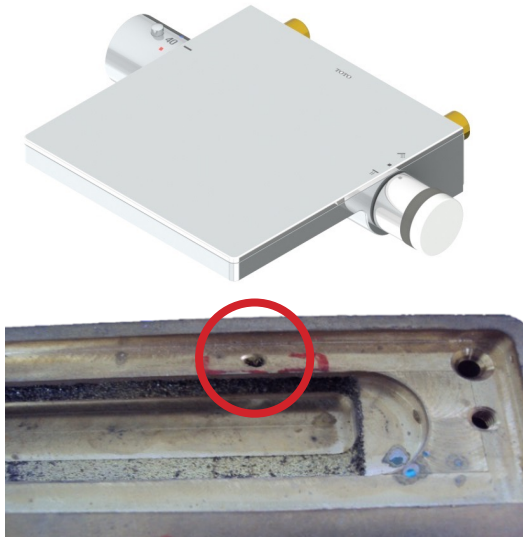


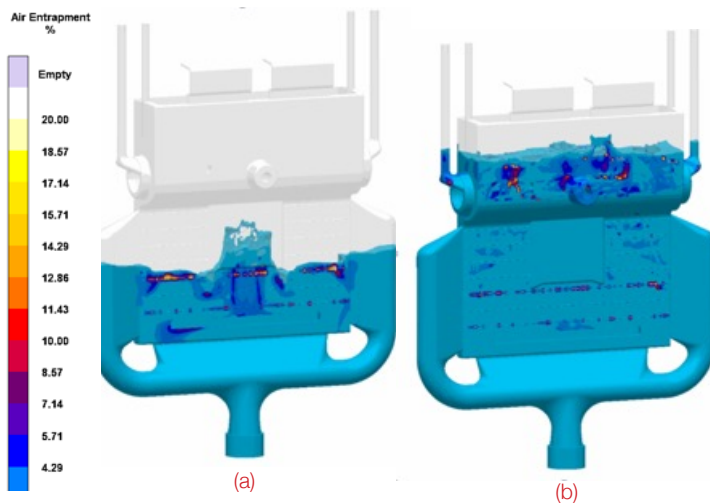
# 气孔



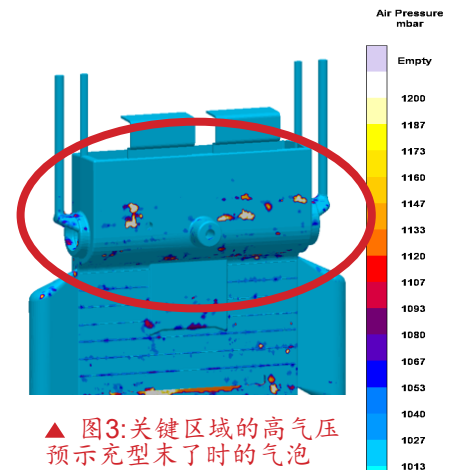
▲ 图1: LPDC工艺生产的黄铜用品的气孔

## 描述:

气孔是有色金属铸造中最严重的问题之一。它一般是由充型和凝固过程中气体的演化引起的。气孔由不同的源头引起的。典型的根本原因是熔体制备过程中吸氢和填充型腔过程中的卷气。后者大多是由于湍流过大或浇注系统设计不当造成的(图1)。气孔出现在铸件上,呈圆形或椭圆形,表面光滑。加工后的表面可通过目视检查进行识别,非加工表面需通过x射线检测进行识别。



◀ 图2:显示充填顺序的卷气结果(a)在充型40%处出现飞溅;(b)充型85%的关键区域熔体中出现较高百分数的卷气。



▲ 图3:关键区域的高气压预示充型末了时的气泡

## 模拟解读:

卷气的结果展示了充型过程中被卷入到金属液中气体的变化(图2)。此外,空压压力结果(图3)展示了气体产生的区域和时刻。诠释气孔通常需要评估这两个结果。

## 造成气孔的根本原因:

填充过程中严重的紊流:

- 高的填充速度,通常超过0.5 m/s
- 不合理的浇注系统设计导致卷气和浇注不满
- 溢流口和排气设计不当

铝铸件中氢含量高:

- 氢的来源——空气中的水分进入熔融的金属合金,金属合金锭上的水分或者油脂,熔炼工具上的水分。
- 不充分或不适当的除气过程

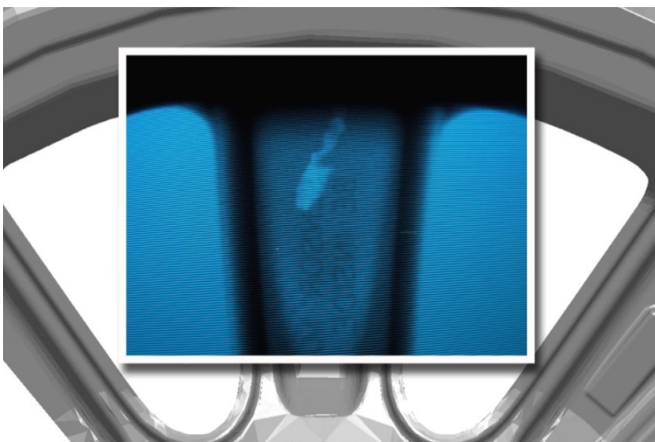
<sup>01</sup> 2008 ASM Handbook Castings. Vol. 15, Ohio: ASM International

<sup>02</sup> PT. Surya Toto Indonesia. Casting Quality Improvement with MAGMA simulation. Case study presented in the User Group Meeting ASEAN 2016.

