

砂芯模拟在工艺优化中的实际应用

JÖRG C. STURM, INGO WAGNER

MAGMA Gießereitechnologie GmbH, AACHEN, GERMANY

摘要 Abstract:

制芯模拟是一种协助砂芯和模具制造商改进其芯盒设计和制芯过程的新技术。作为制芯模拟软件的 MAGMA C+M，提供更多的是代替不必要的试验和实验。它提供一种评估复杂砂/粘结剂和空气的双向流并揭示“黑箱”芯盒内幕的新方法。本文中，介绍了各类实际工业案例，MAGMA C+M 如何帮助优化复杂砂芯的射芯和固化工艺，并可深入了解射嘴内的流动情况。

Core making simulation is a new technology to assist core and tool makers to improve their core box designs and core making processes. Core making simulation as offered with MAGMA C+M is more as a replacement of unnecessary trials and physical experimentation. It offers a new methodology to assess a complex 2-phase flow of sand/binder and air and reveals the “black box” core box. In this paper real industrial cases are presented, how MAGMA C+M helped optimizing the core shooting and curing process of complex cores as well as offers insights to the flow situation of nozzles.

关键词 Key Words :

制芯工艺模拟，射芯，双向流，射嘴，排气，砂-空气混合物，射芯设备，优化

Core making process simulation, core shooting, 2-phase flow, nozzle, vent, sand-air mixture, core shooting equipment, optimization

砂芯制造还将为模具和芯盒制造商带来惊喜。砂芯相关缺陷是铸造生产主要的成本因素。芯盒的布局设计一般基于传统经验进行试错，直到获得令人满意的砂芯质量。生产所用新模具的试产扩量阶段一般需要几次成本高昂的优化循环，包括按照生产条件进行最终批准。每次试生产或多或少会导致模具的修改，对于铸造工程师而言，不能保证所修改的方案会真正获得期望的成功。只能看到最终结果，故决策没有基于明确的因果原则（该原则证实何种修改导致怎样的结果）。

模拟砂芯生产过程是一个相对较新的方法。它是在铸造工艺模拟出现 20 多年后才被引入的。通过分析射芯和固化过程，从根本上改变了芯盒和工艺布局。砂子在流动、运输过程中复杂的交互作用，以及随后砂子-粘结剂的混合物在芯盒中的压实，还有砂芯的放气、固化和干燥过程都是无法通过“线性”思维过程来理解的。模拟制芯过程使得工程师可以在用钢板切割新芯盒前（即制造新芯盒前）即可定量的分析对砂芯质量影响最大的必要参数。在设计过程开始前，即可显示砂芯制造及其过程（可视）。整个过程及其相关物理参数变得可视化。这使得工程师可以基于物理定律和清晰的成因而明确目标。由此，砂芯的技术和经济可行性变得可以量化。另外，工艺理解和实现质量改进措施变得更为容易。模具制造商可采用三维方式观察制芯过程，并能有效开发出符合生产要求的芯盒。

射芯模拟模型评估

由于砂粒在流动以及空气的不断变化，射芯过程的建模是一个极为复杂的过程。砂子-空气混合物的流动过程与金属液流动的流动过程完全不同，因为该“流体”的局部性能一直在变化。空气和砂子之间以及各自和周围环境（压射缸、射嘴、芯盒）之间的相互作用需要额外考虑工艺边界条件并结合专业知识【1,2,3】。

选择正确的模拟模型要求与开发商合作评估几个建模方式并对此进行验证。例如，一个开发商通过与最终实现的模型直接对比测试“混合模型”，计算其中的砂子和空气的混合相【4】。

采用该“混合模型”不可能以一种令人满意的方式对所有应用案例的射芯过程的动态特征进行描述（其中砂子和空气典型地按照完全不同方向和不同的速率流动）。

因此，模拟程序 **MAGMA C+M** 采用一个描述空气-砂混合物动力学特征的模型，该模型基于处理作为两个分离相的空气和砂子以及砂-粘结剂混合物【5,6,7】。除了空气和砂子之间的主要动量转换外，还应考虑砂粒自身之间的相互作用。

