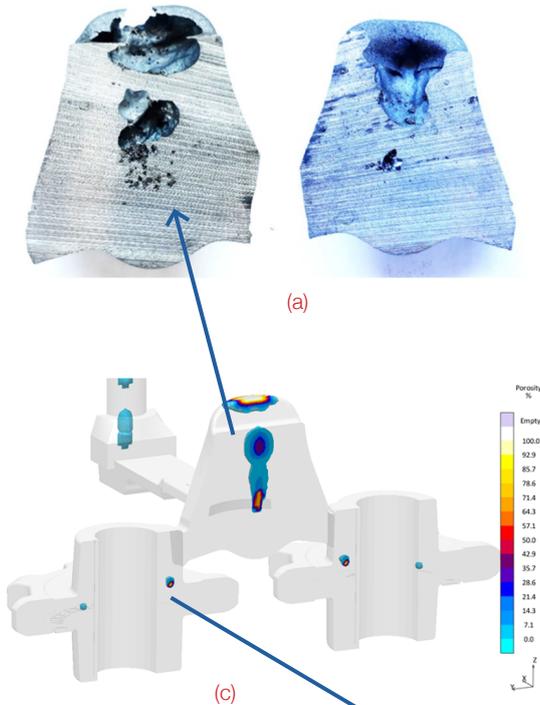
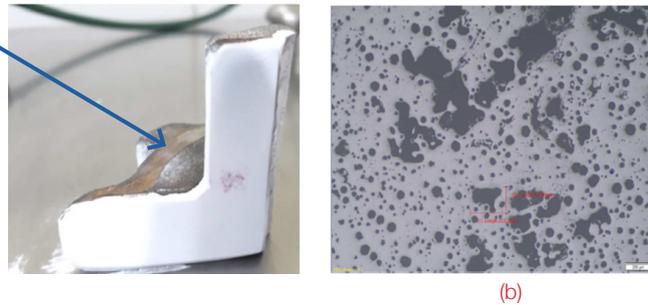


缩孔缩松



▲ 图 1(a): 冒口中的宏观缩孔; (b) 微观缩孔在其内表面显示出树枝状的形态; (c) 球铁件空隙率的预测



描述:

缩孔是由凝固过程中的体积收缩引起的体积亏空，且亏空的体积得不到足够的补缩而产生的。铸铁中的缩孔通常分为宏观缩孔（一次收缩）和微观缩孔（二次收缩），它们的起源是相同的，但它们在形态上表现出差异，并与形成它们的凝固阶段有关。一次收缩发生在铸件不同区域的凝固早期阶段，此时固相分数较低，通常这部分的收缩由冒口进行补偿。另一方面，二次收缩发生在凝固的最后阶段，此时大部分液体流动已经被打断，这部分的收缩只有石墨膨胀才能补偿。一次收缩通常会导致大的、光滑的空腔（图1a），而二次收缩表现出树枝晶形态（图1b）（01）。

模拟解读:

液相百分率（Fraction Liquid）和温度（Temperature）结果显示了凝固顺序以及形成孤立液相区的时间。热节（Hot Spot）和孔隙率（Porosity）（图1C）结果显示了缩孔的位置、体积和百分比。

为了能够识别孔隙率是宏观缩孔还是微观缩孔，有必要逐步分析孔隙率（Porosity）结果，并与液相百分率（Fraction Liquid）一起识别凝固的哪个阶段产生缩孔。

可能的根本原因:

宏观缩孔:

- 由于孤立液相区补缩不足
- 冒口颈模数小
- 尺寸过小或形状不完美的冒口
- 浇注温度高

微观缩孔:

- 碳当量
- 没有孕育或孕育效果不好
- 砂型紧实度低或局部区域未压实
- 合金元素偏析(如: Mo, Cr)

