



通过充分利用模拟为铸造厂节约能源和原材料

Jörg C. Sturm, MAGMA Giessereitechnologie GmbH, Aachen Germany

Christof Heisser, MAGMA Foundry Technologies, Inc., Schaumburg/IL USA

严丹宁，迈格码（苏州）软件科技有限公司

## Abstract 摘要

铸造是有效循环利用材料的“世界冠军”。90%以上的铸造零件由重熔后的废旧金属制成。但是还不止于金属材料：造型材料（砂子）和水也得到重复使用，几乎不会导致废料。

但是，铸造厂的平均能源和材料费用占有所有成本的 40% - 相当于人工成本。金属熔炼和凝固需要消耗大量的电能。物理定律确定每公吨最终铸造产品平均需要 2000 千瓦时的电能输入。这些总和后得到德国每年铸造行业需要消耗 110 亿千瓦时的总电力。这一能耗的 50% 以上并非用于最终铸件本身，而是用于浇冒口系统。该浇冒口系统对于引入金属到达和进入型腔（之后包含最终铸件）很有必要。在铸件凝固过程中浇冒口系统还会对铸件进行补缩（提供材料），以抵消液体和固体金属

之间的体积差，进而消除缩松缺陷。

此处具体地说，铸造工艺模拟提供了一种不可或缺的贡献：模拟使得铸造工程师能在首件铸件浇注前按物理和技术优化设计一套浇冒口系统。它以两种方式实现节能：首先通过尽量减少需要的材料用量，其次是通过降低熔炼过程的相关能源。

在大批量铸件生产中，模拟在能效和相关减少二氧化碳排放方面的其他重要贡献在于其可以降低工艺和循环时间。它被用于优化金属型的加热过程和温度分布，以及找到可安排最多零件数的模型布置方案。在整个生产过程中，模拟也能降低能耗，因为它被用于减少造型材料用量，改进落砂条件，消除清理和返工（包括修补焊接）。通过减少或消除最终批量生产前的试错运行，实现大幅度的间接节能。

因此，通过采用铸造工艺模拟可以大大提高铸造厂的能源和原材料的利用效率。来自铸造厂的如下案例将证明模拟是如何为当前二氧化碳讨论中提出的问题贡献解决方案的。

## 介绍

要制造一公吨的铸铁件，平均需要 1000 千瓦时的电能和 100 公斤的焦炭。这相当于每公吨最终铸件需要排放 1500 到 2000 公斤的二氧化碳【1】。压铸件平均能源输入大约为每公吨最终铸件 5600 千瓦时，相当于每公吨大约排放 2500 公斤的二氧化碳【2】。在德国，每年要熔炼和浇注 590 万公吨的金属（钢和铸铁 480 万公吨，有色金属材料 110 万公吨【3】）。取这些平均值（在德国，每公吨最终铸件 2000 千瓦时，每千瓦时电力 563 克二氧化碳）估算出德国铸造厂每年能耗大约为 110 亿千瓦时，二氧化碳排放量为 650 万公吨。很明显，透过这些数据，可以发现，能效“绿色”铸造可以为改善气候做出巨大贡献。

很自然地，就是由于商业经济原因，铸造行业长时间以来一直聚焦于采用和进一步开发节能铸造工艺。能耗在铸造厂全部生产成本中占有很大的比重，因此，对于铸造厂的利润率和竞争力具有巨大的影响。节能工作的着眼点通常以优化涉及能源利用过程为重点，即熔炼过程和铸造设备的运转：具有更高效率的熔炼炉，具有更好隔热性能的炉衬，能源回收利用或压缩空气的优化分配，都是目前研究计划的一部分。

铸造工艺模拟可以为能源效率铸造做出巨大贡献。它在很多方面支持减少必要原材料数量和处理这些材料的相关能耗。用于生产最终铸件的大量能源在重熔和烧损过程中被消耗。可以降低重熔（再熔化）金属量和增加铸件出品率（最终铸件与总浇注重量的比率），可以节约大量的能源。德国的 Gießereitechnik IfG 研究所计算结果显示，对于一家采用感应电炉的年产 2000 公吨铸件的铸造厂而言，铸件出品率从 60% 提高到 70%，每年可节约电能 300000 千瓦时【1】。另外，可在全部工艺链条（表格 1 和图 12）中降低能耗。只有充分优化所有“能源热节”，才能降低整个经济活动中的二氧化碳排放并确保铸造厂在成本和竞争力方面的优势。

Process	Castiron	Steel
	kWh/t	kWh/t
Melting	944	1.000
Heat Treatment	42	514
Ladle Preparation	214	214
Molding	171	120
Cleaning	128	171

表格 1: 铸造厂几个工艺环节中铸铁和铸钢的具体平均能源消耗。红色表示可通过铸造工艺模拟施加巨大影响的领域（【1】修改）。

## The analytical view into the mold 铸型分析图

铸造工艺模拟作为节约能源和成本工具的想法来自于德国亚琛。早在上世纪 80 年代，此方法的价值得到德国研究联盟(Deutschen Forschungsgemeinschaft)的认可，在德国亚琛工业大学促进制造过程节约能源和原材料的专门研究领域的框架内，其各项基本原则得到了支持。

上世纪 80 年代末，随着铸造工艺模拟技术被引入到各铸造厂，人们可以第一次真正探究铸型“黑箱子”的内部并根据验证过的数据优化工艺条件和浇口设计。铸造工艺模拟的基本目的就是开发出经济、成本最优的铸造工艺，生产较高质量铸件。这与实现节能、降低成本和改进原材料利用的目标相吻合。在铸件工艺开发和在样件阶段系统性采用铸造工艺模拟将减少废品和返工，实现额外的降本增效。此外，通过改进金属型和压铸模内温度分布以及改进诸如热处理的后续过程，提高生产率，可实现节约能源的目标。通过减少产品和工艺开发时间、改进沟通方式（内部和外部与客户之间）以及培训和教育雇员和公司专业知识的透明建档，模拟还产生一定财务效益。

在过去三十年间，铸造工艺模拟工具已经从单纯的缺陷检测和浇口开发工具进化为一种充分提高效率并确保稳健工艺的公认的方法。很自然地，该模拟的作用是在模拟结果中获得的值得信赖的铸造专家经验为基础的。因此，如同一个“虚拟试验铸造厂”，采用可预测的工艺描述，其中不仅一次性计算铸造技术以确认初始假设条件，而且被用于进行参数和敏感性研究，以探究重要工艺参数对生产工艺稳定性的影响。这就确立了了解重要参数及其对铸造厂能源和材料影响的基础。下列案例描述了这些关联。

## Designing cost reducing castings 设计降成本铸件

减重是汽车和设备制造行业的关键技术。一台车辆减重 100 公斤相当于每百公里油耗减少 0.2~0.4 升。在车辆寿命期内，按总驾驶里程 25 万公里计算，可以最高减少 1000 升汽油或 2.3 公吨的二氧化碳。而且，设备制造商需要考虑轻量化条款。也就是说，增加大型海上风电涡轮机的计划，风能吊舱的重量成为重要的可行性评估因素。

通过采用现代化模拟工具，可以开发出铸造材料及其制造工艺的全部潜力。如今模拟工具能准确预测工艺参数对铸件的影响。可以早在产品开发过程就采用此工具，以减轻重量。模拟程序提供的信息不仅支持工程师找到可铸造和重量优化的设计，而且可使得铸造工程师能确立稳定和降本增效的生产（工艺）。

一开始，设计师创建一个满足负载要求的模型。当涉及到潜在供应商时常常会在设计中引入铸造工艺相关专业人士。此时此刻，通常设计已经被冻结，铸造工艺要求的任何必要修改或导致大量工作以及增加设计师和供应商之间的大量沟通环节。可以确定的事实是，铸件设计定义了全部生产成本的 80%。尤其对于需要特别关注有关轻量化要求的零件，铸造工艺模拟的早期介入提供巨大的益处（图 1）。当采用模拟时，可以及早发现铸造工艺存在问题和存在相关潜在质量损失的设计问题，并在设计师和供应商之间讨论。这对于铸造工艺、热处理工艺和定义零件最终性能的后工序加工工艺的多工序生产工艺而言尤为重要。

