

## 模拟发展到自主优化

Ingo Hahn and Jörg C. Sturm, MAGMA GmbH,  
Aachen, Germany

铸造工艺模拟在引入金属铸造行业将近 30 年后，在金属铸造工程部门以及模具和铸件的设计中成为一种被广泛接受的工具。通常由经验丰富的技术人员进行模拟 - 因此，模拟结果反映出他们的铸造经验、思维方式和技能。每个单独的模拟相当于一个虚拟试验。基于模拟结果，工程师们要以合格的质量标准为依据评估诸如所选的浇注系统或工艺参数配置能否在可接受的成本范围内，然后提出修改建议，以便找到更好的解决方案。

在金属铸造工艺中，一切都发生在同一时间，并且紧密耦合。尽管与其它生产工艺相比，这可以被看成是金属铸造的一个关键优势，但是对于最好的或者至少适当的铸造系统来说，它也起着决定作用。由于参数之间的相互作用，改变一个工艺参数可能对工艺的其余部分具有一系列影响，并且可能以很多不同的方式影响最终的铸造质量。这使得通过真实试验来评价铸造质量，并同时追求质量和经济目标，采用手动方式来优化铸造工艺具有挑战性。

当今铸造发展和相应金属铸造工艺的需要能够实现最大化工艺稳健性和最快盈利的方法和工具。通常情况下，无法自由的对工艺进行改进，并且受限于一系列连续生产中，工艺参数的变化。基于铸造试验的真实铸造质量的定量评估和减少以优化铸造工艺为目的实验仍然是一个挑战。

与实际的试验相反，使用模拟工具的自主优化能显著提供更多的灵活性。自主优化使工程师能够修改多个参数，即使铸造设计和铸造过程工艺同时存在并彼此独立，并且可单独和定量评估质量标准。结合来自实验统计设计的工具，铸造工艺模拟可被用于自主优化铸造工艺和设计[1]。软件同时追踪多个目标，并且根据首要原则找到它们之间最优方案。所有模拟质量标准的自动评估可被用于快速容易地找到达到预期目标的最佳方案。

此外，可以减少真实试验的数量，并且可在铸造、模具和工艺发展中评价各种工艺参数对稳健工艺的影响[2]。

自主优化的新方法并不是替代工艺知识和专业知识。根据其工艺的技术和经济条件，结合铸件的要求和要达成的目标，铸造工程师需要指定哪些参数可以灵活更改以及更改的自由度。通过将目标与相应的质量标准相联系，使这些目标可以量化。软件要解决的问题很简单：良好的浇注系统具有什么特点？如何实现稳健的工艺过程？我如何选择所需铸造质量的工艺条件？回答这些问题需要重要影响因素的定量描述、质量标准的量化和成本指标和要达到的目标。就如同在实际优化铸造工艺，自主优化使用相同的三个基本组成部分（图1）：

- 可变的**工艺参数** (设计变量)
- 指定的**质量标准** (输出值)，作为计算的定量结果
- 不同**目标** (目的)

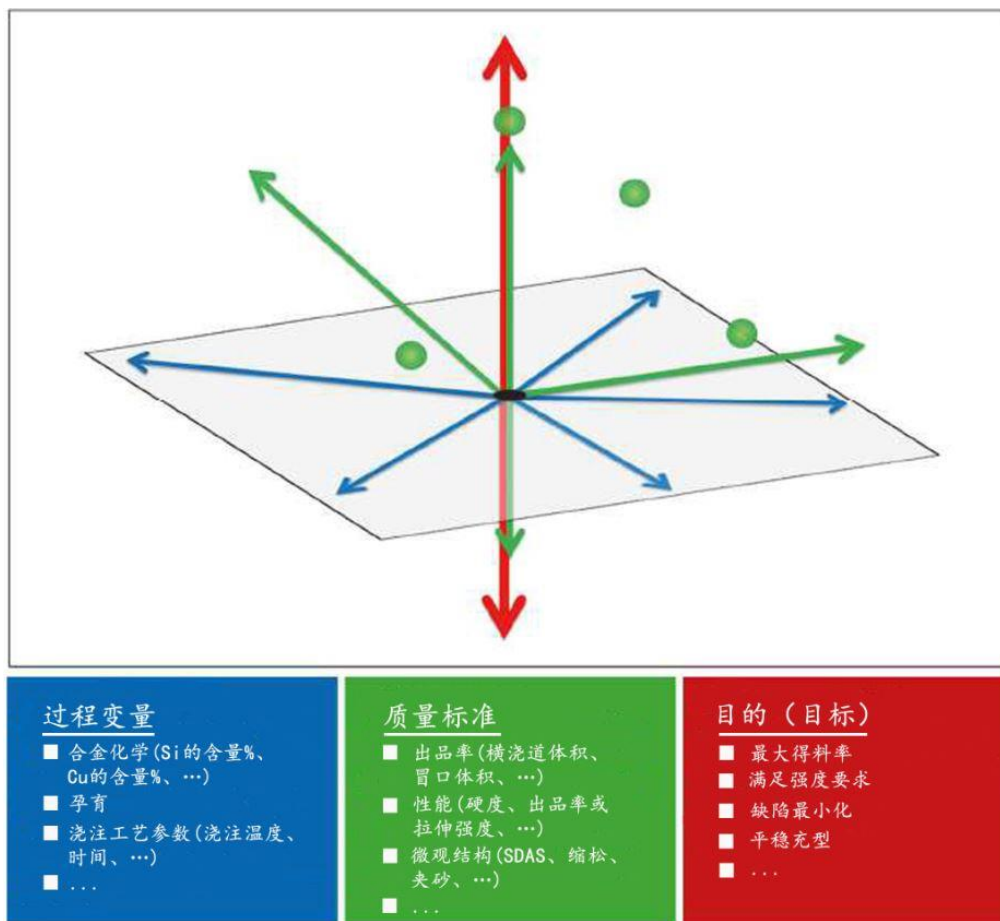


图 1：由不同工艺参数、计算的质量标准和软件中定义优化目标构成的自主优化的虚拟设计空间。

直至今日，铸造工艺模拟工具已被金属铸造工程师用于确认将要采用的工艺参数和评估现有的铸造工艺布局。然后，他们手动更改工艺参数或几何体，如横浇道、内浇道或模具，以接近实现他们心中的目标并重复这个过程，直到他们找到一个满意的解决方案。这种逐步推进的方法可以描述为一维手动优化（图 2）。

