

铸铁——可预测的材料

——铸造过程模拟用于评估铸铁件生产过程和性能的新功能

*Jörg C. Sturm and Guido Busch

(MAGMA 铸造技术公司, 德国 亚琛)

摘要: 对铸铁件生产厂而言, 采用铸造过程模拟已经变成预测工艺过程完善度及可靠性的主要手段, 特别是由于为了定量评估铸铁的缩孔(松)和凝固行为而需要考虑合金元素、熔炼实践及冶金因素的影响时。最新的模拟工具可以定量预测铸铁件的残余应力和变形, 铸件中的裂纹以及热处理减少多少铸造应力也可以预测。近年来等温淬火球墨铸铁的工业应用逐渐增多, 而软件的最新发展可以对这种合金所需要的热处理进行模拟。通过预测各种相和进行参数研究可以优化奥氏体化、淬火以及奥氏体化过程中与合金有关的热处理条件。将铸铁局部性能提供给设计师, 让他们预测与整个生产过程有关的铸件的疲劳性能和耐用性能, 将可以增加对这种古老, 但已做了很多改进的材料的信赖度, 并将为其未来的应用创造机会。本文将概介目前定量预测铸铁件缺陷和性能的功能, 并着重介绍铸铁和 ADI 生产过程模拟以及铸铁件应力预测方面的最新发展。

关键词: 铸造过程模拟; 铸铁; 缺陷; 铸件性能; 发展

Cast Iron——A Predictable Material

——New Capabilities in Casting Process Simulation to Assess Iron Casting Production and Properties

***Jörg C. Sturm and Guido Busch**

(MAGMA Gießereitechnologie GmbH, Aachen, Germany)

For cast iron foundries, the use of casting process simulation has become an important instrument to predict the robustness and reliability of their processes, especially since the influence of alloying elements, melting practice and metallurgy need to be considered to quantify the special shrinkage and solidification behavior of cast iron. State-of-the-art tools allow the prediction of residual stresses and iron casting distortion quantitatively. Cracks in castings can be assessed, as well as the reduction of casting stresses during heat treatment. The industrial application of austempered ductile iron has grown in recent years, and the latest software developments allow the modeling of the required heat treatment for this alloy. Phases can be predicted and parametric studies can be performed to optimize the alloy dependent heat treatment conditions during austenitization, quenching and ausferritization. The transfer of local properties into the designer's world, to predict fatigue and durability as a function of the entire manufacturing route, will increase the trust in this old but highly innovative material and will open new opportunities for cast iron in the future. The paper will give an overview on current capabilities to quantitatively predict cast iron specific defects and casting performance and will highlight latest developments in modeling the manufacture of cast iron and ADI as well as the prediction of iron casting stresses.

Key words: casting process simulation; cast iron; defects; casting performance; development

作者简介: *Jörg C. Sturm (1959—), 德国人, 公司总裁, 主要从事铸造金属及铸造过程模拟研究, E-Mail: JC.Sturm@magma-soft.de

1. 引言

金属铸造业总是在保持工程能力、确保高效经营和保护商业利润的情况下，力求平衡技术要求和商业需要。从根本上说，商业是没有变化的，变化的只是其经营方式。业务大范围分散化正在进行中，铸件客户越来越多地将业务外包和进行全球化采购。因而使得金属铸造商承担的技术要求和责任范围就越来越苛刻。这种情况对我们的工程资源增添了额外的要求，迫使我们考虑采用新方法缩短交货时间，降低总成本，并且在技术上更高效地与客户合作。

当今市场变化的步伐如此迅速，使时间对市场起着决定性作用。铸造商家由于知道时间紧迫，必须经常采纳新思想和新方法。随着计算机辅助工程技术（CAE），包括铸造过程综合模拟、自动化铸造工艺过程优化、以及基于计算机的零件设计新工具的迅速应用，使铸造人员有可能与铸件设计人员协同工作，使零件设计和铸造工艺参数可以同时进行优化。通过这些工程技术方面的努力，铸造厂家就可以保持竞争优势，从而确保他们的业务稳定和增长[1-5]。

采用新的工程技术优化零件设计和铸造工艺要通过铸造工程师与零件设计师的紧密合作才能实现。这种结合和人员合作是使设计-工艺链加速运行成功与否的关键。设计人员必须有铸造专家的大力支持，才可能在他们的设计中充分利用铸件的性能。由铸造工艺模拟提供的铸件性能定量结果会有助于设计人员了解铸造工艺对所用铸件的性能的影响。

计算机性能不断提高是促进 CAE 工具用于铸件研制的另一个推动力。展望不久的将来，我们将会看到计算机工艺优化的潜力。铸造人员将不需要在车间现场进行费时的试验和遭受失败，可以使用计算机工具实现铸造工艺方案或工艺条件的自动优化[6]。

在汽车和机械工业中，工艺和材料的更取代已经逐渐成为新零件设计标准常规。这种情况对经典结构材料铸铁的挑战日益俱增。为应对其原有市场受到的这种威胁，铸造行业采用了性能改进的合金，以及可以将这些合金铸造可靠零件的新工艺，这在十年前都是不可想象的。

生产符合当今技术标准的铸铁、球铁、蠕铁以及等淬球铁铸件，必须对这些材料以及工艺完善程度有充分的了解。近十年来，铸造工艺模拟以及最终材料性能预测技术通过两种方式显示了作用，其一是：使本来是个黑匣子的铸型变得透明，有助于铸造专家在初次浇注之前就预知可能发生问题的原因。其次是：开发用于铸造工艺过程的模拟工具要求定量地深入了解物理、冶金及化学等因素的影响，这样就将源自经验的工艺实际上变成基于第一原则的可靠的制造工艺。

对于许多铸铁铸造厂而言，铸造工艺模拟已经变成评估浇冒口，以及预测补缩情况的日常标准工具，同时也成为质量系统以及工艺优化的工具。这些最新的模拟工具从合金成分、熔炼情况以及冶金因素等方面来考虑铸铁特有的材料特性。

当前研究的内容已经不仅仅是对铸造和凝固过程的评估，其着重点之一是涉及到对由于冶金因素与工艺因素相互作用而引起的复杂缺陷的预测。第二个研究方面是着重对整个制造路线的模拟和预测。所有这些研究都是达到铸造工艺过程模拟这一最终目的所必需的：后者包括用于对零件设计评价的铸件局部性能预测，总体技术的预测，以及对铸铁件获利可能性的经济影响的预测。

通过模拟铸造工艺预测铸件性能的是一项挑战性的任务，如图 1 所示。

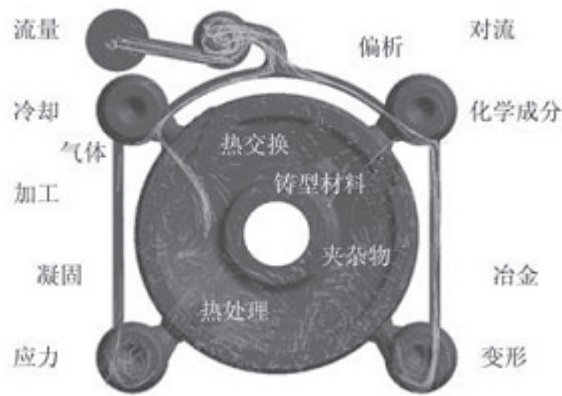


图 1 一项挑战性的任务：通过模拟铸造工艺预测铸件性能

Fig. 1: A challenging task: simulating the casting process to predict component properties

这种铸造工艺模拟最大的好处是它可以同时完成许多任务，然而这也正是它的缺点：由于许多工艺参数互相关联，因而必须同时考虑。

2. 对铸铁件成功应用铸造工艺模拟的前提条件

所采用的熔化和冶金实践对铸件的完好性有决定性的影响。这对铸铁零件而言，尤其如此，此时冶金工艺对铸件的最终组织和性能起着决定性作用。因此只有当铸造工艺模拟能够考虑合金化和冶金因素影响时，铸件局部组织预测才是可能的。