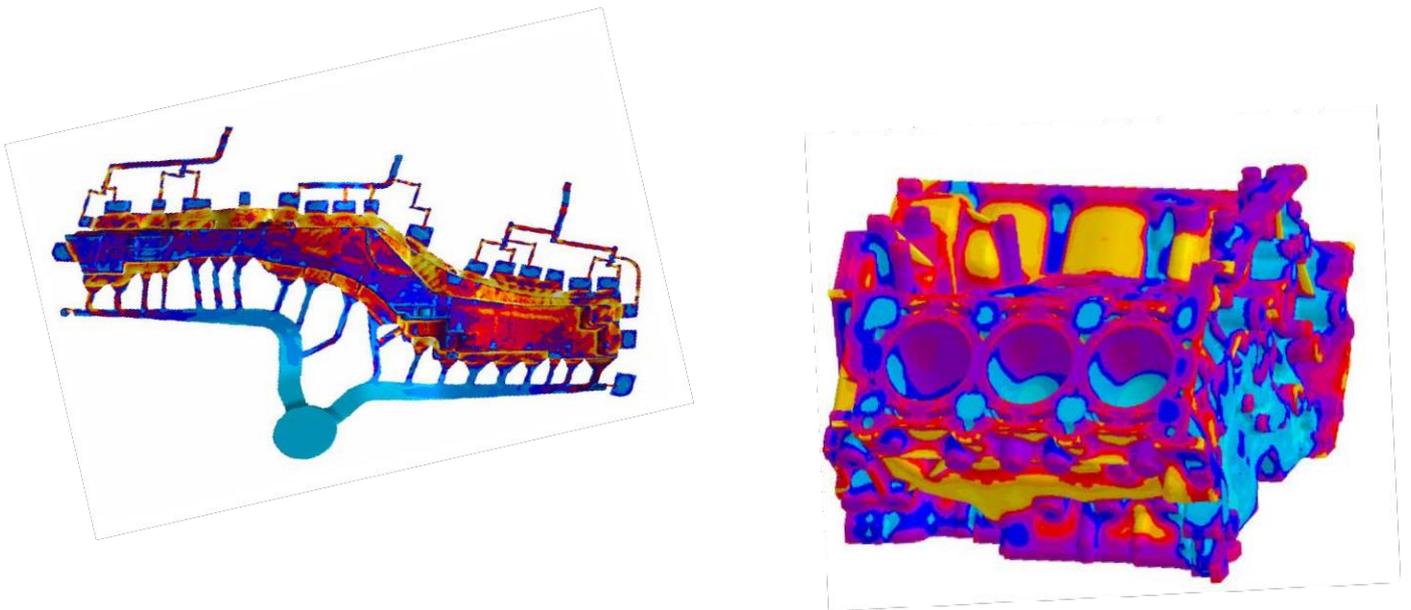


图 1：可采用所有铸造材料获得铸件的轻量化设计（左：材质为 AlSi9Mn 的奥迪 D4 连接器【6】，右：采用蠕墨铸铁的重量优化后的奥迪 V6 发动机缸体【7】）。

## 通过减少或消除试错运行节约能源

如果没有铸造工艺模拟，在零件设计完结后需要进行多次成本昂贵的工艺试验。通过物理试浇注，模拟几乎可以较少试错工艺优化的过程。铸造专家采用模拟软件可在生产开始前就能确定稳健生产的所有工艺参数。只是通过减少或消除实际试验，就能立刻实现省去初次原材料和能源消耗的目标。例如，一家美国铸造厂大幅度减少了配置和试浇注次数，结果其自己不仅减少了样件的成本（降低了 58 万美元的成本），而且消除了导致大量报废铸件的工艺试验，这另外节约了 20.8 万美元【8】。

另一案例来源于一家采用铸造工艺模拟减少必要试验的铸钢厂。模拟工作和大量试验的相关性对比：增加 56% 的模拟活动导致试验次数减少 64%（图 2）。由于模拟每月协助开发大约 30 个零件的浇注系统，铸造厂能使得废品率降低 2.65%，相当于节约了 51.4 万美元【9】。

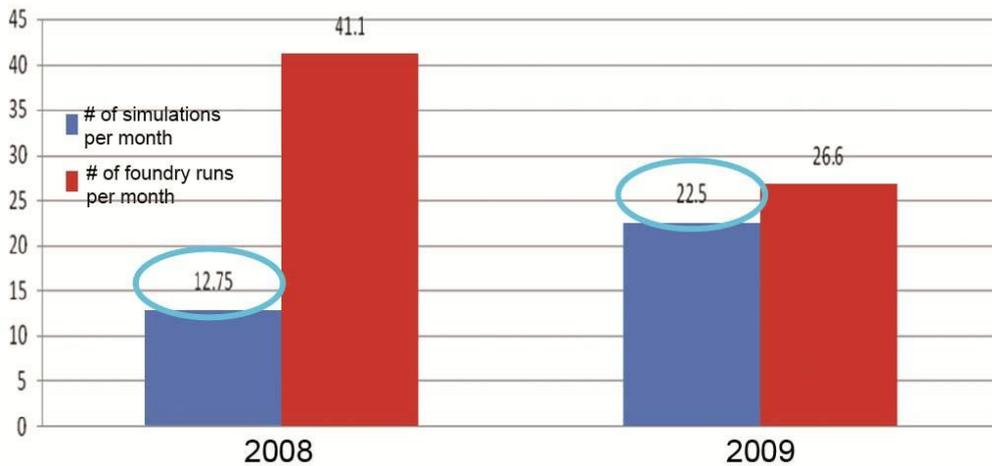


Fig. 2: Reduction of test runs vs. Number of simulations in 2009 [9].

图 2：2009 年试验减少与模拟次数【9】。

## Introduction of new casting technology 引入新的铸造技术

在任何铸造厂引入新铸造技术都面临挑战和风险。提高能源和材料效率的方法得到了公认，但是对于生产风险和交货承诺不利。这就一再导致因循守旧，总是固守成规。

在生产复杂球铁支架过程中，到了机加工过程时才发现了缩松缺陷。首次模拟便发现了此缺陷并找到了根源：通向关键区域的补缩通道被提前阻断。对冒口布置方案进行修改后便消除了这一缺陷（图 3）。此外，对浇注系统的必要修改使得浇注重量减少了 13 公斤，浇注时间缩短了 2.5 秒。每年实现的 13 公吨金属液节约量相当于在熔炼过程中减少能耗 12272 千瓦时。通过缩小冒口颈横截面积 25% 实现另一效益（减少冒口清理费用）。而且，修改后的工艺布置方案导致凝固时间减少 11 分钟，并进而使得生产率增加了 15%。原先的工作是消除此缺陷。基于模拟的最终方案使得生产成本大幅度降低【10】。

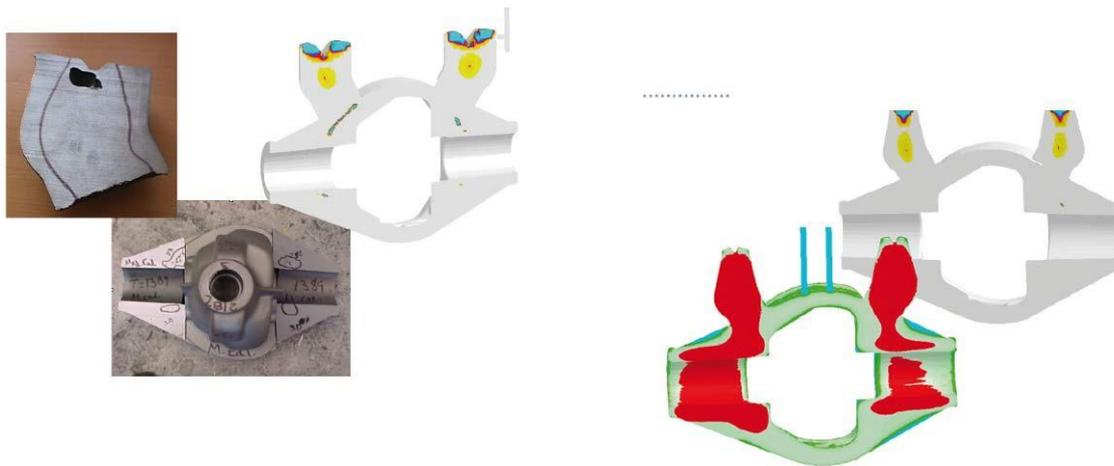


图 3：与原设置相比较，引入新的冒口设计导致材料成本以及熔炼和清理成本降低，并提供更好的铸件质量（左）【10】。

德国西梅尔特的 Otto Junker Edelstahlgießerei 的铸钢泵壳之所以实施由边冒口修改为带过滤网的直接浇注顶冒口的工艺转换，就是因为之前的铸造工艺模拟验证了该修改的可行性和成功可能。因此，钢水总体积减少为原体积的 81%。另外，还获得造型时间大幅度降低（79%）的效果，使得切割冒口和其他相关清理工序需要的时间最小化（87%）。该铸件中生产成本降低了 12%【11】。