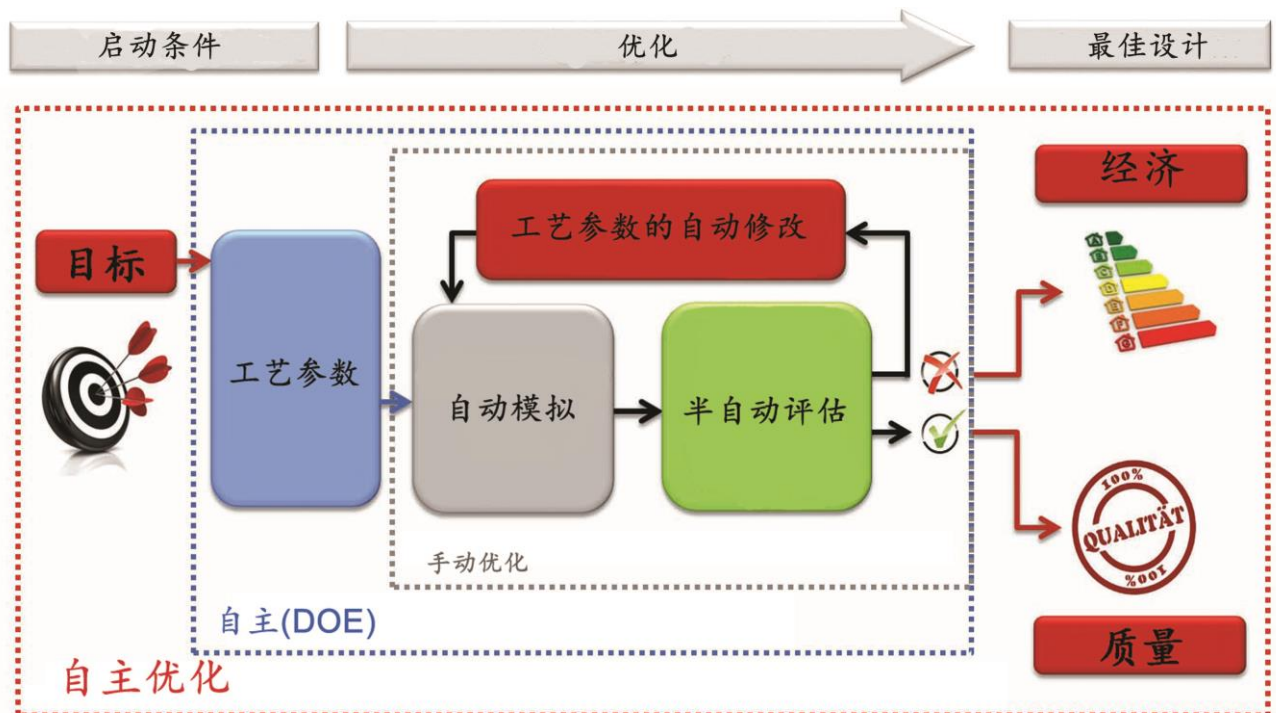


图 2：各种用于寻找最佳解决方案的优化方法

在 MAGMASOFT® 中，这种内循环（灰色）已经完全实现自动化。可通过建立可变几何体和工艺参数预定义（蓝色）的自主实验设计（自主 DOE）扩展。这将创建一个设计集，可以自动运行，例如更改冒口数量、位置和尺寸，改变参数相关的工艺，选择不同的金属化学成分。对于各个虚拟铸造试验或设计，程序会自动评估规定的质量标准。这些标准可基于 MAGMA<sup>5</sup> 中存在的任何结果，即如凝固时间的工艺信息、如缩松或气孔的缺陷信息、局部微观结构和性能，如枝晶间距、石墨球数和拉伸强度。

整合目标来实现一个完全自主优化（红色），对于偶尔目标相互冲突的模拟设计进行自动评估。如同金属铸造者在他的日常工作中，这意味着程序需要权衡铸件和工艺上的不同需求（例如：避免临界孔隙率，同时保持可接受的出品率）。利用遗传算法和统计工具，程序可以同时遵循这些相互冲突的目标，借鉴所进行的虚拟铸造试验的结果。

以下是一些选定的例子，显示这种新方法如何支持铸造工程师系统的开发他们的工艺，以及在铸件浇注前开发出稳健的铸造工艺。

## 铸钢件清洁程度的评价与优化

清洁程度是决定现代铸钢件质量的一个关键标准。关键部分的夹杂物往往意味着需要更多的清理次数，从而导致机械性能的降低。加工工艺中由于发现夹砂的表面缺陷，铸件经常报废。

铸钢件中的大多数夹砂是由于充型系统中金属接触空气氧化所致。众所周知，铸造工程师用巧妙设计的浇注系统来避免此类缺陷。他们明白平稳充型和避免卷气可以提高铸件的清洁度。

实际铸造工艺中，铸件清洁度仅可以通过表面加工、夹砂计数、二维样品的统计评价进行评估。为了避免破坏铸件，可能在连铸试块上进行这种调查，也就是说，仅仅评估冶金质量。铸钢件内的局部流动状态所带来的影响完全被忽略。非金属夹杂物的实验评估总是过度耗费时间和成本，在各个铸件的生产中进行实施是不切合实际的。然而，自主 DOE 和优化可以轻而易举的快速运行。它们可以系统的评估变量以及定量分析不同的浇注系统（图 3）。在这个例子中，研究浇注系统对钢铸件表面再氧化夹砂数量和分布的影响。软件运行 12 种预先准备的不同浇注设计。在软件用户没有任何操作的情况下，设置和计算自主 DOE 中的各个模拟，并根据相关质量标准评估其结果。不同设计以条形图的形式显示在图 3 中，并按照其表面清洁度进行排序。根据质量标准，快速选择最佳和最差的设计。图 3 中显示一个较好（#3）和不太好（#10）的浇注系统，每个都接近其各自的模拟表面清洁度结果。

图 4 评估 4 个方案的表面质量。另外增加一个质量标准，就是显示充型过程中的紊流程度。利用充型工艺中金属液前沿被氧化的表面积，可以很容易地进行评估。具有最多表面夹砂的方案同样也有较为严重的紊流。这个图表再次确认平稳充型和铸件清洁度之间的关系。自主优化能够快速、安全地量化评估质量标准。自主优化结果的对比用来确定工艺参数和质量标准之间的相关性。