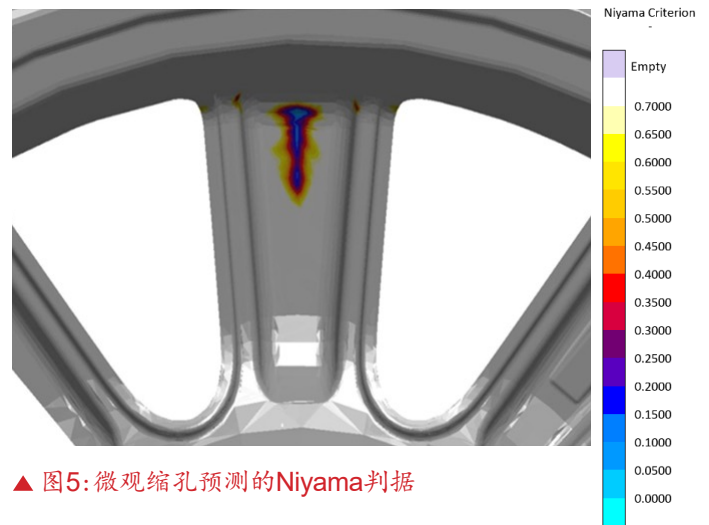
# 微观缩孔

## 描述:

微观缩孔或中心线缩孔(图4)是小的孔洞,一般可以通过液体渗透、超声波、X-ray识别。这类缺陷发生在铸件有几何相关的补缩需求的区域。来自冒口(重力金属型)或升液管(低压铸造)中的残余的金属液不能充分地补缩这些位置。铸件内部小的孔洞降低了机械性能,常常导致泄漏的问题。



▲ 图4:x射线分析显示铝轮毂中的微观缩孔



▲ 图5:微观缩孔预测的Niyama判据

## 模拟解读:

Niyama结果中较低的数值显示定向凝固较差,可以帮助识别存在微孔隙风险的区域。临界值通常取决于合金,但通常情况下,低于0.7的值说明出现微孔隙率的风险较大(图5)。额外的“Microporosity”结果来自Niyama,也可帮助分析和比较孔隙缺陷。

## 造成微观缩孔的根本原因:

- 几何相关缺陷——在凝固过程中有低的温度梯度和高的冷却速率,典型的例子是板状几何
- 凝固区间宽的合金
- 较差的定向凝固,被枝晶臂隔离于补缩金属液之外而形成的孤立的金属液和随后已孤立的金属液体积收缩导致微观缩孔形成
- 通过修改补缩布局、冷却通道的位置和加工余量来改善定向凝固寻找解决方案

# 氧化夹渣

## 描述:

通常铝铸件中的氧化夹渣分成一次氧化物和二次氧化物。一次氧化物是不太柔性的夹杂物，在熔体制备过程中形成。二次氧化物呈柔性薄膜状（图6），它在液态铝合金表面上形成，在型腔充型过程卷入到铸件中。这类氧化物缺陷对铝合金铸件的力学性能高度有害，也是泄漏的最重要的根本原因之一（图7）。

## 模拟解读:

为了能够减少填充过程中氧化物的形成，有必要确认高速（>0.5m/s）充型的区域。充型过程中高速和金属坠落（图8）产生的紊流，使更多的熔体表面暴露在空气中。氧化粒子（图9）有助于识别和对比充型过程中产生的氧化物的数量。卷气和空气接触的结果通常有利于识别暴露在空气中较多的区域。优化界面中的平稳充型结果支持比较虚拟DOEs中不同设计方案之间的自由表面面积，找出较少空气暴露的设计。

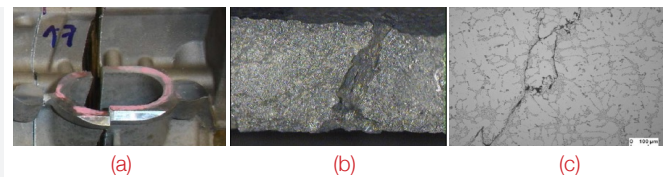
## 可能的根源:

### 一次氧化物:

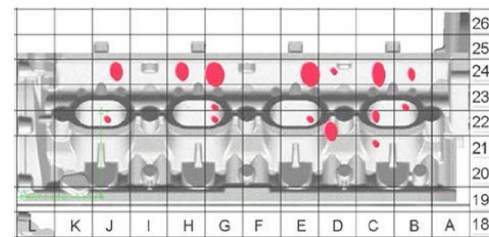
- 未经过滤的原生铸锭
- “脏的”重熔锭（浇注系统，报废的铸件，机加工切屑）：水汽，油/切削油，砂布/过滤片，砂模/砂芯
- 炉壁上堆积的氧化物/ $Al_2O_3$
- 缺少过滤和除气/精炼
- 炉内搅拌
- 处理后工具上的水汽

