

模拟制芯的全过程

M. Schneider MAGMA Giessereitechnologie GmbH, Aachen, Germany

R. Stevenson MAGMA Foundry Technologies, Inc., Schaumburg, IL

铸造厂的砂芯

砂芯制造是一个充满技术挑战的复杂过程，这些挑战经常会导致生产延误，造成废品和返工，并增加成品铸件的总成本。随着铸件设计中铸件形状变得越来越具有挑战性，对于错综复杂和高质量砂芯的需求也将不断增加。在最新一代内燃机中可以找到这类范例，该内燃发动机被设计为可耐受极端的热力学负载，并保证在最小可能重量下获得最优性能。这就需要大量几何形状复杂和薄壁的砂芯，以便在这类新发动机中提供清洁呈现的冷却系统。大多数这类铸件的砂芯形成的通道一定不能含有粘砂、毛刺和不平整表面，因为任何缺陷将会大大降低冷却回路的效率。另外，还持续要求生产砂芯的工厂遵守更为严格的环保规定，旨在减少制芯过程产生的排放量。铸造厂要获得盈利并同时满足这些新的环保规定和增加客户需求，则对制芯工艺进行优化以保持较严格的工艺控制并同时消除时间和成本资源的浪费显得尤为重要。

当提及确定是否可以一种合算的价格生产出新铸件所需的砂芯时，目前还存在高度的不确定性。这种有关复杂砂芯工艺性的不确定性限制了设计师，因为他们试图设计出将满足最终应用要求的铸件。当谈及砂芯生产时，对于如何有效生产优质砂芯可能存在更大的不确定性。大多数情况下，根据过去经验或通过测试不同模具设计和工艺参数的试错方法设置芯盒。确定全面最优化的芯盒设置和制芯工艺参数总是需要大量时间和成本昂贵的试样周期。工艺开发的这一试错法需要对模具进行多次修改，以获得期望的结果，且不会给在试验期间观察到的问题实际原因提供任何定量信息。应该对全部制芯过程进行彻底全面的科学评估。目前还没有把根源分析应用到解释制芯工艺中的复杂现象中。

制芯过程的复杂性部分原因在于大量变量相互作用决定着砂芯的最终质量。在射芯过程中，大量射嘴和排气孔以及射嘴和排气孔的尺寸和位置通常会对砂芯的最终质量具有重大影响。另外，诸如在射芯时采用的压力大小、总喷射时间和砂与粘结剂比例也可能影响芯盒的充填方式。一旦芯盒被充满，粘结剂随后一定被固化或硬化以便为砂芯提供足够的强度。砂芯固化过程也涉及很多影响砂芯最终质量的变量。在采用酚醛树脂冷芯盒（PUCB）粘结剂系统的情况下，排气孔数量、排气孔尺寸和排气孔位置以及固化气体用量和用于施加固化气体的压力曲线将决定一个砂芯是否会得到充分固化。使得PUCB制芯工艺更为棘手的是，通常使得射芯过程运行良好的排气孔组合对于后续固化过程可能不是最优的方案。其他诸如无机和树脂覆膜壳型砂的粘结剂系统需要一种芯盒的均匀回火，以获得充分固化和砂芯强度。对于在何处设置加热单元和在各区域加热时间长短等工艺不太容易确定。因此，使得一种新芯盒投入生产的过程通常需要几周的时间。与使得砂芯成功投入生产相关的时间和成本通常无法追踪且很少可以绑定到铸件的成本中，虽然这些成本可能对铸件的全部生产成本有重大影响。

对制芯过程的模拟能大大改善整个铸造生产过程的可预测性。当设计师评估其设计的可行性和在产品开发过程的设计阶段时考虑制芯和铸造工艺时，可在生产前预先确定砂芯的技术和经济可行性。因此，全部工艺链和相关物理参数变得更为透明。模拟也加深了对制芯过程的理解，并提供射芯和固化过程的三维可视化。该洞察和理解将帮助工程师理解砂芯中缺陷的根源所在，并提供一种可生产优质砂芯的更有效安排芯盒布局和工艺参数的手段。由此，采用砂芯制造模拟的铸造厂将最终实现改进铸件质量和降低总体生产成本的目标。

射芯过程的建模

当试图充分代表同一流动过程中空气和砂粒以及粘结剂混合物的动力学流体特性时，对射芯过程的建模提出了重大挑战。固体颗粒和气体混合物的流动性能与液体流动大不相同，因此需要用于模拟射芯过程的物理-数学模型与用于模拟液体流动的模型大不相同。为了准确描述射芯期间空气和砂/粘结剂混合物的动力学流动特性，已经针对某一系统从现有模型中选择了一种方式【即2-4】。此处有效描述的双相模型将砂/粘结剂混合物视作为在射芯过程中与空气完全分离的相。在此双相模型中，砂/粘结剂混合物和被强迫进入芯盒内的空气所需要的质量和动量需要保持守恒。至关重要的是，该类砂流体考虑了在广泛不同局部砂子密度分布基础上砂粒将表现出的不同性能。例如，当在如图1a上部区域内所示存在高的空气含量时，运动学模型最适宜描述空气中砂子/粘结剂运动。但是，随着在某一区域内砂子密度开始增大，例如如图1a中部区域，粘结剂覆盖砂粒之间的摩擦增加，通过砂粒碰撞消散的能量也增加。这种从运动到摩擦和碰撞能量的转变是砂粒如何表现的一个方面，在模拟中必须加以考虑。随着在芯盒内某一规定区域内砂子密度开始增加，如图1a底部区域，运动砂粒动能的消耗将开始主要被砂粒之间的摩擦力所主导。还必须考虑从摩擦和碰撞消耗到以摩擦为主的消耗的能量转换模式的这种转变。

