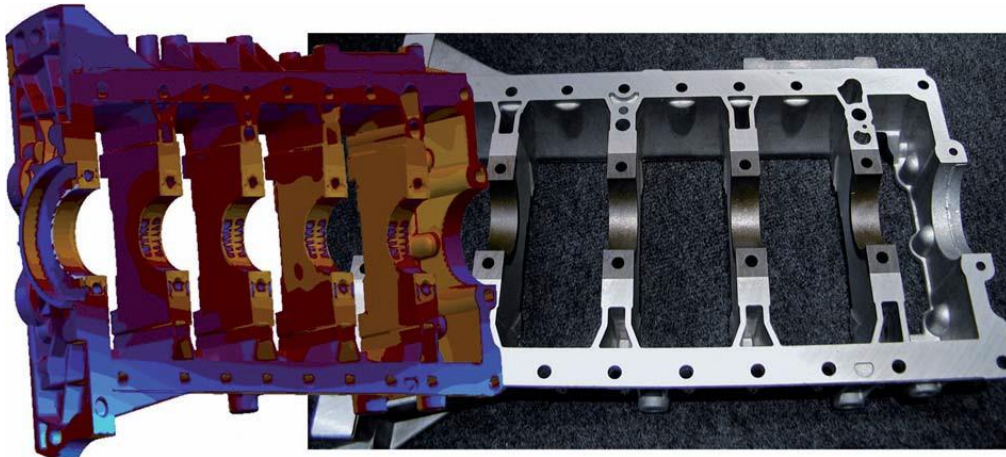


模拟



通过镶件提高铸件的性能在技术上极具挑战性。但是，可以借助于铸造模拟预测显微结构或变形来控制铸件质量。（图片来自：MAGMA）

Dr.-Ing. Götz Hartmann, MAGMA GmbH, Aachen

严丹宁，迈格码（苏州）软件科技有限公司

组合材料在轻量铸件上的应用

铝镁合金铸件在轻量铸件中发挥重要作用。应用领域在不断扩大，材料方面的具体需求日益增加。在很多情况下，铸件的机械或摩擦性能不够，工作温度太高，或环境中存在高度的化学腐蚀。因此，通过铸入镶件（通常由钢或铸铁制成（根据需求））可使得局部零件性能满足特定需求。在浇注期间，这些镶件导致各种缺陷。例如，液体金属局部激冷，阻塞充型时的流动路径。铸件的不均匀冷却导致残余应力、变形，有时会导致裂纹和断裂。由于相邻材料导热和热膨胀的差异，可能导致同样问题。本文展示了可以早在在第一个铸件铸造之前或在热处理前计算和减少残余应力、变形和裂纹形成的可能性。

对混合铸造零件性能的预测

可采用特殊设计或特殊材料制造轻量零件。在各类可实现减重的方案中，组合材料为铸造零件提供巨大潜力，但是，要特别注意各组合材料的具体特性。例如，在铸造生产过程中，材料组合可能导致特殊复杂的残余应力或特定的现象。

如今，很多这些现象都可借助于铸造工艺模拟进行预测和评估，即充型、凝固、显微结构的材料性能的形成的计算机模拟，以便为设计和生产改进（通常很有必要）提供系统性开发的基准。

材料性能 – 局部凝固和冷却条件 – 零件性能分布

有关强度或耐久性极限值的铸件设计和计算，大多数基于标准性能的假定。这没有考虑到在铸件凝固期间的局部不同条件和铸件冷却到环境温度导致局部不同显微结构，并因而产生局部不同机械性能的事实。

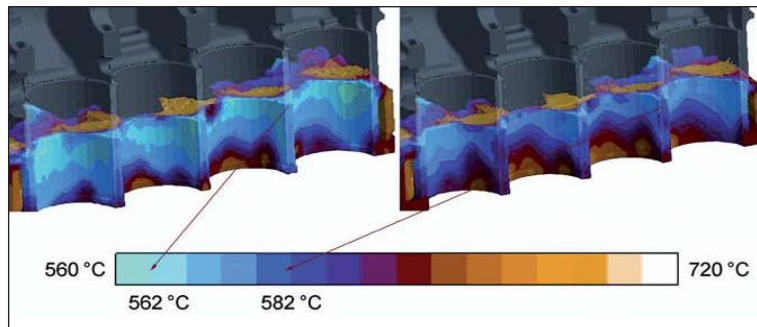
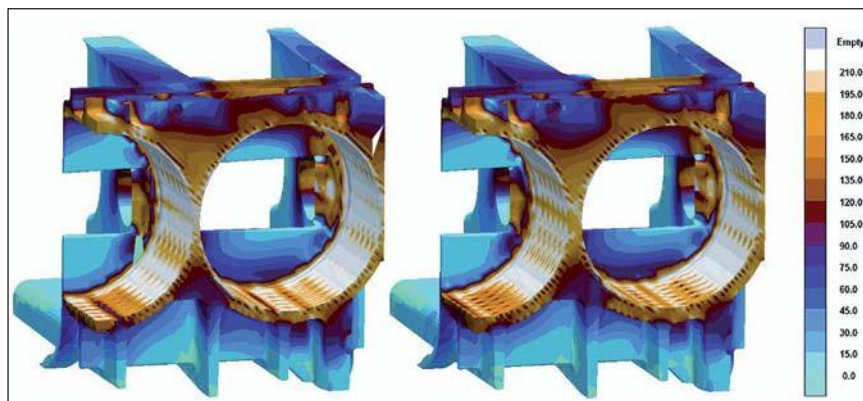


