

# 通过虚拟 DoE (试验设计) 减少铝合金缸盖中的氧化夹杂物

---

## 总结

铝合金浇注过程中形成的氧化夹杂物是铸件泄漏的主要原因。本文论证了 MAGMA5 中如何应用 VDOE (虚拟试验设计) 工具来评估及优化产品浇注过程的参数, 而这些参数与氧化夹杂物的形成和分布密切相关。与此同时, 还定量评估了描述缸盖铸造过程中形成氧化物的质量标准。采用 vDOE (虚拟试验设计) 自主产生浇道系统和工艺参数的各种变化。事实证明, vDOE (虚拟试验设计) 可产生最优的浇道设计和工艺参数, 从而导致大幅度减少铸件中氧化物。试验主要借助软件模拟, 并应用高速摄像技术和 PREFIL 测量技术验证。

## 引言

在铝合金浇注过程中形成的氧化夹杂物被认为是诸如缸盖类薄壁铝铸件泄漏的主要原因。在铝合金熔体表面上快速形成的氧化皮不能被溶解或重新融化 (由于其高熔点温度), 并在铸件内部保持固态。这将导致氧化层外壳分割断裂, 随后被裹入金属液体内。氧化层导致显微结构内材料分隔, 取决于其尺寸大小, 可能导致局部机械性能降低 (尤其是薄壁铸件), 这些可能导致产品的泄漏。

氧化物对铸件质量的破坏作用在实际生产中只能通过试验进行评估，例如铸件中的泄漏试验只能在铸件生产出来后进行。氧化物位置、分布及其导致的泄漏很难预测，也几乎无法量化。文献【1,2】描述了铝合金熔炼和浇注过程中形成氧化物的潜在原因和机理。但是，迄今为止，在缸盖生产过程中各工艺步骤中形成氧化物的各根本原因的定性和定量评估还没有得到全面评价。

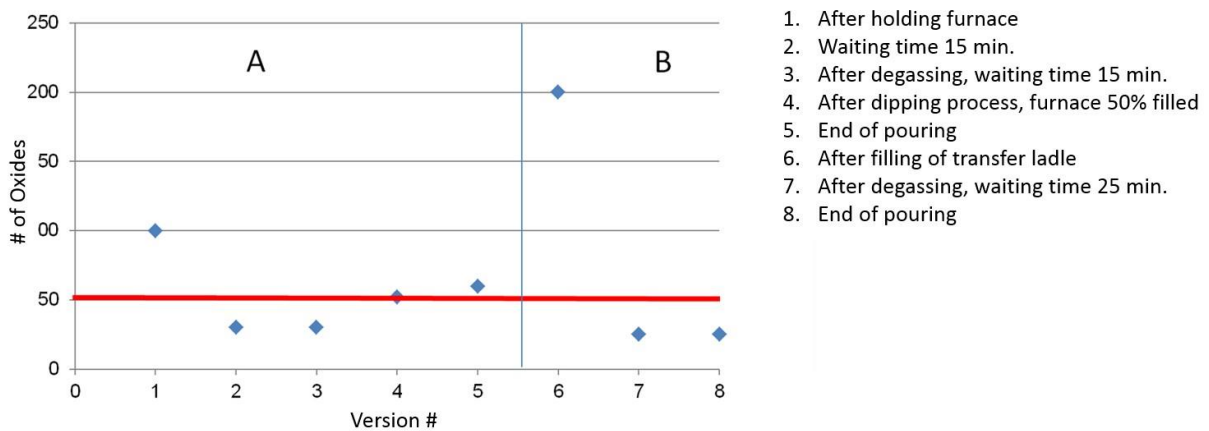
只有通过采用铸造工艺模拟技术才能对充型过程多个不同因素对气缸盖质量的影响进行有效的评估。流动现象和充型过程的模拟是铸造业内公认的标准程序。最近几年来一直建议采用不同模拟方法来描述充型过程中氧化物的形成和迁移【3-7】，但是，很多此类模型仅提供2维模型。由于其复杂性和计算要求，它们不适合铝合金的具体条件，由于其冗长的计算时间，在铸造行业中几乎没有用处。

最新版本的模拟软件 MAGMA5 为评估复杂铸件充型过程中潜在氧化物形成提供一种便捷、有意义和定量的选项。通过自主优化技术完整融入虚拟试验设计（VDOEs）可在很短时间内开发出最优的浇道系统和工艺参数，且早在铸件设计过程中即可采用这一技术。

### **试验性金属熔体质量评估**

针对不同工艺步骤试验性评估金属熔体的质量。用于此评估的 PREFIL 系统以过滤后的液体铝试样滤为基础，需过滤的试样应通过受控条件下的陶瓷过滤器。在靠近过滤器提取的试样上进行定性评估。

采用金相学方法对氧化物颗粒的数量、厚度和长度进行了评估（图 1）。



# of oxides 氧化物编号 version #版本号 after holding furnace 在保温炉后 waiting time 15 min 等待时间 15 分钟 after degassing, waiting time 15m 除气后, 等待时间 15 分钟 after dipping process, furnace 50% filled 在浸渍过程后, 将炉子充填 50% END OF POURING 浇注结束 AFTER FILLING OF TRANSFER LADLE 转运包装满后 after degassing, waiting time 25m 除气后, 等待时间 25 分除气后, 等待时间 15 分

图 1: 两条缸盖生产线 A 和 B 中不同工艺步骤金属液中测得的氧化物数量（采用 PREFIL 法）。红色线条表示每公斤金属熔体中氧化皮最大数量为 50。

从缸盖生产线（A）采集了#1~#5 试样，其金属熔体由 84%的纯净合金和 16%的重熔合金构成。#6~#8 试样来自第二条生产线（B），其金属熔体由 45%的纯净材料和 55%的重熔合金构成。

其中发现第 1 和第 6 号试样中的氧化皮大大超过了规定的每公斤溶液内氧化皮数量为 50 的极限值，因此是不可接受的。在各炉子之间转运金属液的过程导致产生极高的值，尤其当腾空转运包时更为严重。在浇注结束时在炉内氧化皮数量（5 号试样）还是稍高于临界极限值。金属液中的氧化皮数量可以通过前期保证足够的静置时间或后期的除气处理等方式降低。采取类似措施后（试样#2，#3 和#7）显示氧化皮数量大幅度减少。结果确认了采用一种减少转移紊流方法是可取的，尤其当放空浇包时。

## 流动现象的试验性评估

高速视频技术，每秒提供多达 1000 个画面，被用于不同工艺步骤期间流动现象的定性评估（图 2）。

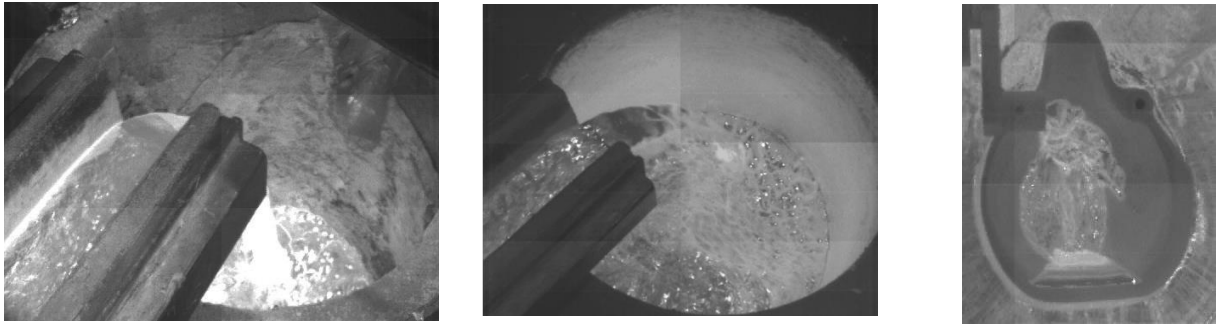


图 2：采用高速视频评估转运过程。转运包的充填（左），充填保温炉（中部），充填浇包（右）。

从熔炼炉转移到保温炉通过一个加长的浇注槽进行（当两者靠近时），或者当需要跨越较大距离时应通过一个转运包进行。在金属液处理后，通过浇包将金属液输送到铸型内。由于每次转运，在金属液产生了紊流。这是在金属液内新的氧化物的主要原因。

视频图像中可明显看到在金属液表面游移的氧化物泡沫与坠落的金属液流体相混合。转运过程的观察结果与 PREFIL 测量结果相一致。在保温炉装满后从浇注槽或转运包中取出的所有试样表明氧化物数值超过临界极限值（也参见图 1）。在对浇注炉内进行金属液处理（除气和保持）后，在金属液内发现的氧化皮数量减少。