### 二次氧化物:

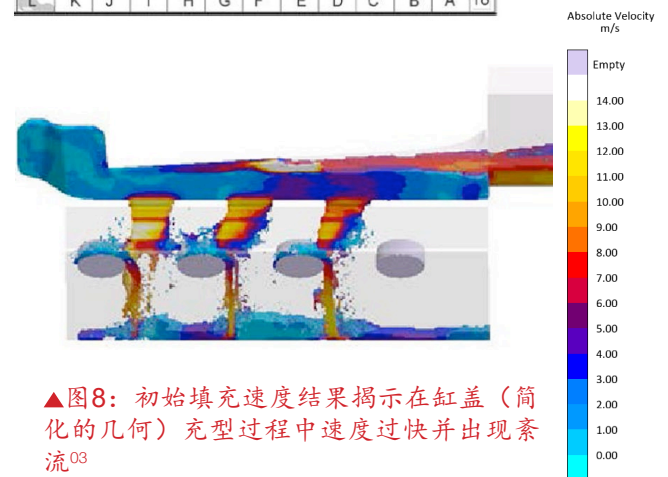
- 熔体转移
  - 熔体表面，浇勺，流槽系统卷入的氧化皮
  - 浇勺/流槽中大量的熔体倒入模具：速度高和紊流
  - 低压保温炉的加料，熔体回落和产生的氧化皮搅动
- 浇注系统
  - 熔体速度高（超过0.5 m/s）
  - 由于紊流导致金属液前沿破碎
  - 浇注系统内产生的憋气
  - 金属坠落到下沙箱中
  - 由于气团的坍塌导致的卷气



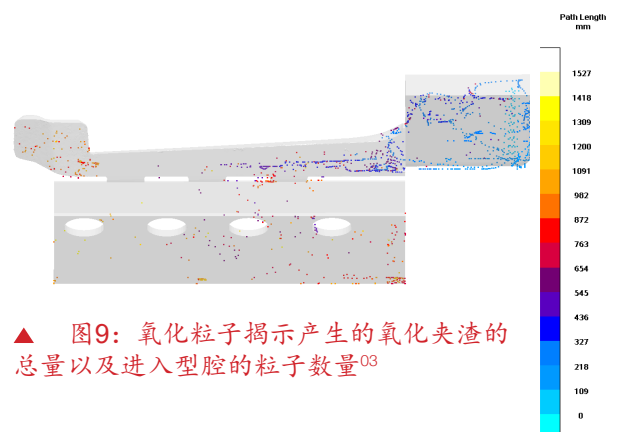
▲图6：泄漏的缸盖的根本原因分析：(a)水下泄漏测试表明有两个泄漏区域有上升的气泡；(b)断口分析揭示横跨整个薄壁的一层氧化皮；(c)微观组织分析确认泄漏的原因<sup>03</sup>



◀图7：泄漏评估——缸盖铸件中的氧化夹渣造成的泄露<sup>03</sup>



▲图8：初始填充速度结果揭示在缸盖（简化的几何）充型过程中速度过快并出现紊流<sup>03</sup>



▲图9：氧化粒子揭示产生的氧化夹渣的总量以及进入型腔的粒子数量<sup>03</sup>

<sup>03</sup> Sturm J.C., Pavlak L. Reduction of Oxide Inclusions in Aluminum Cylinder Heads Through Autonomous Designs of Experiments, in International Journal of Metalcasting, vol.11, nr.2. American Foundry Society, 2017.



# 热裂

## 描述：

热裂发生在凝固末期，裂纹开始并沿晶界传播。热裂为典型的锯齿形断裂花样——枝晶间/晶间断裂（图10b和10c）。当铸件冷却时，铸件收缩并产生热应力。热应力不是导致热裂的唯一因素，因为材料没有完全固化。其原因是关键区域周围已凝固位置的应力以及铸型和型芯的约束。凝固时已凝固区域的应力“拉伸”关键区域，产生应变和热裂风险。