工艺建模还需要考虑相关设备参数，比如如何在压射缸内增压。射嘴实际上将射芯设备与制芯模具相连接。在实际制芯工艺中，会采用多种集合特征的射嘴。

采用压力损失法则对这些特性进行建模。为了实现芯盒的排气，采用了不同设计和尺寸的排气孔。小排气孔口需要阻挡芯盒内砂子并允许空气逃逸。实验证明，流体定律证实了排气孔处压力损失的模拟符合实际条件。

在设置射芯模拟过程中，需要确定是否需要全部制芯设备（如料斗和芯盒）进行建模或是否仅将边界条件应用于射嘴。如果考虑整个设备自然会导致模拟时间的延长，但有时只有该方式可以考虑影响射芯过程的所有参数。这尤其适用于多型腔模具，其中所有砂芯需要均匀和采用统一方式充型。考量料斗变得很重要，尤其是充型的初始阶段可能导致一些射嘴处的“喷射”时（影响整个充型过程）。

射芯模拟的应用

模拟可以展示射芯的详细过程。提供该过程中任何时间点处的结果和判据。在制模阶段它有利于确定射嘴的位置。可以用来评估射嘴的变化而带来的效果。

充型过程的可视化分析可以评估不同的射嘴结构。射嘴位置的微小变化可能对射芯过程的动态和预期砂芯质量有重大影响。

为了辅助射砂过程的工艺优化，射芯模拟不仅可以基于最终结果分析复杂砂芯，还可分析各种类型的砂芯。因此，射芯模拟可提供整个芯盒里每个射嘴处的局部空气和砂子的速度、砂子分布结果以及在射嘴和排气孔内部砂子和空气的体积、速度和压力等有意义的曲线。

案例研究： 涡轮增压器外壳冷芯盒砂芯的优化

涡轮增压器壳要求需要有一定的气体流动效率，所以其表面质量要求较高。因此，砂芯产生的表面缺陷直接导致铸件被拒收。这使得制芯过程面临一定的质量挑战。芯盒里有关射嘴和排气的布局通常受到客户的限制。

通过原始的工艺方案在冷芯盒中生产出的砂芯存在缺陷【8】（尤其如图 1 中的涡形结构中）。基于原始方案进行射芯模拟，模拟结果与缺陷分布非常吻合（如图 2）。

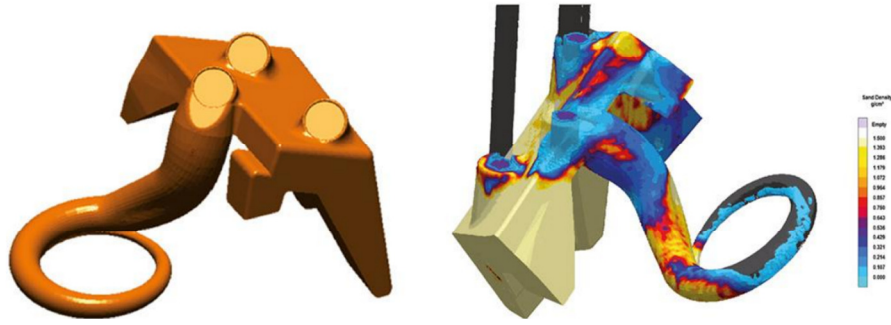


图 1：涡轮增压器砂芯几何形状 (a) 和在射芯过程中砂子/粘结剂混合物密度分布 (b)。

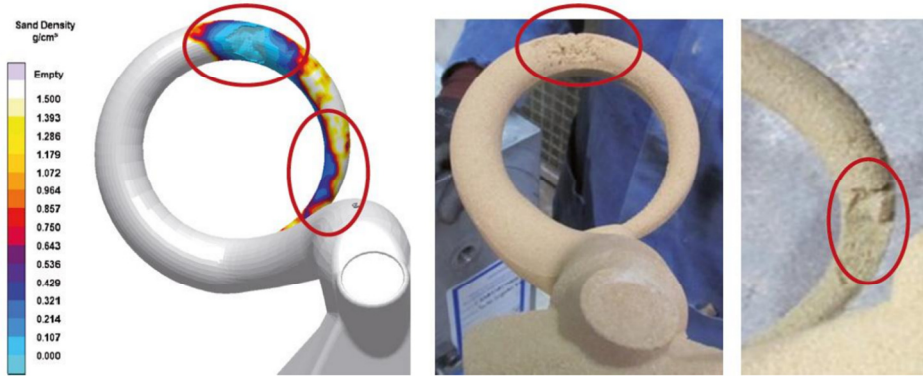


图 2：砂芯涡形结构内预计的密度分布 (a) 和最初芯盒设计生产出的实际砂芯的缺陷 (b) 和 (c)。

在采用 **MAGMA C+M** 模拟的结果得到可肯定后，铸造厂接受并将砂芯模拟用作同步优化芯盒的预测工具。由铸造厂专家通过射芯模拟来评估芯盒设计的优化工艺方案。

