52.830	52.616	34.477
17	53.715	52.310	52.666	52.880		34.467
18	49.579	52.539	51.857	55.556	51.009	34.320

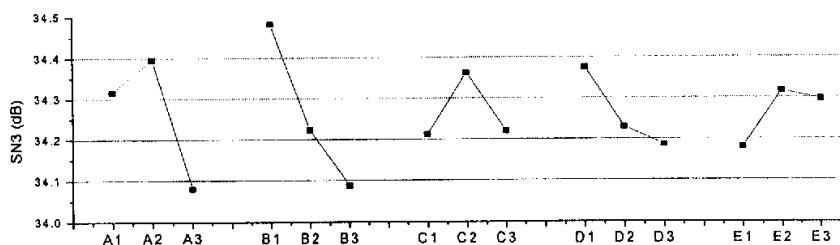


图 4.6 试样#3 最佳工艺参数组合

Fig.4.6 Combination of optimization processing parameters at #3

根据图 4.6，试样#3 位置最佳工艺参数是 A2/B1/C2/D1/E2.

$$\eta_{A2/B1/C2/D1/E2} = \eta_{A2} + \eta_{B1} + \eta_{C2} + \eta_{D1} + \eta_{E2} - 4\eta_m$$

$$= 34.396 + 34.482 + 34.362 + 34.375 + 34.317 - 4 * 34.264$$

$$= 34.875$$

表 4.9 试样#4 的信噪比 (S/N)

Table4.9 Signal-to-Noise at #4 in the main experiment

序号	1 (Mpa)	2 (Mpa)	3 (Mpa)	4 (Mpa)	5 (Mpa)	S/N (dB)
1	53.197	50.949	54.813	52.787		34.466
2	49.198	51.791	52.582	54.340	48.338	34.170
3	50.278	53.839	50.970	50.500		34.209
4	53.913	51.538				34.434
5	52.333	52.182	53.570	53.592		34.470
6	52.468	51.383	52.880	50.921	51.435	34.287
7	54.874	51.336	56.517	52.440	55.433	34.650
8	54.563	53.568				34.657
9	53.607	55.482				34.731
10	54.823	53.812	55.288			34.749
11	50.992	51.965	52.514	51.893	51.862	34.293
12	50.332	51.442	52.268	52.223	51.261	34.235
13	55.426	51.854	53.572	52.793		34.545
14	54.134	52.575	50.746	52.225		34.383
15	55.022	54.467	50.306	52.746		34.492
16	53.169	52.828	53.202	52.321		34.465
17	53.019	50.340	52.146			34.286
18	51.975	51.668	52.270	52.111	52.997	34.353

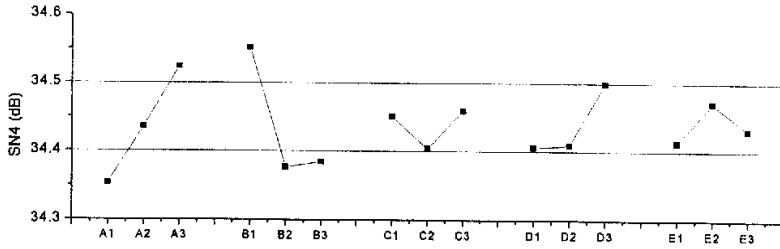


图 4.7 试样#4 最佳工艺参数组合

Fig.4.7 Combination of optimization processing parameters at #4

根据图 4.7，试样#4 位置最佳工艺参数是 A3/B1/C3/D3/E2.

$$\begin{aligned} \eta_{A3/B1/C3/D3/E2} &= \eta_{A3} + \eta_{B1} + \eta_{C3} + \eta_{D3} + \eta_{E2} - 4 \eta_m \\ &= 34.524 + 34.552 + 34.458 + 34.498 + 34.470 - 4 * 34.438 \\ &= 34.752 \end{aligned}$$