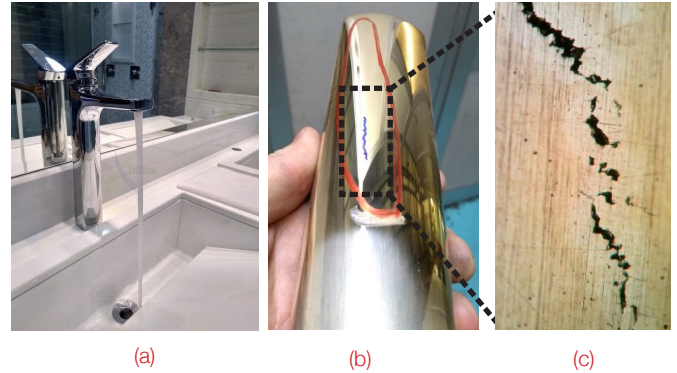
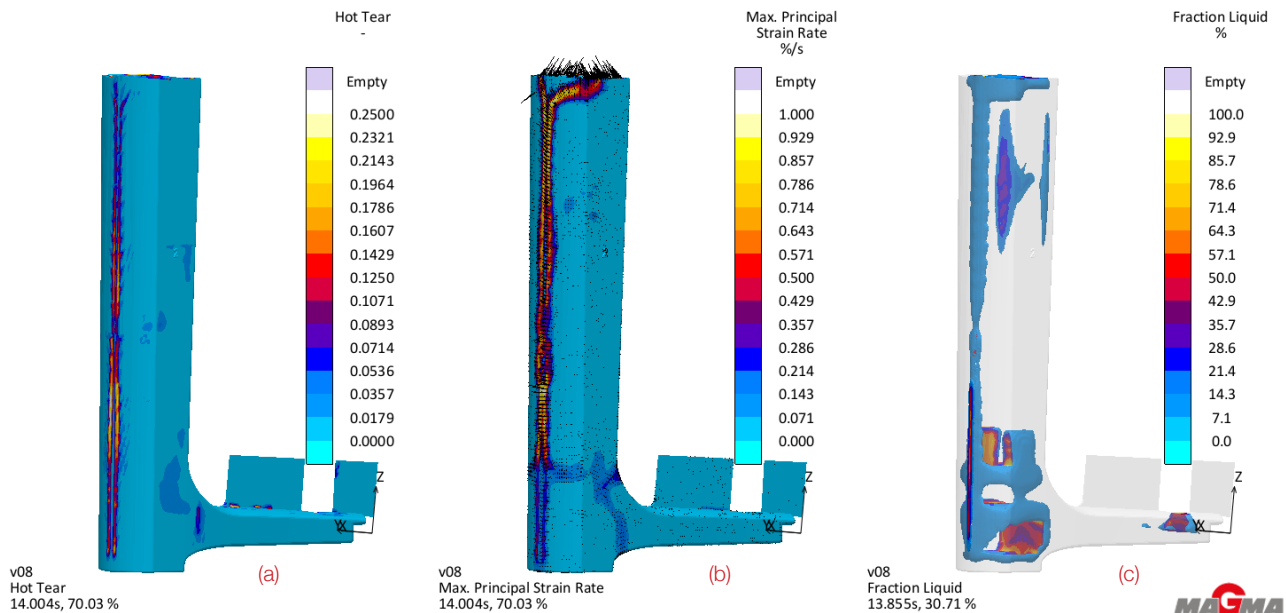


图10(a)：黄铜水龙头；(b) 抛光后的铸件-表面出现热裂纹；(c) 裂纹放大后呈锯齿形形状<sup>04</sup>



▲ 图11(a)热裂判据；(b) 拉应变率结果；(c) 液相分数结果<sup>04</sup>

## 模拟解读：

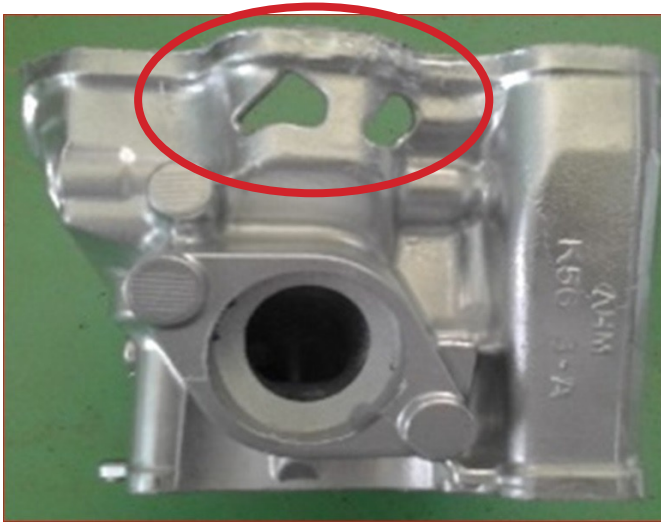
使用热裂判据可以很容易评估铸件的热裂倾向。MAGMASOFT®通过评估凝固过程中的应变率来计算热裂判据，该应变率是从无法通过枝晶网络进一步补缩的时刻开始的。热裂结果判据（图11a）显示了内浇口附近的圆角区域的热裂风险。结合热裂判据，有必要分析凝固后期拉应变率的演变（图11b）、周围区域的应力和关键区域的液相分数（图11c）。

## 造成热裂的根本原因：

- 结晶范围宽的合金，处于脆弱状态下的时间更长，更容易产生热裂。（例如：低Si%的AlSi合金）
- 结构导致收缩受阻
- 截面厚度差异较大
- 设计的圆角太小
- 壁厚的突然改变、结构分叉和连接部分的突然改变
- 型芯刚度过大，造成高收缩阻力

<sup>04</sup> Docol case study courtesy - Conserving Resources and Protecting the Environment With MAGMASOFT - MAGMATimes vol. 36 nr. 3 pag 6. Publication of MAGMA Geissreitechnologie GmbH. Aachen 2021