获得与补缩有关的工艺方案的支持仍然是铸造工艺过程模拟的最重要任务之一。要得到无缺陷的铸件，必须考虑到由于所浇注的合金不同而有所差异的补缩性能和自补缩能力。因此，仅根据由温度场推导出的热节预测缩孔（松）缺陷是不够的，还必须能够定量地预测它们。为评估凝固模式对补缩行为的影响，以及考虑取决于合金类别的补缩范围，凝固模拟必须与密度和质量迁移计算相结合。这是通过描述由温度决定的热物理性能完成的。

铸铁的特殊补缩行为及其凝固行为对冶金学的高度依从性表明：仅靠宏观热节预测是不足以评估铸铁件的工艺设计（methoding）的。在球墨铸铁中，大的热节多半有利于石墨充分析出，因而得到无缩孔（松）铸件。而另一方面，凝固早期形成的小热节则可能由于奥氏体收缩和石墨化受阻而导致严重缩孔（松）。

为了能够根据铸件的真实的局部收缩和膨胀预测铸铁件的健全度（缩孔、缩松趋势），要求程序必须能够分别考虑在整个凝固过程中形成的各个相的动力学。对铸铁而言，就是要考虑所有合金化成分以及孕育、熔化和冶金实况的影响。

每个铸造专家都采用孕育和化学成分来防止白口或共晶渗碳体，而局部冷却条件会使这些激冷影响加重。单纯地模拟宏观热流不可能把这种合并的交互作用考虑进去。因此采用了所谓微观组织模型，根据上述的交互作用来预测铸件任何部位及任何时刻形成的新相的数量。

图 2 所示为基于微观模型对铸铁铸造工艺过程的模拟。如果将显微组织模型用于铸铁凝固模拟，输入信息和所采用的模型即可得到结果。

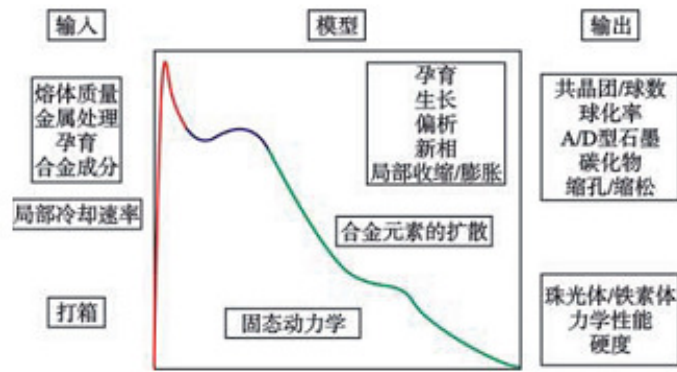


图 2 基于微观模型对铸铁铸造工艺过程的模拟

Fig. 2: Modeling of the casting process for cast iron based on micromodels.

两种模型的不同能力最好采用“模拟的”冷却曲线来评估。在宏观热模型中，材料的（热物理）性能对所使用的合金是固定的，而在微观模型中这些性能是作为当前相形成的函数在每个时间小间隔及每个点确定的。这种情况影响到潜热的释放并且最终要影响局部冷却曲线的形状，如图 3 所示。作为模拟的结果，过冷、再辉及生长温度都取决于局部的冶金和热条件。同样地，真实的冷却曲线用来检测熔液的质量，而模拟的冷却曲线则是对所采用模型的质量的验证。只要知道任何点处的石墨、奥氏体和渗碳体等析出相的实际情况，就能局部预测补缩和缩孔（松）趋势。

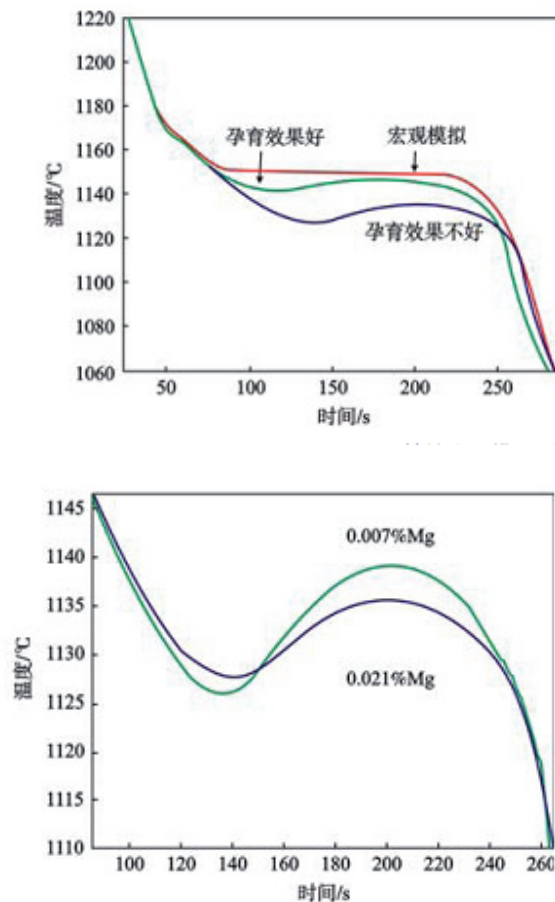


图 3 铸铁微观模型对铁液处理情况的敏感性

Fig. 3: Sensitivity of cast iron micromodels to the metal treatment applied.

这两个图用模拟的冷却曲线说明宏观模拟与微观模拟的差别。采用宏观热传导方程式只能模拟由所释放潜热决定的冷却曲线的形状，而微观模拟还考虑了不同孕育条件的影响（上图），甚至成分变化（有效镁含量在 0.007%和 0.021%之间变化），都会改变所计算的过冷度、再辉度以及生长温度（下图）。

3. 模拟支持铸造工艺设计并使工艺方案完善可靠

评估生产工艺过程是否可靠和高效依然是铸造厂家应用铸造工艺模拟的主要目的之一。由于冶金条件与材料性能密切相关，铸造专家仍然有一些与铸铁件的充型和凝固有关问题需要决定。案例之一是要重复稳定地得到所期望的石墨形态以及与局部石墨析出密切相关的补缩性能。

对如何制作铸件的最初评估可以在得到一个铸件设计之后立即完成。在数分钟内即可确定对铸造方案有很好的指引作用的热模数。根据这些数据，软件就可以提供取自数据库的浇冒口位置和尺寸，见图 4。

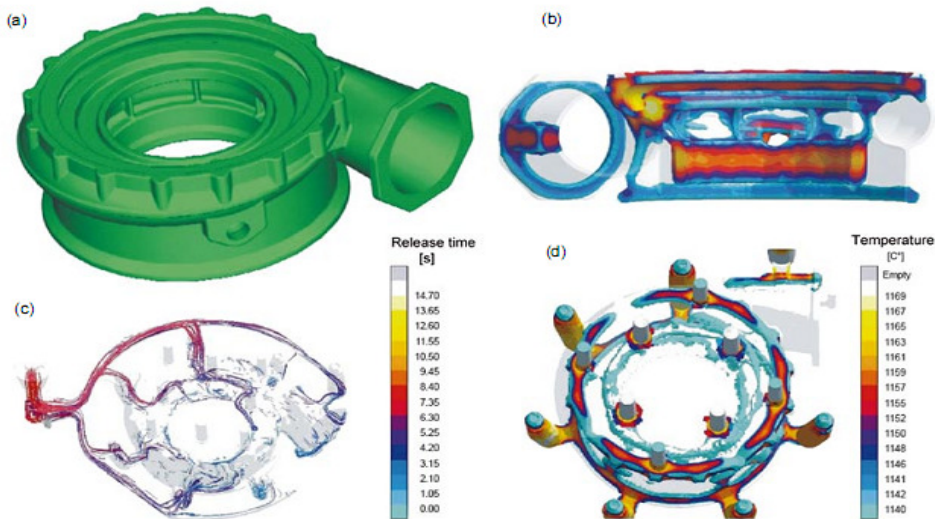


图 4. 球墨铸铁压缩机壳体铸造工艺方案设计

Fig. 4: Set-up of methoding for ductile iron compressor housing.