本章小结

本章对非结晶高聚物 ABS 进行拉伸试验，利用 Taguchi DOE 和信噪比 (S/N) 找出不同位置工艺参数中最大影响因子和最佳工艺参组合，如表 4.10

表 4.10 不同位置的最佳工艺参数组合

材料: ABS

Fig.4.10 Combination of optimization processing parameters at different location Material:ABS

位置	主要影响因素	最优工艺参数
试样 #1	注射压力/熔体温度	A3/B3/C3/D2/E3
试样 #2	熔体温度	A2/B1/C1/D1/E2
试样 #3	熔体温度	A2/B1/C2/D1/E2
试样 #4	熔体温度	A3/B1/C3/D3/E2

第五章 工艺参数对熔接行为影响的数值分析

我们利用 CAE 模拟分析软件对不同工艺参数进行模拟分析，结合我们对 LDPE 和 ABS 所作的试验，以进一步了解高分子的流动行为，特别是熔体在嵌件后的倒流行为，加深我们对理论的理解以及对我们所提出的假设进一步论证。注塑模流动模拟软件的指导意义十分广泛，它是一种设计工具，能够辅助设计者优化工艺参数，指导产品设计者从工艺的角度改进产品形状，选择最佳工艺参数。

CAE 流动模拟能够显示熔体从进料口逐渐充满型腔的动态过程，由此可判断熔体流动是否较理想的单项流形式（简单流动）。各个流动分支是否在同一时间充满型腔的各个角落（流动是否平衡）。在填充过程中最大型腔压力值能帮助判断在各个流动方向上单位长度的压力差（又称压力梯度）是否接近相等。熔体填充过程中的温度场，可鉴别在填充过程中因剪切发热而形成的局部热点，判断熔体温度是否均匀，而熔体结合点的温度还可帮助判断熔接线的相对强度。剪切速率对熔体的流动过程影响甚大，剪切速率过大将使熔体过热，导致聚合物降解或产生熔体破裂等弊病，剪切速率分布不均匀会使各处分子产生不同程度的取向，因而收缩不同，导致制品翘曲。

我们利用 LDPE 进行模拟分析。由于 LDPE 试样 #1 主要与工艺参数中注射速率有关，我们就以注射速率为主控制工艺参数进行数值模拟，注射速率分别用 $20\text{cm}^3/\text{s}$ 、 $60\text{cm}^3/\text{s}$ 、 $100\text{cm}^3/\text{s}$ 。分析结果如下：

1. 沿制品中心路径的最大剪切速率。

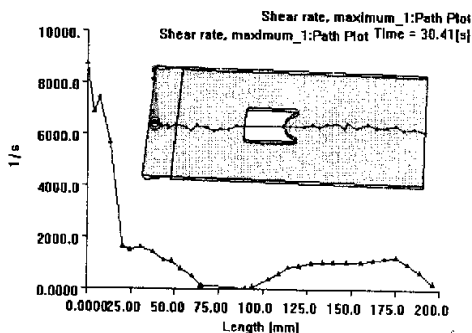
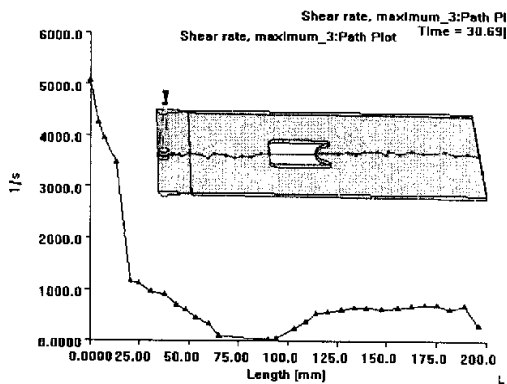
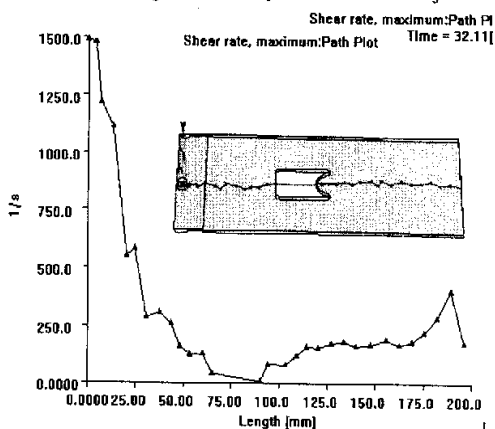