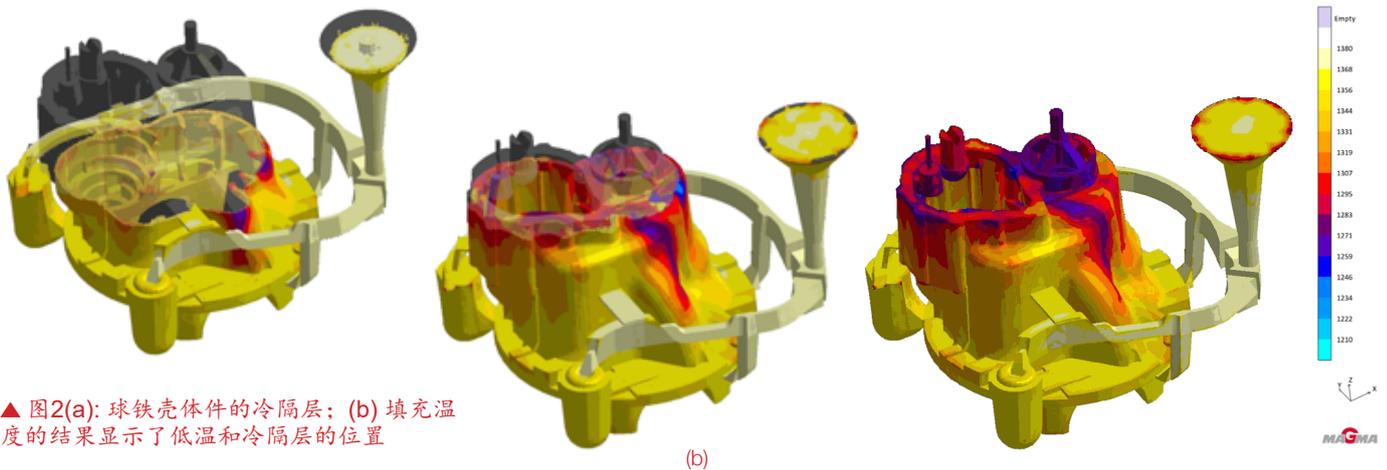
冷隔/皱皮/浇不足



(a)

描述:

冷隔/皱皮/浇不足是表面缺陷，其根源相似，但形态发生了变化。冷隔可以定义为由于两股金属液流相遇并未能结合而在铸造金属表面出现的不连续 (01)。这种缺陷肉眼可见，通常会由于该缺陷导致铸件被拒收。如图2 (a) 所示，皱皮通常是由铸造温度过低引起的表面褶皱。浇不足是当液态金属太冷而无法流动时，或者在凝固之前无法排除型腔末端的空气时发生的错流，导致液态金属没有完全填充型腔。



▲ 图2(a): 球铁壳体件的冷隔层; (b) 填充温度的结果显示了低温和冷隔层的位置

模拟解读:

通过对空腔填充温度 (图2 (b)) 和速度特征的详细分析，可以直观地看到流动方式以及流体交汇处的温度。填充温度 (Filling Temperature) 结果判据显示金属液到达型腔特定区域的温度。即使在相对较高的温度下，流动前沿或填充结束时的低速度和高空气压力也会显示出类似的缺陷特征。

可能的根本原因:

- 浇注温度低
- 浇注中断
- 流速低、流动距离长
- 内浇口位置不佳 - 避免狭窄通道以及确保流动距离尽量短
- 铸件顶部液面与浇口杯中的液面高度差太小
- 充型过程中的气体背压太大，气体无法快速排出
- 砂型透气性差
- 由于铝、磷等合金元素导致金属液的粘度高 (01,02)

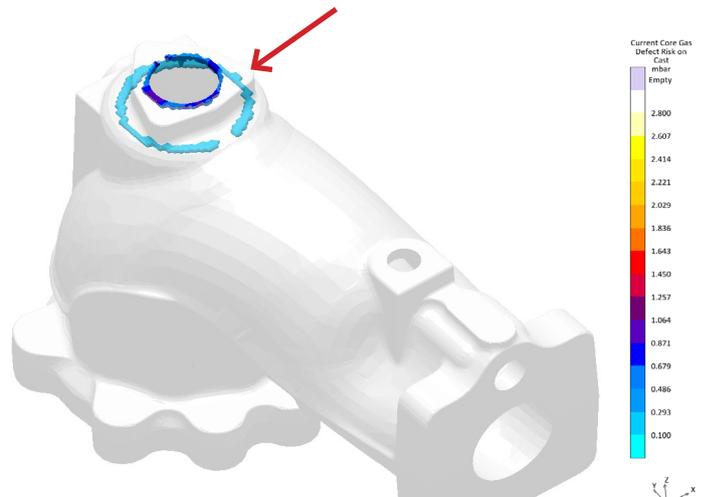
砂芯发气气孔

描述:

砂芯气孔也称为气孔，其特征是相对较大的气泡，表面光滑。它们是由于有机粘合剂热降解和其他挥发性成分产生的气体而形成的。当使用无机粘合剂时，气体主要是由于水分蒸发形成的。形成的气泡被困在铸件中，在填充/凝固过程中无法排出导致了铸件气孔。如图3 (a) 和 (b) 所示，这种缺陷通常位于型芯附近，铸件表面下方或铸件表面处。



(a)



(b)

▲ 图3(a): 铸件表面的砂芯气孔; (b) 实时砂芯发气缺陷风险显示砂芯气孔风险的位置

模拟解读:

当前铸件中实时砂芯气体缺陷风险 (Current Core Gas Defect Risk on Cast) 的结果 (图3 (b)) 显示了气体从砂芯中释放到了铸件的位置，根据金属液的温度，这将是有可能出现气孔的位置。此外，还有不同的结果可用于分析砂芯中气体的速度、压力和转移路径，模拟支持用户找到正确的解决方案来避免这种缺陷。

可能的根本原因:

- 砂芯透气性差
- 砂模或砂芯排气不足
- 造型制芯中使用粘结剂、煤粉或其它易发气物过多
- 浇注温度过低

粘砂

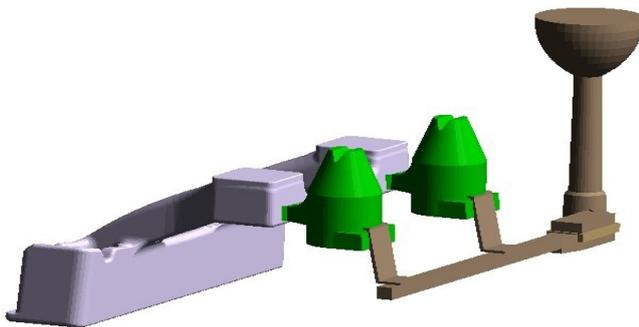
描述：

化学粘砂和物理粘砂主要是由于砂型或砂芯局部过热导致的铸件表层附着一层坚硬的粘附层（如图4a）。这种过热会导致液态金属破坏铸型表面并渗透进表层砂粒间隙。

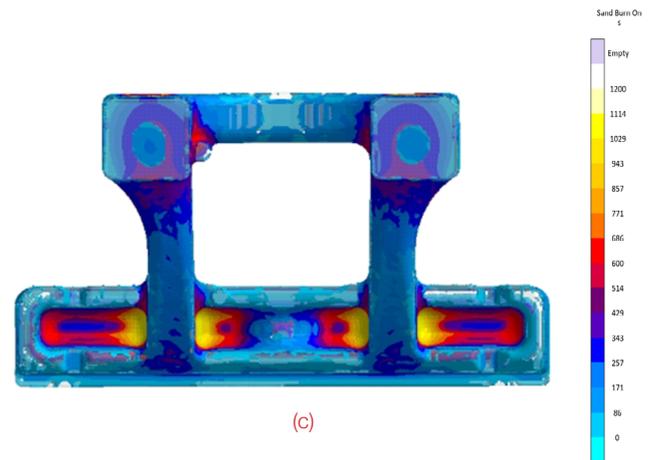
化学粘砂是一种需要比正常抛丸更费力清除的缺陷，而物理粘砂是一种更严重的缺陷，其特征是金属液穿透砂型或砂芯，形成粘附在铸件热节上的表面硬壳，而这种硬壳很难从表面消除。



(a)



(b)



(c)

▲ 图 4(a): 硬壳粘附在铸件表面; (b) 原始浇注系统; (c) 化学粘砂 (Sand Burn on) 模拟结果显示关键的区域

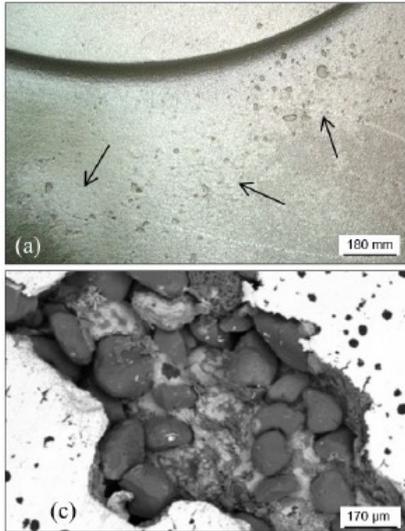
模拟解读：

化学粘砂 (Sand Burn on) 和物理粘砂 (Sand Penetration) 直接在结果中显示哪些区域是有严重缺陷风险的位置，如图4c的化学粘砂结果表明：铸件底部区域产生该缺陷可能性很高。