(a) 根据原始零件的 CAD 模型快速评估热模数; (b) 确定浇冒口设计方案 (包括冷铁和冒口位置),接着对整个方案进行模拟;充型过程 (c) 和凝固过程 (d) 都可以定量预测[7]

在设计浇注系统和模样布置之后，就可以对整个工艺过程进行初次全面模拟。模拟的基础是对铸件整个凝固过程中不同的相及它们的数量的计算。这样就可以确定作为当前存在的收缩相（液体、奥氏体和渗碳体）以及膨胀相（石墨）的函数的局部收缩总和，以及来自冒口的补缩。

一旦形成不再可能得到补缩的孤立区后，补缩需要总量就是剩余液体和奥氏体的收缩与石墨膨胀之和。此外，在计算自补缩作用时，必须考虑铸型的稳定性和膨胀。只有采用这种微观模拟方法才可能预测铸铁中的缩松，见图 5, 6 和 7。



图 5. 铸铁件收缩缺陷的预测

Fig. 5: Predicting shrinkage in cast iron components.

图中显示球墨铸铁件在冒口下面有二次缩孔。这证明简单的热流计算是不够的，因为它只是显示铸件中心部位的环形温度分布。只有将局部收缩与膨胀情况相结合才能做出正确的预测。

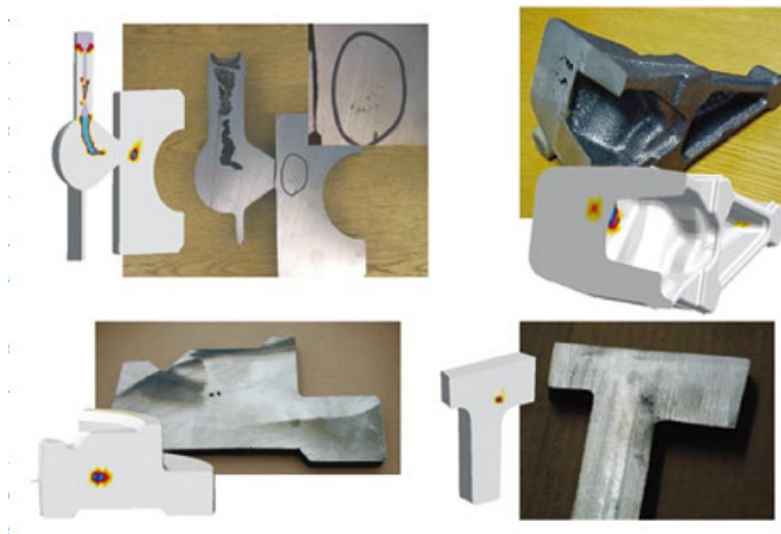


图 6. 缩孔（松）预测与实际情况

Fig. 6: Shrinkage prediction and reality.

这几个实例显示了对不同铸件缩孔、缩松预测的精确性。



图 7. 是否需要冒口?

Fig. 7: Is a riser needed or not?

左图为对 HT250 灰铸铁铸件原来的无冒口工艺方案进行缩松预测结果，表明靠近顶部部位有问题。右图为工艺方案改进后缩松预测结果，表明用一只小冒口可以完全补偿液态收缩。此图片由 ITT Water and Wastewater AB 公司友情提供。

4. 模拟预测铸铁显微组织和力学性能

对作为冶金、熔化和孕育实况参数的函数的各个相的模拟还可以预测凝固后的显微组织（石墨球数量、共晶团数量、灰口/白口凝固数量、奥氏体/共晶石墨数量），见图 8。通过对直至固态反应的继续冷却和局部偏析的计算，可以定量地估算基体中局部相的分布（铁素体/珠光体分布、珠光体粗细度）。这是铸造厂质量系统的重要信息，见图 9。

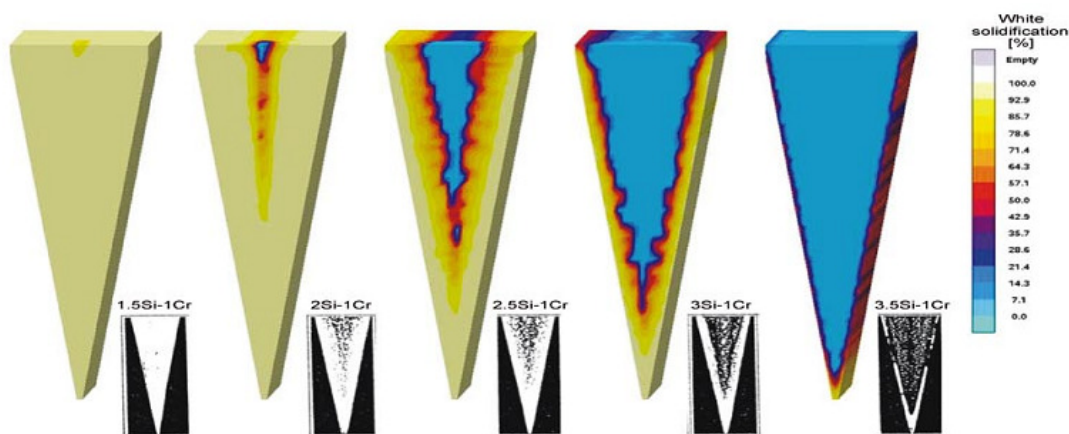


图 8. 模拟合金元素对显微组织的影响

Fig. 8: Simulating the influence of alloying elements on the microstructure.

根据与合金元素的函数关系预测的楔形试块中灰口凝固向白口凝固转变与实际显微组织的对比。随着 Si 量增加，渗碳体析出向石墨形成转变

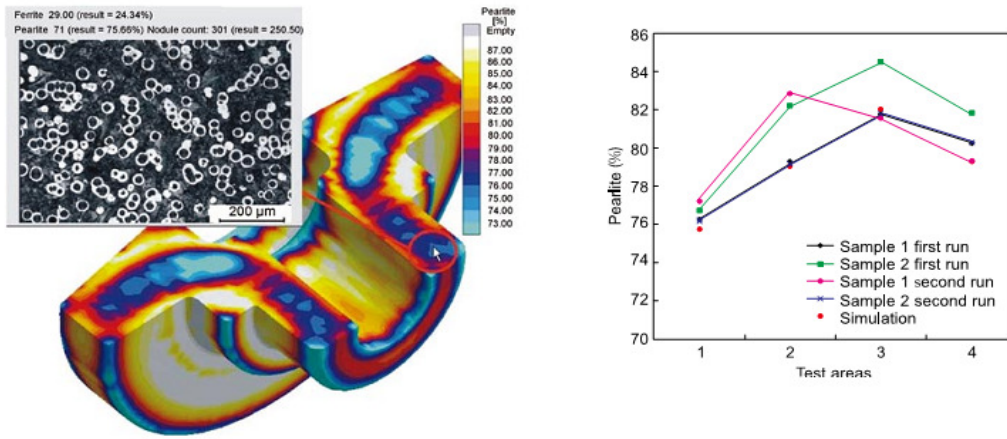


图 9. 对球墨铸铁显微组织和力学性能的评估

Fig. 9: Assessment of microstructures and mechanical properties for ductile iron.