图 5.1 注射速率为 $100\text{cm}^3/\text{s}$ 沿中心路径的最大剪切速率

Fig.5.1 Maximum shear rate along the center path when melt injection speed is $100\text{cm}^3/\text{s}$

图 5.2 注射速率为 $60\text{cm}^3/\text{s}$ 沿中心路径的最大剪切速率Fig.5.2 Maximum shear rate along the center path when melt injection speed is $60\text{cm}^3/\text{s}$ 图 5.3 注射速率为 $20\text{cm}^3/\text{s}$ 沿中心路径的最大剪切速率Fig.5.3 Maximum shear rate along the center path when melt injection speed is $20\text{cm}^3/\text{s}$

从这三副不同注射速率下的最大剪切速率图我们可以看出：最大注射速率下，在主流道附近的扁平浇口后，最大剪切速率有所回升，其它两种注射速率下，最大剪切速率都是直接下降的趋势；最小注射速率下，最大剪切速率的波动比较剧烈，而且在填充的最后阶段，最大剪切速率反而有所回升。

根据此种情况以及我们提出的扇形堆积物假定，我们构想了图 4.4,4.5 的流动形态。在注塑成型过程中，填充熔体被嵌件分割成为两股熔料，经过嵌件后熔体才会再次碰撞融合。之后这两股熔体的随着流动距离的增大，最大流速中心越来越偏向制品的中心，当流动距离足够大时，两股熔体真正意义上融合在一起，熔体的最大流速就在制品的中心位置。高注射速率成型时，两股熔体流经嵌件后，由于速率较大，会冲出嵌件很远的距离，当熔体再次融合时，在型腔中已经填充了很长一段距离，所以在嵌件后的停滞倒流区域比较大。当注塑完成时，两股熔体的最大流速中心并不能和制品的中心重合。而低注射速率成型时，熔体的中心

流速和边缘流速差别不大，两股熔体流经嵌件后，只需较短的流程就能再次融合，在嵌件后的停滞倒流区域小。所以当熔体相遇后继续向前填充时，有足够的空间距离使两股熔体的最大流速中心和制品的中心重合，造成制品的中心熔体流速在填充一段距离后达到最大，从而在低速注射成型时，熔体在制品中心处最大剪切速率随着熔体填充距离的增长而增大。