可能的根本原因：

- 浇注温度过高
- 金属液静压力太高（铸件高度太大）
- 砂型/芯耐火度不足
- 砂型/芯紧实度低或不均匀
- 浇冒口系统的局部位置过热
- 型砂特性，如烧结温度低、粒度太粗、导热性差等
- 型、芯砂粉尘量、残余树脂量、低熔点氧化物含量过高

夹砂



(a)

(b)

◀图5(a):大型球墨铸铁件表面夹砂; (b)球铁夹砂金相检测图(01)

描述:

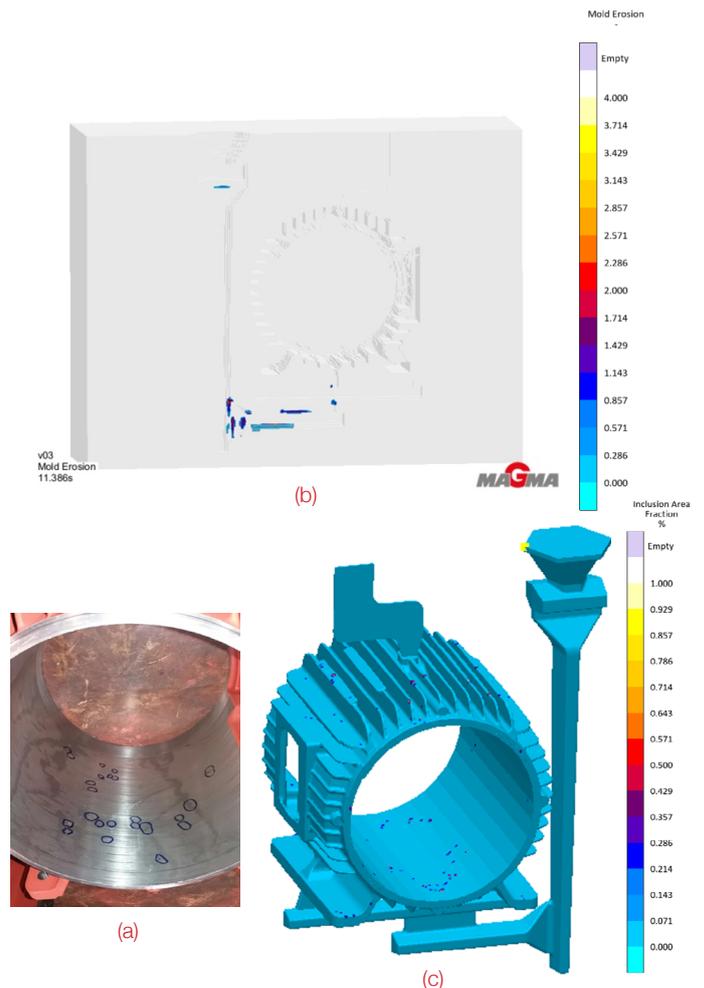
夹砂缺陷一般位于铸件的表层或近表层（如图5a, c），主要是由于流动的金属液对砂型、砂芯冲刷侵蚀所致。用肉眼观察时，夹砂很容易被误认为是熔渣或氧化夹杂物。粘附在铸件内部的小砂粒很容易识别，但铸件表面的夹砂由于喷丸处理后可能会破坏或断裂，只能通过金相检验方式来进行详细分析，如图5b所示。

模拟解读:

图6a和b分别展示了铸型侵蚀（Mold Erosion）和夹砂面积占比（Inclusion Area Fraction）结果。铸型侵蚀结果表明了砂型被冲刷位置，夹砂面积占比表明了砂粒冲刷后随金属液流动到哪些位置。

可能的根本原因:

- 浇注系统设计不当导致紊流及充型速度过高，促使铸型侵蚀加剧
- 造型紧实度差形成分散的浮砂粒
- 因粘土砂含水量低而形成的低紧实度
- 混砂温度高，型砂中水分丢失而降低紧实度
- 粘土砂中膨润土含量偏低
- 型砂中粒度较粗的砂子比例较高
- 造型操作不当，砂型和砂芯表面损坏