除了射芯过程的准确建模外，正确描述所模拟的砂子和粘结剂混合物的物理性能和流动特性同样也极为重要。大量检测和系统

改变砂子和粘结剂流动性能已经考虑了合适类别的各类常用砂/粘结剂组合。确定各组合的流体特性的物理性能和因素被储存在数据库内，该数据库可在模拟软件内调用和参照。可调节或精细调整每一个该类数据组，以便与生产中采用的砂子/粘结剂组合的性能相匹配（如需要的话）。

射芯过程模拟也需要考虑所有相关工艺参数，诸如压射缸内压力增加的方式，和诸如所采用排气孔类型等芯盒设计变量等。在模拟中，通过直接规定射砂期间各点处施加的压力大小定义压射缸中施加的压力。当谈及芯盒内排气孔时，排气孔内很小的洞口或缝隙被用于将砂子保持在芯盒内，同时允许芯盒型腔内的空气逃逸。在行业内有各种不同的常用排气孔形状和设计。在所有情况下，压力损失定律被用于描述模拟模型中排气孔的不同特性，并可从排气孔数据库很方便地调用，该数据库内保存有各不相同排气孔设计和尺寸的压力损失曲线。经过试验校正后的流体定律确保针对射芯过程中该关键设计变量的排气孔处压力损失建模符合实际。

由于射芯过程各次模拟，取决于特定模拟的目的，必须确定模拟中是否需要射芯机砂斗建模和考量或是其足以射嘴安排边界条件，以便在没有实际模拟砂斗内砂流情况下从射嘴引入砂/粘结剂和空气混合物，考虑整个砂斗需要花费更多的CAD建模和模拟时间，但是，在有些情况下，可能是准确预测芯盒内充型问题（当这些问题为砂斗内砂子流动所导致时）的唯一途径。由于砂斗造成问题的范例之一就是造成砂子堵塞和/或在砂斗自身内部形成的空气通道。图2表示在射嘴上方砂斗内形成的空气通道的简单示例。该情况大大改变了芯盒的充填，并只能通过考虑整个砂斗内空气流动得以重建。