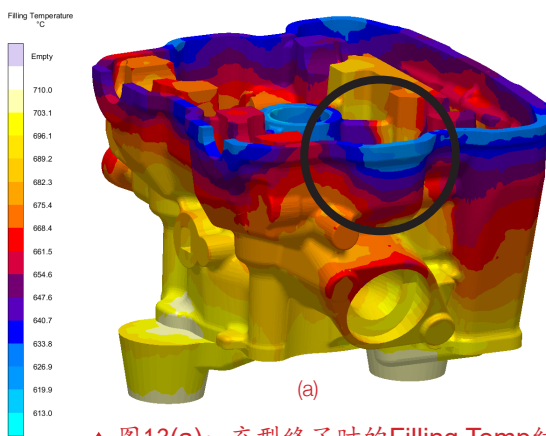
# 浇不足/冷层/冷隔



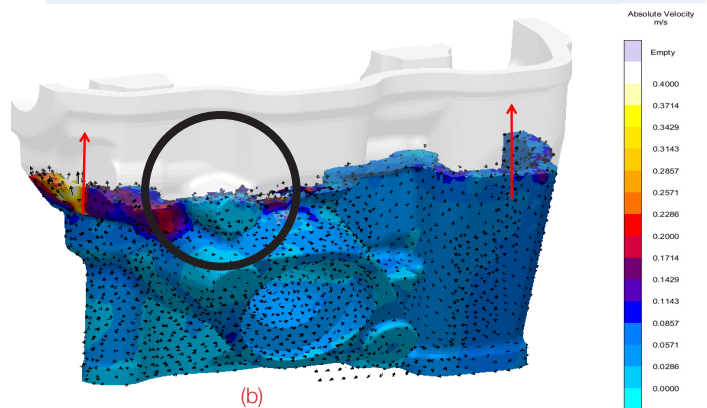
▲ 图12: LPDC生产的摩托车缸盖上的浇不足

## 描述:

冷隔, 冷层和浇不足是典型的表面缺陷, 但具有相似的根本原因。冷隔可以定义为由于两股金属液汇聚但未融合<sup>05</sup>而出现在铸件表面的一种不连续。这类缺陷肉眼可见, 经常会导致铸件拒收, 因为这类缺陷会产生一个强度弱的区域。冷层是铸造温度在表面上产生褶皱标记。浇不足(图12)发生于当金属液太冷以致于无法流动或型腔末端的气体无法在凝固前逃逸。液态金属不能完全填充型腔。



▲ 图13(a): 充型终了时的Filling Temp结果-揭示温度接近合金的液相线温度



▲ 图13(b): 重要区域的流速低

## 模拟解读:

型腔Filling Temp (图13a) 和速度 (图13b) 的详细分析允许可视化金属液的流动。Filling Temp结果揭示金属液到达模具特定区域时的温度。即使金属液温度相对较高时, 流动前沿或填充终了时若金属液流动慢并伴随高压, 也会导致类似缺陷。

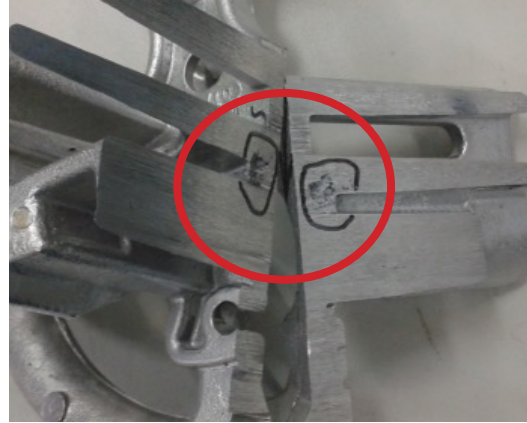
## 可能的根源:

- 浇注温度低
- 浇注中断
- 模具温度低
- 流动前沿卷气——渣包数量少或位置错误
- 流动距离长且流速低
- 有待改善的内浇口位置——减少金属液的交叉和保证流动长度短
- 浇口杯顶部液面与型腔顶部区域的高度差低
- 由于型腔中的气体不能迅速疏散到开放的大气中导致充填失败——缺少排气

# 缩孔



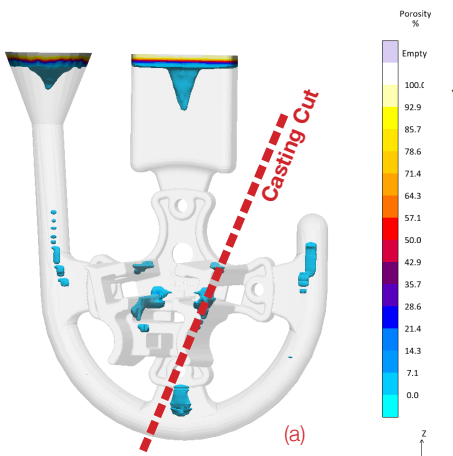
▲ 图14(a): 重力金属型铸造产生的“夹具底座”