通过采用铸造工艺模拟开发一种非传统浇注系统，南美的一家铸铁厂使得球墨铸铁差速器箱壳体的铸造出品率从 62% 增加到 67%。与此同时，其总体废品率从 17% 降低到 7%。按每年 24000 件计算，可节能 70 万千瓦时，降低成本 50 万美元【12】。

## Energy and cost savings through riser optimization 通过优化冒口节约能源和降低成本

德国阿姆施泰滕的 Heidelberger Druck AG 铸造厂仅今年就评估和修改了目前生产的 38 种铸件（年产铸件量 32000 件）的浇口系统和工艺技术。通过这一工作，回炉重熔了 295 吨铸件，淘汰了总重量达 1300 公吨（的材料）。

在前 18 个月内，Heidelberger Druck 每年在材料和能源费用上节约 10 万欧元【13】。

例如，基于模拟结果，一个齿轮的浇口系统的冒口从 5 个修改为 2 个。每件减少浇注重量 69 公斤或每年减少 82 公吨，相当于每件 32 欧元或每年 38000 欧元（图 4）。

采用模拟使得铸造厂还能将一模 3 件改为一模 4 件，同时减少冒口数量。铸造出品率增加 53%，每个铸件降低成本 2.18 欧元。

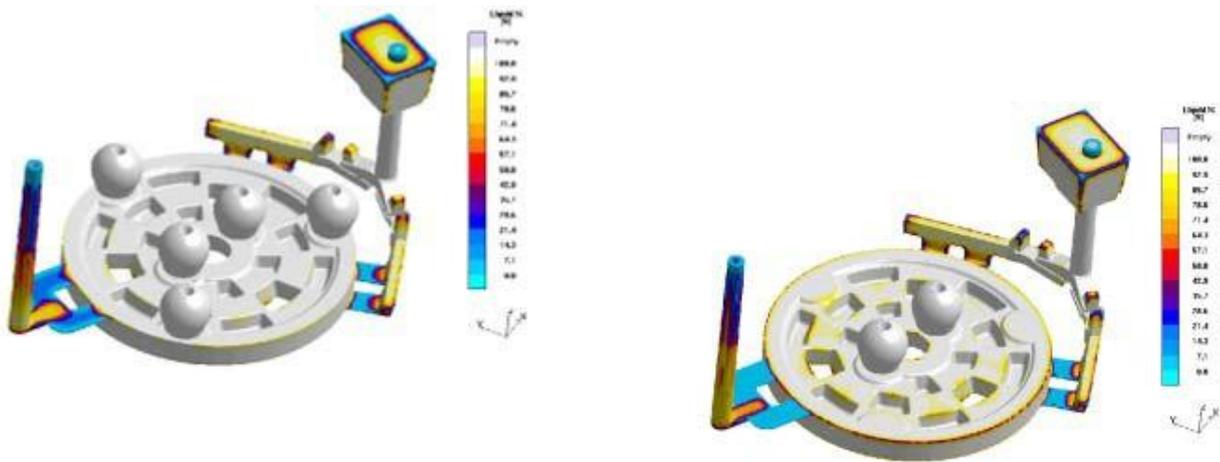


图 4：原齿轮浇冒口系统需要设置 5 个冒口（左）。最优化铸造技术每件仅需要 2 个冒口（右）【13】。

## Quality supported by simulation avoids energy intensive scrap 通过模拟为质量提供支持，避免高耗能废品

美国伊利诺斯州的 John Deere, Moline 通过修改其设计和浇冒口系统能将灰铸铁废品率从 10.3%降低到 1.4%，年节约成本 66,936.00 美元（图 5）。与此同时，通过随后采用铸造工艺模拟使得铸造出品率从 58%增加到 64%。这相当于每年另外节约 66,600.00 美元。需要铁水总量降低 195,6 公吨，使得在满负荷生产时造型生产线上可再提供 274 个铸型。此优化每年还可以节约能源 160000 千瓦时。如果在早期已经采用了模拟技术，铸造厂声称在第一年生产时有另外节约 140,000.00 美元的潜力，并可免去铸件设计和模型修改费用 120,000.00 美元。

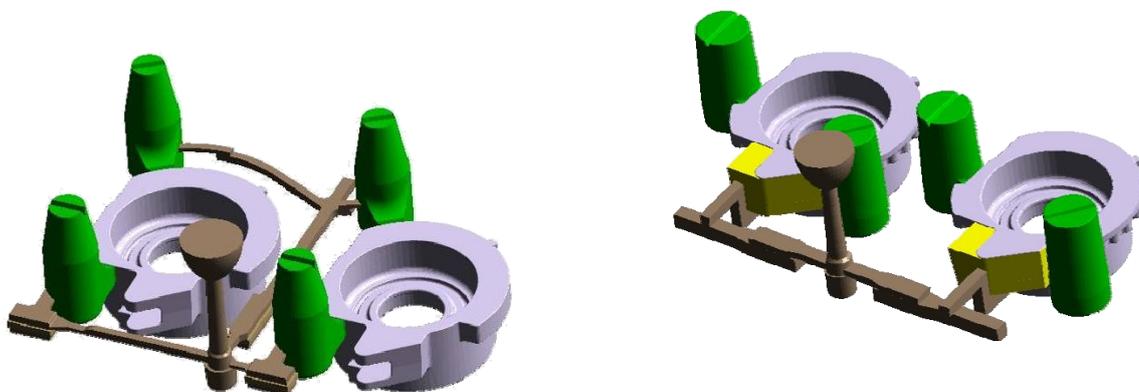
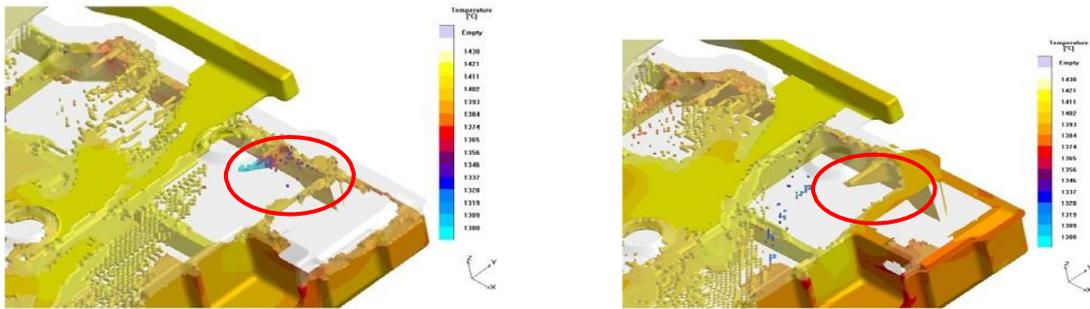




图 5：重新设计铸件和修改灰铸铁铸件浇注系统技术使得大幅降低能耗和成本【14】。

根据铸造工艺模拟进行内浇口布置的优化，这大大减少了对于 Heidelberg Druck AG 铸造厂生产的端盖的维修率：原零件中的温度损失导致筋板的不完全充型，零件的 90% 都需要焊补。重新安排内浇口后消除了任何修补的需要（图 6）。



## Efficiency improvement of production and logistic costs in foundries 铸造厂生产和物流费用的效率提升

关键零件凝固和冷却时间的预测使得 Heidelberg Druck 能缩短生产循环时间，以优化冷却（保温）区域和模架可用性。因此，实现与生产和物流相关成本的最优化（图 7）。