缸盖的充型形成复杂的流动过程。自由落体进入浇道系统产生的紊流和当从浇道系统流出进入到型腔内时产生的紊流虽然无法彻底消除，但可以设法降低。然后金属液流过不同的

砂芯。管控壁厚 4 毫米的汽缸盖的复杂型腔内的流动和减少紊流需要丰富经验并基本了解流体现象。

在设计横浇道以及设计横浇道和铸件之间内浇口位置过程中，需要考虑金属液流速，以建立层流条件，避免充填砂芯时的流动不利现象。充型过程中非最优流动方向可能导致砂芯表面上局部过早凝固。这会产生氧化皮，并在随后充型过程中被夹带裹入型腔内，并保留在铸件内（图 3）。正如采用重力铸造汽缸盖试验所确认（图 4），缸盖铸型内轮廓的复杂程度以及较薄的壁厚增加了产生氧化夹杂物和导致泄漏的风险。

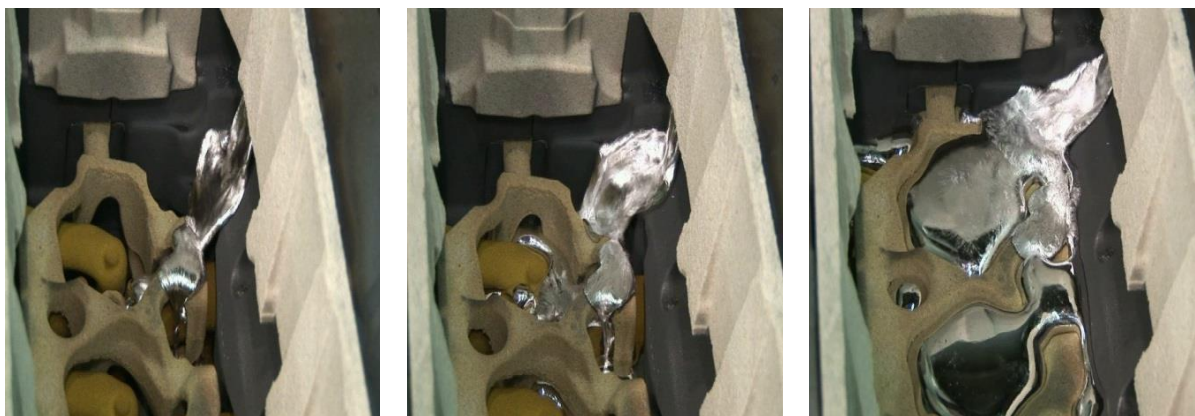


图 3：缸盖充型过程中流动方向的变化。对盖砂芯进行了修改，以便可以拍摄从横浇道直到内浇口的金属液的高速视频。



(a) 切割泄漏的汽缸盖

(b) 贯穿渗漏区域的断口分析

(c) 显微结构分析

图 4：泄漏汽缸盖根源分析。水下渗漏试验通过两个升起气泡显示两处渗漏点(a)。断口分析显示一块氧化皮横跨整个薄壁（b）。显微结构分析确认渗漏的原因（c）。



## 通过利用铸造工艺模拟定量分析氧化物形成和优化机会

铸造工艺模拟提供了工艺参数对于全部铸造过程（从熔炼全程直到浇注铸件）形成滞留空气和氧化物的影响评估。

如下几个质量准则被用于评估滞留空气总量和相应产生的氧化物：

1. 在充型过程中夹带裹入的空气量。
  2. 在全部充型过程中累计自由金属液表面
  3. 全部充型过程中金属液暴露于空气中的时长（准则 2 和 3 是产生氧化物的倾向性指标）
  4. 描述充型过程中被夹带入空气处的准则函数
- 5 还对金属液内的虚拟粒子（示踪物）进行审查，以评估充型过程中的流动情况。取决于其被指定的质量，这些粒子还可能经历浮力和浮动或下沉。

图 5 表示此类质量准则的范例：通过示踪物模拟的夹带氧化物，计算得出的在浇包充填过程中夹带裹入的空气量，和在缸盖充型过程中金属液内速度分布。对于提供定量结果的所有计算质量准则，这是必不可少的。采用此方法，可以评估浇口系统或工艺参数（设计参数）变化的影响，并通过铸造工艺优化程序中定义的目标进行自主优化。



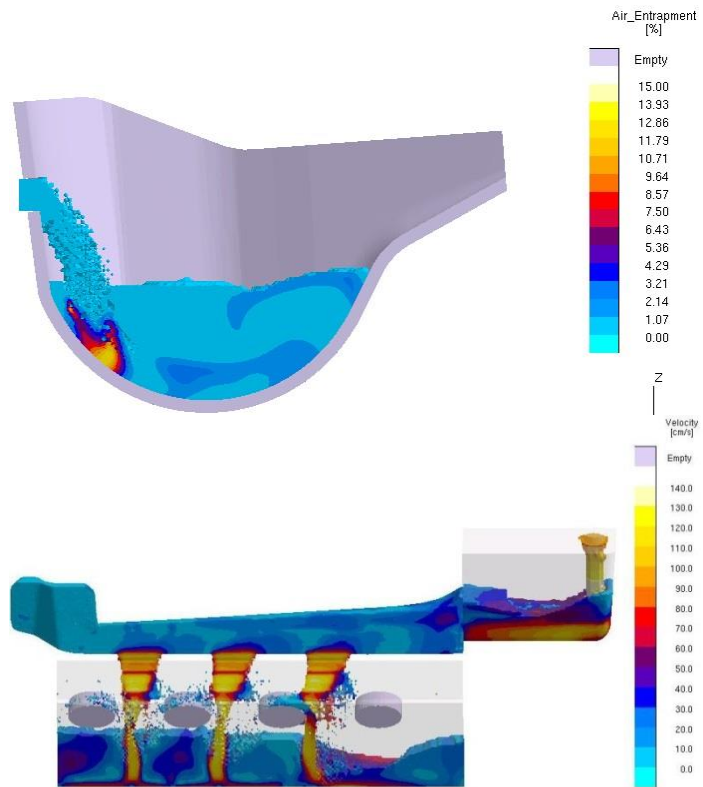


图 5：用于评估氧化物产生倾向、氧化物夹带（左）、裹入空气（右上）和流动速度（右下）的制造工艺模拟工具质量准则范例。

第一次铸造工艺模拟评估了从熔炼炉到保温炉的转运过程。保温炉直径 60 厘米，高度为 150 厘米。合计充填时间为 60 秒。

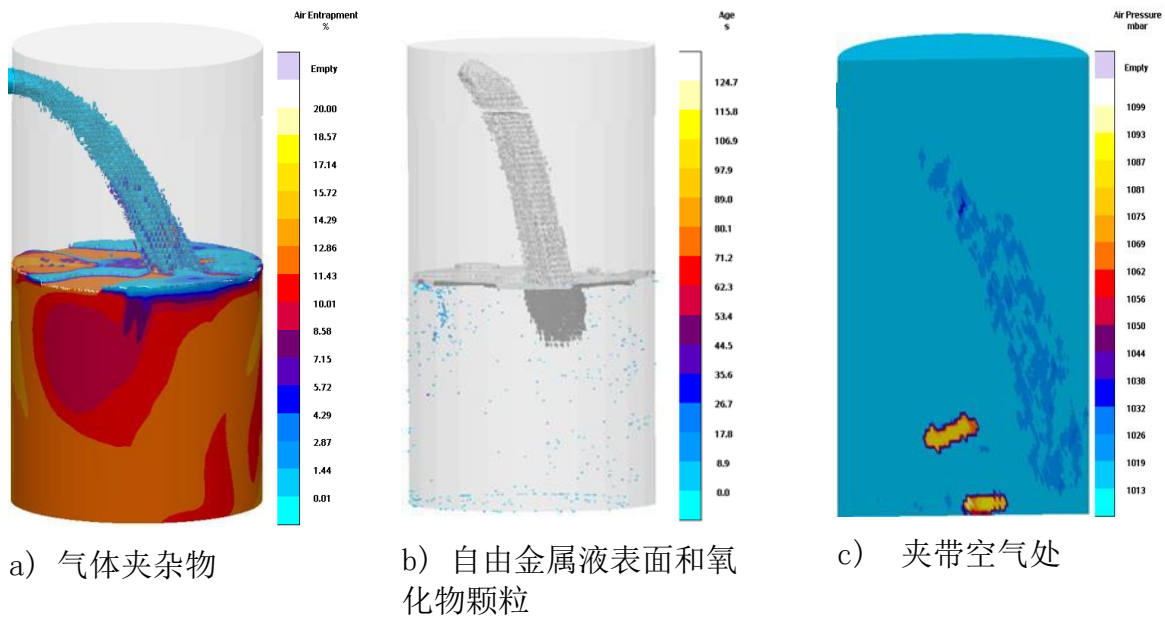


图 6: 金属液从熔炼炉到保温炉的转移。在充填 30 秒后计算出准则值。模拟出充型过程中空气夹杂物分布 (a)，显示包含夹带氧化物颗粒的自由金属液表面 (b)。表示穿过保温炉中心处夹带空气量。