由于考虑成核、相分布、合金元素偏析以及固态反应期间的局部冷却，因而铁素体/珠光体分布可以定量预测。这就使得模拟能够引入铸造厂的质量系统。图中以一只球墨铸铁轮毂作为实例（左图），检测结果与模拟结果对比说明模拟结果精确，有助于减少客户要求铸造厂进行的连续测试（右图）

与所采用的冶金条件、合金成分以及局部冷却条件有函数关系的微观模拟还可以预测各种石墨形态的转变（例如 A 型与 D 型石墨之间的转变，以及球墨向蠕墨转变）。图 10 所示为对一只发动机缸体内的球化率分布的预测。定量掌握局部相和显微组织就有可能预测整个铸件的力学性能（抗拉强度、硬度、屈服强度、伸长率以及杨氏模量），图 11。

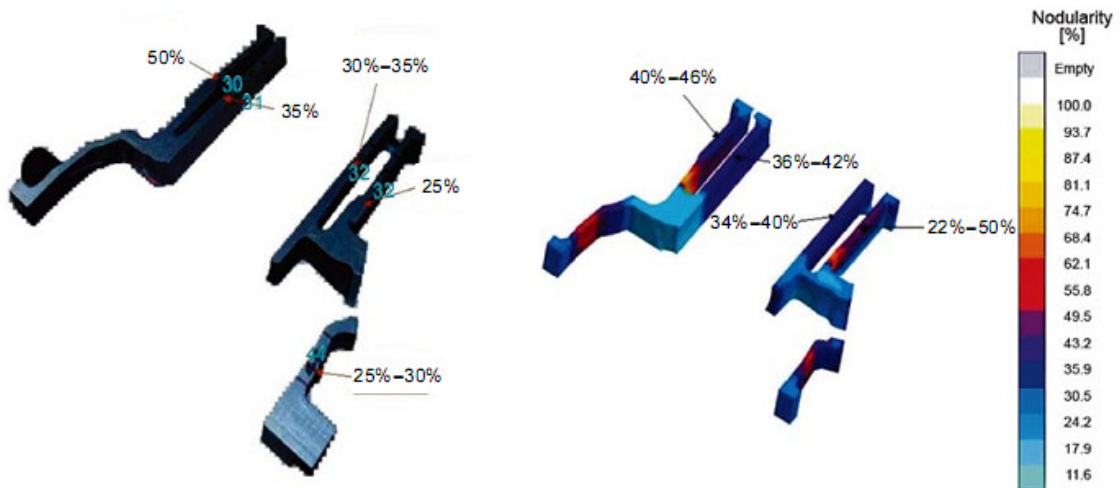


图 10. 根据与合金成分、冶金条件和冷却条件的函数关系模拟局部球化率。

Fig. 10: Simulating local nodularity as a function of alloy, metallurgy and cooling conditions[4,8]

图中所示为对一只发动机缸体试验铸件的球化率预测数值与实测结果对比[4,8]

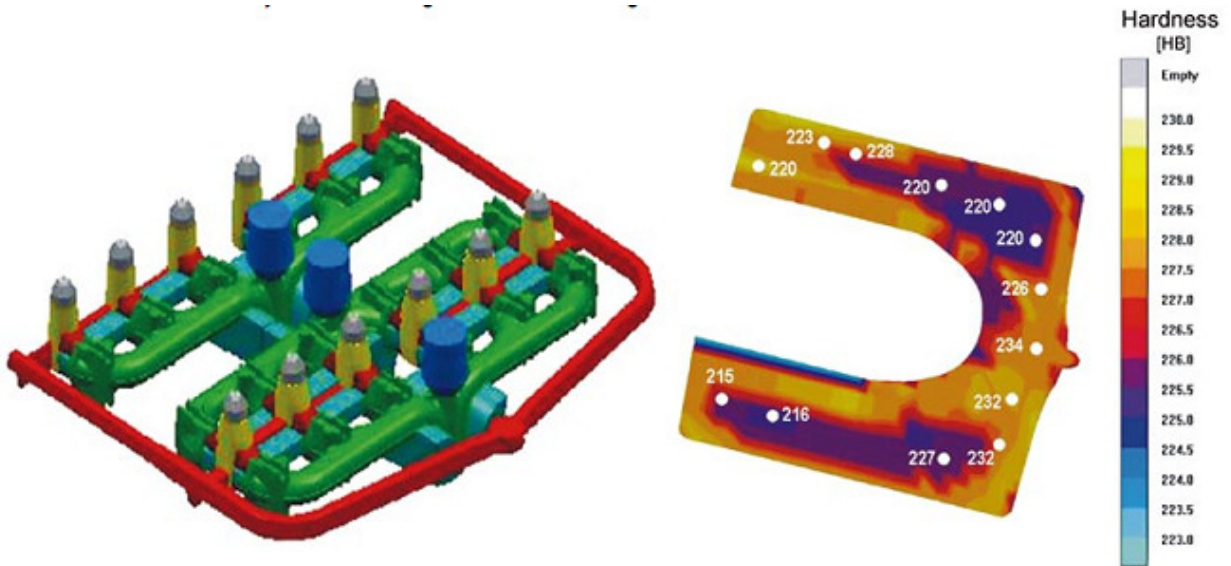


图 11. 模拟硬度值与实测硬度值的对比

Fig. 11: Comparison of simulated and measured hardness values.

Si-Mo 合金铸铁排气歧管的硬度实测数值与模拟预测数值非常一致[7]

5. 残余应力对铸件质量的影响

热应力对铸件质量及性能的影响过去经常被低估。铸造厂必须处理铸件变形和裂纹问题，但防止与应力形成有关的问题的措施却很有限。常用的方法只能是采取应力释放处理来达到技术要求。

如今，模拟由受热引起的残余应力已经成为可能。它可以探测各种质量问题，例如热裂、裂纹敏感性、残余应力水平以及铸件变形，见图 12 和 13。

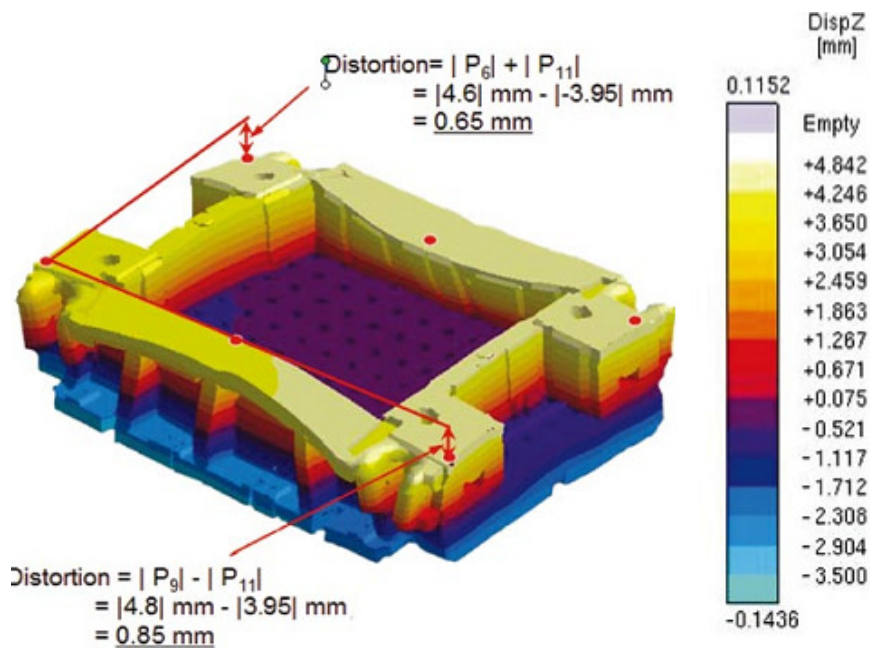


图 12. 用一只冲压模具的变形显示的铸铁件中的残余应力

Fig. 12: Residual stresses in cast iron parts shown using the distortion of a stamping press tool.