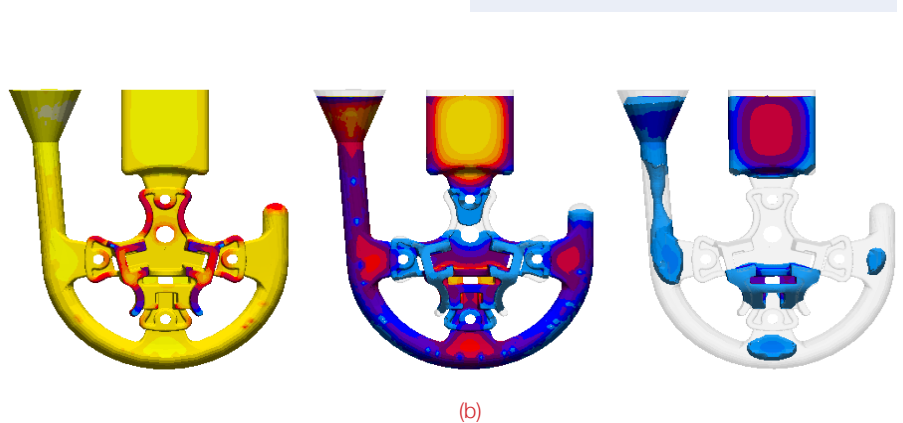
▲图14(b): 热节区域的缩孔缺陷<sup>06</sup>

## 描述:

缩孔或宏观缩孔是液相向固相转变过程中产生的体积收缩导致的一种组织不连续，当液态金属不足以补缩正在凝固的金属（如图15b）的体积收缩时发生。这类缺陷与合金成分，补缩通道，冒口和流道布局密切相关。



▲ 图15(a): 缩孔结果显示有缩孔缺陷的区域<sup>06</sup>



▲ 图15(b): 液相百分数序列结果显示凝固终了时的液相孤岛的区域

## 模拟解读:

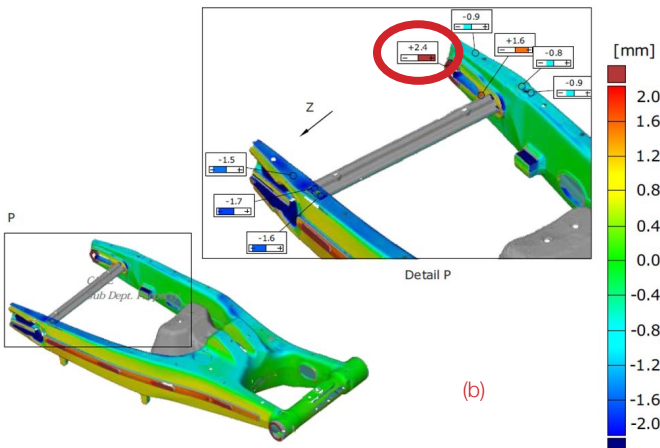
液相百分数（图15b）和温度结果揭示凝固路径和孤立热节形成的时间。FStime揭示补缩停止的时间（枝晶搭接时间）。热节和缩孔（图15a）揭示缩孔的位置，体积和强烈程度。

## 造成缩孔的根本原因:

- 铸件设计产生的孤立热节，但又不能通过浇口和补缩系统解决
- 铸件内或冒口/浇口补缩通道不合理以致于不能提供补缩的金属
- 定向凝固缺失，导致建立起不当的温度梯度
- 合金成分
- 浇注温度高
- 不合适的冷却系统或不恰当的开始/关闭时间
- 模具局部温度高
- 不恰当的模具涂层工艺



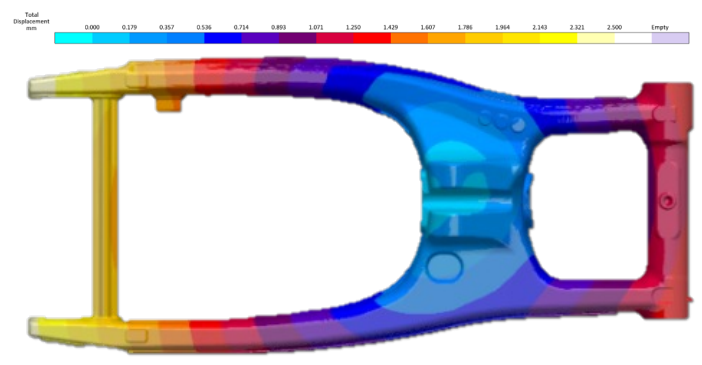
# 变形



▲ 图 16(a): 重力倾转铸造工艺生产的摇臂; (b) CAD 文件和扫描的实际铸件之间的尺寸偏差, 圆圈区域显示的最大偏差为2.4mm。

## 描述:

在铸件凝固和冷却过程中, 由于复杂的几何形状以及型芯和模具的限制引起的热梯度导致应力增加。在某些情况下, 高应力水平会导致永久变形, 从而影响最终零件的尺寸。图16b显示了CAD几何形状和最终扫描铸件之间的尺寸偏差。



▲ 图17: 总变形结果为几何体的位移。临界区域的约为 $\approx$ 2.5mm。

## 模拟解读:

X、Y、Z方向的位移结果显示零件相对于原始尺寸的移动。这是热收缩和变形的组合(图17)。为了评估最终尺寸的偏差, 有必要将变形的零件与参考几何结构进行对比, 或在测量界面使用不同方法(即最佳拟合、3点或6点)测量平面度和圆度。