模拟结果显示当铝液落入保温炉内的金属液中时空气是如何被裹入金属液内的 (图 6(a))。此过程以及受到其浮力和对流力量影响的金属液的内部的夹带空气的移动是氧化物夹带入金属液的原因 (图 6(c))。

根据模拟结果得出的保温炉充填过程结束时金属液内氧化夹杂物数量确认较大的浇注高度会导致夹带氧化物，这些氧化物是在通过金属流的的金属液表面上形成的。因此，有必要建立一个尽量减少夹带空气和形成氧化物的转移工艺。也建议采用合理的办法，将铸件浇注位置设置在尽可能靠近保温炉处，以便可以取消转运浇包的使用。



## 浇包充填过程的模拟和优化

浇包充填过程的视频分析检测出较高的表面紊流。因此，浇包侵入到距离金属液水平表面以下 2 厘米，并通过一个薄的矩形孔充填。虚拟 DOE 的目的就是要确定导致平稳充填浇包的工艺条件。在开始浸入过程时，浇包向后倾斜一定角度，禁止金属液自由掉落到孔的外部并使得金属液平稳淹没浇包轮廓。在此过程之后，浇包被倾斜恢复到原先的水平位置。

虚拟 DOE 的目的是找到最佳初始倾角和最优时间点以及转回到水平位置的旋转速度。起始角和合计充填时间被定义为工艺变量（起始角可以在 0 度和 50 度之间变化，步长为 10 度，合计充填时间可以在 5.1 秒与 6.9 秒之间变动，步长为 0.9 秒，）（图 7）。

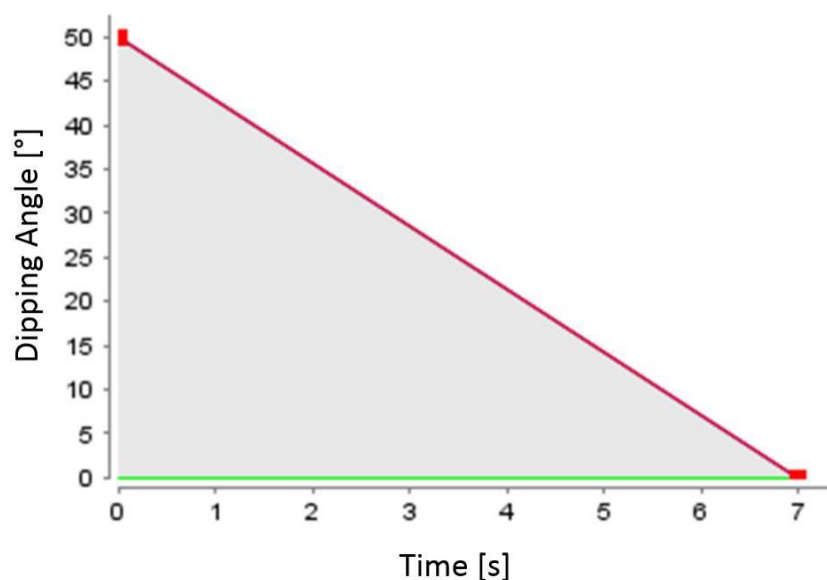


图 7：工艺变量“起始角”和“合计充填时间”的定义

Dipping angle 浸入角 TIME 时间

这将产生六个不同起始角和三个可用的充填时间，进而生成 18 个工艺版本。所有十八个计算版本的制动评估应以以前规定目标为基础。优化程序采用自由液面作为评估充填过程平稳性的质量准则。因此，目的就是尽量减少浇包充填过程中的累计自由表面。

可以通过软件采用不同方式评估工艺版本和预期目的之间的相关性。一个有意义的方式就是采用所有结果的散点图。这些散点显示出工艺参数变化之间的相关性及其对所有计

算版本不同质量准则的影响。此外，可以表现出各工艺变量对于各质量准则的显著性（重要性）。

在图 8 和 9 中，图中各点表示一个计算版本。结果表明浇包的起始角对质量准则“自由表面”具有较大影响。充填过程开始时的倾角越大，此准则的值就越低，即意味着充填的紊流越小。

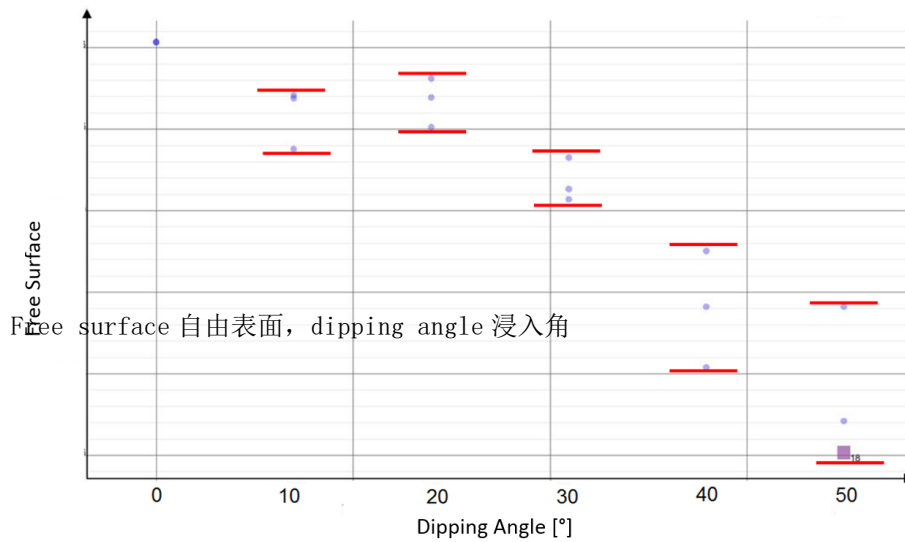
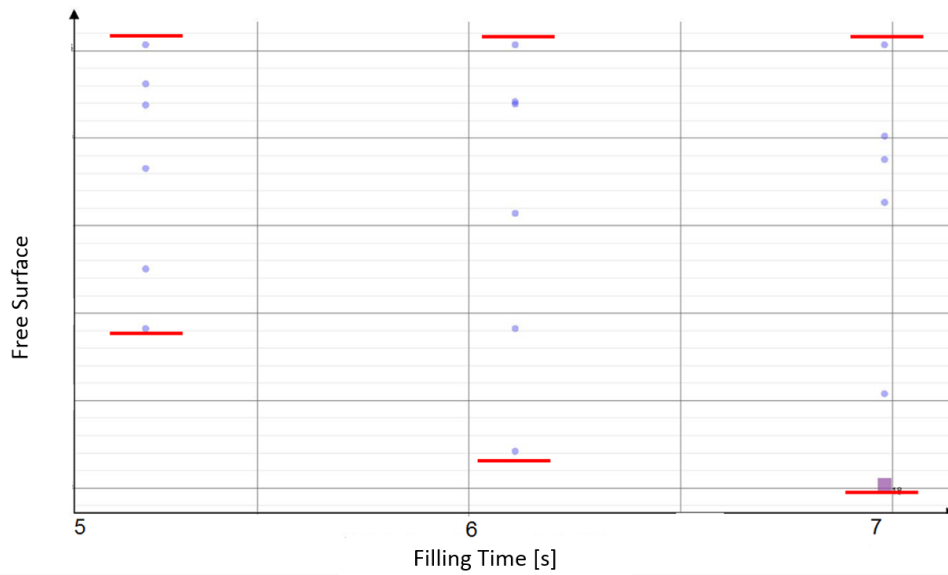


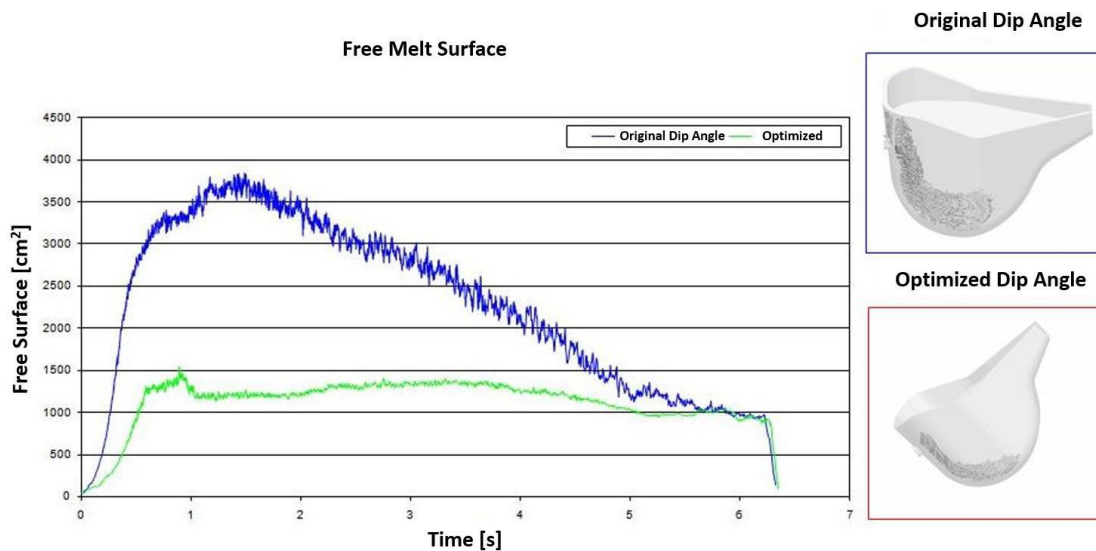
图 8：作为浇包起始角函数的质量准则“自由表面”。但是，结果也反映出合计充填时间对累计自由金属液表面的影响微不足道（图 9）。最佳组合是 50 度起始倾角与 6.9 秒的充填时间（图 8 和图 9 右下角中的紫色方块）。