模拟降至室温时的残余应力可以预测局部变形，可以预测铸件表面平整度和线收缩，以及型芯和铸型刚度对最终变形的影响。

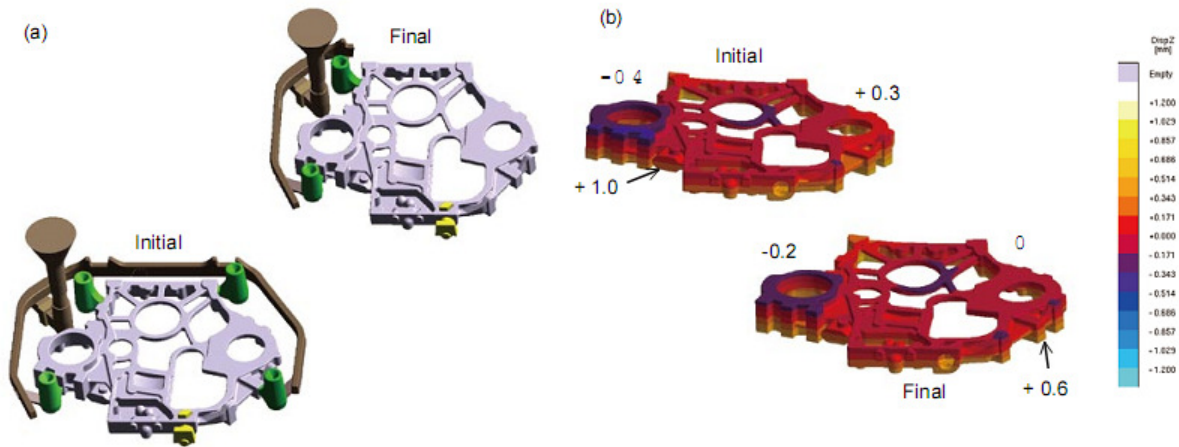


图 13. 优化浇注系统设计减轻铸件变形

Fig. 13: Optimization of a gating system design leads to reduction of casting distortion.

一只灰铸铁壳体曾发生变形问题，其根本原因确定是由于浇注系统刚度过高。变形导致机械加工时因加工余量不够无法加工而报废。对引起变形的浇注系统进行了改进，模拟结果满足技术要求，并且仍然保证充型顺利和凝固顺利。图 13 (a) 所示是原用的浇注系统（左图）与最终设计的浇注系统（右）的比较。图 13 (b) 对比了前后两种方案的铸件变形情况。此图由巴西的宝马国际公司 MWM International 提供。

对充型、凝固和冷却等过程的研究已不断取得进展，而与之相反，对应力形成的认识要困难得多，这是因为铸件在冷却过程中始终经受着应力逆变的缘故。这种情况在日常实践中经常导致误解：为何在我发现裂纹的截面中检测到的却是压应力？这是因为裂纹的形成通常是在高温开始，此时截面处在拉伸应力状态，而铸件的组织是脆的。在室温时，这些截面里的应力已经转变为压缩应力，而裂纹显然仍旧存在。由于这个原因，评估铸件应力模拟得到的结果也是一项很具有启发性意义的任务，有助于了解这类质量问题的原因，见图 14。

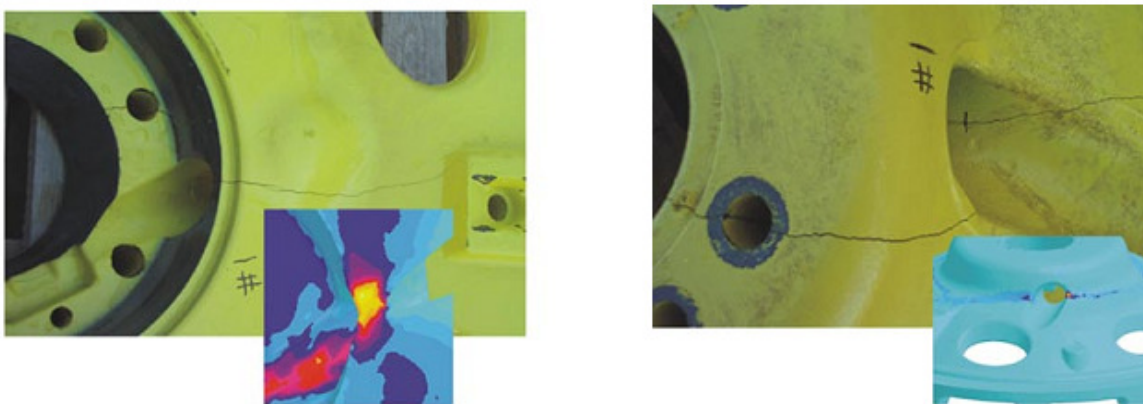


图 14. 车轮铸件配重中裂纹的形成

Fig. 14: Crack formation in wheel weights.

这些灰铸铁件在铸造后没有显露任何缺陷，并且在机加工和油漆过程中也没有显示任何明显的裂纹和不连续性缺陷。可是当这些配重安装到车轮上时，裂纹出现了。残余应力模拟显示：阀杆孔周围的材料在铸造过程中被损坏了。在冷却过程中，残余应力还不足以使铸件开裂，但在安装过程中附加的载荷使应力超过铸铁的强度。模拟绘示了裂纹的始点（左图）。此外，凝固过程中的高应变和应变速度均说明有可能引起热裂，造成了该部位的损坏条件，使该部位产生贯穿铸件的裂纹（右图）。模拟结论是铸件结构需要修改。新设计的铸件在安装时没有再发生损坏。

如前所述，残余应力能说明有关铸件性能的很多问题。由于大部分铸件都是加工后装配使用的，而任何加工工序都会使铸造零件产生新的应力，在不利的条件下，机械加工工序可能会引起高的应力集中而导致铸件开裂和损坏，如图 15 所示。

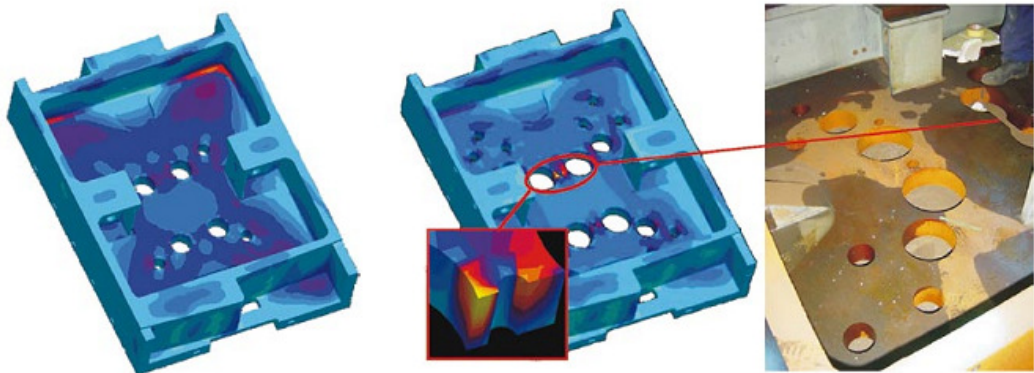


图 15. 机加工前后裂纹敏感区的预测

Fig. 15: Prediction of crack sensitive area prior to and after machining.