首先，假定由于排气问题导致在涡形内产生了缺陷。因此，第一步就是在涡形区内增加更多排气孔，这是通过砂芯模拟评估得出的结论。与专家们的预期相反，采用 6 个排气孔的方案并没有表现出比原先 4 个排气孔的布置方案有很大的改进，如图 3 所示。

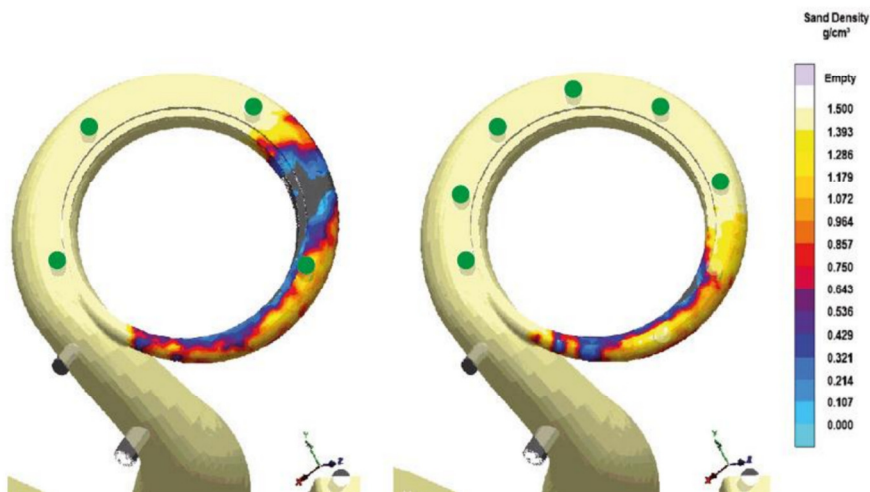


图 3：不同排气布置的模拟结果 (a) 4 个排气孔 (a) 6 个排气孔

射芯过程的详细分析显示出紧实度问题的根本原因。靠近涡形入口附近的排气孔使得空气（用于砂子/粘结剂混合物输送媒介）过早逃逸。这导致在砂子完全填充芯盒空腔前空气和砂子的流速降低，如图 4 所示。在图示标记处附近的空气速度大幅度降低（从 5 米/秒到大约 2 米/秒）。这导致空气能量的损耗以至于后期砂芯的紧实度降低。