**Fig. 9:** Quality criteria " free surface " as function of the filling time of the pouring ladle. 图 9: 作为浇包充填时间函数的质量准则“自由表面”。

Free surface 自由表面, filling time 充填时间

. 图 10 显示初始和最优版本全部充填过程内“自由表面”的变化情况。最佳版本在 1 秒后达到自由金属液面的最大值。在此刻，金属液已经充满浇包全部直径。此后，自由液面几乎保持不变，这是平稳充填的一种象征。在初始版本中，1.5 秒后达到自由液面的最大值，但是要比最优版本中确定的数值大三倍。



Free melt surface 自由金属液面 original dip angle 原始浸入角 free surface 自由表面 time 时间 optimized dip angle 最优浸入角

**图 10:** 在整个充填过程中“自由金属液面”的计算演变。

金属液内部紊流导致自由表面的明显较高值。在金属液离开出水口后浇包底部处达到

70 厘米/秒的流速。金属液流体不断夹带空气和氧化物（图 11）。最优化版本显示没有此类夹带的空气。

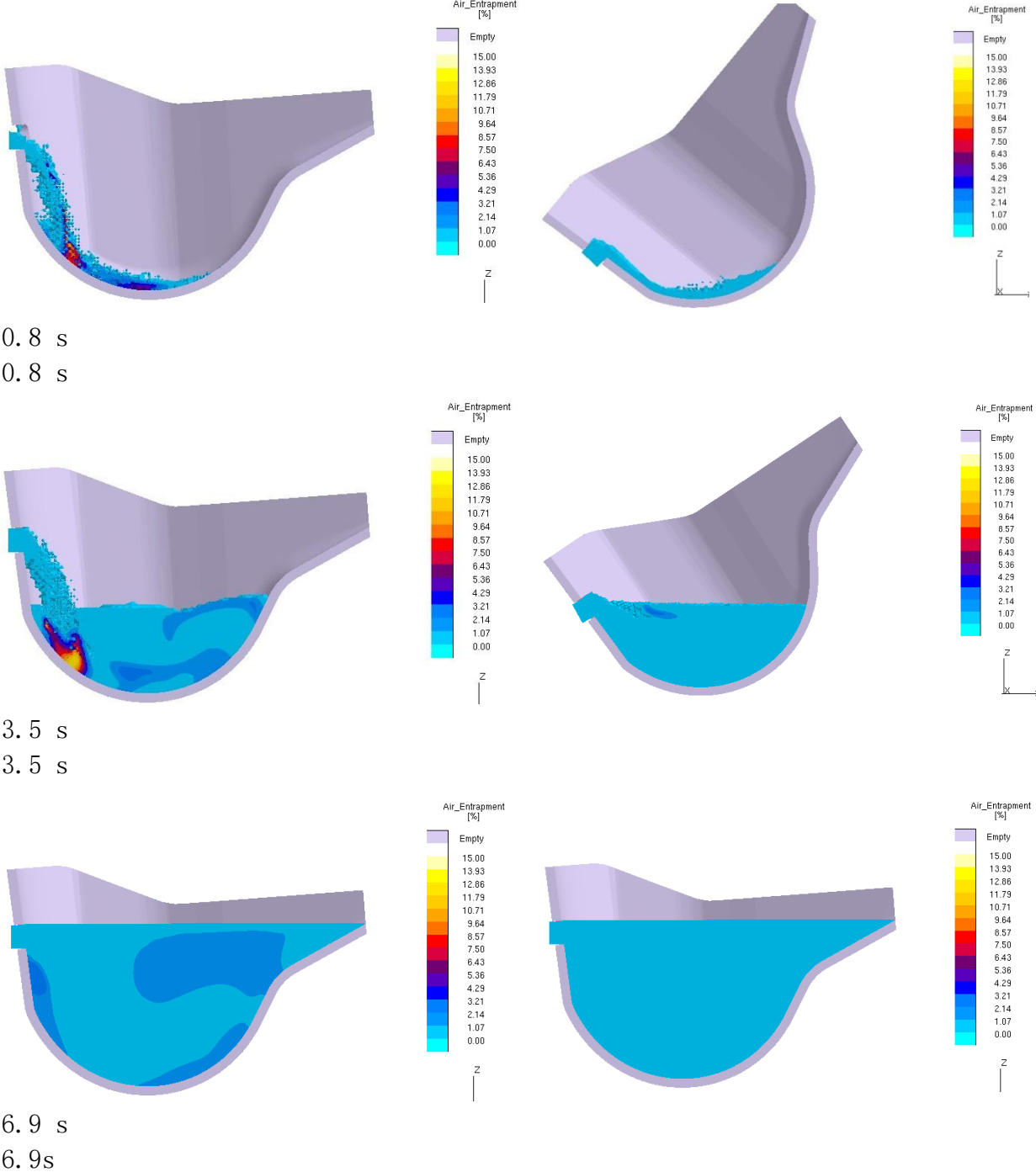


图 11：初始过程（左）与最优化版本（右）相比较的浇包充填过程中的空气夹带（剖开浇包中心）。

准则“空气接触”系指各金属液颗粒与空气接触的时间，它是形成氧化物数量的一个重要指标。在初始版本中，几乎全部金属液的体积都较长时间（与最优版本比较而言）暴露于空气中（图 12），而最优版本建立稳定金属液面的速度要快的多。