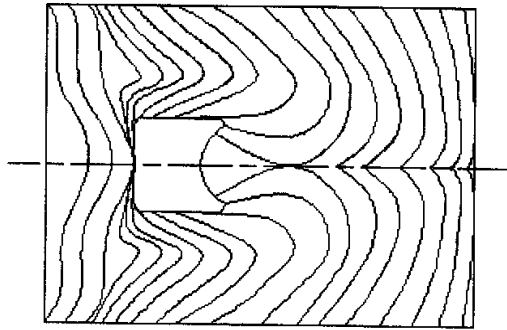


图 5.4 高注射速率下的流动形态
Fig.5.4 Flow morphology at high melt injection speed

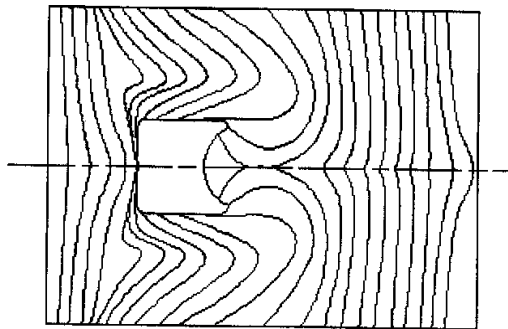


图 5.5 低注射速率的流动形态
Fig.5.5 Flow morphology at low melt injection speed

2. 沿制品中心路径的熔体前沿温度。

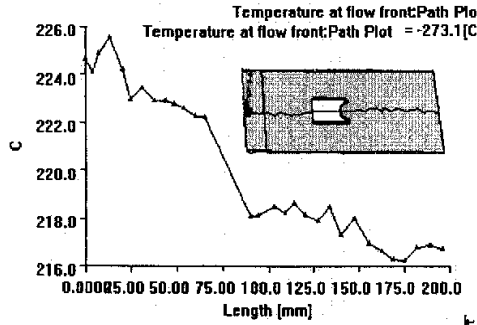


图 5.6 注射速率为 $100\text{cm}^3/\text{s}$ 沿中心路径的熔体前沿温度

Fig.5.6 Temperature at flow front along the center path when melt injection speed is $100\text{cm}^3/\text{s}$

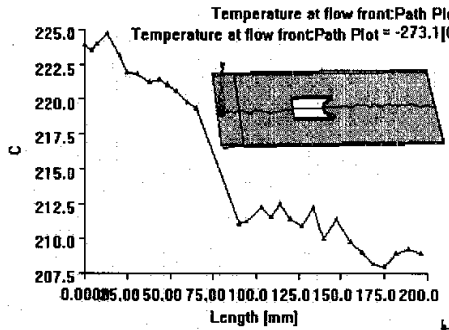


图 5.7 注射速率为 $60\text{cm}^3/\text{s}$ 沿中心路径的熔体前沿温度

Fig.5.7 Temperature at flow front along the center path when melt injection speed is $60\text{cm}^3/\text{s}$

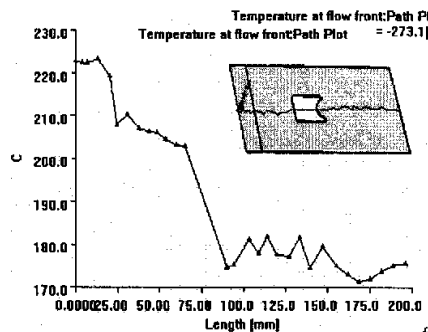


图 5.8 注射速率为 $20\text{cm}^3/\text{s}$ 沿中心路径的熔体前沿温度

Fig.5.8 Temperature at flow front along the center path when melt injection speed is $20\text{cm}^3/\text{s}$

高注射速率成型时，熔体前沿温度差仅有 10°C ，而且熔体温度在扁平浇口后面有所回升。低注射速率成型时，熔体前沿温度差高达 50°C 之多。因此我们在实际生产时，应尽可能采用高注射速率成型，对于高紧密注射制件常采用超高注射速率。

3. 沿制品中心路径的密度。

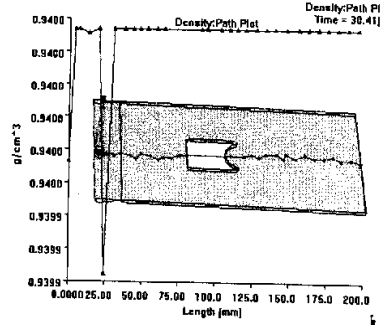


图 5.9 注射速率为 $100\text{cm}^3/\text{s}$ 沿中心路径的制品密度
Fig.5.9 Density along the center path when melt injection speed is $100\text{cm}^3/\text{s}$

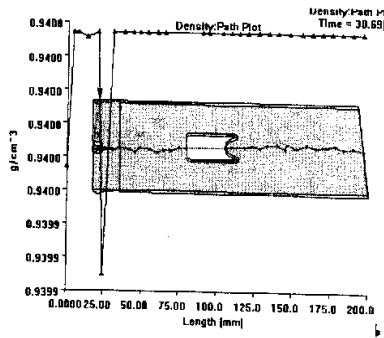


图 5.10 注射速率为 $60\text{cm}^3/\text{s}$ 沿中心路径的制品密度
Fig.5.10 Density along the center path when melt injection speed is $60\text{cm}^3/\text{s}$