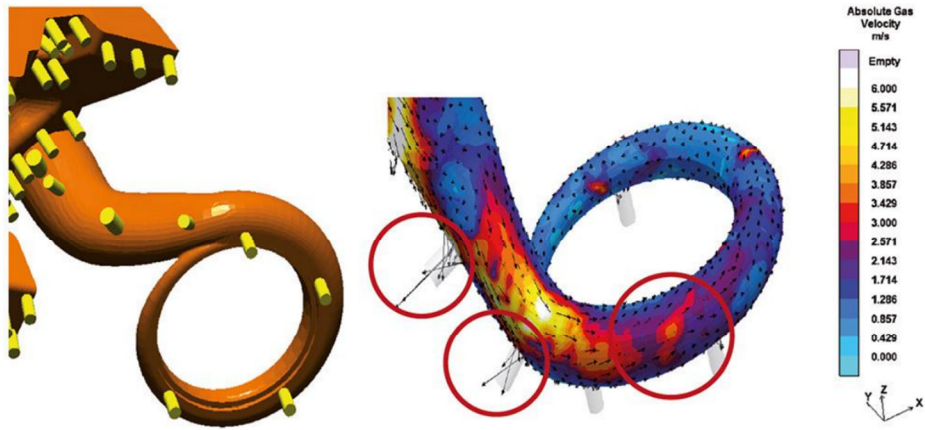


图 4：初次布置的排气孔方案 (a) 和空气速度分布 (b)。

通过 MAGMA C+M 分析，决定采用取消涡形结构入口处的两个排气，增加涡形结构处排气的工艺布局，如图 5。空气流速结果明确显示由于减少排气使得涡形入口处速度增加，但是在涡形内部速度大幅度降低，这导致大的局部压力损失。最后充填区域的较大压力损失是砂子良好紧实度极好标志。快速流动的砂子的速度损耗使得砂子由于其动力而被很好紧实。同时，快速降低的空气速度表明，空气能充分逃逸。

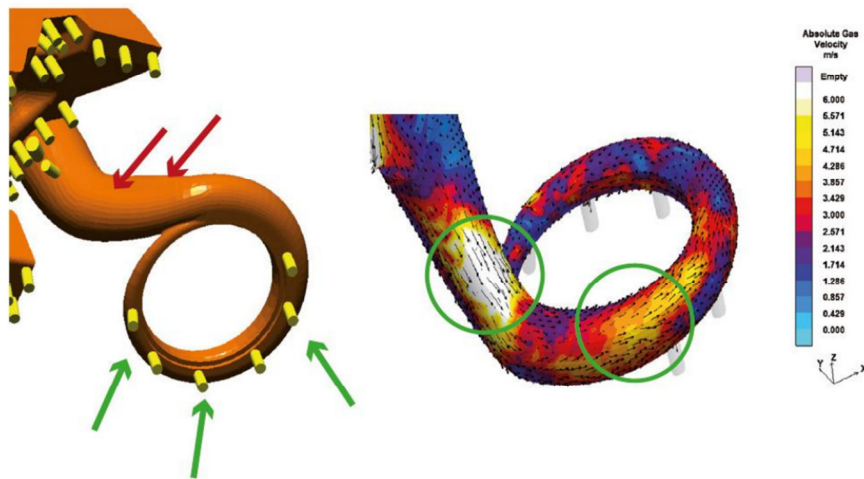


图 5：优化后芯盒的排气孔布置 (a) 和改进后的空气流动分布 (b)。

射芯模拟采用砂子密度分布结果非常清晰地展示射砂过程，如图 6 所示。优化后的方案实际生产出没有缺陷的砂芯。

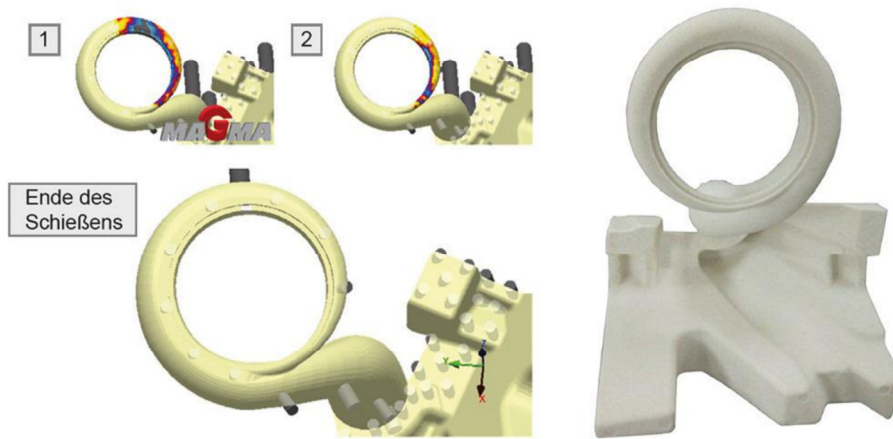


图 6：射芯过程结束时涡形紧实度增加（左）和优化后的砂芯（右）。

依赖于几何形状的喷嘴功能

制芯部门使用多种几何形状的射嘴。作为其最简单形式，射头板开孔就可以作为射嘴使用。然后，从射嘴角度而言，孔径的变化是影响射砂过程的唯一途径，对于简单的砂芯来说这是最经济的选择。但是，通常将射头与芯盒相连接的实际射嘴，一般采用圆筒、圆锥或台阶形状。