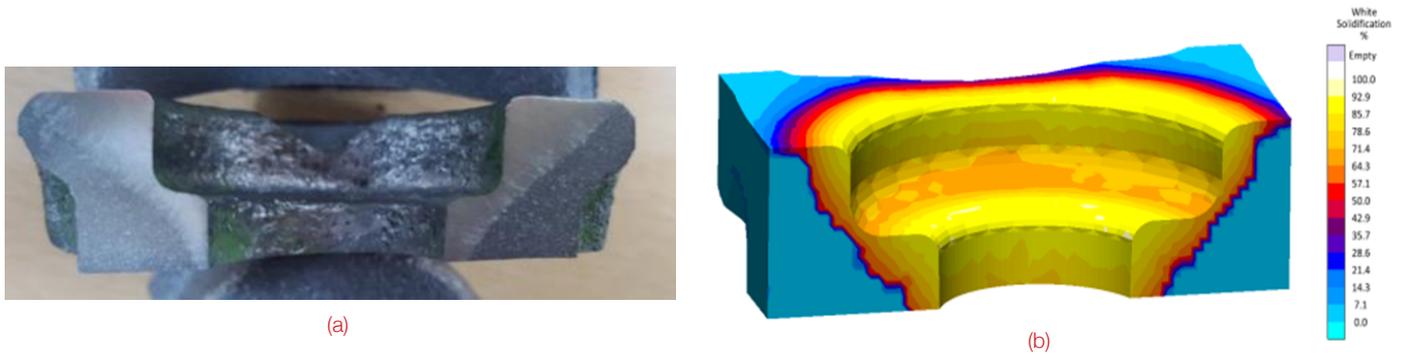
▲图6(a):电机壳表面夹砂缺陷; (b)粘土砂Disa造型工艺的铸型侵蚀结果; (c)关键加工位置夹砂面积占比结果;

碳化物

描述:

铸铁中的碳化物是在凝固过程中形成的，通常是不理想的金相组织，它会增加硬度、降低韧性，并能大大降低铸件的可加工性。如图7a所示，碳化物可以通过硬度测量或金相分析来检测。其他可用于评估铁液形成碳化物能力的技术有三角试样和热分析冷却曲线（01）。

通常碳化物是铁液在达到亚稳态之前，在C-Si稳定系中凝固，石墨成核和生长困难形成的。它可由冷却速度过快引起，如图7a、b和c所示；或者由Cr、Mo、Vn等元素的偏析引起，这些是碳化物的促进元素，有助于在亚稳定系下凝固。后一种情况下形成的缺陷被称为反白口。

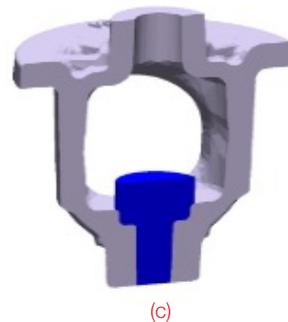


模拟解读:

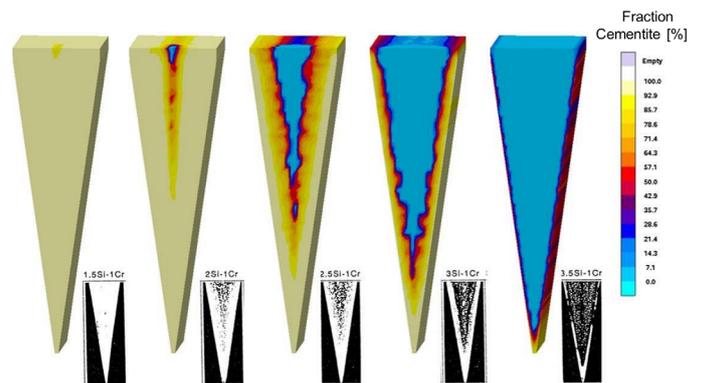
MAGMAiron通过考虑孕育处理、冷却速度、化学成分等因素来模拟铸件中的碳化物形成。金相组织中的白口组织（White Solidification）这个结果直接显示了碳化物的位置和百分比，如图7b和8所示。

可能的根本原因:

- ❑ 冷却速率过高，如在铸件的薄壁和靠近冷铁位置
- ❑ 碳化物形成元素如Cr、Mo、Vn，或碳化物促进元素（抑制石墨生长）如Mg、Bi和稀土元素含量偏高
- ❑ 缺少孕育或孕育效果不佳
- ❑ 孕育衰退
- ❑ 碳当量低的亚共晶铸铁，其中Si对石墨形核起着重要作用
- ❑ 在浇包或是电炉中保温时间太长降低了金属液的形核能力