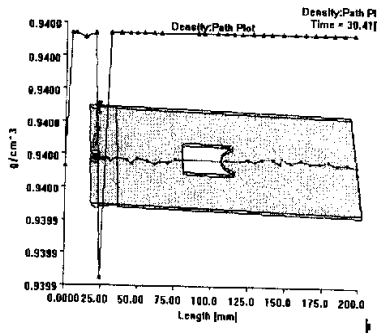


图 5.11 注射速率为 $20\text{cm}^3/\text{s}$ 沿中心路径的制品密度
Fig.5.11 Density along the center path when melt injection speed is $20\text{cm}^3/\text{s}$

我们从图可以看出在主流道附近扁平浇口处的密度有突变，在该处密度突然降低。这进一步降低此处的力学性能，这也论证了我们提出的扇形堆积物假设。

第六章 总结与展望

本论文从熔接线形成机理开始，利用不同形状嵌件形成不同的熔接过程和熔接线，采用短射形式固定充填中熔体熔接和熔接线形成过程，通过 CAE 流动分析软件模拟充填过程并截取不同时刻的充填位置，比较实际短射样品和模拟结果，集中讨论了菱形、三角形和半圆形嵌件后熔体流动行为。另外阐述了工艺参数（注射压力/熔体温度/保压压力/模具温度/注射速率）对熔接线影响。运用 Taguchi 方法进行试验设计，共分 18 组试验，通过对制品不同位置使用 Taguchi DOE 以及信噪比 S/N，我们了解到嵌件前后不同位置工艺参数中的主次影响因子和最优化的工艺参数。然后我们分析了每一个位置最大作用工艺参数的影响原因，使得我们更加了解工艺参数对熔接线强度的影响。当我们遇到实际问题时有更多的理论指导意义。在数值模拟的基础上，分析了制品沿中心线在不同注射速率最大剪切速率、熔体前沿温度以及密度。在此基础上提出主流道附近扁平浇口处扇形堆积物假设以及高、低注射速率下的流动形态图。本论文主要结论如下：

- (1) 菱形、三角形和半圆形嵌件形成不同的熔体熔接和熔接线。熔体绕过菱形嵌件是沿着菱形边前进的，熔体在嵌件后没有形成空洞，熔体相遇后由于压力的增加而停止了流动，在其后形成了冷熔接线。而熔体通过三角形和半圆形嵌件，由于嵌件的原因，熔体在嵌件后形成了空洞区域，熔体相遇后并没有停止流动，在其后形成了热熔接线，这加剧了分子的界面穿越和松弛。三角形和半圆形不同之处在于其后空洞区域的大小。
- (2) 试验采用结晶聚合物 LDPE 和无定形高聚物 ABS，嵌件形状为半圆形。试验表明对于结晶聚合物 LDPE 嵌件后拉伸强度随距离的增加而降低，而对于无定形高聚物 ABS 嵌件后的拉伸强度高于嵌件之前。
- (3) 利用 Taguchi DOE 和信噪比 (S/N)，寻找最大不同位置工艺参数中最大影响因子和最佳工艺参数组合。
- (4) 模拟分析了沿制品中心路径在不同注射速率下的最大剪切速率、熔体前沿温度以及密度，由此提出的提出主流道附近扁平浇口处扇形堆积物假设以及高、低注射速率下的流动形态图。

注塑成型中制品出现的熔接线是一个很复杂的问题，由于时间精力以及试验

条件等因素的限制，本论文只是对熔接线进行了初步探讨，对熔接线的研究尚有许多有待完善的地方，主要表现在：

- (1) 本文只进行了两种材料的试验和模拟，而塑料品种成千上万，我们应该找出各类材料的共同的一些关于熔接线方面的工艺参数优化。
- (2) 本文没有研究含有熔接线和不含有熔接线的制品断裂时的断面形态，没有从微观结构方面进行熔接线的研究。
- (3) 如何建立起熔接线强度与工艺参数的定量关系。