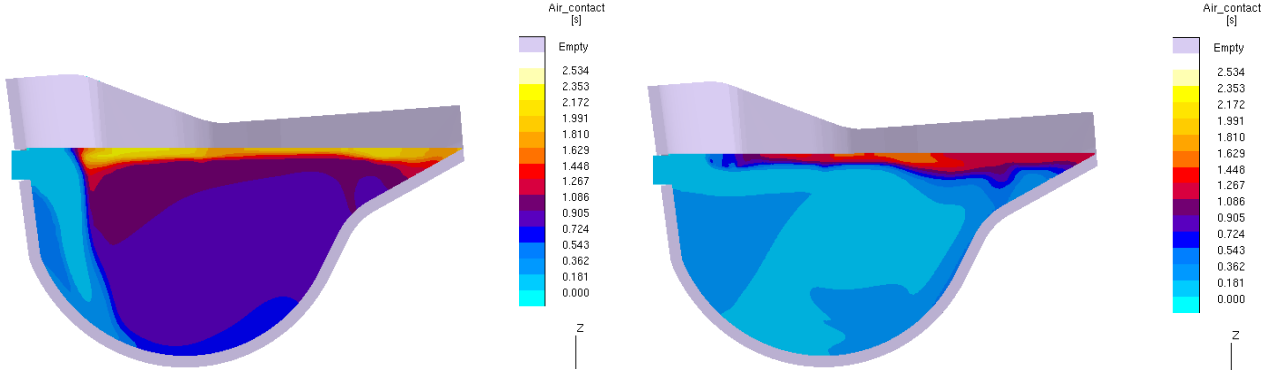


图 12: 静态充填（左）和最优倾斜充填（右）之间空气暴露的比较（浇包中心剖视图）。

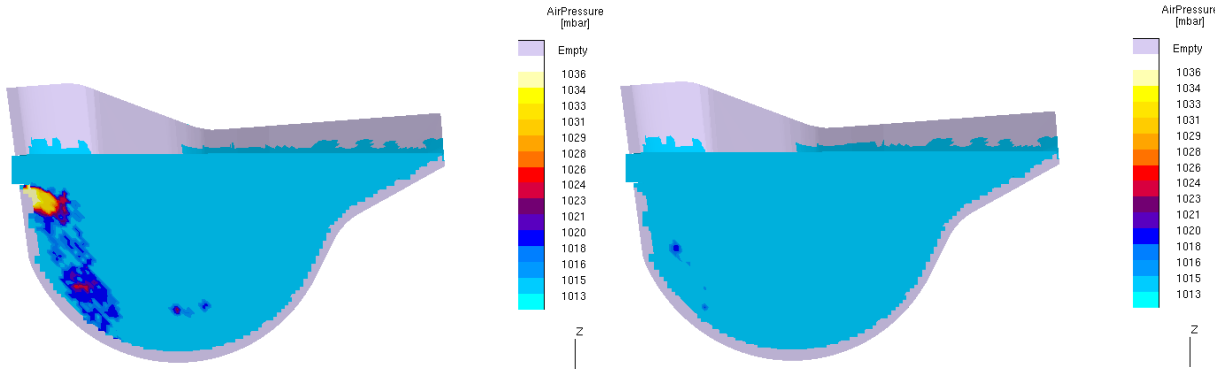


图 13 : 静态充填（左）和最优倾斜充填（右）夹带入空气处位置的比较（浇包中心剖视图）。初始版本主要在开始金属液从出水口自由落入浇包过程中夹带空气。

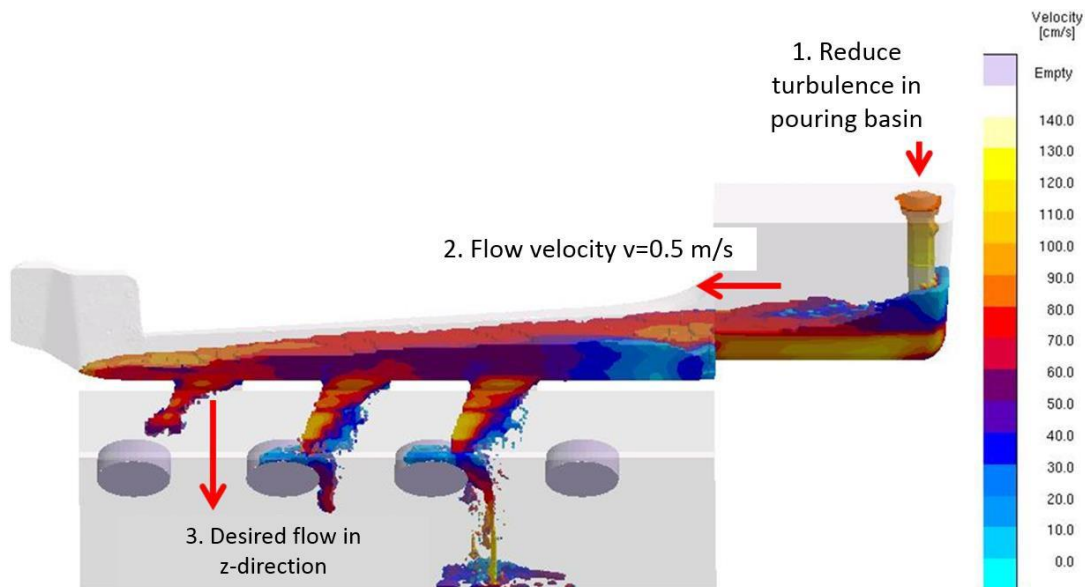
模拟结果显示，由于浮力和金属液紊流，夹带的空气泡将向金属液表面移动。它们沿途留下微量氧化物。随着金属液从浇包直接进入浇道系统和型腔，此时存在的所有氧化物将进入铸件内部，从而对铸件质量产生有害影响。

## 缸盖浇道系统的优化

氧化物夹杂导致渗漏是所评估缸盖缺陷的主要来源。通过高速摄像机分析充型过程和模拟原先几何结构充型过程可证明存在一定的优化潜力。金属液质量和充型方式对于铸件中氧化夹杂物的数量和分布都有直接影响。原先浇道系统对于造成氧化物产生如下主要贡献者：

- ✚ 浇口杯中的剧烈金属液紊流
- ✚ 主横浇道中铝水流速高
- ✚ 当通过内浇口进入型腔时差于最优液流方向

虚拟 DOE 被用来评估和量化几个内浇口系统几何结构修改和工艺参数对于形成氧化物，以及已经存在氧化物夹带到铸件内及其分布的影响。



Reduce turbulence in pouring basin 减少浇口杯内的紊流 flow velocity 流动速度  
desired flow in Z-DIRECTION 期望的 Z 方向流动

图 14：示意显示虚拟 DOE 的优化目标

vDOE 的第一个目的就是要找到可尽量减少浇口杯内紊流（和氧化物形成）的最佳浇注系统布置方案。




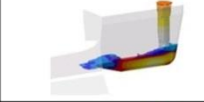
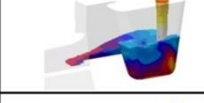
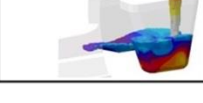
改变了金属流的浇注高度和方向（冲击浇口杯后壁与浇口杯底面比较），以减少原先观察到的当冲击浇口杯壁时金属液自己陷落时的回波（图 14（1.））。

第二个目的就是降低金属液离开浇口杯时和进入横浇道时的流速。除了采用与浇口杯直接相连的横浇道外，还评估一个偏离浇口杯。几个浇口杯进入横浇道过渡方案（上升或台阶与水平）预计将支持所期望的减速（图 14（2.））。

第三个目的就是实现从内浇口向缸盖内水套内腔的恒定垂直流速。这是期望减少或甚至消除管道砂芯上金属液的过早凝固。延长内浇口和在其下方增加流动性助剂是此优化方面的变量（图 14（3.））。

采用 MAGMA<sup>5</sup> 优化运行采用原浇注系统的参数化几何结构。因为效率原因，复杂的缸盖几何结构被简单的几何结构所代替。壁厚和浇口下方的壁的角度以及管道砂芯的位置恰好与实际缸盖的配置相匹配。

加总如下几何结构变量：在浇口杯中间或后壁处充填，从浇口杯到横浇道的水平或上升过渡，短或长内浇道，提供或不提供充型辅助导致产生 16 个需要计算的版本（图 15）。

| Pouring basin with flat/stepped transition |   | Version | Gate Height | Flow Aid   |
|--|---|---------|-------------|------------|
| 1  |  | A       | 6 mm        | none       |
| 2  |  | B       | 16 mm       | none       |
| 3  |  | C       | 6 mm        | 6 mm thick |
| 4  |  | D       | 16 mm       | 6 mm thick |

Pouring basin with flat/stepped transition 带水平/台阶过渡段的浇口杯 version 版本 gate height 内浇口高度 FLOW AID 流动助剂 NONE 无 mm 毫米 thick 厚度

图 15: 16 个评估变量的试验计划和命名

定义了评估所有模拟结果的如下功能:

1. 尽量减少浇口杯和横浇道之间过渡段中控制点 C1 的最大金属液流速
2. 尽量减少采用不利流动方向（偏离 Z 方向）通过内浇口 A1, A2 和 A3 的金属量（图 16）
3. 减少充型过程中金属液的累计“自由表面”

在 MAGMA5 中自动运行虚拟 DOE, 包括生成几何学变量、其网格剖分、质量准则的计算和评估和评估所有模拟的功能。

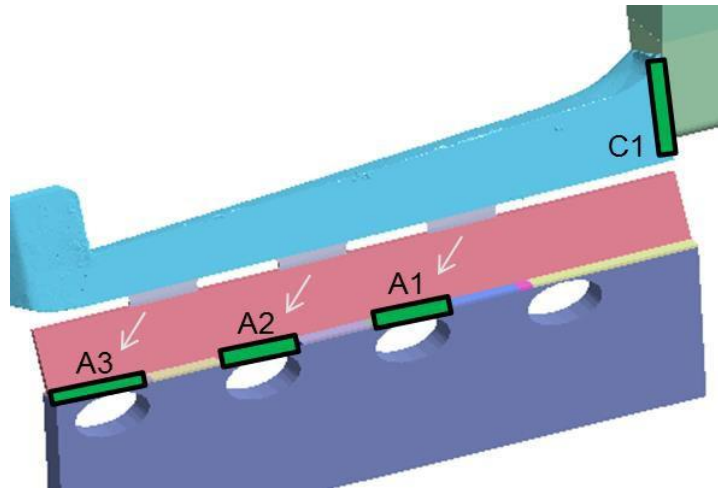


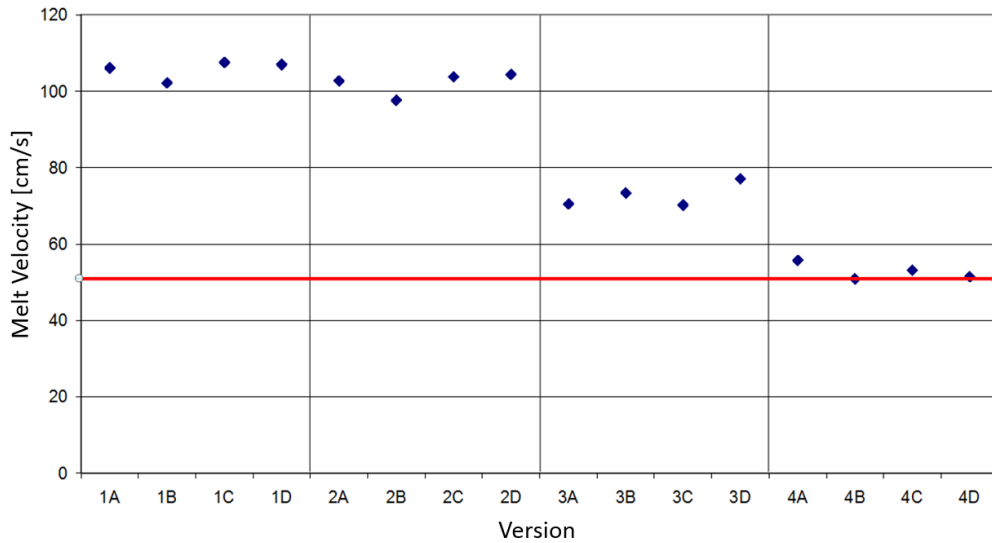
图 16: 定义用于评估偏离预期的 z 方向的金属流的评估区 A1, A2, A3 以及金属液流速评估的控制点 C1 的位置。