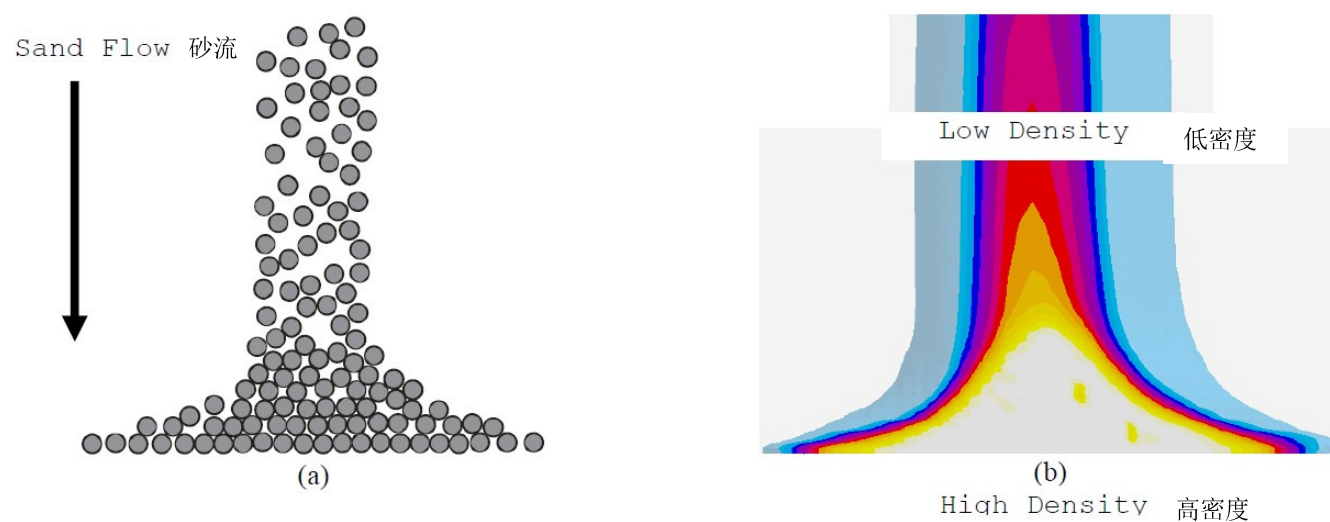


图1： 解释性球模型 (a) 和表示砂子紧实情况的3D模拟 (b)。

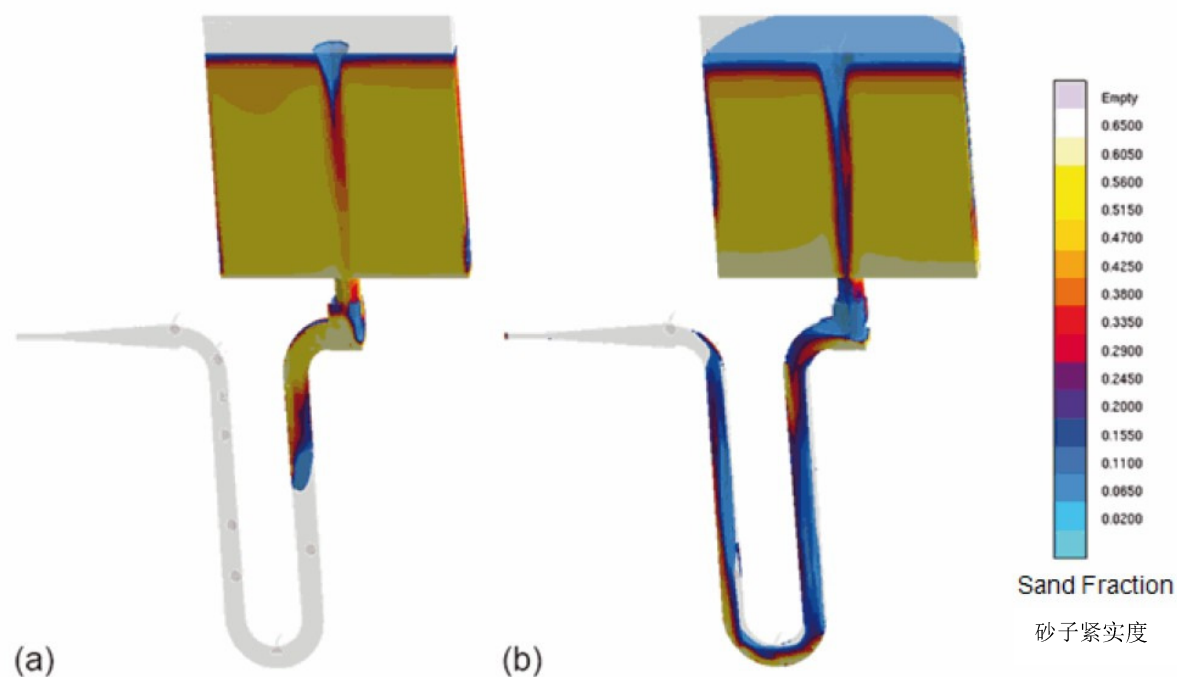


图2在充型早期 (a) 和在充型后期 (b) 时段采用简化后砂斗两点处的射芯模拟。在两种情况下，在砂斗中心处均可看到形成了砂子紧实度较低的区域。

射芯模拟的应用

除了模拟外，芯盒设计者对于评估很多影响芯砂填砂方式的不同变量几乎没有多少选择。模拟可以使得用户直观观察到芯盒内部砂子的流动并评估过程中任何时点处的标准功能。例如，图3表示芯盒整个充型过程中四个不同步骤的砂子紧实度结果。在此模拟结束时砂子紧实度较少区域与砂芯缺陷具有很好的相关性，这在图4所示的生产中的该水套砂芯中可以观察到这类缺陷。可以通过采用砂子紧实度和砂子密度预测探测和评估一个砂芯内的异常体积不足或空隙。射芯模拟还提供砂芯内部的差异化分析。在发现表面下方的此类空隙后，随后可以通过修改设计和/或工艺参数加以消除。通过模拟找出低密度区域，也有助于确定该给定低密度区域是否将导致该砂芯在寿命期内出现问题。采用砂芯密度模拟结果配合有限元分析，可以模拟当从芯盒移除时额外接触而施加于砂芯上的力和在铸造过程中砂芯将遭受的力学和热力学负载。根据这些负载分析可得到砂芯缺陷位置的关键和非关键区域。

射芯模拟使得用户也可以采用着色不同的虚拟砂追踪各射嘴的砂流。图5和6中所示，来自不同射嘴的独立砂子前端试图汇聚到一起，该砂子痕迹对于消除这些位置观察到的缺陷也很有帮助。尽管该结果没有实际标注出低密度或未充填缺陷，但它对找到该类缺陷的根源会有帮助。例如，一开始，采用可预测缺陷的砂子紧实度或砂子密度结果将会发现图5所示的在制芯左侧的缺陷。但是，要更好地理解 and 查找所预测空隙的原因，随后可利用砂子痕迹结果为用户提供缺陷与混合金属液前端齐平缺陷的附加信息，并因此需要增加排气，以便混合前沿之间的空气可以逃逸。很明显，并非前端混合的所有区域将有缺陷，尤其是如果排气孔和射嘴布置在这些混合前沿区域形成最优条件的话。还应注意的是，图5中在制芯右侧有一个区域，也明显有一个低密度。尽管砂子痕迹结果明显显示出该缺陷与任何混合砂前端不一致，用户还可以采用砂密度和砂子紧实度结果找到该缺陷。通过找到存在多个砂子前沿汇聚的区域，工程师能调节排气和/或射嘴位置，以避免这些区域的未充填和低密度。图6表示采用来自各射嘴不同着色砂所制造的砂芯与模拟砂子痕迹结果的比较。这些试验结果表示模拟砂芯和生产测试芯之间的良好相关性。

在生产中砂芯质量可变性高的场合，模拟依然是分析缺陷根本原因和更好理解该过程中主要变化源头的卓越工具。一旦更好了解了变化的来源，然后模拟可被用于系统性优化工艺参数。此外，采用模拟检测该过程中变化的影响（即针对给定参数的上限和下限进行模拟）将有助于确定该过程可以运行同时还能生产出可接受质量等级砂芯的可接受的变化量。随后，这些可接受等级可以在针对制芯过程利用统计工艺控制方法中加以考虑。