模拟允许铸造工程师可以采用一种在轴承盖落砂时将冒口和浇口断开的几何结构，而非后期单独切除。按 12700 件生产量计算，可年节约 5400 欧元。

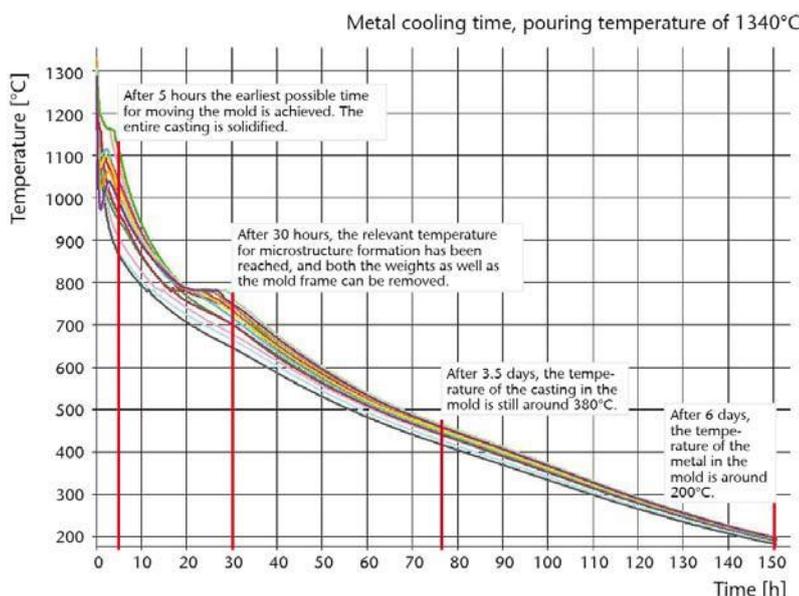


图 7：预测冷却时间可有助于优化铸造设备的布局和减少物流费用【13】。

## Energy savings potential through the simulation of heat treatment 通过模拟热处理获得的节能潜力

(Figure 8).在实际铸造过程之后，很多铸件在热处理阶段获得其最终机械性能。在热处理过程中最优工艺布置和相关能源输入与显微结构的形成密切相关。可以模拟全部热处理过程和相应产生的显微组织和机械性能。一般对各热处理工艺步骤提高安全系数，因为过去存在大量有关热处理炉如何提供能源和该能源如何被传输到零件内的不确定性。工艺模拟使得操作工及早开始大幅度降低该安全系数。新模型甚至允许预测铸铁和铸钢内的局部碳饱和度【15】。鉴于风电零件奥氏体化总时间为 6 小时和减少 1.5 小时的可能性，提供每公吨产品节能 128 千瓦时的可能性。对于 500 件已经热处理的零件，每年节能累计达 10 万千瓦时（图 8）。

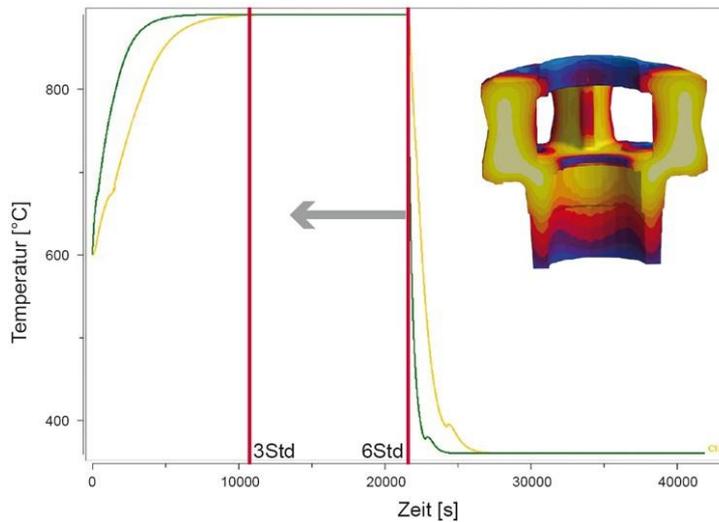


图 8：模拟帮助优化热处理工艺时间【15】。

## Energy and cost savings in aluminum permanent mold casting processes 采用铝金属型铸造工艺节能和降低成本

由于大批量铸件提供的杠杆作用，大批量生产铸件节能的潜力相对很高。不幸的是，金属型应用中工艺相关自由度数要比砂型铸造工艺低得多。但是，可以在整个工艺链条中发现节能的潜力。

采用倾转浇注铸工艺生产的摩托车叉的原浇注系统，模拟出的若干风险。另外，铸造出品率才为**49%**。

全部基于模拟开发的最终解决方案消除了充型过程中以前存在的紊流。热节和相关缺陷也被根除。较小的浇口导致铸造出品率提高了**18.5%**。快速充填薄壁铸件减少了凝固时间，进而减少循环时间**10%**（图 9）。

通过考虑较高的铸造出品率、较低的废品率、较短的循环时间和节约模具和材料费用，可以计算通过铸造工艺模拟降低的成本数。尽管增加了将新浇注系统工艺落实到模具的工作，但是第一年就总共节约了 28000 欧元的成本。

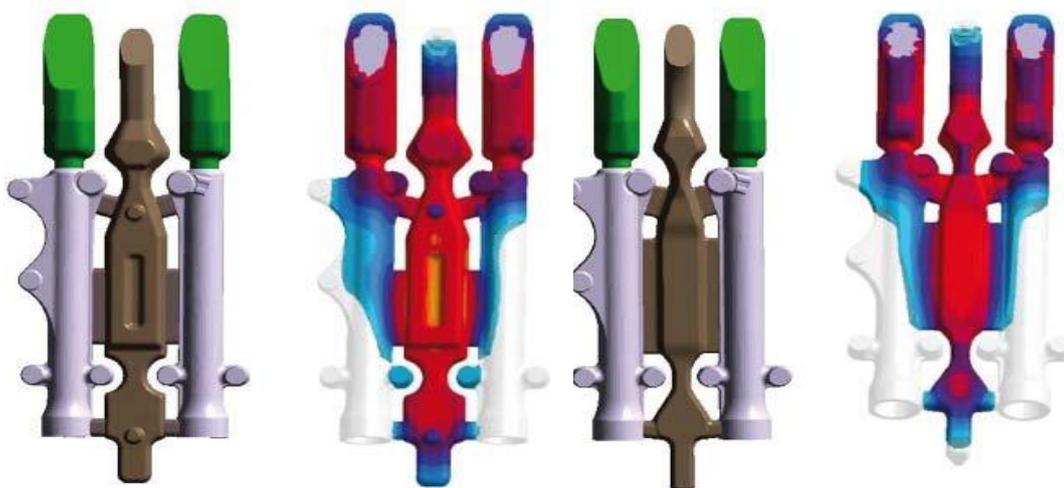
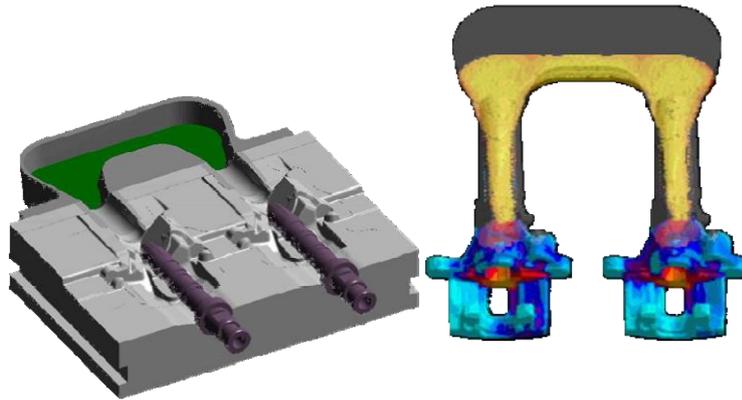


图 9：优化后铝合金摩托车前叉的浇注系统和模具布置方案（左：原来的浇注系统布置和热节分布，右：采用定向凝固的优化后的浇注系统布置【16】）。

通过模型布置方案修改和铸造工艺改进（只有通过采用铸造工艺模拟才有可能），波兰弗罗茨瓦夫铝铸造厂 EBCC 在其制动钳生产中已经获得节约成本 10 万欧元以上的效益【17】。导致这一成功的主要因素就是减少了熔炼过程中的损耗（每年大约 25000 欧元），熔炼节电（大约每年 45000 欧元）和降低循环时间，据此造成金属型损耗较少，导致需要更换铸型数减少（每年 35000 欧元）。很明显，减少循环时间也导致生产率提高（图 10 和 11）。