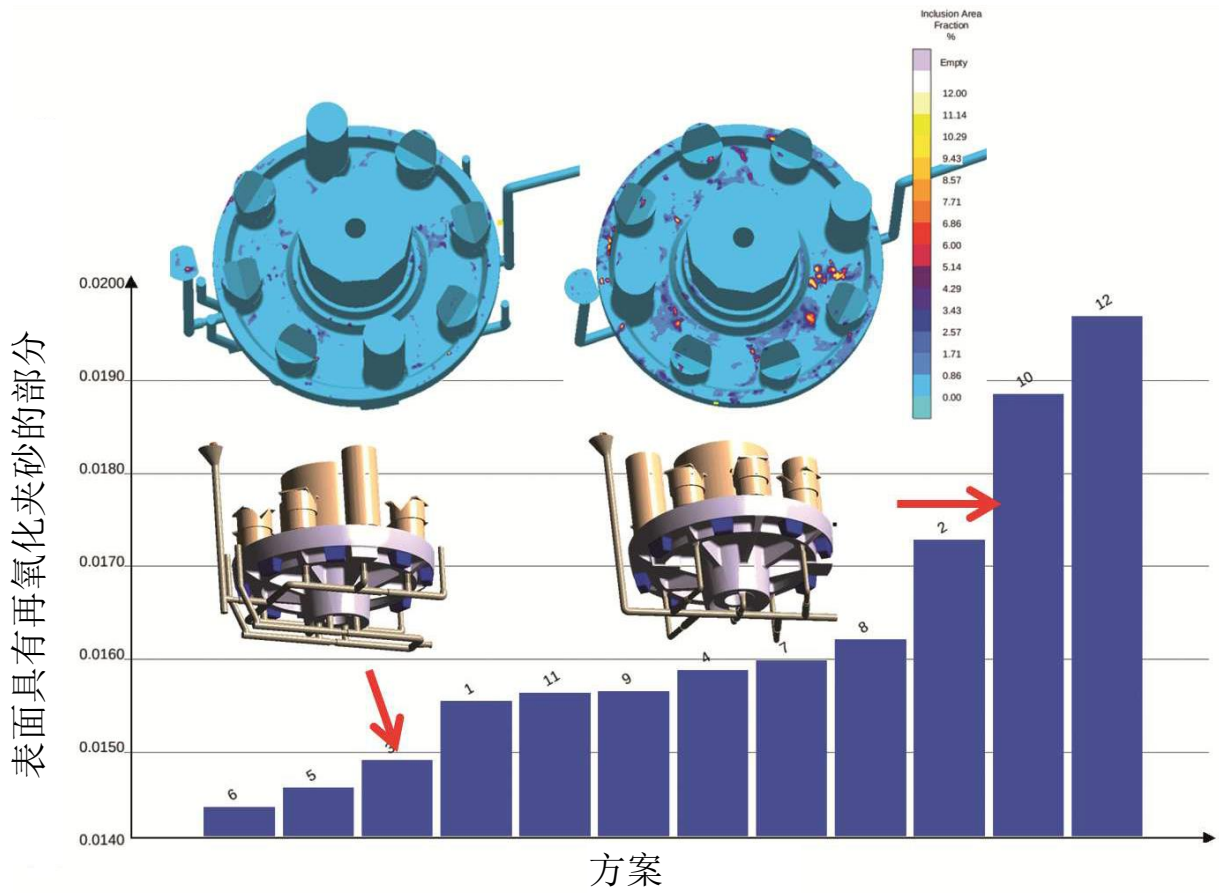


图 3: 自动和定量评价多个浇注设计与表面质量的相关性

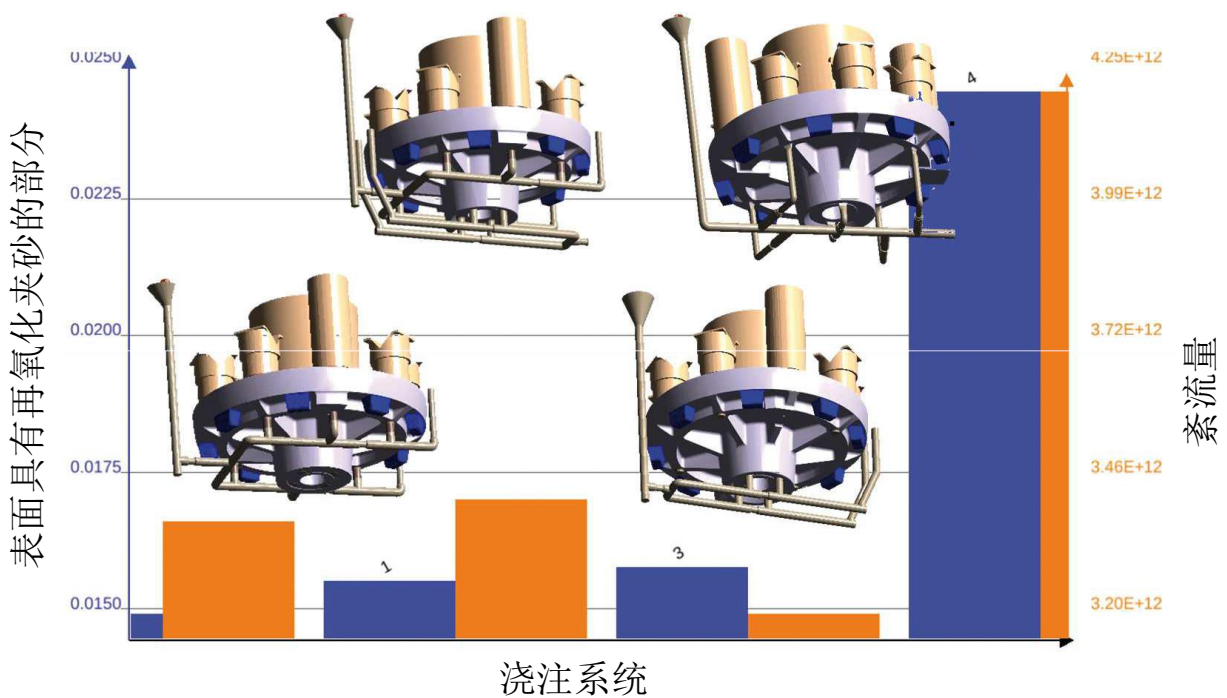


图 4: 4 种浇注系统方案在充型过程中的表面质量和紊流评估

## 行星齿轮架的冒口优化

自主优化允许铸造工程师根据质量标准定量的评估局部铸件质量，另外整个铸造过程工艺及相关设计参数都可以灵活变动，可以给工程师无限的空间来评估影响铸件质量的重要因素，确定用于生产的最优方案。

这个例子（图 5）是优化球墨铸铁行星齿轮架的冒口方案。铸件内外部的冒口和冷铁为铸件法兰区域（红色虚线）提供补缩。添加的变量是选择增加冒口以下区域的壁厚（补贴），从而能生成不同的工艺方案。

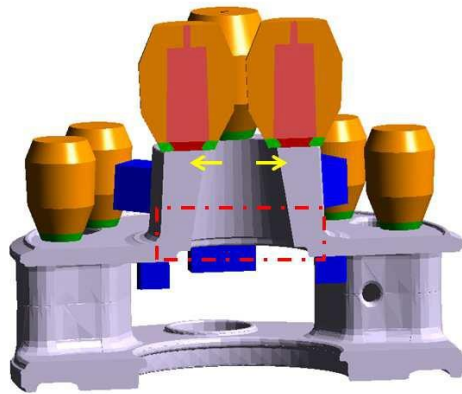


图 5：球墨铸铁行星齿轮架及其冒口和冷铁分布的断面图；红色虚线表示评估区域；黄色箭头显示可以增加铸件壁厚的地方。

通过更改多个参数，以评估哪些参数对关键区域的缩松具有显著影响。具体来说，研究冒口尺寸，补贴尺寸以及冷铁内外分布对于铸件关键区域的影响。这使得软件将会自动运行 32 个实验方案（DOE）

该 DOE 的结果（图 6）显示每个参数对质量评估的影响，比如法兰区域的缩松。散点图中的每个标记都代表一个设计方案，并且是一个单独模拟的结果。

这些结果表明对于所有可变参数，可以得到较低的孔隙率。可以清楚地看到冷铁分布对缩松具有显著影响。具有图 6 右侧最多冷铁数量的方案，无论其他参数如何变化，缩松缺陷总是较小的。在这方面，该种解决方案相对于其他生产条件中的变化是稳健的。正如预期，增加补贴的尺寸也可缩小缺陷范围内的分散，但是它的影响小于冷铁的改变对于铸件缺陷的影响。