不同几何形状的射嘴将产生不同的流动特性。流体力学定律不适用于制芯过程中空气-砂子的流动。例如，在规定压力的边界条件下，相对于圆筒形而言，一个台阶形射嘴将使得流速增加（由于连续性法则）。在射芯过程中，砂子将在射嘴狭窄处聚集，砂子速度将降低，如图 7 所示。除了砂子速度外，流量也将随着射嘴几何形状而变动。

随着砂芯复杂性增加，选择射嘴过程的要求也会提高。迄今为止，一直根据经验和试错选择射嘴的几何形状（即便针对困难的情况）。射嘴内部的流动形态基本上都是未知数。通过砂子流出射嘴的试验表明仅修改射嘴几何形状可产生速度几乎恒定的砂流或产生不连续的脉冲砂流，参见图 8。目前，通过试验无法观察或评估导致此特征流体形态的流动过程。现在，模拟可以分别研究射嘴内部的流动状态。如今可基本理解和量化评估该物理现象。砂芯生产者必须要有影响射芯结果的有关射嘴形状的知识，这一点至关重要。选择不同的射嘴结构，砂的速度和有效射砂质量可能大不相同。根据砂芯几何形状，这也对砂芯局部紧实度有一定影响，如图 9 所示。通过模拟获得的知识可被用于选择合适的射嘴，来实现复杂砂芯的均匀充填。通过模拟的评估，可得出何种射嘴应被用于何种砂芯的系统性规律。