].图 10: 铸型布置和制动钳倾转工艺的模拟

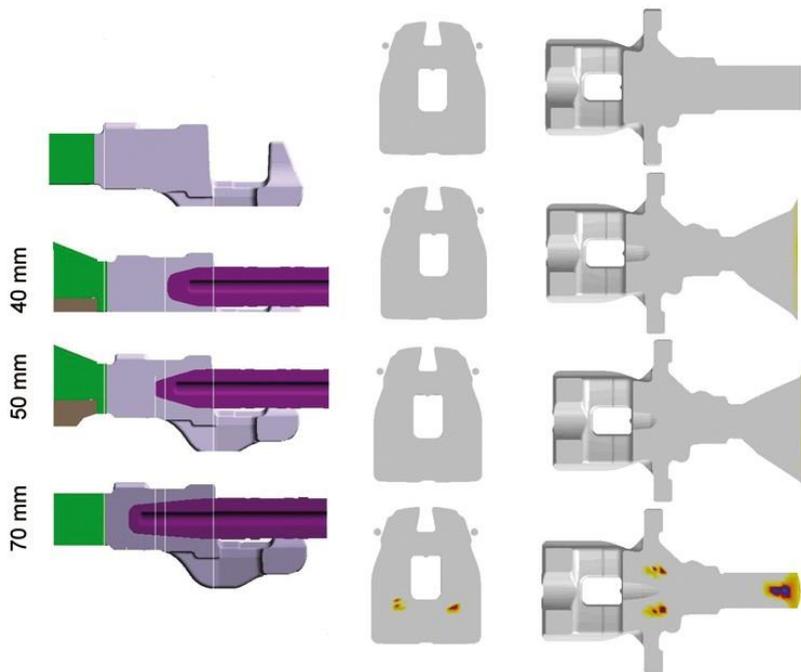


图 11: 优化铸型和模块几何形状保证稳健的工艺条件并同时降低能源输入。

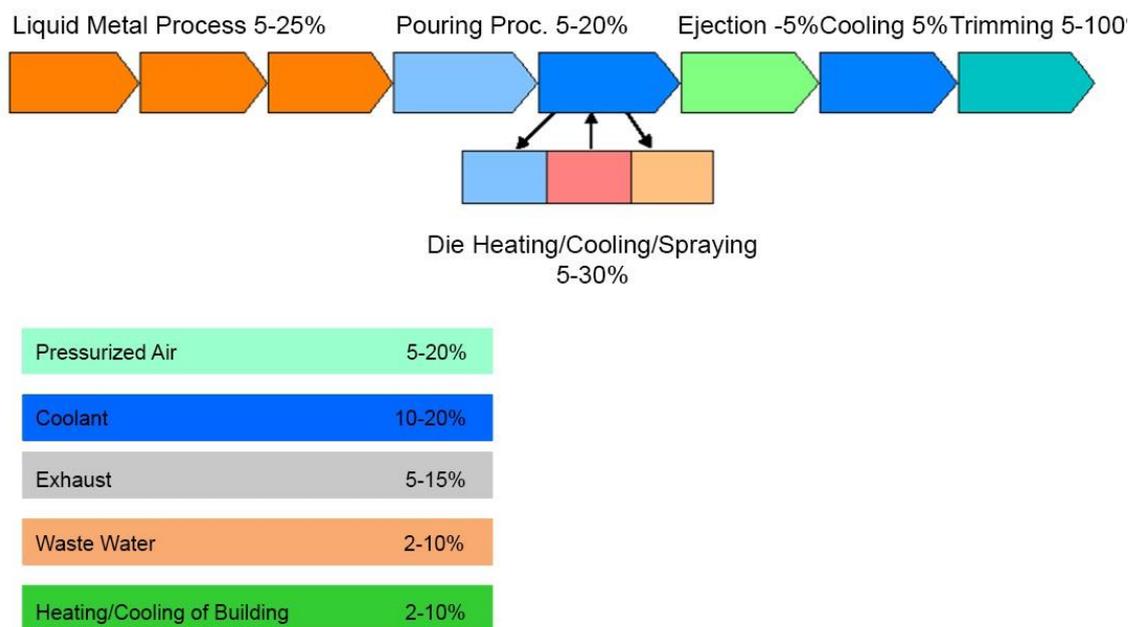
## Savings potential in high pressure diecasting 采用高压铸造的节约潜力

在高压铸造过程中，全部能源需求的 40%~60% 被用于提供液体金属。剩余部分被用于实际铸造过程【18】。熔炼过程需要的能源输入依赖于废品数量（一般为 5% 到 7%）和熔炼损失（2% 到 5%），并主要受到铸件质量与总浇注重量之比（铸造出品率）的影响，该铸造出品率值范围在 30% 到 70% 之间（取决于具体零件和采用的工艺）。据此，也取决于铸造厂之间的铸造设备差异及其各自增加能效的努力，用于熔炼的天然气的量可能波动 7 倍（最多和最少的可能相差 7 倍），用电量可能有 2 倍的波动，导致每公吨最终铸件 5603 千瓦时的平均值【2】。这些数值

表明潜力存在于优化浇注系统及其对潜在节能的影响。

对于高压铸造过程而言，一般大量能源通过冷却和能源传递到环境中损失了大量的能源，所以仅小部分能源保留在铸件内。能效提高的额外潜力隐藏在模具布置方案（即通过多个型腔增加生产率）和模具寿命延长中（增加能源和材料利用率）。

全面优化全部生产工艺使得任何压铸工可实现合计高达 15%~35%的节能（图 12）【2】。正如在一个现有研究项目中所评估的那样，铸造工艺模拟可以提供巨大贡献【18】。



Liquid metal process 液体金属过程 pouring process 浇注过程 ejection 开模 cooling 冷却 trimming 修剪 pressurized air 压缩空气 coolant 冷却剂 exhaust 排气 waste water 废水 heating/cooling of building 建筑物的加热/冷却 die heating /cooling/spraying 模具加热/冷却/喷水

图 12： 高压铸造过程中各工艺环节的节能潜力【2】。

## Optimization of gating systems and re-melt 浇注系统和重熔的优化

以齿轮箱体为例，研究项目评估了将油基模具冷却系统转变为水基冷却系统的节能潜力。此条件对铸件质量没有任何负面影响。采用铸造工艺模拟进行了综合虚拟参数研究（DOE），以评估几个工艺参数和浇口设计的影响（图 13）。软件可允许直接比较所有计算的试运行并描述最佳方案（图 14）。