图 1：在较冷的灰铸铁衬层之间流动的铝液的温度。当冷铁衬层预热温度较高时（左），温度非临界；当衬层温度较低时，液体金属无法完全充满此缝隙（右）。这是采用感应预热衬层（冷铁）的铝合金砂型铸造。



图二：镶件周围铝的最大主应力（最大残余拉应力）。注意两个衬套间隙内的高内应力和衬套周围的不均匀应力。衬垫（左侧）距离较近（206 MPa）更大（187 MPa；右侧）。这是一个压铸发动机缸体。

高的凝固率，或者更准确地说，高速凝固前沿形成小枝晶间隔、较细晶粒，并进而形成较高晶界能量或减少偏析。所有这些显微结构参数影响材料的机械性能（如断裂时的延伸率、抗拉强度和弹性模量），而且影响Woehler曲线。由于壁厚不同或混合零件中镶件的激冷作用导致各处的凝固率的不同，上述机械性能也分布在铸件的一定极限范围内。

因为这些原因，凝固后进一步冷却在铸件内各处各有不同，在不同区域形成不同的相，或采用不同方式形成一个和相同的相。这也适用于热处理，即在冷却期间不同的冷却速度可以产生机械性能的不均匀分布。

最后，各种铸造方法都有其自己的、有特点的机械性能分布。在压铸工艺中，大多数压铸模在不到 100 毫秒内快速充型-以及液体金属中的高压，使得金属液与压铸模壁良好接触，进而导致非常致密、细晶粒和无偏析的铸件外壳。这通常会导致形成远超过合金可能的材料性能的交变应力下的较高蠕变断裂强度。

铸件的特征还包括残余应力，这在混合铸件中通常是由典型的材料的不同刚度引起的。在所有采用铸铁、钢或磁铁作为镶件的铝合金和镁合金铸件中，冷铁接受基体材料在其上收缩的特定功能。此过程基本上与如下事实相关联，铝或镁增加镶件中的残余拉应力，平衡镶件内的残余压应力。在混合（材料）铸件中的这一应力发展过程是不可避免的；但是，在零件设计中经常会被忽视。