模拟铸造应力还可以了解由于去除浇注系统或者由于机加工引起的应力重新分布。应力重新分布可能会引起高应力集中而导致整个铸件失效。铸态残余应力模拟并没有显示任何明显高的应力（左图），而机加工后引起了应力重新分布而导致铸件开裂（右图）[9]。

为了防止高应力，在许多情况下要对铸件进行热处理，借以减少铸件的应力。如果你能知道最佳的工艺条件以及它们对铸件应力状态的影响，这一昂贵的热处理工艺过程就可以优化，见图 16。

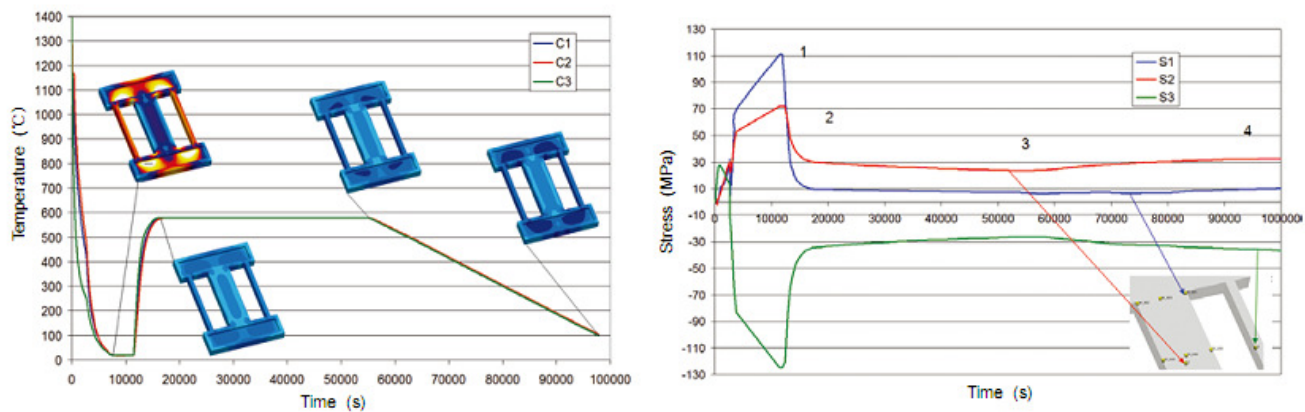


图 16 铸铁零件在热处理过程中的应力释放

Fig. 16: Stress relief of cast iron components during heat treatment.

最新的模拟工具可以模拟包括热处理在内的铸件的整个生产过程。此图显示一应力框架铸件从铸造到热处理结束的温度变化过程，包括显示铸件内的应力分布（左图），以及不同点处的相关应力变化过程（右图）。铸态铸件应力可能接近材料的屈服应力（1）。因此，特别是对于机械工程铸件，要进行释放应力热处理。退火可以使应力随时间延长而变小，见（2）和（3）。应力变小是由蠕变造成的，这是一个与时间有关的复杂的机制，这一机制与温度和局部应力水平有函数关系。在任何情况下，热处理都不可能完全消除应力。应力决不可能降低到低于取决于退火温度和时间的某一临界值。由于热处理结束时的冷却，可以看出有弹性应力形成（4）。

6. 模拟支持整个铸件生产路线

为了定量预测铸件运送到客户时的最终性能，铸造过程模拟必须能够探查铸件的整个生产路线，因为在许多情况下，零件的最终性能是由后续的生产工序（例如热处理）决定的。

近年来，等温淬火球墨铸铁（ADI）的工业应用已增多，这种材料有许多力学性能对汽车、重型卡车以及其它许多工业结构件的应用很有吸引力，并且其性能可以根据需要调整成高强度、高耐磨性、高断裂韧性和高疲劳强度等类型。

ADI 是一种合金化球墨铸铁，要进行被称为等温淬火的三阶段热处理。球墨铸铁先被加热到奥氏体化温度并保持足够的时间以得到被碳饱和的全奥氏体基体。奥氏体的含碳量取决于加热温度、合金含量、球墨数量和反应时间。第二阶段是将球墨铸铁淬冷到奥氏体等温回火温度。在此阶段，合金化和冷却条件对防止早期铁素体和珠光体以及马氏体的形成起着决定性作用。在第三阶段，铸件在奥氏体等温回火温度保温一段时间，然后冷却到室温。在等温回火过程中，全奥氏体基体转变成针状铁素体和稳定的高碳奥氏体，即一种被称为奥铁体的基体。这一过程称为第一阶段反应，其间奥氏体分解为铁素体和高碳奥氏体。

因此，奥氏体等温回火时间必须充分，以得到稳定的高碳奥氏体，并且避免形成马氏体。但是，如果等温回火时间过长，高碳奥氏体的要变成碳饱和奥氏体，后者随后会分解为铁素体和脆性的碳化物。这被称为第二阶段反应，也必须避免。ADI 的最佳力学性能组合是在第一阶段反应已完成，但第二阶段反应尚未开始之前获得的。

各种生产条件和各种显微组织的相互影响很复杂，尤其适合于采用过程模拟。只要知道局部铸态显微组织（球数、相分布和偏析趋势图），可以采用一个结合扩散和动力学的模型模拟局部奥氏体形成及其随后作为时间和和处理条件的函数的碳的吸收情况，见图 17、18、19。

饱和碳浓度，合金化元素和局部冷却条件用于确定淬火过程中（不希望发生的）局部相形成。这些相是最终等温显微模型的输入条件，显微模型可以评估与相动力学和扩散有函数关系的局部扩散和固态相的形成。铁素体在奥氏体基体中形成和生长以及奥氏体的稳定性都在该模型中预测。模拟程序还提供有关阶段 I 结束的重要信息（完全转变成铁素体的时间），以免随后形成碳化物，见图 20。

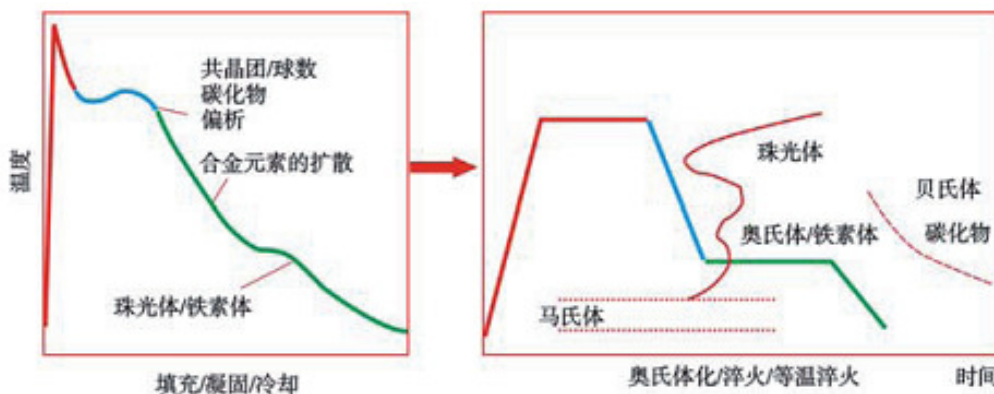


图 17 通过铸造过程模拟与热处理模拟相结合预测 ADI 组织

Fig.17: Integration of casting process simulation and heat treatment simulation to predict ADI structures

铸铁微观模拟为随后的热处理提供有关组织和偏析情况的有价值的信息。石墨球数和偏析趋势将用作模拟奥氏体化、随后的淬火以及等温阶段的输入值。模拟提供有关任何热处理阶段的显微组织的定量信息，并可以确定获得各种组织所需要的时间。

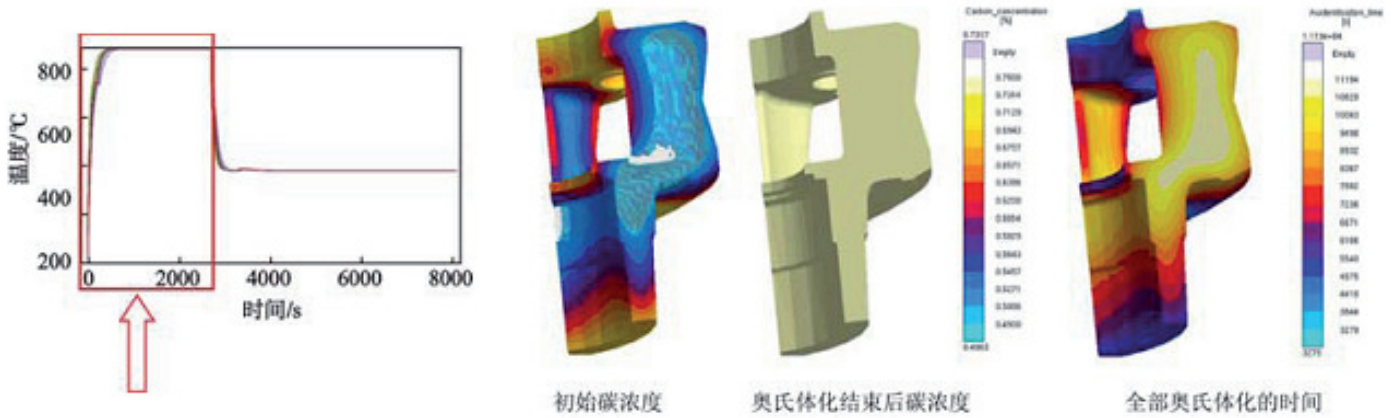


图 18. 一只行星齿轮架的奥氏体化模拟

Fig. 18: Simulation of austenitization of a planet carrier.