结果是横浇道体积减少了 25%，这使得每次压铸采用的材料减少 12%。同时，优化冷却管路设计与较低的浇注重量相结合，使得循环时间降低了 8%【19】。

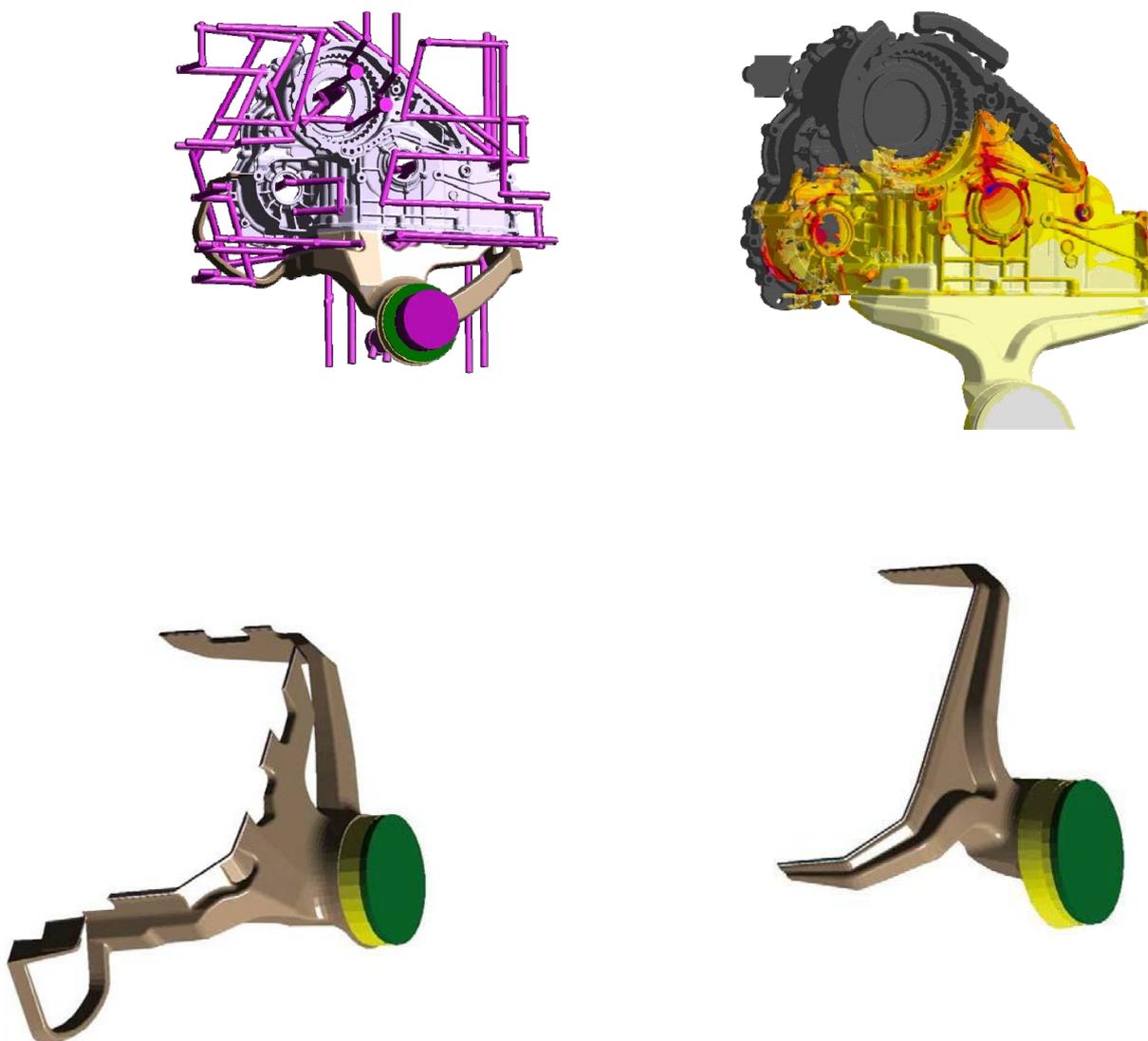




图 13: 优化后的齿轮箱体浇注系统布置方案, 右上角: 原来布置方案和冷却管路设计, 左上角: 优化横浇道后均衡的充型模式, 原来 (左下角) 和重量优化后的横浇道系统 (右下角) 【19】。

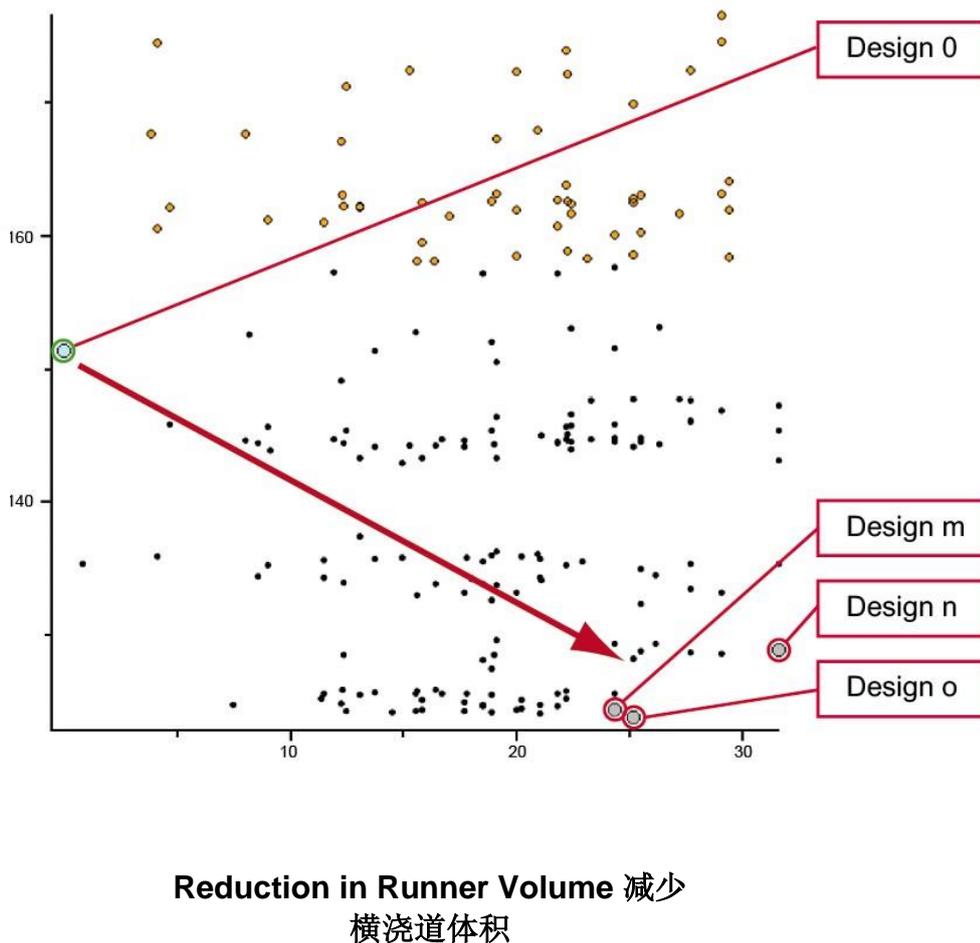


图 14: 通过铸造工艺模拟制动优化铸造工艺和模具温度。不同设计的参数研究表明, 与原设置相比 (设计 0) 存在若干可提供减少横浇道体积并同时改进铸件质量的解决方案 (设计 m, n 和 o)。

## Dielife Improvement 模具寿命的改善

压铸模的机械疲劳和其横浇道系统内磨料磨损是模具失效的主要原因。关联成本很大: 模具镶件的一般更换成本大约为 50,000.00 欧元, 这还没有计算每天压铸机停工时间的约 3,000.00 欧元的损失。通过铸造工艺模拟, 现在可以非常可靠地确定热裂和磨损的关键位置 (图 15)。修改工艺参数、模具设计变更和改进模具材质可以防止这些问题的发生。

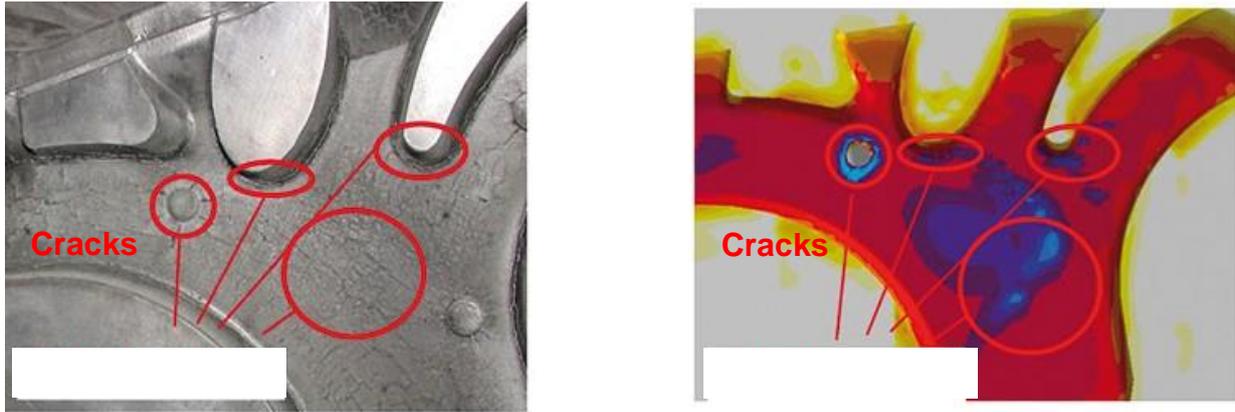


Fig.15: Prediction of dielife through simulation of local thermo-mechanical fatigue [21]

图 15: 通过模拟局部热机械疲劳预测模具寿命【21】

在德国的迪腾海姆 Metallgießerei Karl Scherb 公司，基于减少以前遭遇的模具磨损和相关浇注模具寿命问题的目标对浇注系统进行了修改，结果导致节约成本 25,000.00 欧元（图 16）。试验和压力试验设备仅需要支付不到 20000 欧元，也是因为铸件的缩孔分布得到了改进【22】。