使用自主 DOE，可以清楚地确定哪些参数对铸件质量具有显著影响，以及铸造工程师应将重点放在何处（本例中是冷铁方案），以找到最终和最优方案。

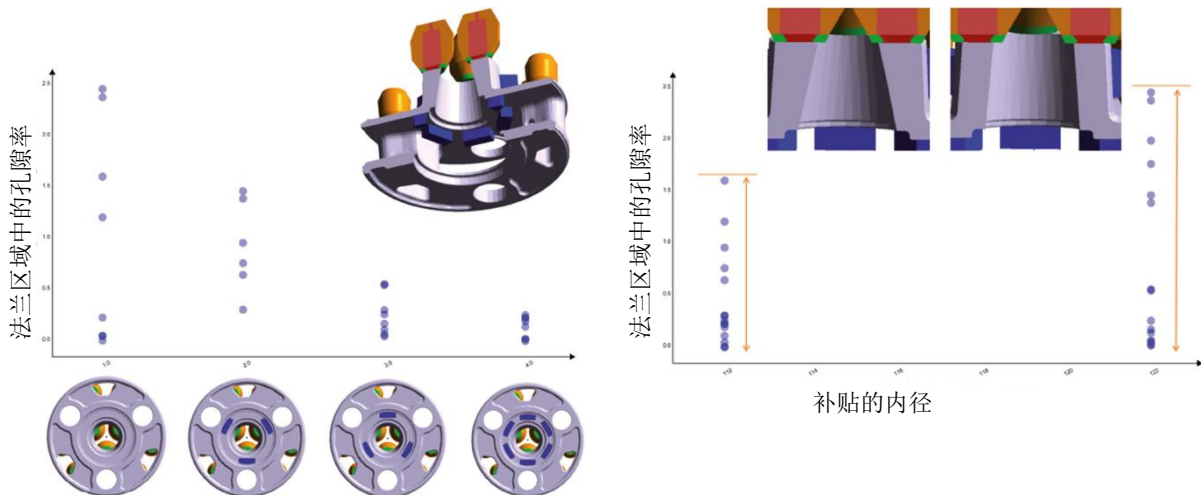


图 6：冷铁方案（左侧）和补贴（右侧）对关键区域缩松的影响

### 重力砂铸铝件的稳健工艺布局

在大批量铸件制造中，持续满足质量要求至关重要。工艺参数可能随时间变化。由于这些参数之间复杂的相互作用，铸造工艺总是在生产过程中验证。外部因素，例如：化学成分或砂的变化会影响铸造工艺，如果改变又有可能造成安全问题。自主 DOE 和优化提供工艺参数和铸造质量之间相关性的定量分析。此外，它们提供关于工艺参数或其他因素波动时质量标准如何受到影响的有价值信息。这意味着使用自主优化不仅可以帮助确定最佳的铸造工艺，而且可以提供关于工艺方案如何稳健的信息。

下面的例子优化一种砂铸铝件的冒口方案[3]（图 7）。一模六件。

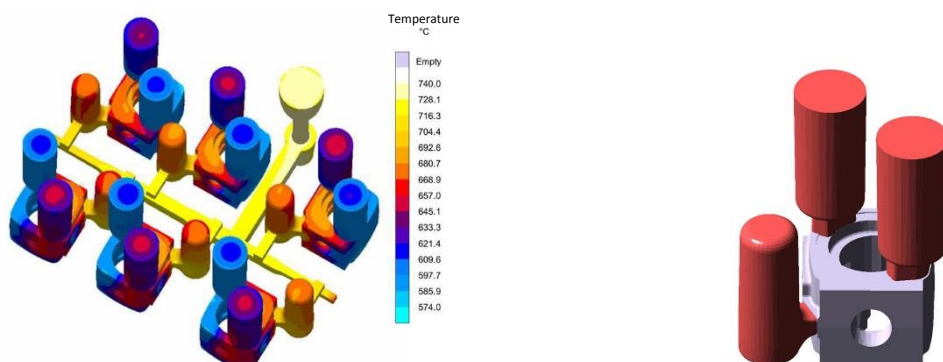


图 7：一模六件的浇注系统—充型结束时的温度分布（左）以及单个铸件的原始冒口方案（右）

在第一个步骤中，优化热冒口的形状和尺寸。在浇注结束后，各个不同铸件的温度分布完全不同。通过“热”冒口浇注各个铸件。此外，2个“冷”冒口位于各个铸件的顶部。进行具有“尽量减少铸件内部缩松”和“尽量减少冒口体积”目标的自主优化。在不到8个小时内自主进行总共45个设计的计算（各个铸件浇注和凝固的模拟）。图8中的散点图显示各个模拟设计的缩松与冒口体积之间的关系。最满足这两个目标的设计方案，绿色的方案表示没有缩松和冒口最小化的工艺方案。此图表中也显示出其他没有缺陷的方案（靠近X轴水平线上的方案），但是这些方案都需要较大的冒口，这会使得出品率降低。

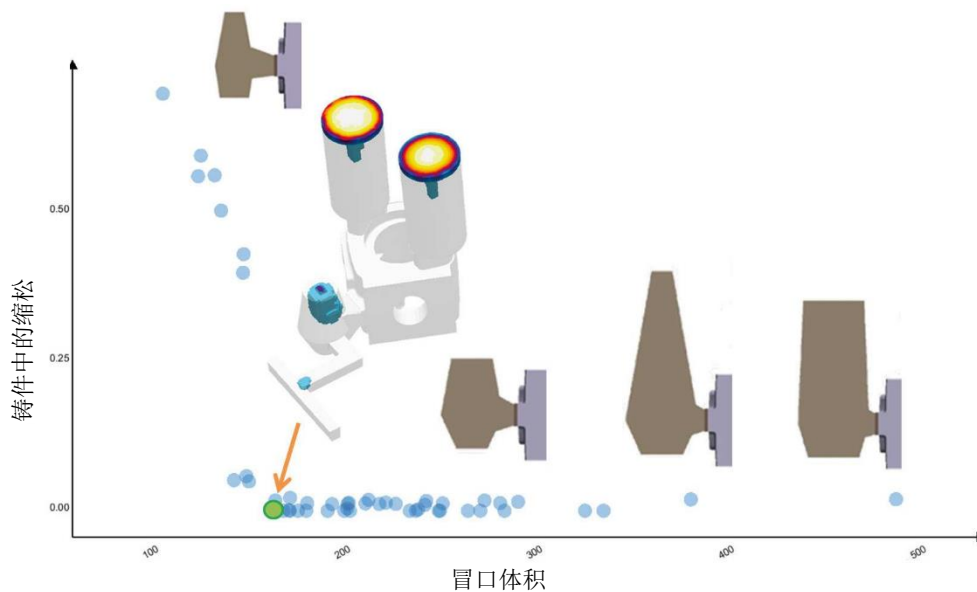


图8：散点图中显示热冒口形状和尺寸对铸件中缩松和冒口体积的影响（绿点是最佳设计）。

显示的优化设计提供以最低成本从各个型腔获得无缺陷铸件的最佳组合，假定其他工艺参数保持不变。通过评估所有显示无缩松铸件的设计方案，可以研究怎样的冒口设计在生产中更加稳健。由于软件可以额外的增加质量标准来评估之前模拟过的方案，所以也可以评估工艺方案的稳健性。质量标准“关键补缩区域”显示需要最长补缩的铸件区域。如果该标准表示需要由冒口延伸进铸件，工艺参数中即使最小的波动也将导致铸件出现缩松的风险。图9显示预测的缩松分布（左侧）连同“关键补缩区域”结果（中间），作为最佳方案的补缩性能评估。