根据局部铸态组织可以模拟从固态相到奥氏体的相转变以及随后的碳饱和，因而可以预测碳含量和达到全饱和的时间。

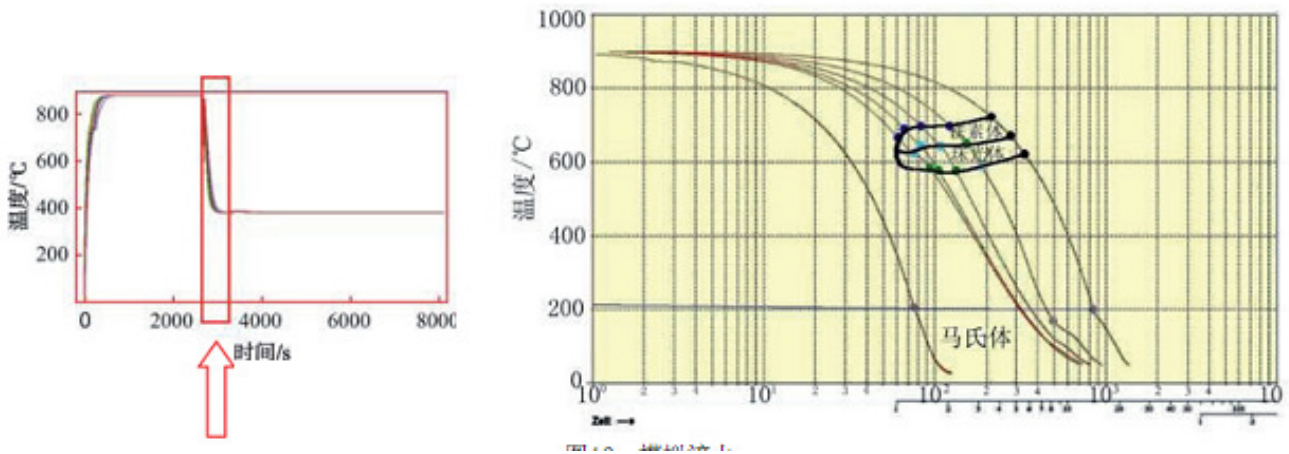


图 19. 淬火的模拟

Fig. 19: Simulation of quenching.

淬火过程中最重要的目标是保持饱和奥氏体而防止铁素体和珠光体形成。这主要依靠合金成分（特别是借助于加入 Ni 和 Mo）。尤其是对于厚大截面铸件，其局部冷却速率可以模拟。由于冷却速度可能差别很大，模拟有助于确定临界工艺条件。

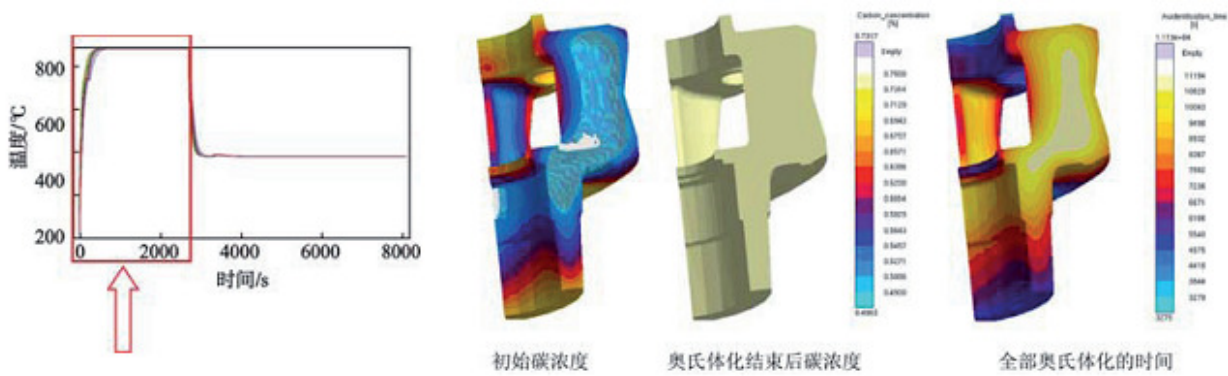


图 20. 奥铁体化的模拟

Fig. 20: Simulation of ausferritization.

更进一步的模拟包括铁素体的形核和生长，以及碳扩散进入奥氏体。这样就可以定量预测最终的相分布以及达到完全奥铁体化的时间。

7. 模拟支持铸件的性能设计

定量地知道局部性能对铸造专家和铸件设计师都是有帮助的。铸造人员可以制订能保证技术标准要求的可靠工艺。设计师可以在他的设计考虑中利用局部性能，以便充分利用铸件的潜力。这样就强力地支持新的和创新的铸造零件的开发，例如风力涡轮铸件，图 21。



图 21 铸造工艺过程模拟强力支持风电铸件技术的发展

Fig. 21: Casting process simulation strongly supports the development of wind power casting technology.

与焊接件相比，铸件的疲劳性能要好得多，这对要求最低寿命为 20 年的构件是极其重要的。铸件重量是决定风力涡轮机的功能性和价格的重要因素，因此，要得到最佳的零件，设计人员必须与铸造厂通力合作，充分利用材料性能的优点。（图片由挪威 Vestas 公司提供）

即使在采用“新型”材料时，也可以采用微观模型进行铸造过程模拟。根据铁液处理情况预测局部球化率和缩松倾向的组织预测工具的新发展，大力地支持了采用蠕墨铸铁的新一代发动机缸体的设计方案[4]。

设计师只有在充分利用材料的潜力时才可能使铸铁性能得到最佳利用。这就要做到既减轻重量，又能使设计达到最佳性能。为此目的，铸件设计师正在寻求可靠的设计准则和工具来支持零件的设计。

除几何因素外，铸铁件的性能还取决于缺陷情况、石墨形态以及基体组织。所选择的熔炼工艺以及工艺过程控

制都是影响铸件性能的主要参数，因而使设计师难以确知他们所依据的真实铸件性能。因此铸件标准只能用来保证最低要求，所以至今仍有些设计师认为，常有变化的铸件性能带来的威胁多于机会[10]。

这说明铸造过程模拟与性能模拟二者必须紧密相结合。只有将根据铸造工艺过程得到的真实材料性能引入设计师的载荷计算，充分利用材料潜力才可能实现，见图 22。铸造过程模拟必须同时回答铸造人员和设计人员提出的问题。因此，重要的是模拟不仅能定性地，而且能定量地预测铸铁的材料性能。