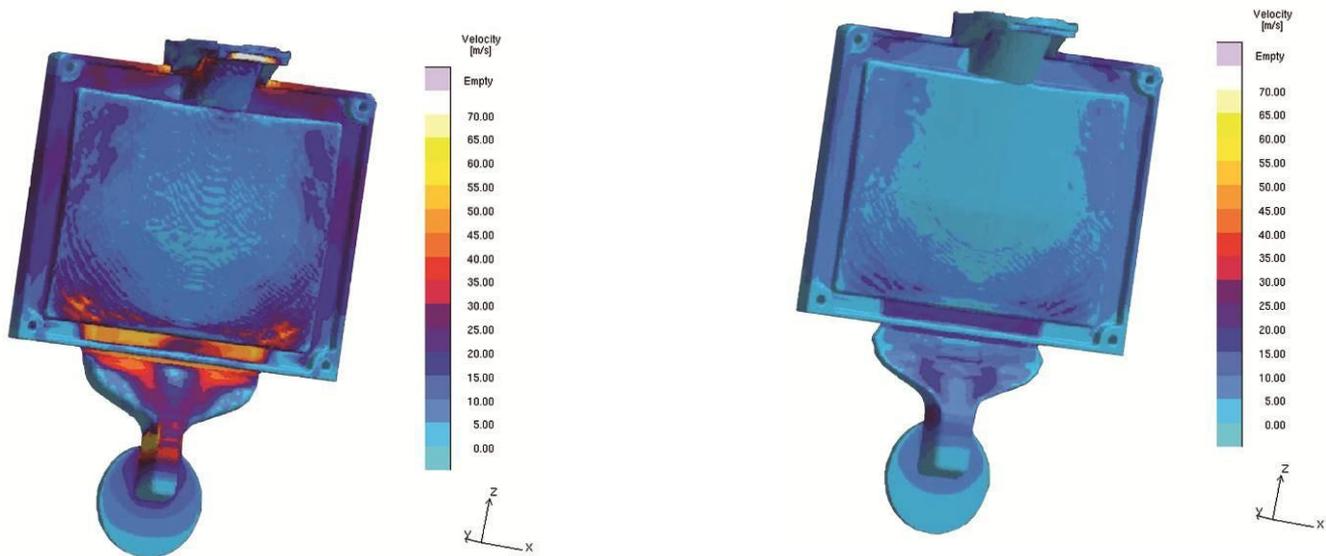


图 16: 降低内浇口流速提高了压铸模插件（活块）的寿命【22】。

## Efficiency improvement and cost reduction through multi-cavity dies 通过多型腔模具提高效率和降低成本

生产率和相关具体能源和材料消耗取决于每个铸型或压铸模中浇注铸件的数量，这一点适用于所有铸造工艺。对于有关生产技术和铸件质量的挑战随着零件型腔数上升而大幅度（以指数方式）增加的高压铸造而言，这显得尤为明显。通过使用两型腔模具可以比单个型腔模具降低成本 20~40%

（图 17）。除了相关维护成本外，降低单位铸件成本的最大潜力存在于设备运转方面的节能【23】。传统采用的改进单型腔模具工艺的工艺步骤无法实现相当规模的生产率提升。

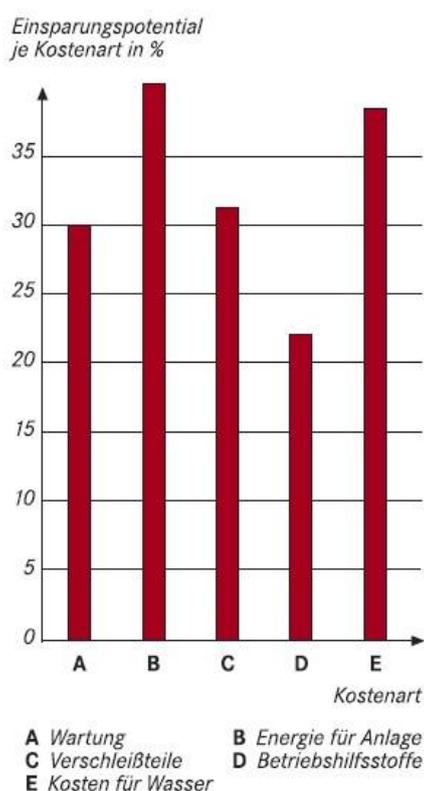


图 17：单型腔模具与双型腔模具相比的节约潜力。

可以节约 20~40%的成本（具体节约值取决于成本类别）。

不幸的是，当型腔数增加时生产风险会大大增加。因此，需要对过程进行可靠控制。将单型腔工艺改为多型腔工艺需要修改横浇道设计，则通常会导致压铸模内各铸件之间的质量差异。在采用不对称浇注系统的压铸模中，各分离的型腔由各自的横浇道充型，这个问题尤为突出。设计依赖于的横浇道的形状，单型腔模具已成功转换成双型腔模具（图 18）。通过采用自动优化，在被成功转变为双型腔设置的单型腔模具中获得了高质量的铸件。通过采用铸造工艺模拟生产风险因此被大大降低，铸造厂由于实施新的工艺布置方案而直接受益。

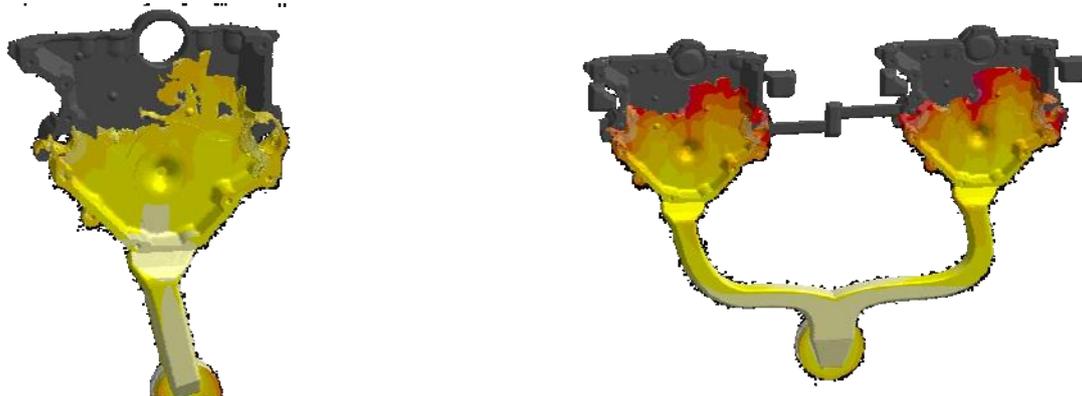


图 18：将成熟的充型方式转移到双型腔模具中【23】。

德国厄尔廷根的模具制造厂 Metabo 国际公司每年大约制造 200 万件铸件。象装饰件、齿轮箱和齿轮，他们为其电动工具提供“巨大”核心。制造工艺模拟允许其工程师创建物理上近似不可能的多型腔模具。通过过去几年来对其横浇道系统的优化，该公司能减少重熔材料（回炉料）50%。这对于用于熔炼、加热、材料配送和运输产生了直接影响【24】。

总体而言，通过采用多型模具每件成本降低了 40%，增加了模具寿命，并降低了再循环材料（回炉料）的成本- 一种 Metabo 直接将其与制造工艺模拟关联的成本降低。

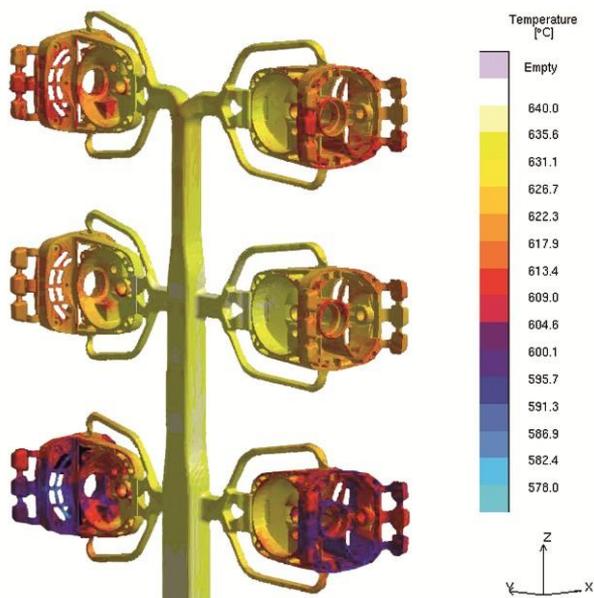


图 19：采用多型铸模（尤其是与复杂件组合）需要铸造工艺模拟提供早期可靠的信息【24】。

## Energy savings through conversions to castings 通过转换为铸件来节约能源

有一个铸造工艺模拟有助于节能的完全不同领域。在与其他加工工艺竞争中，铸造是一种获得近似净形状产品的最直接路径。通过采用闭环过程，铸造工艺具有比机加工或焊接工艺明显的能源相关优势。每吨铸件仅采用加工件所需要一次能源的三分之二。现有的模拟技术提供一种将加工制造件转换为复杂、几乎接近最终形状的铸件的机会。对于整体零件以及用于总成中小零件而言尤为如此。范例之一是 **Metabo** 公司在通过模拟确保可行性后，在其零件中包含有预铸造的钻孔（避免采用机加工钻出这些孔）（图 19）。铸入这些特征（孔）后每件节约费用不多（几个便士）并消除后续的加工过程，但每年累计可节约几十万欧元。