正如预期的那样，铸件没有缩松，仅在冒口处看到缩松。另一方面，“关键补缩区域”的热冒口延伸进铸件。用户现在能够灵活选择另一个满足这两个标准的冒口设计。在这种情况下，相比“最佳”设计，热冒口只需轻微增加尺寸，以确保“关键补缩区域”不进入铸件（图 9，右侧），因此提供一个更稳健的设置[3]。

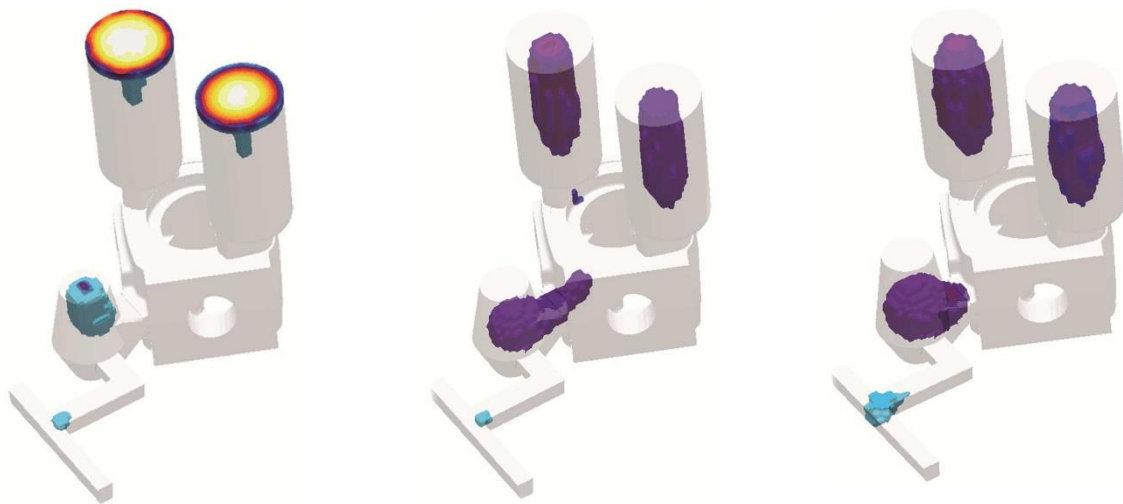


图 9：优化布局（左侧）和具有轻微较大冒口的更稳健情况的预测缩松和“关键补缩区域”结果

### 压铸件横浇道设计和压射曲线的同步自主优化

由于浇道设计和浇注系统以及压铸过程参数相互关联，浇道的几何形状决定了铸件的浇注过程。作为一个例子，这里研究横浇道设计和压射曲线同步变化对 4 腔压铸件的铸造质量的影响。

高压铸件浇道系统通常离料饼越远，截面尺寸越小。这个例子（图 10）的浇道设计通过底部和顶部腔之间横浇道截面收缩的变化，进行自主优化（见图 10 中的红色实线和虚线）。横截面减少的位置对铸件的浇注过程具有显著影响，尤其是四个腔被均匀浇注。这是高质量铸件可重复生产的一个重要前提。

图 11 显示两种不同浇道截面积工艺的浇注时间的变化。利用对称性，仅显示右侧。左侧布局在顶部和底部型腔内显示完全不同的浇注时间。

在这点上，右侧布局明显更好，因为型腔显示几乎相同的浇注过程。

为了同步研究对横浇道几何体变化对浇注的影响和压射工艺中活塞的加速，横浇道收缩的位置和活塞由慢速到快速的加速时间作为变量。

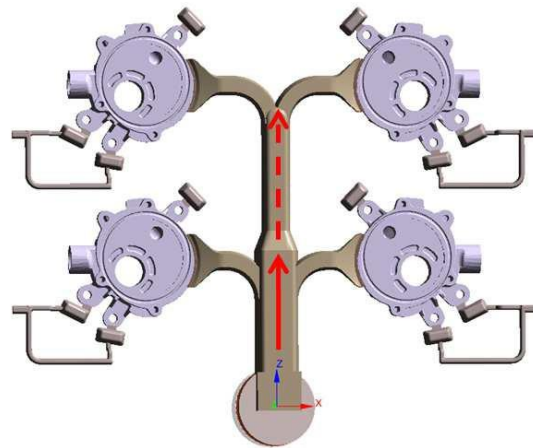


图 10: 高压铸件横浇道中横截面变化的位置

进行一个具有 98 个不同设计的自主 DOE，自主生成、模拟和评估所有几何体和压射曲线变化。

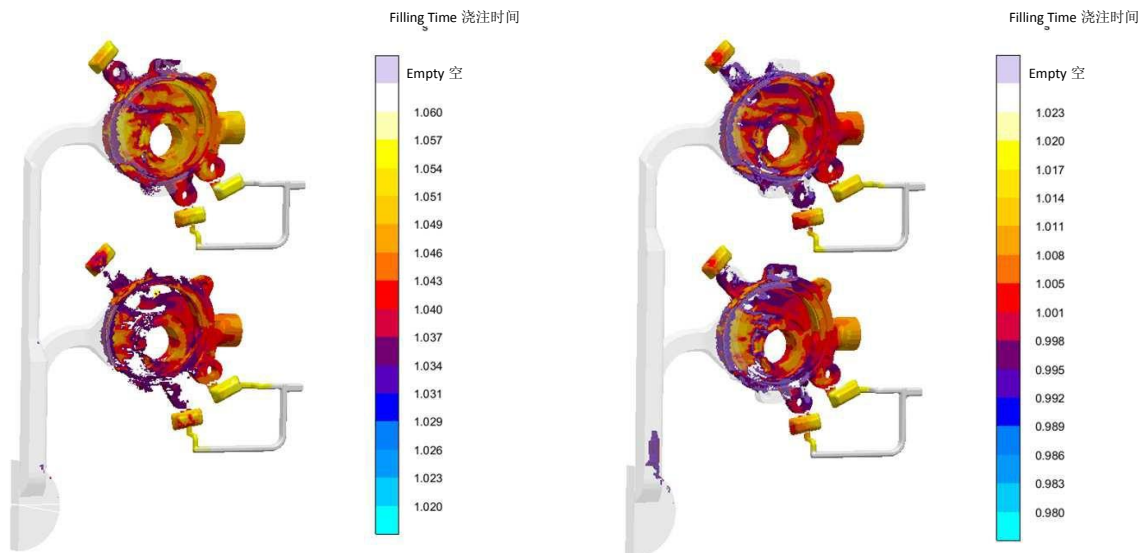


图 11: 两种不同横浇道收缩位置的局部浇注时间（由于对称性，仅显示铸件的一半。）

在图 12 的上半部分显示活塞速度变化图与活塞运动过程。待研究设计加速阶段的开始时间总是位于垂直绿线和蓝线之间。图 12 的下半部分显示主效应图，描述加速阶段开始时间改变（上图）和横浇道收缩位置（下图）对浇注时间之间差异的影响。