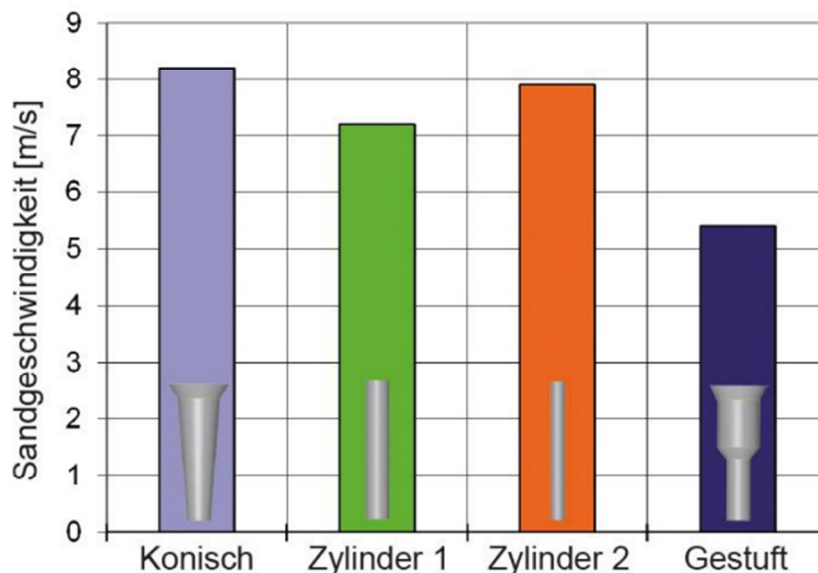


图 7：在几个不同射嘴出口处测定的速度。该速度高度依赖于射嘴的几何形状（在指定相等边界条件下）。

出口直径相同的圆筒形喷嘴 "Zylinder 1"和阶梯形喷嘴"Gestuft" 可产生极为不同的速度。

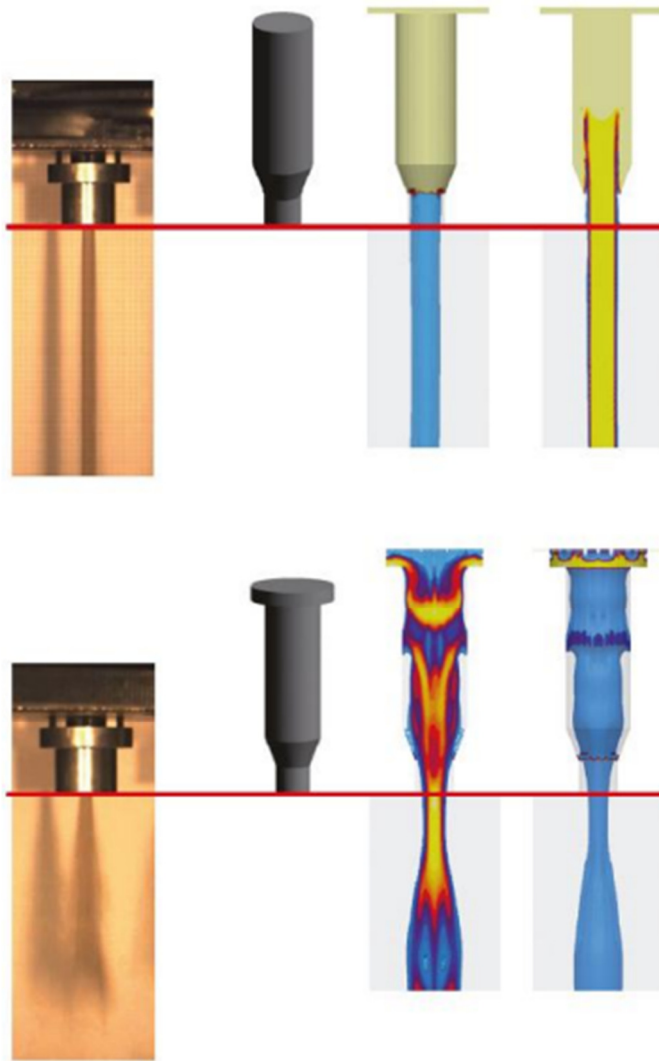


图 8：不同喷嘴形状实际和模拟砂流之间的比较。砂子一般按连续流体流出的喷嘴 (a)。几何形状改变可能将砂流改变为断续、脉冲流体 (b)，此处流体加宽。取决于砂芯几何形状，这可能生产出更好质量的砂芯。模拟过程可以分别评估喷嘴内的流动过程 (c) 和 (d)。

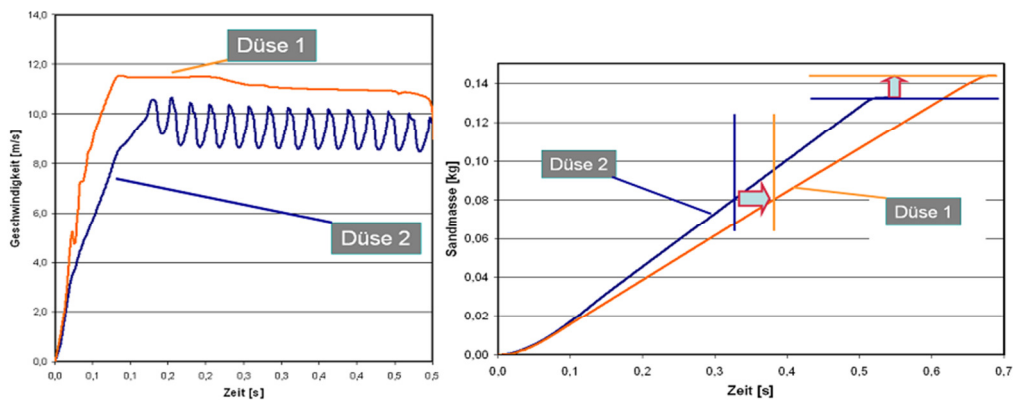


图 9：砂子速度和砂子流量为是两个不同喷嘴形状时间的函数。在喷嘴直径相等情况下，砂子速度和流量也将随着喷嘴形状的不同而变化。从而砂子流量将会导致（取决于砂芯几何形状）不同的紧实度 (b)。此处："Düse 2"充填芯盒较快，但砂子总数量较少。因此，砂芯的紧实度较小。

采用气体固化砂芯的模型

当在砂芯固化过程中采用气体时，加热后的气体被通入之前射好的砂芯内。可以模拟气体硬化的一般固化机制（即 PU 冷芯盒（对于在热芯盒内采用加热空气固化无机粘结剂的干硬化工艺本处也适用）【6】。模拟可以展示气体通过砂芯开孔空间流动的过程。对于 PU 冷芯盒固化，需要向整个砂芯通入三乙胺的固化气体。固化过程取决于各种因素，即粘结剂（成分和数量）、溶剂（类别和数量）和通过粘结剂薄膜润湿砂粒的程度、胺的类别以及砂子和气体温度【9】。通过砂芯的气体流量主要取决于砂芯的几何形状、射嘴布置、气体压力和砂子混合物的渗透性。