## 最优化评估

### 横浇道内减速

铝合金金属液前沿速度不超过 50 厘米/秒，以避免可能导致金属液自由表面积增加的金属液前沿的不稳定和表面紊流【1】，因为这将导致产生氧化夹杂物。降低流速还能支持形成所希望的离开内浇口垂直铝水流动方向。

评估表明在控制点处的铝水流速明显依赖于评估的设计和工艺变量（图 17）。版本 4A~4D 为最佳，因为它们表现出流速值很接近低于 50 厘米/秒的目标，与开始配置相比降低了 50%（A1 具有 105.7 厘米/秒的流速）。

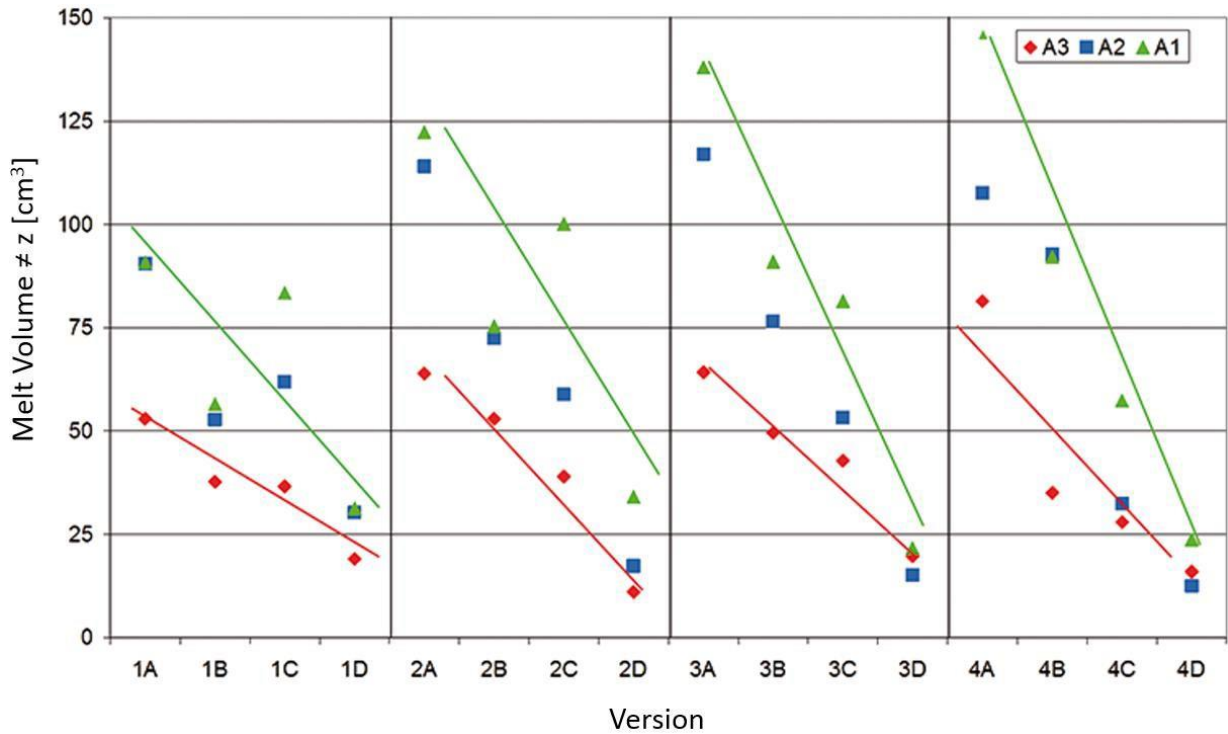


Melt velocity 金属液流速 version 版本

图 17：所有接受评估设计的浇口杯到横浇道之间过渡段处（控制点 C1）的平均金属液流速。红色线段表示期望的 50 厘米/秒的铝水流速临界值。

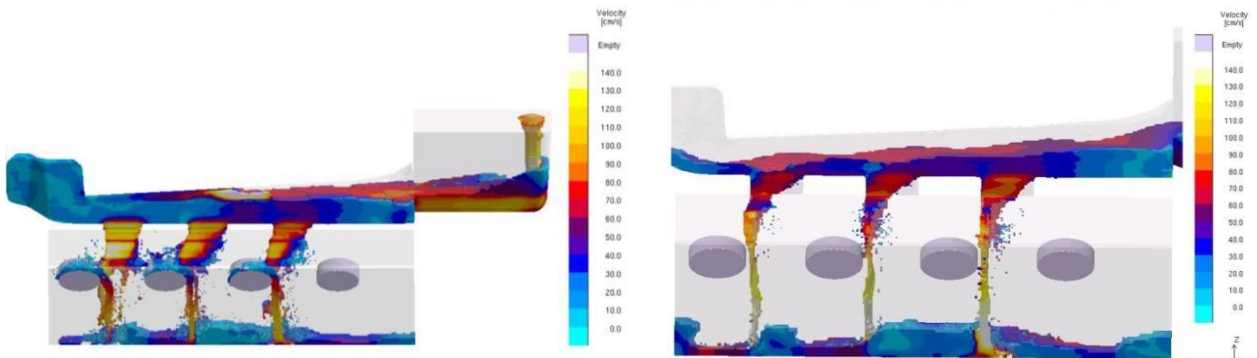
### 控制离开内浇口的金属液流动方向

第二个目的 就是建立从内浇口处的垂直流动，在不冲击任何砂芯情况下，使得铝水从内浇口垂直流入铸型内。图 18 表明，对于所有版本，金属液并非按期望的 Z 向流动。很明显，内浇口 A1 的金属液流动方向与所有版本的大多数相背离，偏离了期望的 Z 向。这是由于从内浇口到内浇口不断降低的压力和动能值所导致。评估也表明，对于所有“D 版本”，意味着独立于浇口杯几何形状及其与横浇道之间的连接，表现出偏离预期流动方向的金属液体积最少。版本 4D 为最佳，因为仅有来自三个内浇口的 52 立方厘米的金属液偏离预期的流动方向。进一步评估该模拟结果还证明金属液仅少量接触到管道砂芯的侧面（图 19）。



Melt volume 金属液体积 VERSION 版本

图 18: 偏离全部 16 个版本 A1~A3 内浇口垂直 (期望) 流动方向的金属液体积 (立方厘米)



Version 1A; 2,67 s

版本 1A; 2,67 秒

Version 4D; 3,84 s

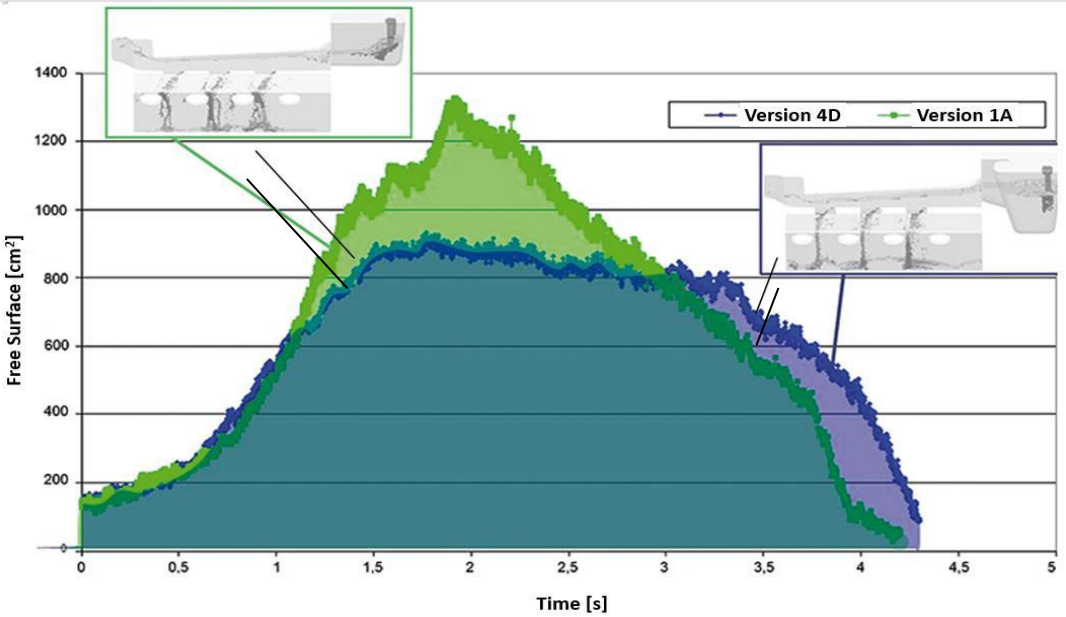
版本 4D; 3,84 秒

图 19: 比较版本 1A 和 4D 同一时刻金属液流速和方向:

### Surface 减少自由熔融表面

MAGMA<sup>5</sup> 中的“自由表面”准则测量充型过程中与空气接触的金属液 (量)。该准则可被用于充型过程中的特定时点 (图 20) 或显示整个充型过程中的累计值 (图 21)。浇注系统中几何结构变化导致各版本之间体积和重量的差异。版本 D 中金属液体积为 4.48 升,

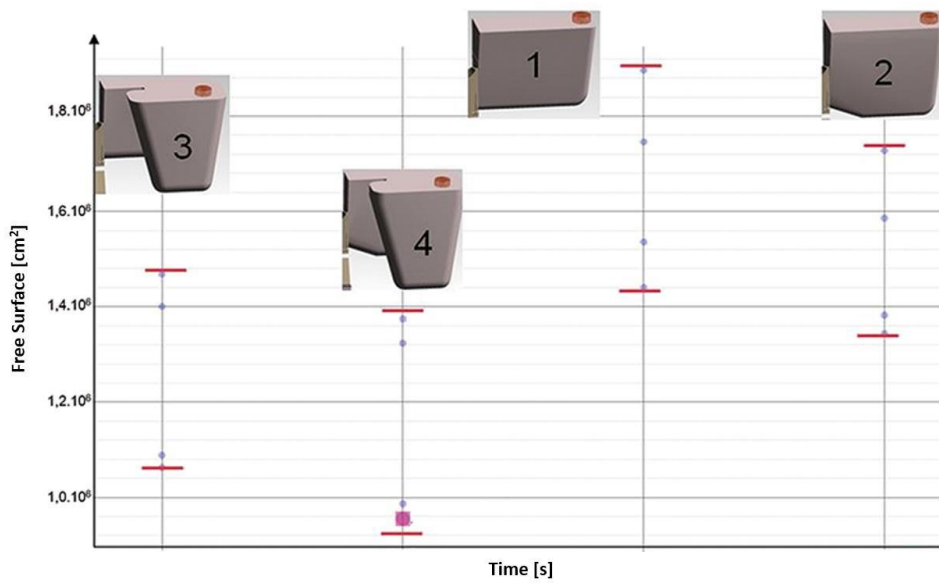
与版本 1A 的 2.82 升相比，大约大 62%。尽管存在这一事实，但是累计自由表面积从 1A 版本的 120,678 平方厘米收缩了约 5%，即达到 4D 版本的 114,944 平方厘米。因而，产生氧化物风险大大降低（图 22）。



Freesurface 自由表面积 time 时间 version 4D 版本 4D VERSION 1A 版本 1A

图 20：作为版本 1A 和 D 时间函数的自由金属液表面积



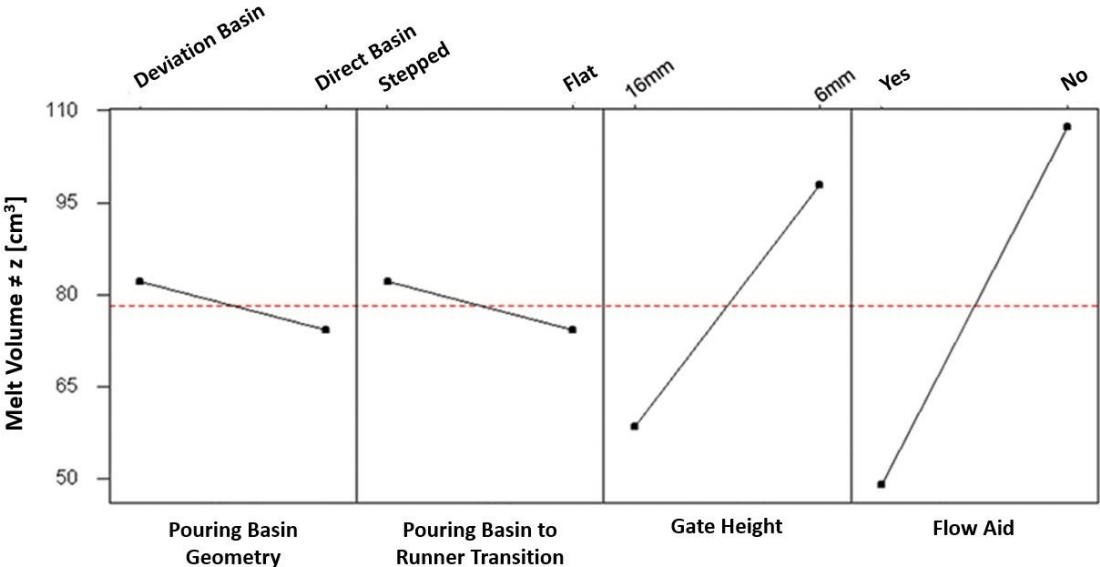


Freesurface 自由表面积 time 时间

图 21：针对不同浇口杯几何形状和其到横浇道过渡段的变化，在整个充型过程中的累计“自由金属液表面积”【平方厘米】。

工艺参数和目标之间关系的评估

借助软件通过“主影响图”（主效应图 22）可以显示不同修改后的工艺参数和评估目标函数之间关系的显著性，并很容易地进行评估。

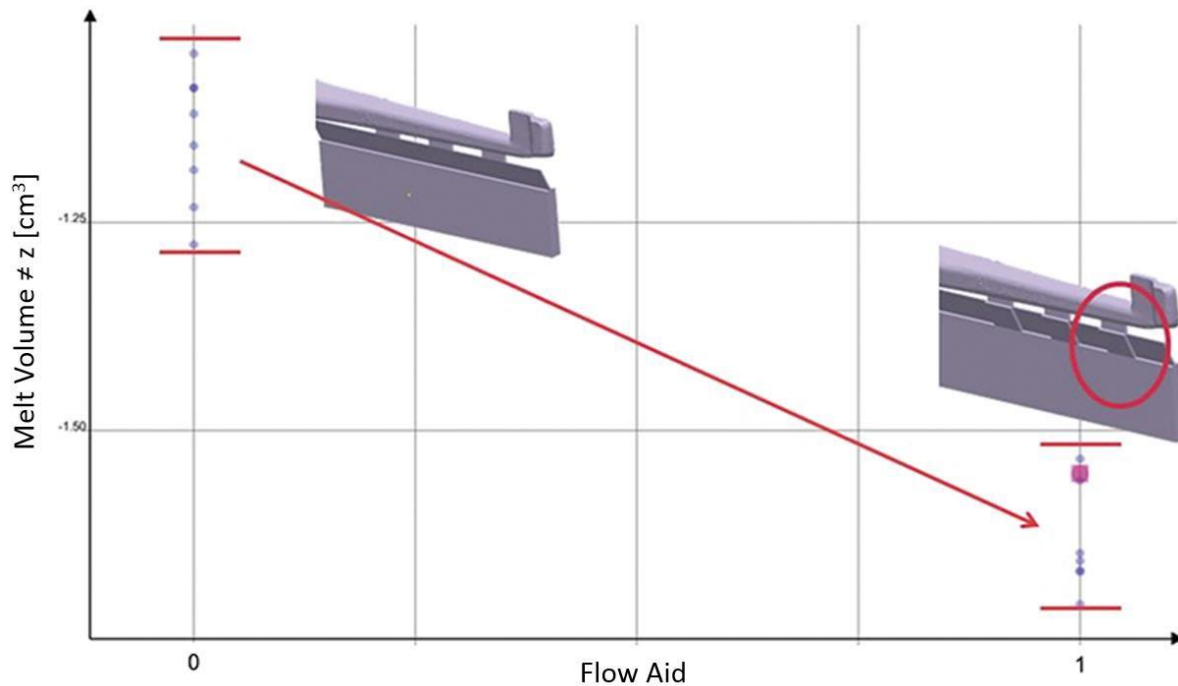


Melt volume 金属液体积 deviation basin 偏离杯 direct basin stepped 直接有台阶浇口杯 flat 水平 pouring basin geometry 浇口杯几何形状 POURING BASIN TO RUNNER TRANSITION 浇口杯到横浇道过渡段 gate height 内浇口高度 FLOW AID 流动助剂