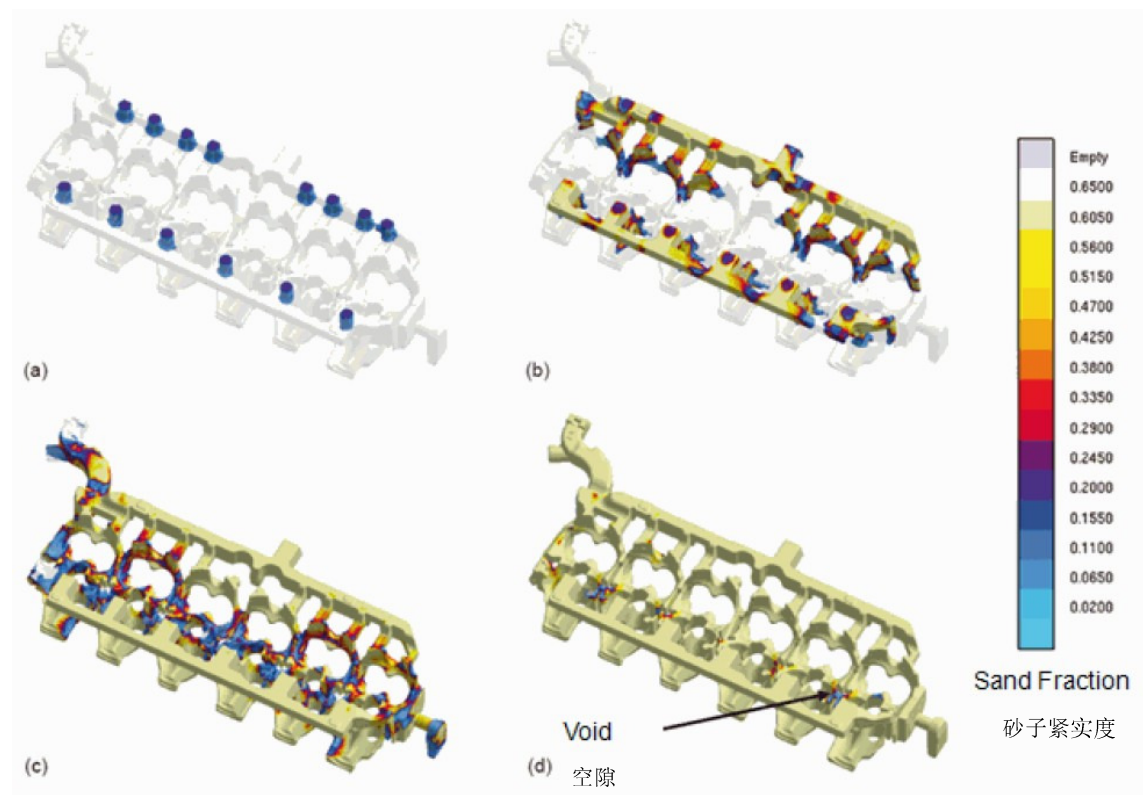


图3: 薄壁水套芯的射芯过程充填顺序。表示整个射芯模拟过程 (a) 1%, (b) 25%, (c) 75%, 和 (d) 100%的砂子紧实度。在射砂模拟结束时观察到的包含砂子紧实度低的问题区域。