该差异越小，浇注过程越均匀。主效应图中的每个标记均表示自主 DOE 针对特定加速点或横浇道收缩位置的所有模拟的一个平均值。线条的倾斜表示各工艺参数对目标的影响。斜率越大，影响越大。

这些结果表明在稍后时间点开始加速导致型腔浇注中的差异增加。相比较而言，横浇道收缩位置的影响相对较弱。收缩越高，型腔的浇注越均匀。

这个例子表明改变一个工艺参数总是对其他工艺条件或铸件和模具设计的决定具有影响。

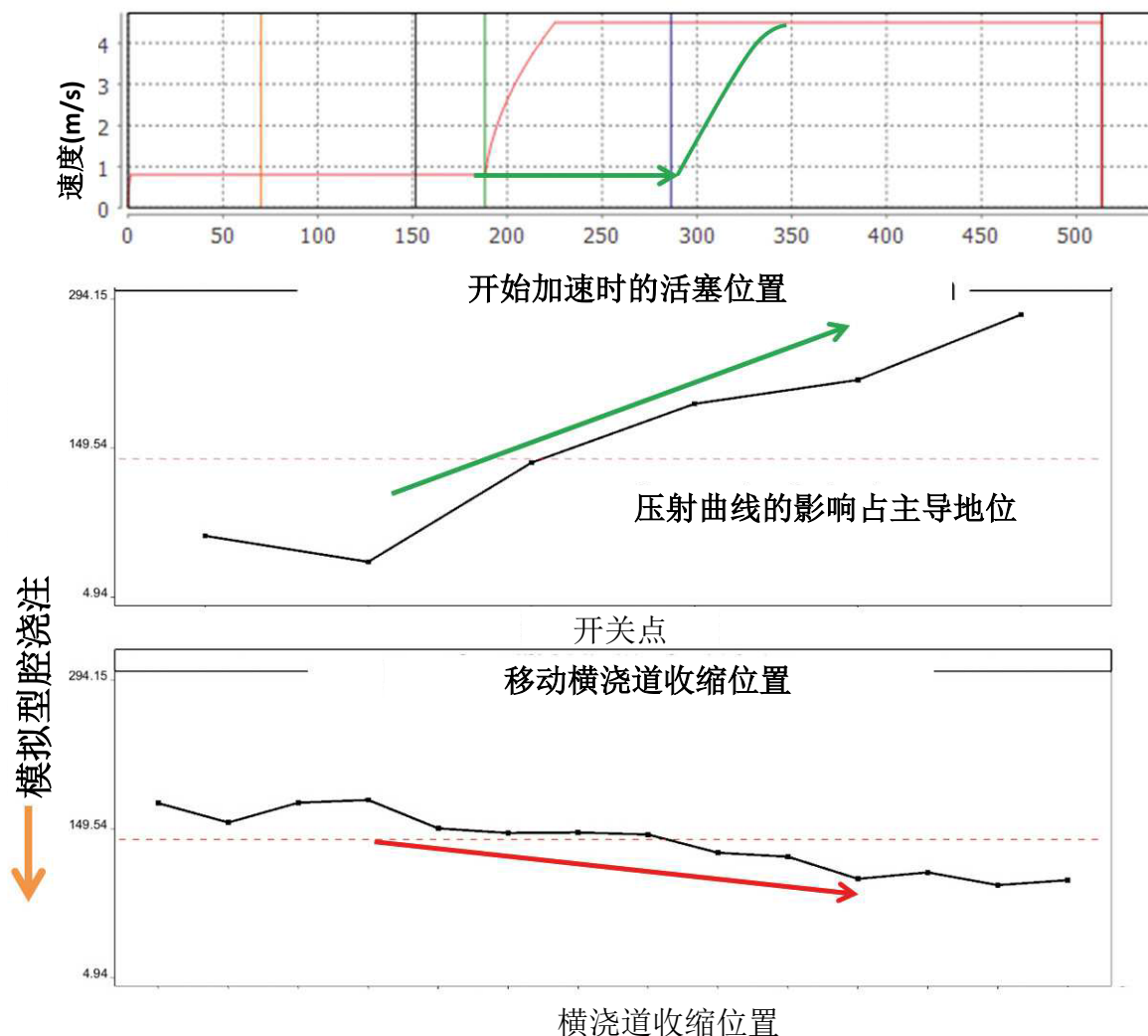


图 12: 压射曲线 (中间) 和横浇道收缩 (底部) 高度影响所有型腔均匀浇注的压射曲线 (顶部) 变化和主效应图

## 结构铸件支撑架热处理的自主优化[4]

铸造工艺模拟工具可以预测铸件在其整个制造过程的残余应力和铸件变形，也包括热处理工艺。这个例子说明如何用自主 DOE 和优化来尽可能的减少即使是压铸结构件的变形。

固溶处理是铝铸件 T6/T7 热处理中的第一步。由于材料强度接近固相线温度，和铸件受到重力的影响，在薄壁的结构性铸件中，生产过程中仍然存在永久塑性变形的风险。图 13 通过计算一个结构性汽车铸件的变形，量化分析不同固溶处理温度以及时间的相关性。在相同温度水平下更长处理时间意味着更高变形的趋势变得越来越明显。因此，虚拟实验不仅能提供一种定量评估各技术参数的方法，它还提供在产品开发工艺中建立稳健工艺条件和节省能源的可能性。