材料模型、几何模型和铸造工艺模拟

为了对铸造工艺进行计算机模拟，采用了描述各类金属铸造现象特点（取决于合金类别）的工艺材料模型。

流变学

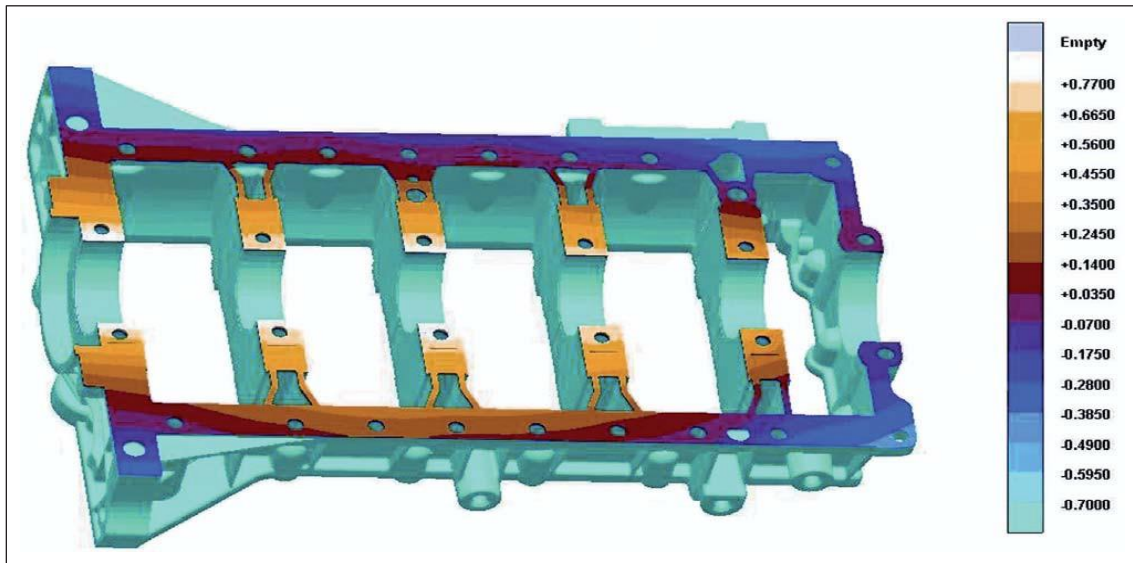


图 3：梯型框架铸件毛坯的尺寸变化。上图显示在垂直于基准平面（Z 方向）上的尺寸变化。该模拟显示梯形框架转角点之间和轴衬支撑表面座之间最大达 1 毫米的尺寸差。

只要在充型过程中金属液没有冷却到固相温度以下，其粘度几乎不会因温度或合金元素含量而变化。表面张力可以发挥重要作用，尤其当在自由金属表面形成氧化层时。相关的模型是最先进的工具。当在充型结束前开始凝固时金属液体流动更复杂，部分凝固的熔液甚至表现出随剪切速率变化和随温度变化的粘度。然而，除了铸造过程中，凝固到 35% 以上的金属被压入型腔中，避免了这种情况。这些模型也很先进。

凝固

熔融金属的凝固一般从包含于任何金属液中的大量核心开始。成核主要由铸造人员控制，因此这些成核也影响着产生的相应铸件特征（如晶粒大小、共晶团的形成或相的构成）。

在液相线温度下开始凝固和在固相线温度下凝固结束之间，固相比比例随着温度降低而增加遵循一定的凝固模型。成核管理和各类凝固模型均被用于铸造凝固的模拟。这些模拟甚至能重现非均衡条件下的凝固状态 – 基本上与金属铸造一样。采用此方式，铸造工艺模拟不仅能确定铸件在不同温度下的组织构成，而且可以确定在显微结构中各相的组成和参数，如枝晶间距等。

残余应力和变形的形成

找此方面，采用先进的弹塑性模型。粘塑性模型一般被用于描绘高温下的蠕变过程或用于热处理。

铸造工艺的模拟主要涉及零件的计算。因此，除了材料模型外，还需要几何模型，即铸件、浇口和补缩系统、铸型和铸模的 **3D CAD** 模型。

它们自动互相关联，以至在几分钟内自动交叉关联，例如，具有温控管道、横浇道和溢流口的压铸模，采用了最先进的技术。

采用灰铸铁缸套的铝合金发动机缸体

在冷却和随后的凝固期间，铝在相对坚硬较冷的 **LGI** 衬铁上收缩。当发生此过程时，在铝中产生拉应力，同时，衬铁则处于压应力之中。根据衬铁之间间距不同，产生不同的内应力（图 2）。通常衬铁之间铝的残余拉应力较高；但是，这可能不是关键因素，因为在此区域形成的任何裂纹对于工作温度下气缸体整体刚度的影响较低。