来自设备制造行业的如下范例也佐证了转换的潜力：通过钢板焊接制造的大型齿轮箱体（图 20）被转变为球铁铸件。该过程包括了同步采用拓扑优化和铸造工艺模拟，以确保设计满足加载要求（主要是刚度）和铸造工艺相关要求。设计师和铸造厂工程师合作的结果是由球铁制造的三个齿轮箱，获得比原焊接件更高的刚度。与此同时，零件的最终质量降低到 **18.4** 公吨，比原重量降低了 **20%**。因为此类零件的成本主要与材料费用相关，减重后使得产品价格降低【25】。

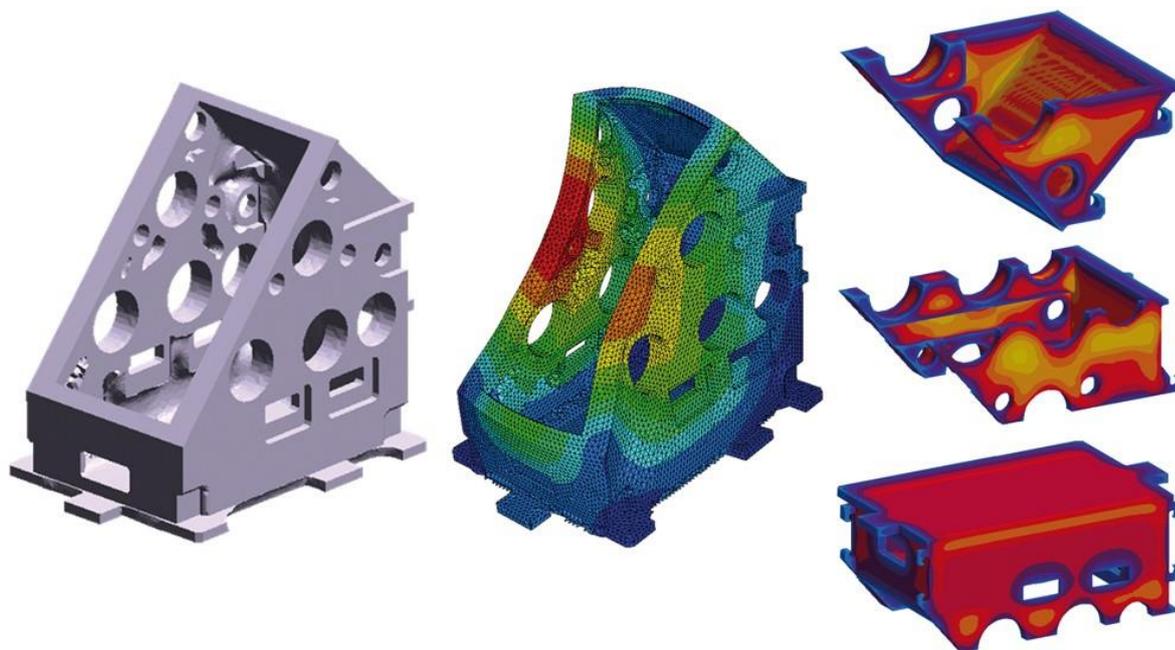


图 20：齿轮箱变为铸件。仅充分利用模拟（左：拓扑优化，中心：载荷模拟，右：三个铸件的铸造工艺模拟）便获得比焊接件重量低 20% 的成效【25】。

## 铸造工艺模拟 - 从竞争优势到技术拯救环境

在很多铸造厂，铸造工艺模拟是一种降低成本和确保稳健工艺的确定的标准技术。汽车和设备制造行业的铸件买家越来越多地要求其供应商提供获得认可的模拟、稳健和节能的生产工艺和铸件。欧盟的能源和气候保护相关目标要求到 2020 年能效提高 20%【26】。提供的范例显示，如果在整个铸造和相关工艺全程采用铸造工艺模拟，可轻松获得能效提高 10% 的效果。以德国铸造行业为例，这相当于每年最高节约 10 亿千瓦时或减排 560000 公吨的二氧化碳的潜力。与当前涉及能效和相关环境保护相关联，通过利用铸造工艺模拟（使得在铸造厂采用模拟技术变为强制性要求）可实现文中所述的潜在节约能源和减少材料消耗的效果

## Literature

- [1] „Energieeffizienter Gießereibetrieb“ 2010, Herausgeber: Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (BDG)
- [2] Jordi, U.: „Energie-Sparpotenziale im Druckguss“, Energieeffizienztagung, Frankfurt (2010)
- [3] Jahresbericht 2008 des Bundesverbands der Deutschen Gießerei-Industrie (BDG) [4] Quelle Umweltbundesamt, <http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf>
- [5] Sturm, J.C.: „Optimierung des Feingußverfahrens durch den Einsatz moderner Simulationstechniken“ VDI Verlag, Reihe 5: Grund- und Werkstoffe, Nr. 226 ISBN 3-18-14 2605-9
- [6] M. Fehlbier, J. Lerch-Thies, H.-I. Stanesco: „Entwicklung dünnwandiger Strukturbauteile mit Hilfe numerischer Simulationsmethoden“, 6. Magma NE- und Leichtmetallforum (2010), Ludwigsburg
- [7] Egner-Walter, A. Zenker, N. und Fritsche, E.: „Vorhersage von Gefüge und lokalen Eigenschaften für Kurbelgehäuse aus GJV, VDI-Fachtagung: Gießtechnik im Motorenbau, Magdeburg (2011).
- [8] entnommen aus Vortrag Magma Nord-Amerikanisches Anwendertreffen 2009 [9] entnommen aus Vortrag Magma Nord-Amerikanisches Anwendertreffen 2009 [10] entnommen aus „At the Heart of Casting - Mitten im Guss“ Herausgeber: Magma GmbH, 2008
- [11] Schreiner, J. Pfisterer, W.: „Der Einsatz der numerischen Simulation zur Wirtschaftlichen Auslegung der Gießtechnik am Beispiel eines Edelstahlgussteiles“, Vortrag auf 8. VDI-Tagung in Veithöchheim, 1995
- [12] persönliche Mitteilung
- [13] Giesen, H.: „Qualitätsguss entsteht auf dem Bildschirm“, Industrieanzeiger, Ausgabe 02/2011, 32-34
- [14] Barter, D., John Deere Waterloo Foundry: „Using Magmasoft to Design Cost Effective and More Manufacturable Castings“, Vortrag auf dem Magma Nord- Amerikanischen Anwendertreffen 2009
- [15] Sturm, J. C. und Busch, G: „Cast Iron - a predictable material“, Proceedings of World Foundry Congress 2010, Hangzhou, China
- [16] „Kleine Änderungen, große Wirkung“ Magmatimes 01/2008, S. 1-2

- [17] Targowski, W. (EBCC Poland) et. al: "Implementation of Magmasoft to improve a gravity die casting process on an example of aluminum disc brake calipers manufacturing, Vortrag auf dem Internationalen Magma-Anwendertreffen (2006), Kopenhagen/Oslo.
- [18] Pries, H.: „Progresse – Ansätze zur Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz in der Prozesskette Aluminium-Druckguss“, Energieeffizienztagung, Frankfurt (2010)
- [19] Hartmann, G.: Vortrag auf Progress-Treffen, Gestaltung ressourceneffizienter Prozessketten am Beispiel Aluminium-Druckguss, BMBF- Verbundforschungsvorhaben, Karlsruhe 2009
- [20] R. Seefeldt, Vortrag auf Progress-Treffen, Gestaltung ressourceneffizienter Prozessketten am Beispiel Aluminium-Druckguss, BMBF- Verbundforschungsvorhaben, Hindesheim 2011
- [21] Egner-Walter, A. und Olive, S: "Using Stress Simulation to tackle Distortion and Cracking in Castings", World Foundry Congress 2006, Harrogate, England, Juni 06 [22] Bärmann, F.: „Breitere Service-Palette, rationelle Produktion“, Produktion, Ausgabe 10/2011, 24
- [23] R. Seefeld, J. Sturm und A. Pawlowski: „Aus Eins mach Zwei“, GIESSEREI 94 (2007), Ausgabe 4, 34–42. Giesserei-Verlag GmbH, Düsseldorf
- [24] „Sichere Qualität durch Prozesssimulation“, Produktion, Ausgabe 31-32/2010, 16 [25] Schulz, R.; Amato, R.; Egner-Walter; A; Busch G.; Zimmermann, J.: "Von der Schweißkonstruktion zum Gussteil – Topologieoptimierung und Gießsimulation für ein Getriebegehäuse", Vortrag auf dem 4. Magma-Eisengussseminar 2006, Heilbronn
- [26] Information entnommen aus Schumacher, M: „Energie(-effizienz) – Ein Schlüsselthema für die Gießerei-Industrie“, GIESSEREI 98, 04/2011, 68-72