一般而言，有利于砂芯射砂过程的射嘴工艺布置对于吹气工艺并非最佳。例如，当气体只能从射嘴短距离横穿到达排气孔时会损耗大量的胺，而其他区域则需要较高的压力且更大的胺量。

首先，模拟的目的就是正确再现整个吹气和固化过程中的胺的流动。在芯盒设计和布置工艺开始前，可以评价砂芯各区域是否被固化气体充分覆盖。软件可以模拟通气过程以及采用空气清洗砂芯的过程。因此，可在早期进行根本原因分析并采取相应的改善缺陷的措施。

案例研究：变速箱盖芯盒砂芯的优化

制芯操作工的基本工作就是确保砂芯在最短的循环时间内充分固化。通常只能在已经射出明显的砂芯和已经确定喷射工艺的射嘴结构后才可发现固化问题，如图 10 所示。通过模拟砂芯的吹胺过程，在生产循环期间胺没有到达砂芯的关键区域，如图 11 所示。



图 10：固化后有缺陷的砂芯。带标记区域表示砂芯未充分固化的部位。

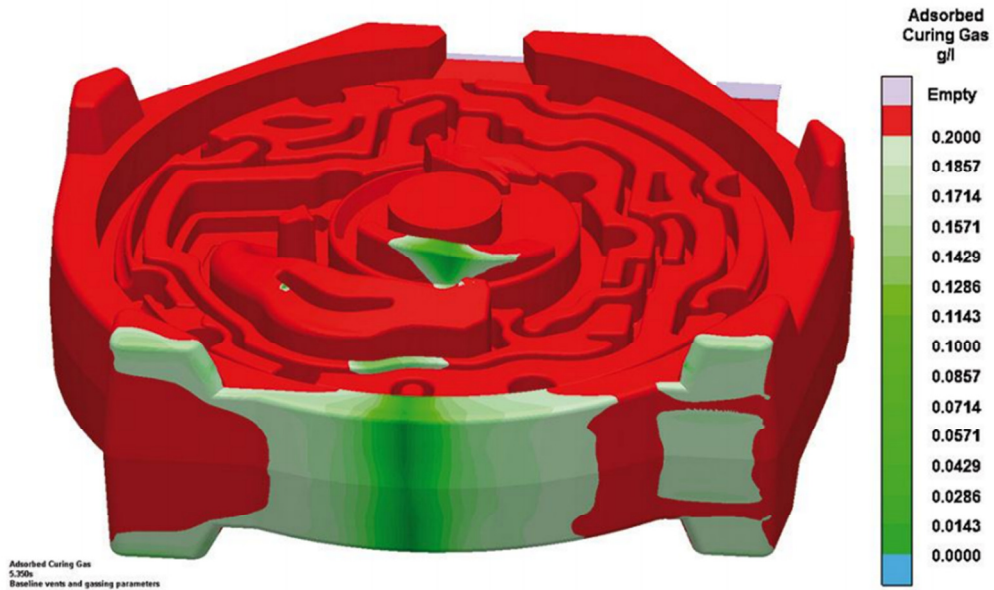


图 11：胺气吹气模拟。所表示的吸收胺的浓度表明固化的程度。完全固化区域采用红色表示，不完全固化区域采用绿色表示（绿色越深，固化越少）。

一般消除固化相关缺陷的措施通常是增加胺的数量、增加气体压力、气体温度，或额外增加吹气时间。不幸的是，这些工艺参数的变化仅适用于小范围并受到砂芯经济性生产要求的限制。由于制芯工不能识别造成缺陷的原因（因为它们可能已经由芯盒布局所导致），上述措施一般仅应对这些症状，但是不能消除缺陷的根本原因。通常，有关固化缺陷的真正原因被视作由于不利射嘴和排气孔构造导致的“流动问题”。即便排气孔位置的微小变化就可能对成功生产砂芯有巨大影响，如图 12 所示。在复杂砂芯几何形状和射嘴结构中，几乎无法“猜出”固化气体的流动形态。如今，模拟可交付详细和客观的流体分析。在砂芯中胺的压力分布、局部流速和显示的临时胺气流量变化是评估吹气效率的重要结果。