图 22： 各变量对于内浇口 A1 的“采用不利流动方向金属液体积”目的函数影响的主影响图

Y 轴线显示没有采用预期流动方向流动的通过内浇口 A1 的金属液体积。这些线段表示四个变量对评估的目的函数的影响。“浇口杯几何形状”和“过渡浇口杯到横浇道”的窗口中的浅线角表示这两个参数对本目的函数仅有很小的影响。“内浇口高度”和“提供充型辅助”具有很大的影响。

图 23 中散点图表示充型助剂对于预期 Z 方向内流动方向的影响。加工形成的切口对于实现期望的 Z 向流动具有重大影响。

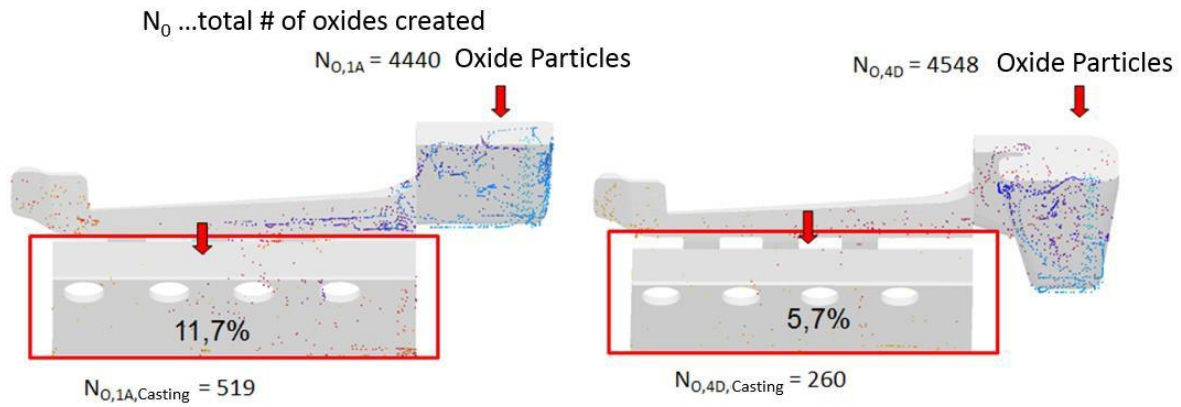


Melt volume 金属液体积 flow AID 流动助剂

图 23: 流动辅助对于按预期 Z 向流动金属液体积的影响 (0=没有流动辅助, 1=提供流动辅助)

与所讨论的三个目标同步, 还评估了在金属液中已经存在而非在充型过程中形成的的代表氧化物颗粒的虚拟粒子 (示踪物)。这些粒子被指定了铝氧化物密度和氧化皮的典型尺寸。示踪物主要因为金属液内部的流体动力学移动, 但是也体验到由于金属液和氧化皮之间密度差所产生的浮力。由于最终金属液质量主要依赖于金属液进入铸型前经历的转运过程, 我们评估了各评估版本夹带氧化夹杂物数量的显著程度。

评估原 1A 和 4D 版本 (适用于所有其他质量准则的最佳版本) 铸件内氧化物颗粒数量的结果明确显示浇口杯几何形状及其到横浇道过渡段 (图 24) 的影响。即使 4D 版本中由于金属液体积较多导致氧化物颗粒总数量较大, 但是由于优化了浇口杯设计和在偏离浇口杯和横浇道之间的台阶型过渡段的原因, 进入横浇道和铸件内的氧化物数量较少。铸件内少量的氧化物被切除一半, 从 11.7% 下降到 5.7%。



Oxide particle 氧化物颗粒

图 24：氧化物颗粒总量  $N_0$ ，铸件内氧化物颗粒总数量  $N_{O, Gusssteil}$ ，和在充型过程结束时铸件内发现的氧化物颗粒百分比值（适用于 1A 和 4D 版本）。

### 模拟结果与实际铸件的对比

4D 版本是降低氧化物夹杂物所有评估质量准则的最佳解决方案。因此，在实际铸造中实施了此版本，以将其与原先版本相比较。采用标准方法检验了依据两个版本生产的缸盖，以便查找渗漏点。统计学评估显示与氧化夹杂物相关渗漏点的明显减少并确认所选定质量准则的有效性（图 25）。

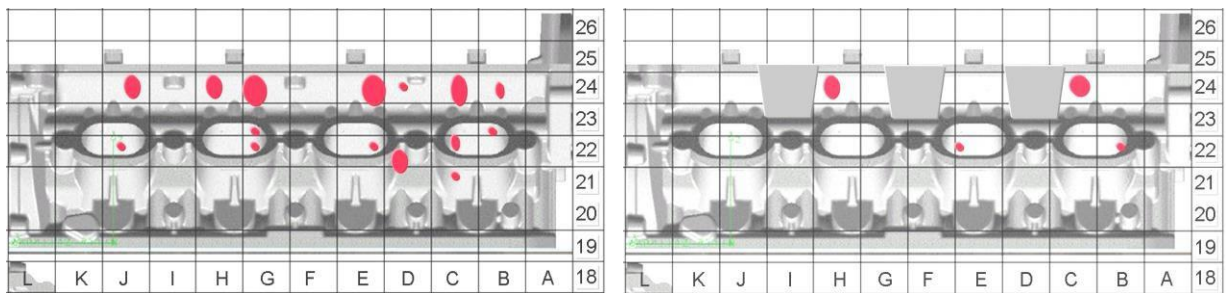


图 25：评估由于 1A（左）和 4D 版本（右）缸盖氧化夹杂物导致的渗漏点的评估。红色表示渗漏的位置和频率。

## 总结

铸造工艺模拟被用于分析缸盖半永久型铸造过程中形成的氧化物的潜在来源。采用 PREFIL 测量方法试验性评估金属液转移过程的影响确认在金属液转运过程中金属液自由坠落和相关自由金属液表面紊流暴露出形成氧化物的极高风险。采用充填浇包作为范例，它显示了虚拟 DOE 如何融入到 MAGMA5 帮助变化工艺参数，以有效和快速降低形成氧化物的风险。通过采用模拟工具 MAGMA5 和其全面综合虚拟试验设计功能已经证明，可以早在新零件铸造工艺开发阶段即能有效评估浇注系统和工艺参数改进的各种想法。除了为本文中讨论的缸盖提供解决方案外，这一新技术提供了工艺参数和质量准则之间量化关系的综合知识。这使得设计师和铸造工程师能同时寻求几个（甚至有冲突）目标。

此出版物以 Ing. Lubos Pavlak 博士的学术演讲和在亚琛的迈格码公司的勤力工作为基础。作者在此感谢韦尔尼格罗德的尼玛可公司奥托·冯·格里克马格德堡大学提供的大力支持。

## Literature

e

1. Campbell, J.: Castings (second edition), ELSEVIER, 2004
2. Carlsson, K.D.; Beckermann, Ch.: Modeling of Reoxidation Inclusion Formation during Filling of Steel Casting, Defect Formation, Detection, and Eliminating during Casting, Welding, and Solidification, TMS Materials Science and Technology Conference and Exhibition, September 2005, Pittsburgh, Pennsylvania, S. 35-46
3. Yang, X.; Huang, X.; Dai, X.; Campbell, J.; Tatler, J.: Numerical Modelling of the Entrainment of Oxide Film Defects in Filling of Aluminium Alloy Casting, International Journal of Cast Metal Research, vol. 17, No.6, 2004, 321-331
4. Campbell, J.: The modeling of entrainment defects during casting, Simulation of Aluminum Shape Casting Processing: From Alloy Design to Mechanical Properties, (The Minerals, Metals & Materials Society), 2006
5. Lai, N. W.; Griffiths, W.D.; Campbell, J.: Modeling of the

potential for oxide films entrainment in light metal alloy castings,  
Modeling of casting welding and advanced solidification processes,  
Warrendale, TMS, 2003

6. Lin, J.; Sharif, M. A. R.; Hill, J. L.: Numerical simulation of the movement, brake up and entrapment of oxide films during aluminum casting, Aluminium Transaction 1, 1999, S.: 71-78
7. Reilly, C.: Development Of Quantitative Casting Quality Assessment Criteria  
Using Process Modelling, PhD Thesis, The University of Birmingham, 2010
8. Pavlak, L.: Experimentelle und simulationstechnische Ursachenanalyse der Oxidbildung beim Zylinderkopfgießen, Dissertation, Shaker Verlag 2011