衬铁预热对残余应力也有影响。基本上，随着预热温度升高，衬铁之间缝隙处残余拉应力降低。

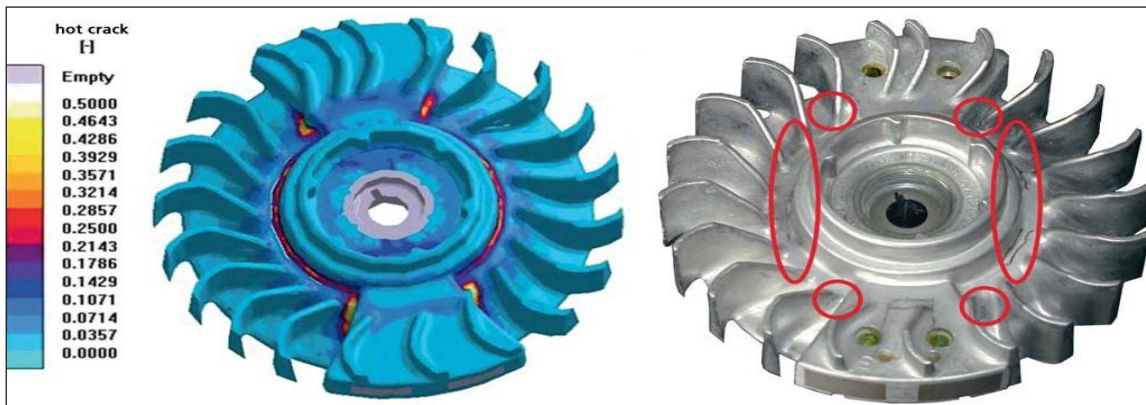


图 4：在紧靠磁性冷铁附近，在凝固过程中飞轮/风机轮产生了热裂。几乎快凝固的金属液是脆性的，超过了临界收缩率。

现在此类发动机缸体采用最新大批量生产工艺。对于砂型铸造，在铸型内嵌入灰铸铁衬铁（片状石墨铸铁，LGI）并预热，而对于压铸工艺，要对它们进行预热，然后放入铸模总成内。在两种情况下，液体铝合金流体随后流过该衬铁，当与这些衬铁接触时铝合金液体将快速冷却，其凝固速度要远快于与衬铁不接触的金属液。在此过程中，在某些情况下可能会出现金属液没有完全充满铸型和在充型结束前某些局部区域已经凝固的情况。由于存在温度梯度以及铝和灰铸铁之间膨胀系数和刚度差异，一定会产生残余应力。两个现象可能很危险（临界），但是，借助于铸造工艺模拟可以对此进行预测。

铝在灰铸铁衬铁之间的流动性能

在采用 LGI 衬铁铝合金缸体充型过程中，衬铁之间的区域通常很关键。例如，为了有利于轻量化结构，应尽可能减小衬铁之间的间距。在此情况下，在发动机内或周围各零件也应可以设计得尽可能小，其中曲轴、凸轮轴、进气管和排气管一定是最重要的零件。但是，尽量减少衬铁间距，势必增加液态铝不再填充衬铁之间间隙的风险。可采用铸造工艺模拟方法评估此风险并针对不同间距进行计算（图 1）。它使得设计工程师能在设计阶段找到制造条件和发现风险，并通过采取一定的工程措施防止此风险。之后，随着大批量生产开始，铸造工艺模拟也可帮助确定最优的预热温度。一方面，它支持液体铝在衬铁周围流动，另一方面，预热需要的循环时间或能耗被限制到尽可能最低。

衬铁之间区域内的铸态残余应力

一般地，采用由片状石墨灰铁或钢衬铁轴瓦的铝合金压铸工艺制造梯形框架。凡是涉及到不同材料组合，会出现同一现象；原理与上述铝缸体（采用 LGI 衬铁）范例一样。通过冷轴瓦没有完全浸入到铝金属液内的事实，可以得出铸件变形甚至更严重的结论。在铸件全部冷却时间段内产生的温度梯度，尤其是在垂直于安装水平面的方向，一般将产生变形，轴瓦将离开缸体而向油盘方向拱起（图 3）。铸造工艺模拟帮助提供变形特征和实际上无法通过铸造方法消除的证据。

从轻量化结构视角来看，降低轴瓦重量是非常可取的，这将自动转化为减少变形。

采用灰铸铁轴瓦的梯形铝合金框架

采用铸入磁铁的镁合金飞轮

对于用于移动机器的小型发动机，如电锯，减重总是发挥重要作用。铸件实例之一就是履行叶轮和承载磁电机功能的镁合金飞轮，首先对此零件进行重量优化，然后通过同时履行几个功能对整个装置进行重量优化。此铸件在衬铁（内冷铁）附近容易产生热裂纹，这是在这些区域凝固过程中形成的。如果此处关键凝固比 - 且随后的收缩率超过标准，会形成裂纹，因为液体金属无法及时赶到以“修复裂纹”（图 4）。

总结和展望

铸件重量可以被最优化，例如，保守地，通过材料适应设计或通过采用设计适应材料的方法。但是，在一个铸件中采用若干材料组合可以找到特殊机会：通过镶件使得形成局部特殊机械、摩擦性能成为可能。另一方面，此可能性一定会被更复杂、高风险和最终代价更高的铸造工艺所抵消。

为了尽量减少与设定新铸造理念相关的工程风险，最重要的环节之一就是采用可靠但低成本的工艺模拟。各大学三十五年来一直在对铸造工艺模拟进行持续改进，并在业内和大批量生产中进行了 25 年以上的运用。

如今，铸造工艺模拟主要用于优化铸造工艺。但是，为了实现效益最大化，可以在铸造首件之前（比如在设计阶段和计算结构阶段）本文中提及的确定局部铸件性能也可以发挥良好的作用。此处，模拟技术的状态提前于纳入有关生产问题模拟的现有状态。通过纳入铸造工艺模拟实现计算铸件结构的改进的潜力很大，因为主要问题就是与铸造工艺相关的机械性能和残余应力的分布。但是，如本文中实例所示，在计算铸件结构时，这些影响是可以计算的，是可以得到开发利用的。

This article is based on a lecture held at the VDI conference “Simulation im auto- mobilen Leichtbau” in November 2011 in Baden-Baden, Germany. 本文件以 2011 年 11 月德国巴登巴登“汽车轻型结构模拟”VDI 大会举办的演讲为基础。