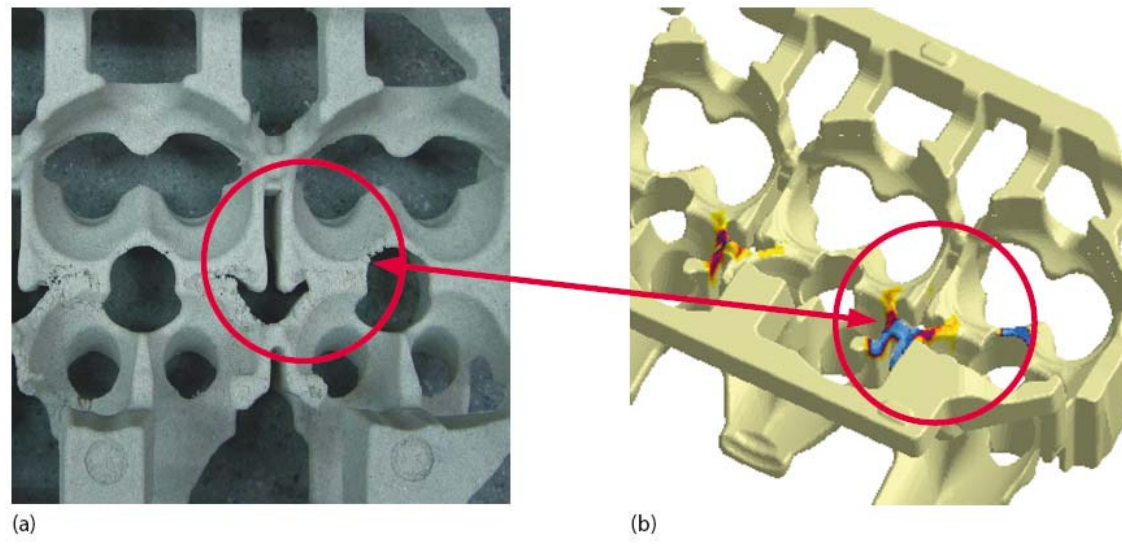


图4: 水套芯中缺陷 (a) 与各模拟结果 (砂子紧实度低的值采用蓝色表示) (b) 的比较。

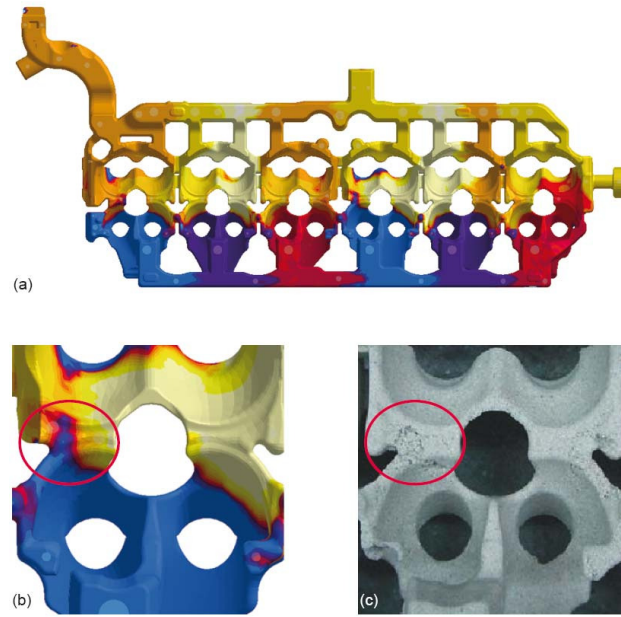


图5: 采用颜色区分来自不同射嘴 (a-b) 的砂流的水套芯射芯模拟以及表示两个砂子前沿汇聚处空隙的试验结果 (c)。

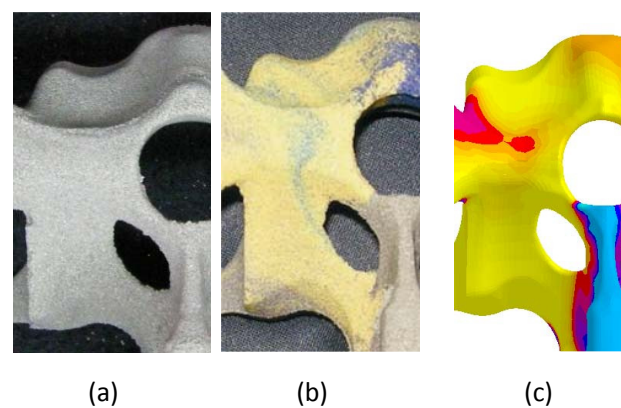


图6：生产砂芯（a）和采用带色砂的试验砂芯（b）和相应的砂芯迹模拟结果（c）。

砂芯固化和粘结剂分解的建模

为了有效考虑整个砂芯制造和浇注过程中砂芯的综合影响，有必要考虑粘结剂系统的固化或硬化以及浇注过程中砂芯中粘结剂燃烧分解。如果砂芯固化，主要关注点之一就是砂芯采用一种将防止在制芯和浇注过程中砂芯损坏的方式得到充分固化。此外，未充分固化的砂芯也可能增加浇注过程中产生冲砂和夹砂的可能性。如果在浇注过程中粘结剂出现分解，主要担心的是气体不能以一种防止其被裹入铸件（表现为气孔缺陷的形式）内的方式从砂芯或铸型中逃逸。从技术角度来看，砂芯固化和在浇注过程中发生的粘结剂分解是两个完全不同的现象。但是，用于描述两个过程的数学模型非常类似。两个过程都具有气体通过砂芯中砂粒之间的开口空隙区域或间隙输送的特点。

一个砂芯固化的模式将取决于所采用的粘结剂系统的类型。已经采用一种常用固化机制（诸如酚醛树脂冷芯盒粘结剂系统或无机粘结剂热固化和覆膜树脂壳型砂系统）都能被模拟的方式构想出砂芯固化的模型[5]。通过在芯盒内引入空气/催化剂混合物定义酚醛树脂冷芯盒粘结剂系统内的气体固化。需要考虑气体输送的机制不仅包括空气/催化剂混合物如何流过多孔砂芯，也包括它将如何很快催化其所到达的区域。如果为采用无机粘结剂，则通过热芯盒内的干燥过程形成砂芯强度。可对流进芯砂的热量和粘结剂中水产生的蒸汽进行建模。还可以模拟将热空气吹入无机芯盒的做法。

气体固化模拟

当设计芯盒时，必须考虑催化剂必须到达的所有区域。采用有利于射芯过程的大量排气孔的排气设计通常会导致固化不充分，因为并非砂芯所有部位可接触到足够的固化气体。固化过程通常受益于这样的排气孔设计：迫使催化剂尽可能保持在砂芯内和在其可能通过排气孔逃逸前到达砂芯的所有部位。在砂芯内的催化剂保持一段延长期可以最终固化某些未充分排气区域，因为它扩散到这些区域。

当在砂芯生产中采用固化模拟时，它会导致固化和清洗过程的复杂、三维、时间相关的流动情况。图7中示例表示催化剂数量，在此情况下为吹气模拟四个不同时间步长下的胺气。采用胺浓度结果可被用于找出胺气还没有足量到达砂芯的区域和胺还没有被完全被吸收到粘结剂内的区域。在图8中可以看到生产砂芯和模拟砂芯之间的比较，其中生产砂芯的较弱强度和破损与没有接受足够数量固化气体的区域密切相关。除了消除有关固化的缺陷，模拟也可被用于分析和优化固化工艺参数，以确保不采用不必要的多余气体。采用的固化气体量减少将导致降低生产成本和固化过程中的较少有害排放。