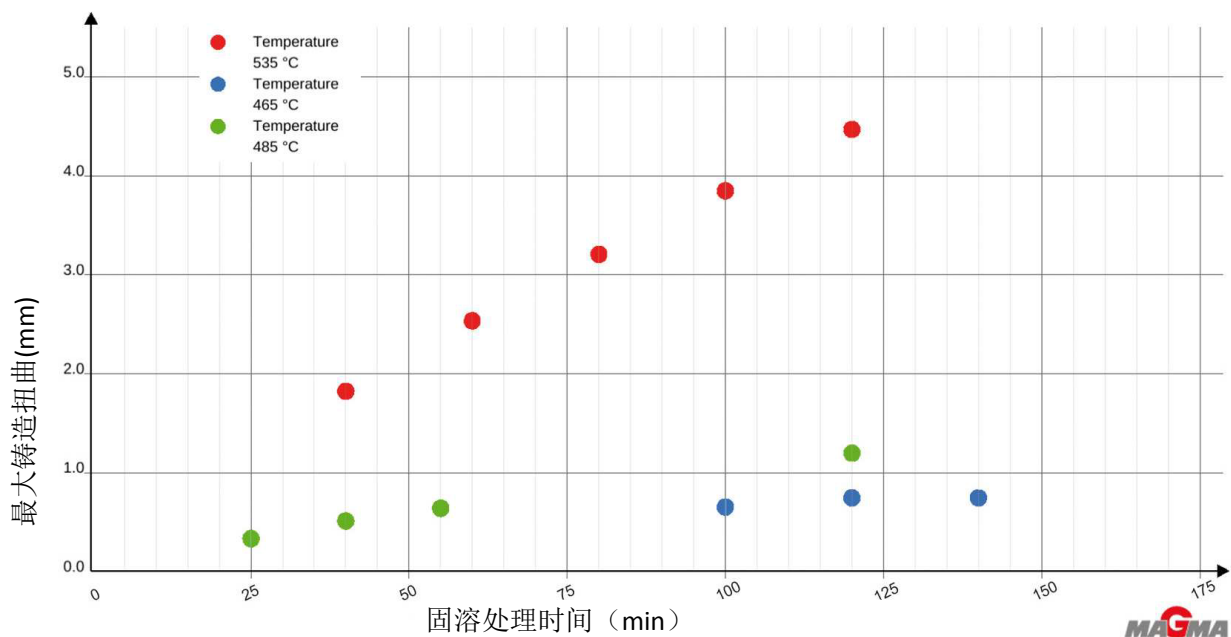


图 13: 研究不同固溶处理时间和时间的热处理工艺中压铸铸件结构部件最大变形的虚拟实验设计。

热处理工艺中铸件放置在支撑架上。支撑架和铸件之间适当的接触点对于取得尺寸稳定性非常重要。开始先选定最佳的固溶处理温度和时间，目的是通过优化铸件/支撑架接触点的位置进一步减少铸件变形量。

设置一个自主 DOE，用不同方案来评估接触点位置（图 14）。图 15 显示一些选定支撑架设计方案的变形结果。可以清楚地看到部件的变形是由于重力所致。第 1 个支撑架（左上角）显示在部件的左前方区域存在 3.2mm 的变形。在左前角（图 15 中的右上角）增加额外的支撑也显示有显著改善。下一个设计（左下角）显示移除前面的一个支撑几乎没有影响。在所示的位置选项中，左前支撑往回移动和甚至更靠左侧，导致约 0.5mm（右下角）的最小变形。

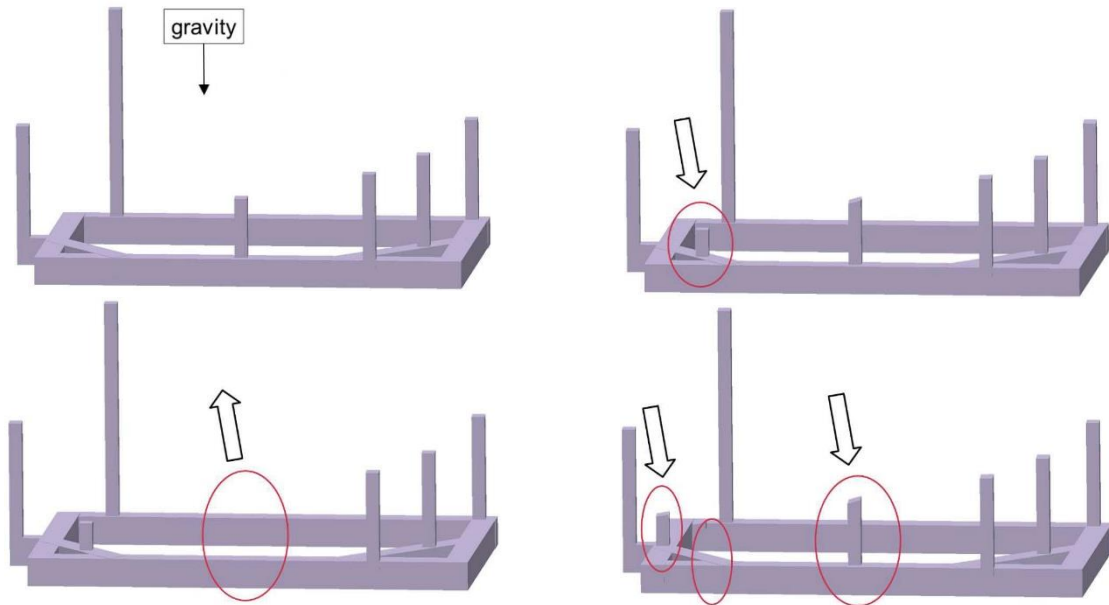


图 14：用于尽量减少热处理变形的 4 种不同支撑架设计

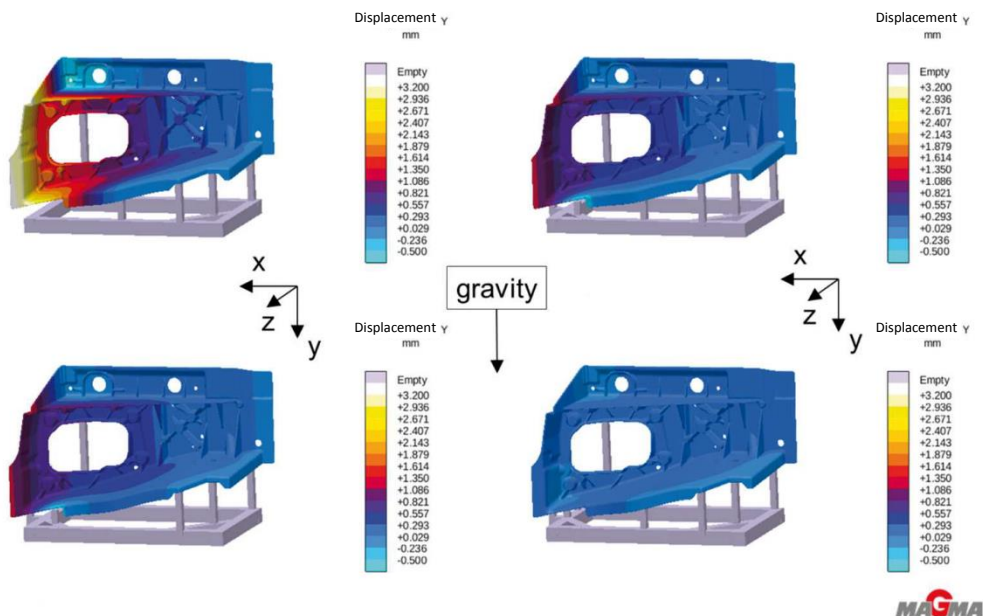


图 15：放置于图 14 中所示 4 种不同支撑架上时热处理工艺中结构压铸件的变形



## 芯盒中加热装置的自主优化

芯盒的寿命取决于砂芯生产过程中由于温度改变导致的模具的热平衡以及周期性应力分布。因此，希望尽量减少砂芯生产过程在芯盒的温度变化，以及在整个芯盒体积上尽可能保持温度均匀分布。完整的砂芯制造工艺包括射芯、粘合剂固化和芯盒的热循环，可以使用模拟自主优化进行分析。