在 CAE 中综合铸件组织模拟、缺陷和性能模拟使设计人员可以根据铸件的真实性能来评估零件的耐久性(见图 23)，也可以利用材料的潜力来减轻重量[12]。

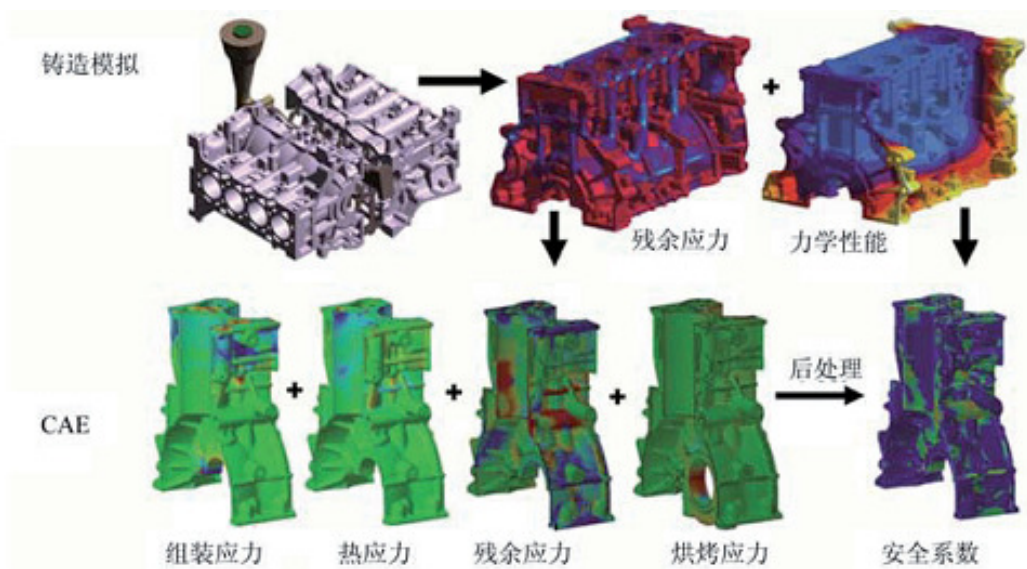


图 22 结合 CAE 设计与工艺过程模拟的链接

Fig. 22: Integrated CAE design-process chain

只有结合应用铸造过程模拟与性能模拟才可能从局部力学性能和残余应力两方面来评估零件的真实材料性能[11]。

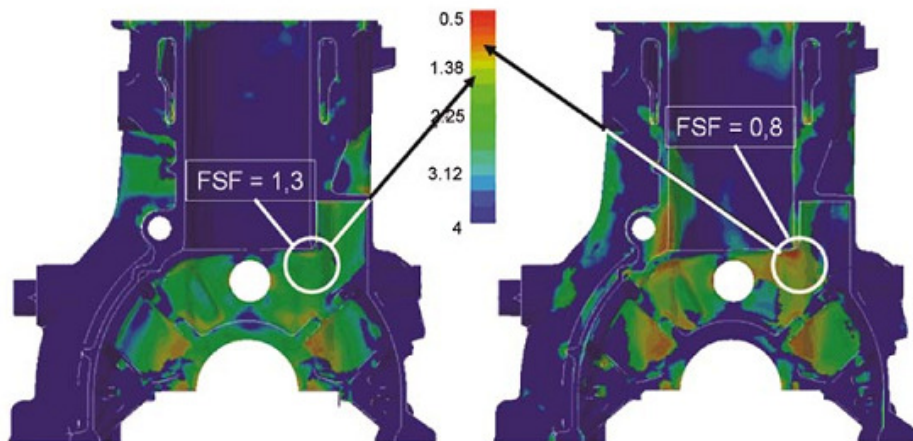


图 23 铸态残余应力对铸铁发动机缸体耐久性的影响

Fig. 23: Impact of as-cast residual stresses on durability of a cast iron engine block.

传统的寿命预测不考虑制造过程引起的应力。无应力铸件在关键区域显示的安全度为 130% (左图)。如果把铸造过程引起的应力视作附加载荷，关键区域的安全度降低到 80% (右图)。另一方面，残余压缩应力则会提高耐久性[12]。

8. 结束语

如果考虑到决定质量的各种参数之间的相互作用的复杂性，铸造工艺能否使一个复杂的铸件“一次浇注成功”将是一种挑战。模拟工具就是要接受这种挑战，特别是在应对铸铁凝固的复杂性方面。只有当模拟程序能在生产健全铸件方面给铸造专家提供适当的自由度时，模拟软件才可能成为铸造厂优化工艺和生产过程的日常工具。

在这种背景下，铸造厂使用铸造过程模拟工具的主要目的是质量稳定、利润增加、使设计适合制造以及进入新市场，也同样使铸造工艺的竞争性得到强化。就此而言，“铸件质量”的含义远远不只是“无缺陷”、“成本降低”、“工艺出品率高”和“铸件性能好”，也不只是“符合所要求的标准”。由最新的铸造过程模拟工具提供的信息有助于零件设计师做到设计考虑材料和工艺要求，也有助于铸造专家建立完善可靠的生产过程。

参考文献

- [1] Hansen P N, Flender E and Sturm J C. Casting Process Simulation – From the Idea 30 Years ago to Reality Today. *International Foundry Research*, 2009, 61(4): 12–29.
- [2] Sturm J C. Die Prozess-Entwicklungs-Kette: Nutzung von Eigenschafts-Vorhersagen für Gusseisenwerkstoffe für innovative Bauteil-Konstruktionen. *Giesserei*, 1990 (9): 56–58.
- [3] Svensson I L, Wessén M. Foundry of Cast Irons: Processing and Simulation. *Numerical Simulation of Foundry Processes*, 2001 (9): 87–145.
- [4] Heisser C, Sturm J C. Casting Process Simulation of Compacted Graphite Iron (03-025). In: *Proceedings of the 107th Casting Congress, Milwaukee, Wisconsin, April 26–28, 2003*: 685–692.
- [5] Heisser C, Nikolov K, Burkhardt R. Applying Experience and Technology Tools to Meet Customer Performance Requirements on a 100-70-03 - Ductile Iron Casting (03-120). In: *Proceedings of the 107th Casting Congress, Milwaukee, Wisconsin, April 26-28, 2003*: 931–937.
- [6] Sturm J C. Optimisation – Integration – Casting Property Prediction. *66th World Foundry Congress, Istanbul, Turkey, September 6–9, 2004*: 171–168.
- [7] Rechsteiner A. Virtuelles Giessen-ein Werkzeug der täglichen Praxis. In: *Proceedings of German MAGMA User Meeting, Vaals, The Netherlands, October 2003*.
- [8] Weiss U, Broda M, Rong P. Die Rolle des Eisengießers bei der virtuellen Produktentwicklung im Automobilbau. Presentation on the MAGMA Seminar "Gusseisen - Ein Werkstoff mit Zukunft", Duisburg, May 2002.
- [9] Boulton A J, Wieckowicz P, Olive S. *Cast Metals Times*. Modern Media Communication Ltd, Shordham by sea, UK, June 2003.
- [10] Hansen P N, Hartmann G, Sturm J C. Optimised Development for Castings and Casting Processes – Increase in Value by applying an integrated CAE Chain for the Development of Automotive Castings. In: *Proceedings of the 65th World Foundry Congress, Kyongju, Korea, October 2002*: 625–638.

- [11] Simon W, Weiss U. Gussteilentwicklung im Zeichen neuartiger Anforderungen. In: Proceedings of NEWCAST-Forum, Düsseldorf: "Konstruieren mit Gusswerkstoffen", June 18, 2003: 3–11.
- [12] McClory B, Nguyen W, Heisser C. Effect of Simulated Material Properties and Residual Stresses on High Cycle Fatigue Prediction in a Compacted Graphite Iron Engine Block. In: Proceedings of 2010 Society of Automotive Engineers (SAE) -Conference, Devlin, USA, Dec. 3, paper No: 2010-01-0016.