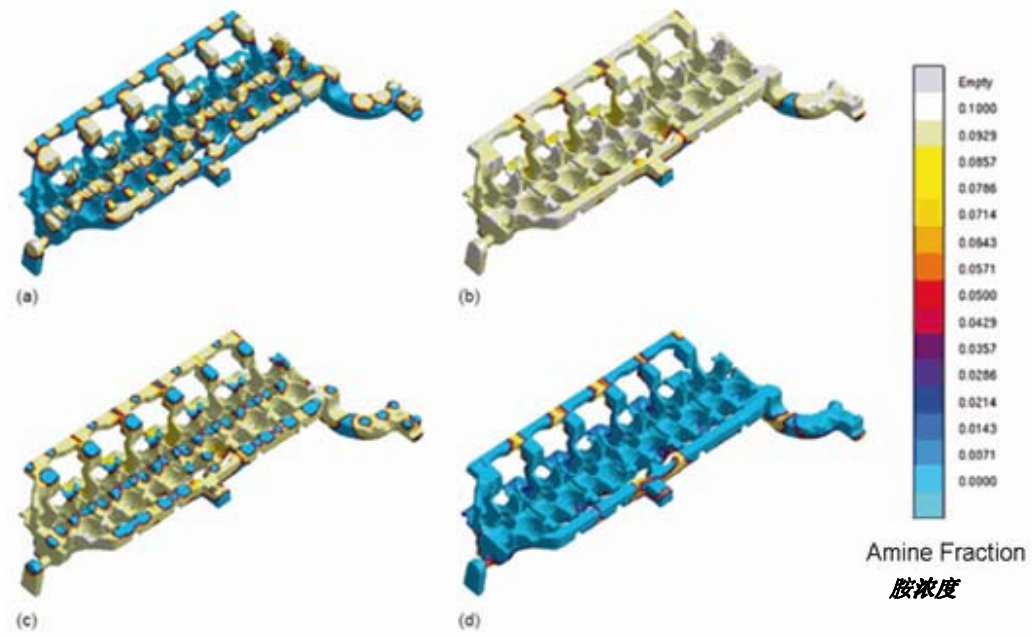


图7: PUR冷芯盒工艺两步骤气体固化的模拟。首先, 将催化剂引入砂芯, 取代之前占据砂芯空隙部位的空气 (a, b)。随后, 由空气冲洗的含有气体的胺压入砂芯内 (c, d)。0.1胺浓度相当于10%的胺。

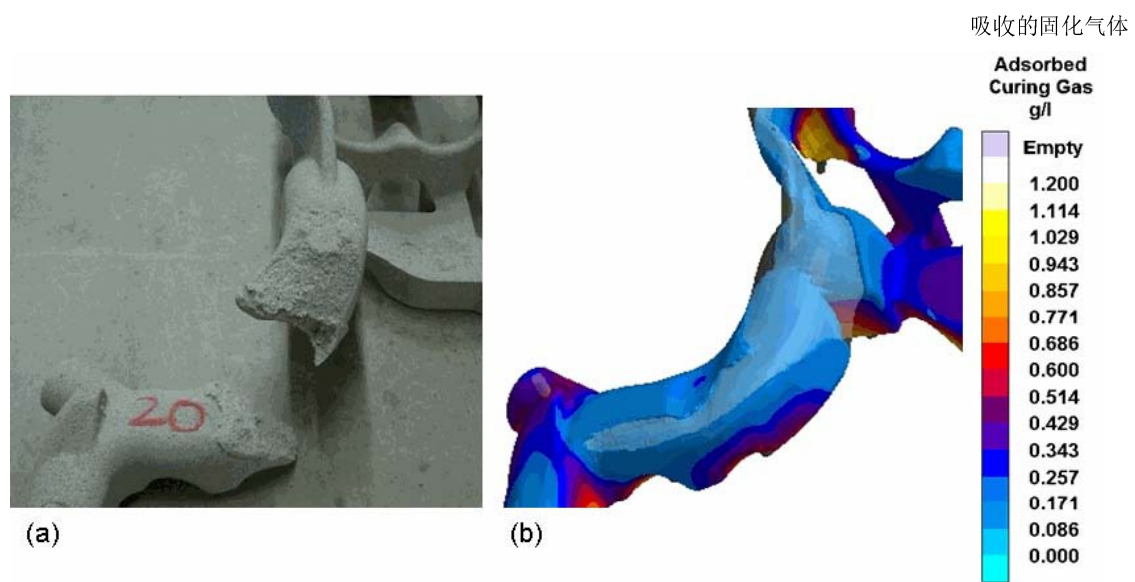


图8: 在模拟中通过透明材料标注出未充分固化PUCB砂芯 (a) 和未固化部位 (b)。

热固化模拟

对于模具工程师来说, 设计采用无机粘结剂和覆膜树脂壳型砂实现成功固化砂芯的模具是一个挑战性的任务。除了形成均匀和充分壳厚度的任务外, 工程师还必须考虑生产砂芯要求的循环时间和循环时间的经济层面。芯盒的均匀回火将确保全砂芯的均

衡壁厚壳体。如果壳的任何区域未充分回火，则薄壳可能在砂芯从芯盒内取出时出现问题。同时，如果在某一区域芯盒温度太高，砂芯也可能不会获得足够的表面强度。因为无机物的加热和冷却和壳芯模具对于砂芯质量和生产时间来说是至关重要的，因此它成为正确预测连续生产过程中冷芯盒加热顺序和热分布的这些过程的模拟的关键一环。通过帮助定位和激活模具中的加热元件（如图9所示），模拟可以为开发模具设计提供有效支持。甚至在芯盒设计早期阶段即可模拟加热元件的位置和容量。