图 16 显示砂芯生产循环中芯盒左右模的温度分布。砂芯厚壁部分对应的芯盒区域保持着较低的温度水平。这将会导致较高的循环应力，减少芯盒的寿命。

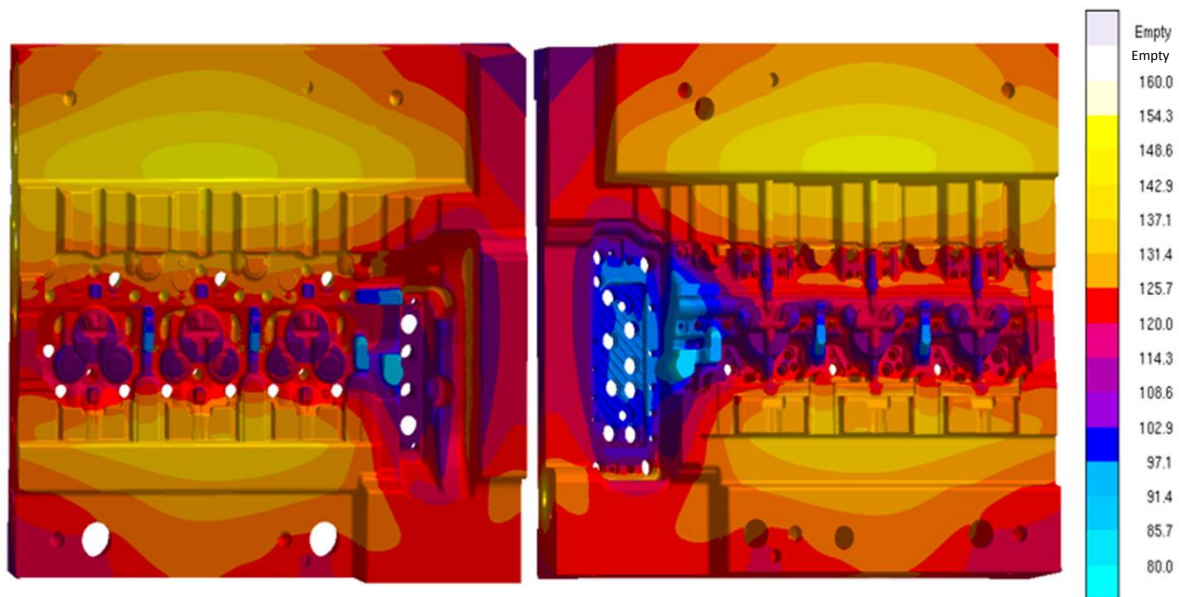


图 16: 砂芯生产循环中芯盒左右模的温度分布

通过调整芯盒中的加热装置，可以取得更均匀的温度分布。每个加热元件在循环生产中对模具都有各自的影响。在实际铸造工艺中，确定各个加热元件对芯盒中温度的影响将需要大量的测量实验。因此，自主优化是评估加热元件配置及其在砂芯生产中对温度分布的影响的理想工具。对于这个例子，各个加热元件对关键区域温度的影响可见于主效应图（图 17）。加热棒#6 对芯盒较冷区域的温度改变又较大的影响，如相应的斜线的斜率所示。与此相反，加热器#3 所示的水平线表明该元件对冷区域的温度几乎没有影响。

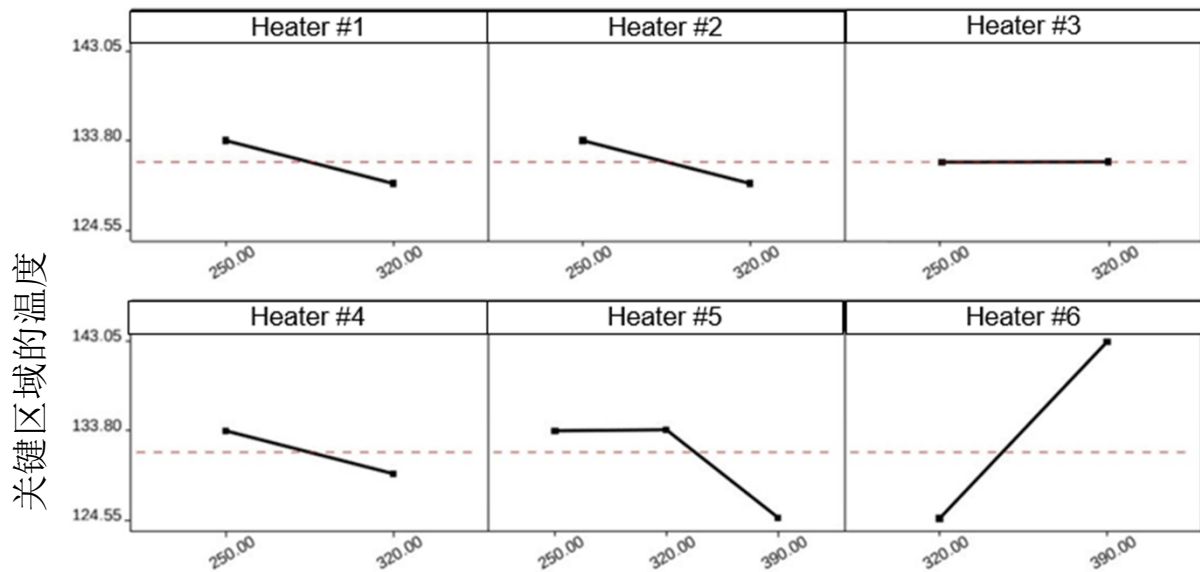


图 17: 每个加热装置对芯盒内关键区域（热电偶放置处）平均温度的影响。

## 总结

以上多个例子阐述了在铸件生产中结合使用模拟工具 MAGMA<sup>5</sup> 来进行自主优化，从而在首个铸件浇注前获得最优和最稳健的铸造工艺布局及参数。该软件可以探索研究最佳的过程参数，最优的浇道和内浇口位置及尺寸，冒口和冷铁的位置及尺寸，工程师们可以使用虚拟的自主优化来代替现场试验，从而实现多个不同的质量目标以及成本目标。

该模拟工具以用户友好方便为目标，此工具整合了参数几何体创建和自动参数变化以及自主实验设计的统计分析和自主优化遗传算法。导出结果的同步评估使铸造工程师可以很容易地比较和评估来自大量模拟的结果。可清晰显示设计和工艺变量、质量标准和目标之间的依存关系。

在引入铸造工艺模拟 30 年后，铸造工程师现在可以结合单一模拟、自主 DOE 和自主优化，在生产高质量铸件过程中，以获取最佳的工艺理解和在最低成本下建立稳健的铸造工艺。

## 参考文献

- [1] Hahn, I., Sturm, J.C.: Versuchspläne in der gießtechnischen Simulation, GIESSE- REI 96 (2009), Nr. 7
- [2] Bramann, H., Pavlak, L.: Innovatives Produktdesign und robuste Prozessauslegung durch virtuelles Experimentieren mit der Gießprozess-Simulation. GIESSEREI 102 (2015), Nr. 2
- [3] Dieckhues, G., Gummersbach, T., Schmidt, D.: Feeder Design for an Aluminium Sand Casting, presentation at the International MAGMA User Meeting, Potsdam, Germany, October 2014
- [4] Gaspers, H.J., Thorborg, J.: Design Optimization of Heat Treatment Support Frames for Aluminium Alloy Structural Cast Parts using Virtual Experimentation, European Conference on Heat Treatment (2015), Venice, Italy, May 2015.