## 导致变形的根本原因:

- 截面厚度差异大, 导致温差和应力大
- 模具中冷却管线的位置
- 铸件设计; 产品尺寸过长
- 开模过早; 在脱模时铸件温度过高

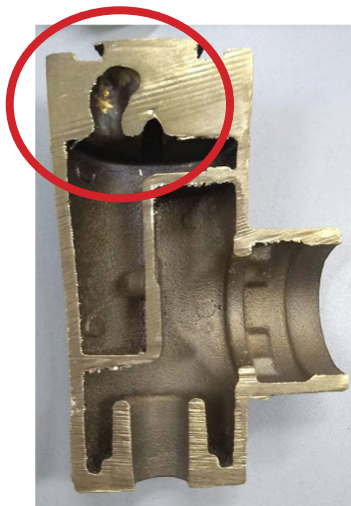
# 砂芯发气

## 描述:

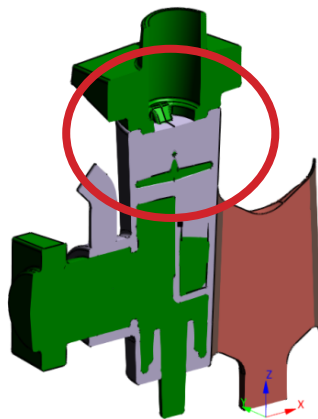
砂芯发气形成的气孔的特征是表面光滑，且相对较大。它们是由于有机粘结剂的热降解和其他挥发性成分产生的残余气体在铸件内部形成的。当使用无机粘结剂体系时，气体的形成主要是由于残余水分的蒸发。由于排气的不足，形成的气泡被困在铸件内，在充型/凝固过程中无法逸出。通常这种缺陷位于砂芯的附近，在铸件表面的下方或表面(图18b和18c)。



(a)

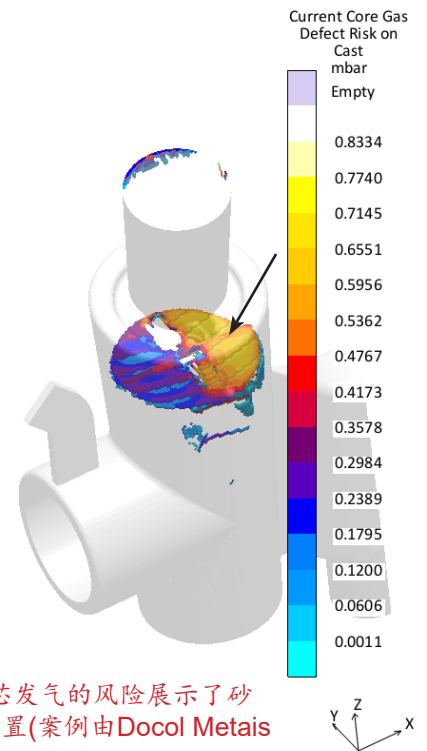


(b)



(c)

▲ 图18(a):水龙头黄铜组件;(b)砂芯上部区域气孔;(c)砂芯内部几何形状的剖面图。(案例由Docol Metais Sanitarios提供)



▲ 图19:铸件上砂芯发气的风险展示了砂芯发气气体孔的位置(案例由Docol Metais Sanitarios提供)

## 模拟解读:

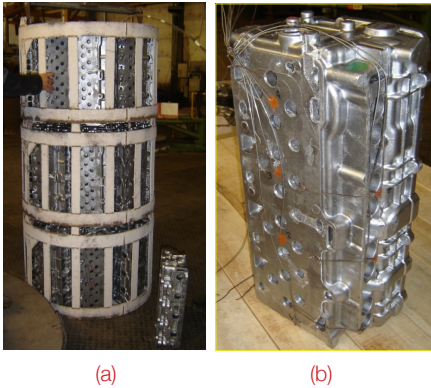
Current Core Gas Defect Risk on Cast(图19)展示了气体从砂芯释放到铸件里的位置，结合金属液的温度，这是气孔最可能发生的位置。此外，软件还提供了不同的结果来分析砂芯中气体的速度、气压和路径，这些结果支持用户找到避免这种缺陷的正确的解决方案。