无机芯的干燥过程也是一个非常动态的过程。在砂子被射进芯盒后，砂子混合物通过热芯盒被加热。然后，粘结剂中水分在砂芯表面蒸发，砂芯的表面随之被固化。此时，来自粘结剂的蒸发水可能在砂芯内部凝结和在某些某些区域聚集。如果一个砂芯从模具中被取出并和现有的该冷凝物储存，则已经固化部位可能会被软化。因此，一般砂芯制造者使得热空气流过砂芯以清除固化过程中的水蒸气。在此情况下，热空气旨在从芯盒空腔中排出水蒸气，并确保砂芯在储存期间不会发生软化。但是，如果采用大小不合适、布置不恰当的排气孔，或如果在此过程中采用的热空气量不足，则可能导致水蒸气一直保留在砂芯内。在无机粘结剂系统固化模拟时应同时考虑在固化期间形成的水蒸气和在将热风吹入模具内期间排出热空气。图10表示无机芯不同区域处的预测的局部含水量。

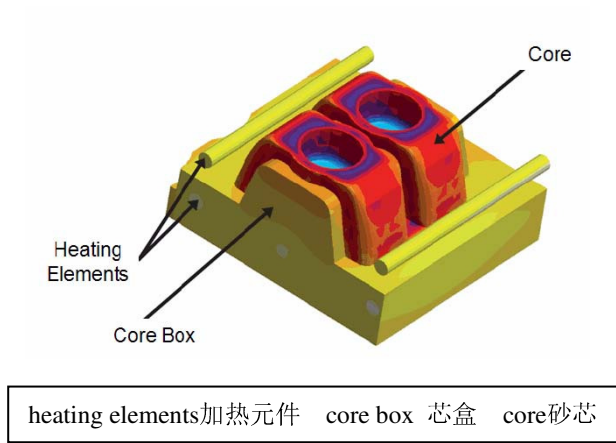


图9：热固化阶段中电加热芯盒的局部视图

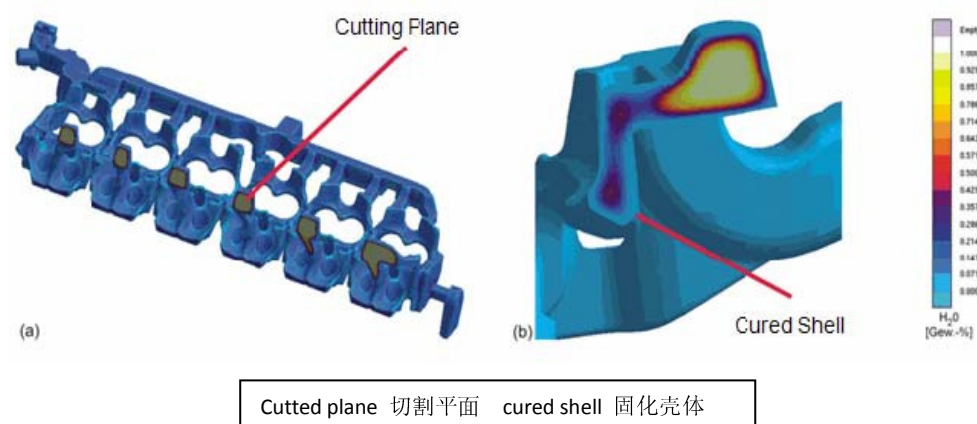


图10：整个砂芯的热固化形象化 (a) 和剖切断面的闭合 (b)

浇注过程中粘结剂分解的模拟

浇注过程为砂芯整个生命周期中的最后工艺步骤。此处，当液体金属在浇注过程中充填铸型型腔时砂芯承受机械和热负载。随着砂芯温度增加，粘结剂将最终开始分解或烧尽。采用粘结剂分解的实验数据【1,5】，可以模拟充填和凝固过程中的局部粘结

剂分解。图11表示充填型腔期间四个不同时点的砂芯的粘结剂含量的变化。随着砂芯温度上升气体的变化导致砂芯内压力的增加，如图12所示为同一铸型充填的模拟。砂芯内气体压力增加可能强迫气体进入铸件并导致铸件在冷却和凝固期间产生缺陷（如果气体未被从铸件中适当排出）。利用粘结剂分解模拟辅助设计和设计排气孔，以确保砂芯气体不会在铸件内以形成气孔缺陷而终止。