◀ 图7 (a): 铸件由于局部使用冷铁激冷形成的白口区域；(b) 白口组织的模拟结果同碳化物形成位置一致；(c) 原始工艺设计和冷铁（蓝色）



▲ 图8: 模拟结果和实际铸件对比，不同铬含量条件下碳化物百分比

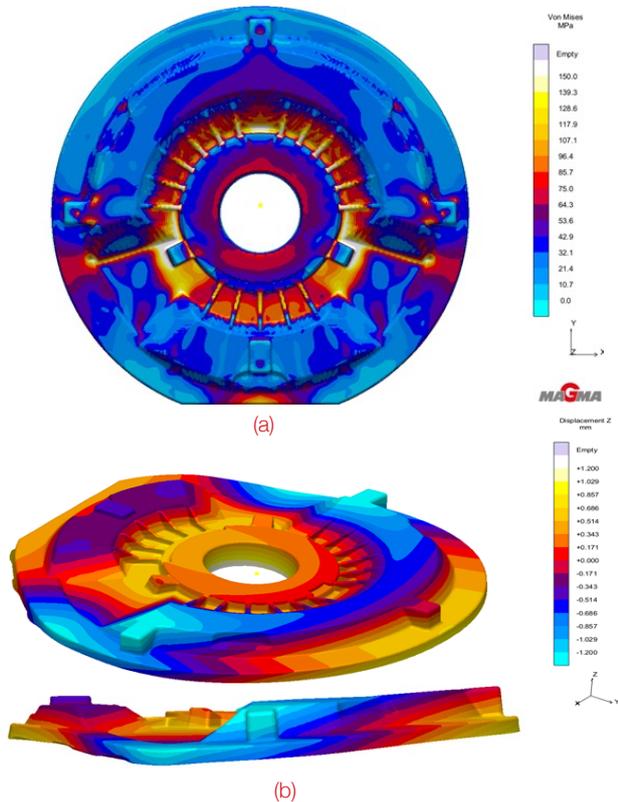
变形



▲ 图9: 安装好的电机盖快照 (06)

描述:

在铸件的凝固和冷却过程中，由于复杂的几何形状导致的温度梯度，以及型芯和铸型的约束产生了应力。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9显示的灰铁电动机盖，测量了其平面度并与模拟结果进行了比较。可以观察到零件肋条周围的内部薄壁区域（图10a）的高应力导致零件弯曲，影响铸件的平面度（图10b）。测量和模拟的平面度偏差见图11。



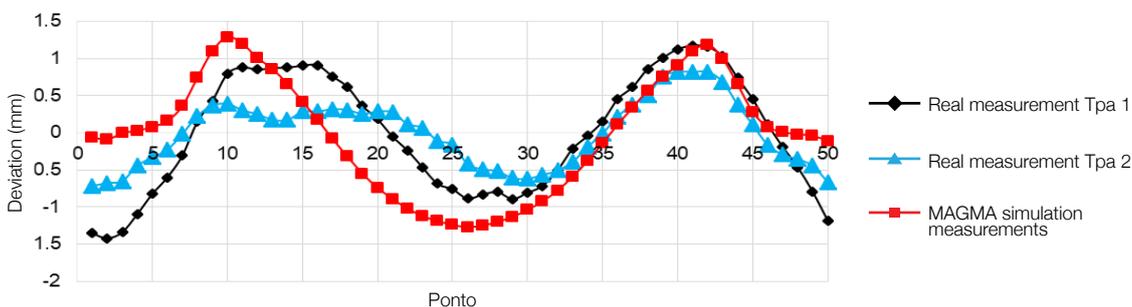
▲ 图 10: (a) 铸造后的 Von Mises 应力，显示了加强筋周围的高应力；(b) Z方向的位移结果 (Displacement) 显示了变形的趋势 (06)

模拟解读:

X、Y、Z方向上的位移 (Displacement) 结果显示零件距离其原始位置的尺寸；这是热收缩和形状变形的综合值。使用畸变因子的功能，更容易对翘曲进行可视化。为了评估最终尺寸的偏差，可使用不同的评估方法（如最佳拟合、3点法或6点法），将变形的零件与参考几何结构进行比较；或是测量平面度或圆度。在图11中，使用了6点法，并将其与实际的3D坐标测量结果进行了比较。

可能的根本原因:

- ❑ 截面厚度差异过大，导致温差和应力过高
- ❑ 冒口和冷铁的位置导致了凝固时间和温度的差异
- ❑ 铸件的设计；产品形状较长
- ❑ 开箱过早，开箱温度过高
- ❑ 铸型和砂芯退让性差导致受阻收缩和不均匀收缩



◀ 图11: 平面度测量——蓝色和黑色曲线为实际测量值，红色曲线为模拟值（使用了6点法）

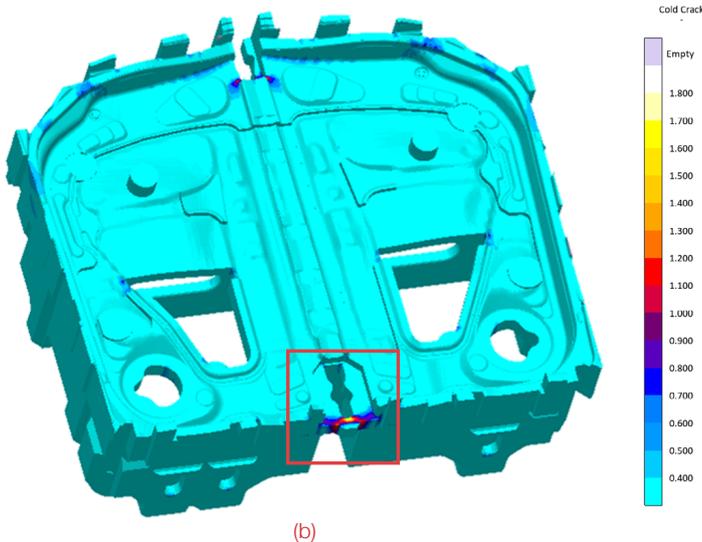
冷裂

描述:

冷裂是在相对较低的温度（低于固相温度）下，铸件基体组织开裂而形成的不连续缺陷；如图12（a）所示，当铸件在冷却阶段积累的应力超过材料在一定温度下的极限抗拉强度时，就会出现冷裂纹。裂纹可以是穿晶断裂也可以是沿晶断裂，这取决于晶粒及其边界的相对强度和裂纹形成的温度（07）



(a)



(b)

▲ 图12: (a) 铸件冷裂; (b)冷裂 (Cold cracks) 模拟结果显示缺陷的关键区域

模拟解读:

图12（b）为冷裂（Cold Crack）判据。该结果显示了铸件冷却阶段的某个时间/温度下发生冷裂纹的趋势。高于1的区域意味着冯-米塞斯（Von Mises）应力超过材料的初始抗拉强度，数值<0.8的区域是非重点关注区域，数值>0.8<1需要重点关注，数值>1是高风险区域，容易在实际生产中开裂。需要注意的是，材料在高温下的抗拉强度要比室温低。

可能的根本原因:

- ❑ 开箱温度过高，落砂清理过程中受到碰撞、挤压等引起的开裂
- ❑ 铸件的几何结构、外模或砂芯阻碍正常收缩，使得铸造应力超过材料的抗拉强度
- ❑ 热处理不当形成的铸件应力

References

1. Sertucha, J., Lacaze, J. Casting Defects in Sand-Mold Cast Irons - An Illustrated Review with Emphasis on Spheroidal Graphite Cast Irons. Metals 2022, 12, 504 <https://doi.org/10.3390/met12030504>
2. Sunny, W. 21 Casting Defects and How to Prevent Them in Your Products. Manufacturing and QC blog. 18 Sep. 2018 (<https://www.intouch-quality.com/blog/21-casting-defects-and-how-to-prevent-them-in-your-products>)
3. Brooks, B.E., and Beckermann, C. Prediction of Burn-on and Mold Penetration in Steel Casting Using Simulation, in Proceedings of the 60th SFSA Technical and Operating Conference, Paper No. 5.3, Steel Founders' Society of America, Chicago, IL, 2006.
4. Los, A.L. Identifying and solving inclusions - six sigma methodology approach. Case study presented in the MAGMA International User Meeting 2018
5. Hyundai Metia case study courtesy - Reduce porosity with geometry optimization - MAGMATimes 2022 vol. 10 pg. 5-6.
6. Leal, T.S., Stuewe L., Flatness and roundness evaluation in an electric engine grey iron cover - Case Study presented in the MAGMA International User Meeting 2016
7. Campbell, J. ed. (2003). The new metallurgy of cast metals, castings. 2nd ed. London: Butterworth Heinemann