## 可能的根源:

- 砂芯的透气性低
- 模具和砂芯中缺少排气或者砂芯排气口
- 在制芯和制模过程中过度使用粘结剂和其他可燃品



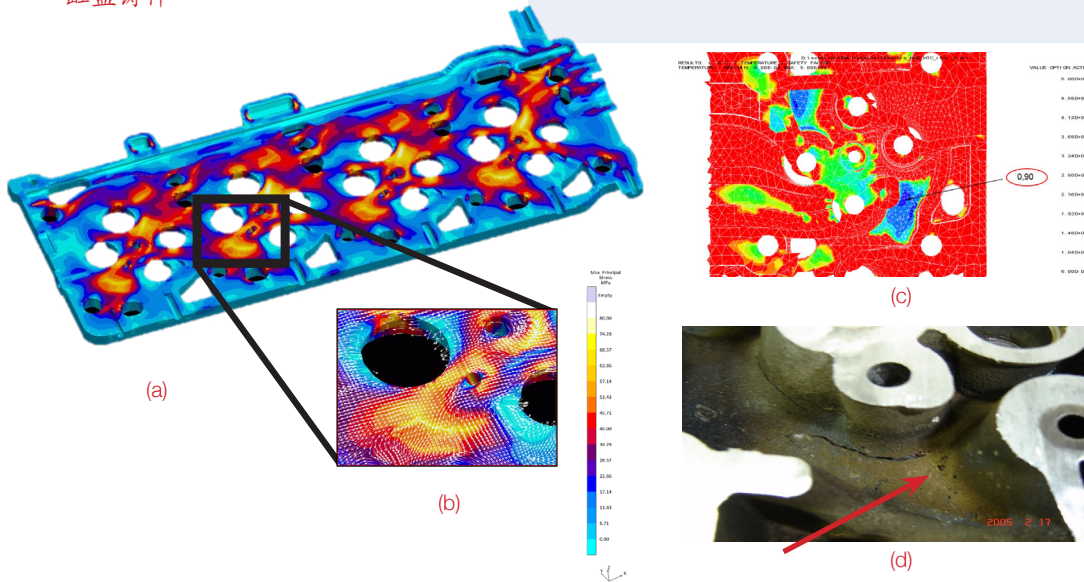
# 裂纹



▲ 图 20(a)缸盖热处理用的篮子; (b)缸盖铸件<sup>07</sup>

## 描述:

裂纹是铸造的冷却过程中或热处理时的淬火过程中，在相对较低的温度（低于固相线温度）下形成的不连续。当冷却阶段零件中累积的应力超过材料在特定温度下的极限抗拉强度时，就会出现裂纹。铸造和热处理过程中产生的残余应力可以与载荷应力方向相同，从而降低零件应用过程中引起裂纹的疲劳安全系数。皮卡车的气缸盖由于热处理过程中累积的高残余应力而开裂（图21a和21b）。如图21c所示，在零件的结构分析中引入了铸造残余应力，从而降低了疲劳安全系数并产生了如图21d所示的裂纹。



▲ 图21(a): 剖面显示了气缸盖拉伸残余应力结果-最大主应力; (b)剖面详细显示了应力矢量方向; (c)在结构计算中考虑热处理残余应力后,有限元分析显示安全系数低于1; (d)热处理后的高残余应力导致的裂纹与零件应用过程中产生裂纹的载荷应力方向相同<sup>07</sup>

## 模拟解读:

在铸造冷却或热处理淬火过程中，可以通过冷裂判据分析裂纹，该结果显示在特定时间/温度下开裂的趋势：高于1的区域意味着冯米塞应力超过材料的初始拉伸强度。小于0.8的值并不重要，值大于0.8且小于1的位置需要仔细观察（“灰色区域”）；值大于1是关键区域，在现实中往往会出现裂纹。高温下材料的抗拉强度低于室温——注意这一点是很重要的。但由于铸造或热处理过程中形成的残余应力值较高，零件在应用过程中也可能出现裂纹（图21a和21b）。该残余应力可叠加到零件载荷应力中，并成为裂纹的根本原因（图21c和21d）。

## 造成裂纹的根本原因:

- 铸造过程中由于铸件的几何形状、模具或型芯对铸件运动的限制造成铸件应力超过材料的抗拉强度
- 热处理过程中淬火时的应力超过材料的抗拉强度引起裂纹
- 铸造或热处理过程产生的残余应力叠加到铸件应用过程中的载荷，从而引起裂纹

<sup>07</sup> Silva, W.C.; Pecula M.M.; Stuewe L. -Avaliação da influência do processo de manufatura na durabilidade de um cabeçote de cilindros em alumínio para motores diesel. 13º Simpósio de Testes e Simulações - SAE Brasil, São Paulo 2015.

## References

1. 2008 ASM Handbook Castings. Vol. 15, Ohio: ASM International
2. PT. Surya Toto Indonesia. Casting Quality Improvement with MAGMA simulation. Case study presented in the User Group Meeting ASEAN 2016.
3. Sturm J.C., Pavlak L. Reduction of Oxide Inclusions in Aluminum Cylinder Heads Through Autonomous Designs of Experiments, in International Journal of Metalcasting, vol.11, nr.2. American Foundry Society, 2017.
4. Docol case study courtesy - Conserving Resources and Protecting the Environment With MAGMASOFT - MAGMATimes vol. 36 nr. 3 pag 6. Publication of MAGMA Geissreitechnologie GmbH. Aachen 2021.
5. Sunny, W. 21 Casting Defects and How to Prevent Them in Your Products. Manufacturing and QC blog. 18 Sep. 2018. Link: <https://www.intouch-quality.com/blog/21-casting-defects-and-how-to-prevent-them-in-your-products>
6. PLP Indonesia case study courtesy - Conserving Natural Resources Exploiting Economic Opportunities - MAGMATimes vol. 37 nr. 1 pag 1. Publication of MAGMA Geissreitechnologie GmbH. Aachen 2022.
7. Silva, W.C.; Pecula M.M.; Stuewe L. -Avaliação da influência do processo de manufatura na durabilidade de um cabeçote de cilindros em alumínio para motores diesel. 13º Simpósio de Testes e Simulações - SAE Brasil, São Paulo 2015.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



迈格码（苏州）软件科技有限公司

苏州工业园区苏惠路98号国检大厦1515室  
电话：0512 6272 5820 | 邮箱：info@magmasoft.cn

[www.magmasoft.cn](http://www.magmasoft.cn)