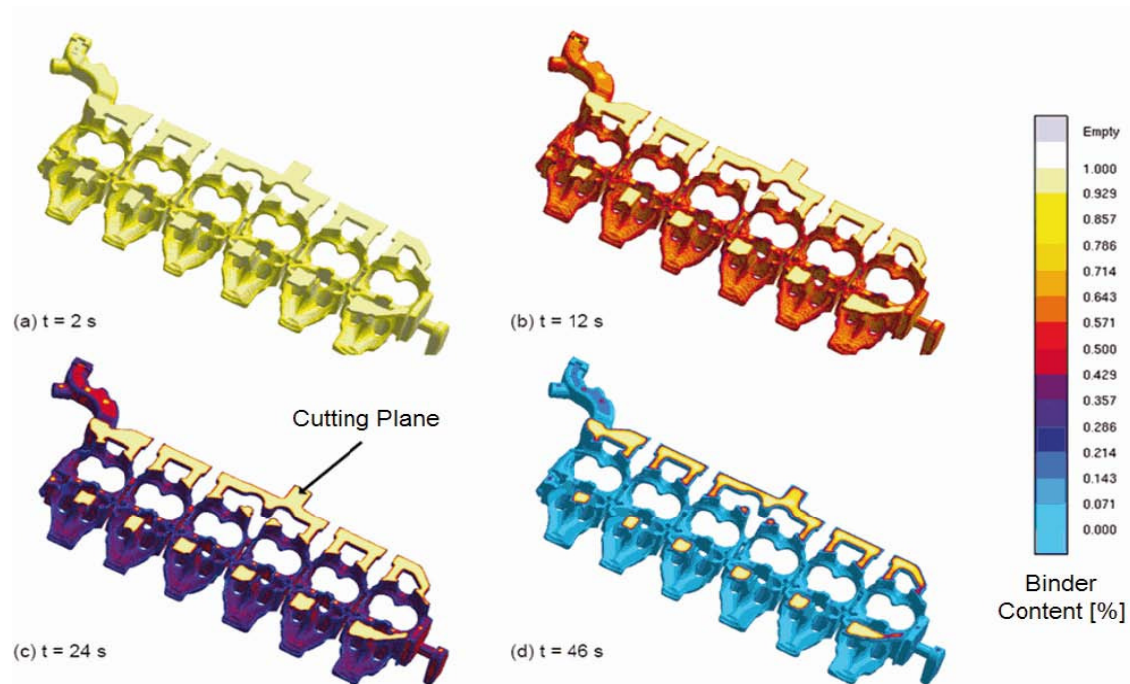


图11：采用750 750 C (1382 F)开始浇注温度的粘结剂分解的模拟。

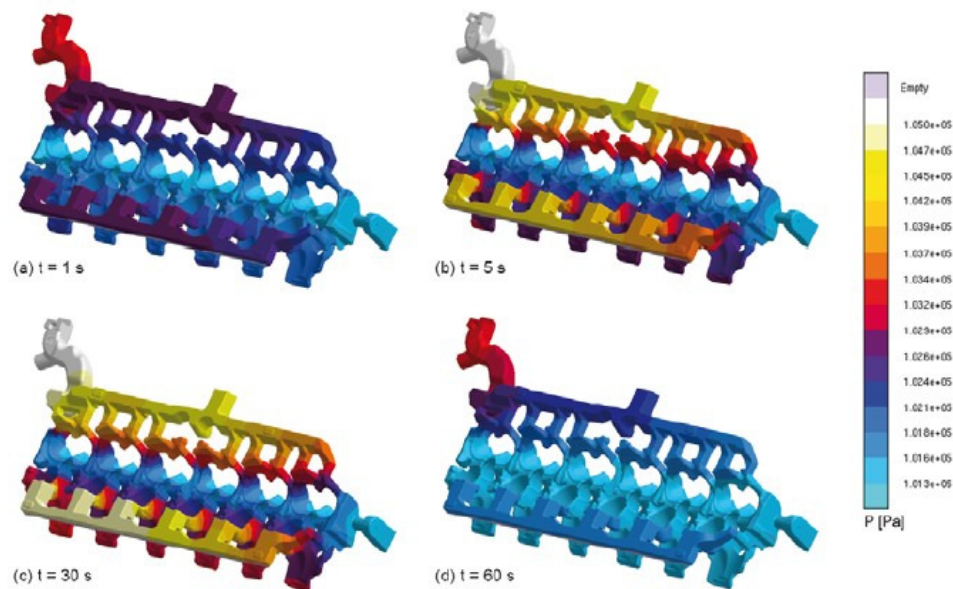


图12：铸造过程中粘结剂分解的模拟，显示出在中心轴处排气砂芯的压力分布。

总结

本文介绍了已经开发出的可以模拟制芯过程以及描述和应用射芯、固化和粘结剂分解模型的一种工具。通过模拟提供的三维可视化的复杂物理流程是一种用于分析和更好理解不同工艺变量之间复杂相互作用影响的极为有用的工具。通过制芯模拟，可进行根源分析，以消除或检测出发生砂芯缺陷的倾向。可以无需高成本的实际试验即可评估模具和工艺变更对砂芯质量的影响，且可缩短优化芯盒布置和工艺参数的时间，进而可以降低成本。

致谢

The fundamentally oriented research work was supported through DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) Bonn/Germany with funding from BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) through the project "VIGI" (Kennzeichen 01RI05008). Another special Thank You goes to the research partners, BMW AG (Gießerei Landshut), Hüttenes-Albertus Chemische Werke GmbH, the IfG (Institut für Gießereitechnik GmbH) and the ITWM (Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik) for the open and valuable cooperation and to the involved employees for the engaged and constructive exchange of experiences.

参考文献

- [1] A. Keßler, H. Wolff and G. Wolf, "Experimentelle Untersuchungen zur Erfassung der Vorgänge bei der Kernherstellung zur effizienten Entwicklung und Produktion von Sandkernen", GIESSEREI 96 (2009) Nr. 6, S. 62-71.
- [2] G.H. Ristow, "Granular dynamics: a review about recent molecular dynamics simulations of granular materials", Annual reviews of Computations Physics, 1 (1994), S. 275-308.
- [3] D. Gidaspow, "Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions", Academic Press (1994).
- [4] M.J. Andrews und P.J. O'Rourke, "The multiphase particle-in-cell (MP-PIC) method for dense particle flow", Int. J. Multiphase Flow 22 (1996), S. 379-402.
- [5] M. Schneider, C. Heisser, A. Serghini und A. Keßler, "Experimental Investigation, Physical Modeling and Simulation of Core Production Processes", Paper 08- 058(04), AFS Transactions 2008, S. 1-14.