参考文献

1. 申长雨. 塑料模具计算机辅助工程. 河南: 河南科学技术出版社, 1998.
2. Jin Kon Kim, Ju Ho Song, S.T.Chung, T.H.Kwon. Morphology and Mechanical Properties of Injection Molded Articles With Weld-Lines. *Polymer Engineering and Science*, 1997, 37(1): 228-242.
3. K.Tomari, S.Tonogai, T.Harada, H.Hamada, K.Lee, T.Morii, Z.Maekawa, V --Notch at Weld Lines in Polystyrene Injection Moldings. *Polymer Engineering and Science*, 1990, 30(15): 931-936.
4. D.F.Mielewski, D.R.Bauer, P.J.Schmitz, H.Van Oene. Weld Line Morphology of Injection Molded Polypropylene. *Polymer Engineering and Science*, 1998,38(12): 2020-2028.
5. S.Fellahi, B.Fisa, B.D.Favis. Weldline Strength in Injection Molded HDPE/PA6 Blends:Influence of Interfacial Modification. *Journal of Applied Polymer Science*, 1995,57(11): 1319-1332.
6. S.Fellahi, B.Fisa, B.D.Favis. Morphological Stability in Injection-Moulded High-Density Polyethylenepolyamide-6blends. *Polymer Engineering and Science*, 1996,37(13): 2615- 2626.
7. YG.Son, K.H.Anh, K.H.Char. Weldline Morphology of Injection Molded Modified poly (phenylene-oxide) Ipolyamide-6 blends. *Polymer Engineering and Science*, 2001, 41(3):554-565.
8. A.Meddad, B.Fisa. Weldline Strength in Glass Fiber Reinforced Polyamide 66. *Polymer Engineering and Science*, 1995, 35(11): 893-901.
9. B.Fisa, M.Rahmani. Weldline Strength in the Injection Molded Glass fiber-Reinforced Polypropylene. *Polymer Engineering and Science*, 1991,31(18): 1330-1336.
10. R.Pisipati, D.G.Baird. Correlation of Non-Linear Rheological Properties of Polymer Melts with Weld-Line Strength. *Polymer Processing and Properties (Proceedings of the European Meeting)*, 1984:215-228.

11. S.G.Kim, N.P.Suh. Performance Prediction of Weldline Structure in Amorphous Polymers. *Polymer Engineering and Science*, 1986, 26(1): 1200-1206.
12. N.Mekhilef, A.Ait-Kadi, A.Ajji. Weld Lines in Injection-Moulded Immiscible Blends: Model Predictions and Experimental Results. *Polymer Engineering and Science*, 1995, 36(10): 2033-2042.
13. H.Hamada, K.Tomari, H.Yamane, T.Senba, M.Hiragushi. Weldline Property and Relaxation Behavior of Polymer Melt. ANTEC'1997: 1071-1075.
14. S.C.Malguarnera, A.Manisali. Effects of Processing Parameters on the Tensile Properties of Weld Lines in Injection Molded Thermoplastics. *Polymer Engineering and Science*, 1981, 21(10): 586-593.
15. S.C.Malguarnera, A.I.Manisali, D.C.Riggs. Weld line Structure and Properties in Injection Molded Polypropylene. *Polymer Engineering and Science*, 1981, 21(17): 1149-1155.
16. R.Selden. Effect of Processing on Weld Line Strength in Five Thermoplastics. *Polymer Engineering and Science*, 1997, 37(1): 205-218.
17. S.Piccarolo, A.Rallis, G.Titomanlio. Effect of Injection Moulding Conditions on Knit-Line Formation. *Plastics and Rubber Processing and Applications*, 1987, 8(3): 181-184.
18. S.Piccarolo, M.Saiu. Knit-Line Structure in the Injection Molding of Polystyrene. *Plastics and Rubber Processing and Applications*, 1988,10(1): 11-16.
19. E.Worden, S.Kushion. Weld Line Integrity of PC/ABS Engineering Blends. ANTEC'1991: 2653-2655.
20. W.Wenig, D.Singh, G.Botzen, F.G.Mosle. Computer Simulation of Weld Lines in Injection Molded Poly (methyl methacrylate). *Angew.Makromol.Chemical*, 1990, 179:35-41.
21. G.Titomanlio, S.Piccarolo, Rallis. Knit Lines Structure in Injection Molding of Nylon 6: Relation to First Solidified Sample Cross-Section. *Polymer Engineering and Science*, 1989, 29(4): 209-213.