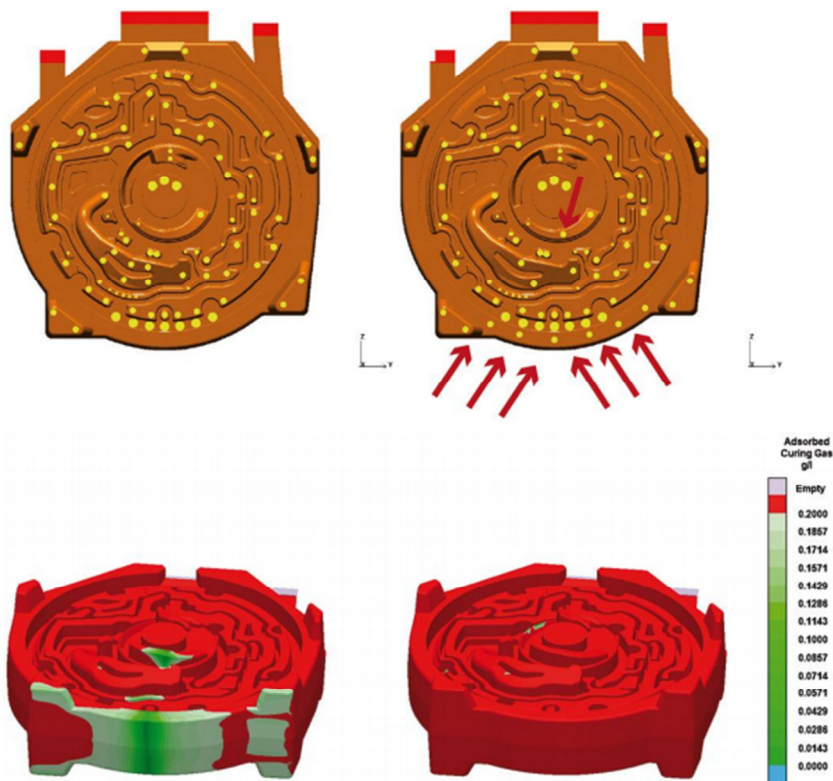


图 12：原 (a) 和改进后排气构造 (b) 之间吹气效率的比较。控制气体流量使得整个砂芯被充分覆盖。

因此,模拟使得砂芯制造者早在芯盒设计阶段就已经能优化射砂的射嘴和排气布置以及固化工艺。在车间现场改变芯盒布置和工艺参数的试验和纠错过程可以被大大减少,或者会被彻底消除。

总结和展望

借助 **MAGMA C+M**, 可作为模拟制芯过程的可视化工具, 该工具专门用于满足生产的设计要求。砂芯模拟是一种宝贵的技术工具, 它将整个射砂的砂芯制造工艺链的分析建立在科学基础上。因此, 在全部相关工艺步骤 (包括芯盒设计直到质量控制) 的所有方面为砂芯制造者提供决策支持。

模拟使得复杂的物理过程变得透明和容易理解。可将缺陷分析暴露于根本原因分析之中, 并可有效地执行对策。可在无需进行昂贵代价的试生产条件下就可评估模具设计的修改。缩短早期芯盒优化时间并大大降低成本。

参考文献:

- [1] Giesserei 96 (2009) Nr. 6, S. 62-71.
- [2] Rogers, C.: A virtual tool for the manufacture and use of foundry cores and molds. In: Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes XI. TMS 2006. S. 1123-1130.
- [3] Giessereiforschung 57 (2005) Nr. 2, S. 14-22.
- [4] Latz A., Schmidt S.: Hydrodynamic modeling of dilute and dense granular flow, Granular Matter 12 (2010), Nr. 4, S. 387-397
- [5] Schneider, M.; Heisser, C.; Serghini, A., u. a.: Experimental investigation, physical modeling and simulation of core production processes. AFS Transactions 2008, Paper 08-058 (04) . S. 1-14.
- [6] Giesserei 96 (2009) Nr. 12, S. 16-29.
- [7] Giesserei-Rundschau 58 (2011), Heft 9/10 2011
- [8] Bilder courtesy of Bocar, Mexiko
- [9] Giesserei 98 (2011), Nr. 1, S. 30 -39