22. Shih-Jung.Liu, Jun-Yu.Wu, Jer-Haur.Chang, Shiu-Wan Hung. Experimental Matrix Design to Optimize the Weldline Strength in Injection Molded Parts. *Polymer Engineering and Science*, 2000, 40(5): 1256-1262.
23. I.S.Dairanieh etc. Computer Simulation of Weld Lines in Injection Molded Polymethyl methacrylate. *Polymer Engineering and Science*, 1996, 36(15): 2050-2058.
24. G.Gardner and R Malloy. A moving Boundary Technique Strengthen Weld Lines in Injection Molding. ANTEC'1994: 624-630.
25. D.J.Hallowell, J.P.Coulter. Weldline Strength in Products Manufactured through Vibration-Assisted Injection Molding. ANTEC'2001: 498-503.
26. D.O.Kazmer. Increasing Weld-Line Strength through Dynamic Control of Volumetric Shrinkage. ANTEC'1994: 630-635.
27. Tham Nguyen-Chung. Flow Analysis of the Weld Line Formation During Injection Mold Filling of Thermoplastics. *Rheol Acta*, 2004, 43: 240-245
28. S.C.Malguarnera, A.I.Manisali, D.C.Riggs. Weld Line Structure and Properties in Injection Molded Polypropylene. *Polymer Engineering and Science*, 1981, 21 (17): 1149-1155
29. J.Tung, G.P.Simon. The Effect of Processing Factors on Weld Lines in Injection Molded Nylon 6 Nanocomposites. ANTEC'2004: 723-727
30. A.Meddad, B.Fisa. Filler-Matrix Debonding in Glass Bead-Filled Polystyrene. *Polymer Engineering and Science*, 1995,35:893-899.
31. S.Fellahi, A.Meddad, B.Fisa, and B.C.Favis. Ultrasonic Improvement of Weld line Strength of Injection-Molded Polystyrene. *Adv.Polym.Tech.*, 1995, 14:169-173.
32. Guo, Shaoyun , A.Ait-Kadi. A Study on Weld Line Morphology and Mechanical Strength of Injection Molded Polystyrene/poly (methyl methacrylate) Blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002,84(10): 1856-1865.
33. Shih-Jung Liu,Chang-Yao Yang. Application of Statistic Estimation to Weldline Strength of Injection Molded Thermoplastic Composites. *Journal of*

- Reinforced Plastics and Composites, 2004,23(13): 1383-1396.
34. Nguyen-Chung, T.Mennig, G.Boyanova, M.Fakirov, S.Calleja, F.J.Balta. Effect of an Obstacle during Processing on the Weld Line of Injection-Molded Glassy Polystyrene: Microhardness Study. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004,92(5): 3362-3367.
 35. S.Y.Hobgs. Some Observations on the Morphology and Fracture Characteristics of Knit Lines. *Polymer Engineering and Science*, 1974,14:621-627.
 36. S.C.Malguarnera, A.Manisali. Weld Lines in Nylon 6 Melt-Blended Nanocomposites. *Polymer Engineering and Science*, 1981,21:586-592.
 37. P.Maskus, H.U.Gahwiler. Injection Welding of Polyamides. *Adv.Polym. Technol.*, 1987,7:411-418.
 38. V.M.Nadkarni, S.R.Ayodhya. The Influence of Knit-Lines on the Tensile Properties of Fiber Glass Reinforced Thermoplastics. *Polymer Engineering and Science*, 1993,33:358-363.
 39. K.Tomari, H.Takashima, H.Hamada. Processing and Characterization of Short-Fiber Reinforced Jute/Poly Butylene Succinate Biodegradable Composites: The Effect of Weld-Line. *Polymer Engineering and Science*, 1995,14:25-32.
 40. Liu S-J., Yang C-Y. Experimental Study of Weldline Caused by Flow Lead Effect in Gas Assisted Injection Moulded Parts. *Plastics, Rubber and Composites*, 2002,31(1): 36-41.
 41. Jarus, D.Summers, J.W.Hiltner, A.; Baer, E., Weld Line Strength of Poly (vinyl chloride)/polyethylene Blends. *Polymer Engineering and Science*, 2000,41(8): 3057-3068
 42. 陈魁. 试验设计与分析. 北京: 清华大学出版社, 2005.
 43. 许健南. 塑料材料. 北京: 中国轻工业出版社, 1999.

附 录

作者在读研究生期间发表的论文:

1. Liu Chuntai, Ma Zhiguo, Shen Changyu. Property predictions for short-fiber reinforced injection-molded composites based on micro-mechanical models, 7th World Congress on Computational Mechanics, July 16 - 22, 2006, Los Angeles, California, USA. (第七届世界计算力学大会)
2. 刘春太, 马志国, 张翼, 申长雨. 嵌件形状对纤维增强注塑熔接线性能的影响, The 2nd Conference of Cross-Strait Academic Workshop on Advanced Technology of Materials Forming and Die/Mold, August 12-15, 2005, Xi'an, China
3. 申长雨, 张翼, 马志国, 刘春太. 短纤维增强注塑复合材料力学性能的预测, 2005年中国工程塑料复合材料技术研讨会, 2005, 10, 泰安, 山东
4. 刘春太, 孙采玉, 马志国, 张翼. 聚合物加工模拟的研究进展和发展趋势(大会报告), 2005《中国塑料》论坛暨塑料注塑新技术国际研讨会, 2005, 7. 12-7. 14, 上海
5. 申长雨, 马志国, 刘春太. 注塑成型中嵌件后流动行为的试验与数值研究, 高分子材料科学与工程(审稿中)。

致 谢

本文是在导师申长雨教授和刘春太教授的悉心指导和关怀下完成的，三年来，刘春太教授对我的工作给予了许多富有启发性的教诲，导师对我的学习、生活上的理解和信任，保证了本文顺利圆满的完成。导师渊博的知识，求实创新的治学态度、严谨细致的工作作风、勤勉的工作态度以及锐意进取的探索精神给我留下了深刻的印象，并将使我受益终身。在此谨向两位导师表示由衷的敬意和诚挚的感谢！

在三年的学习过程中，橡塑模具国家工程研究中心研究开发部的各位老师给予了我很多的帮助和指导，使我少走很多的弯路，在此表示深深的感谢！在实验的试样的制备过程中，得到了橡塑模具国家工程研究中心产品开发部李银亭总经理的慷慨的帮助，使我的实验能顺利完成，在此向李银亭副总经理表示深深的感谢！在试样的性能测试中，得到了王松杰老师的热情帮助，在此也向王松杰老师表示诚挚的谢意。

在朝夕相处的学习生活中，我的研究生同学卜建辉、张翼、赵建、孙彩玉、王静、陈政、翟建兴、沈俊芳、郑小培、陈巍、周应国、闵志宇、路书芬、张雪玲、徐文莉给予我许多的帮助和支持，在此向他们表示感谢！

感谢研究生处的各位老师在学习上、生活上的关心和帮助！