

在无法实际测量时，多物理场仿真提供了答案

高炉中的极度高温使得生产过程中无法对某些部分进行测量。在 TRB，我们通过仿真和测量高炉出液沟中的温度来获得高炉内部情况。

作者：SIMON CHIARTANO, TERRES RÉFRACTAIRES DU BOULONNAIS (TRB)



高 炉中的熔融金属可达到近 1500 °C，在如此高温的环境中，必须采取一切可能的预防措施来保护工人和生产设备的安全。熔融金属通过出液口离开高炉，在沿着分离矿渣的出液沟穿行时（见图 1）含有潜在危险。

如果出液沟完全暴露，可能会溅起熔融金属，对操作员和工具造成极大的危险，或导致生产停顿。

为了遏制飞溅并提供保护，出液沟的一些部位具有沟盖，其外壳由铸铁制成，

用混凝土作为内衬。这种内衬是必需的，因为没有它，溅起的熔融金属会迅速在铸铁中产生熔孔。

混凝土内衬需要承受热冲击，腐蚀和侵蚀。沟盖的寿命一般为一个月，超过寿命使用时间之后必须更换内衬。高炉具有两套、三套甚至四套出液设备，我们在 TRB 具有数以百计的高炉，显然在尽可能将它们设计地经济的同时保持整体安全性是对我们有利的。

设计出液沟向来是一门不精确的科学，因为我们无法精确地测量其内部发生的情况。在过去，我们使用实验方法来确认内衬的最佳混凝土类型，确定最佳厚度。如果内衬损坏得太快，我们只能尝试新的组合。其中很多决定都基于内衬暴露的高热环境。但是，直到现在，我们对于这些温度还是几乎一无所知。它们

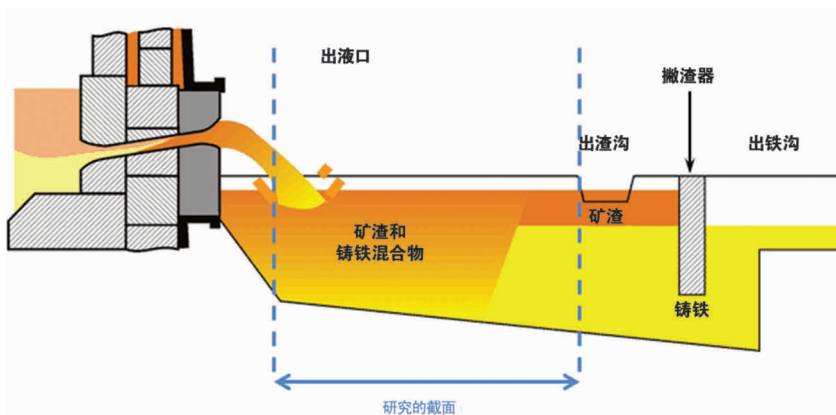


图 1: 熔融金属流出高炉（左）并穿过出液沟，矿渣在此处与铸铁分离（右）。使用 COMSOL Multiphysics 研究的截面（见图 2）显示在中间区域，如图所示。

“我们不能在其中放置传感器，因为暴露在极端高热和飞溅的熔融金属中会破坏这些昂贵的器件。”

是 300 °C，还是 1000 °C？我们就是不知道！我们不能在其中放置传感器，因为暴露在极端高热和飞溅的熔融金属中会破坏这些昂贵的器件。相反，我们转为使用 COMSOL Multiphysics 及其传热模块进行仿真。

预热高炉

在正常工作条件下，熔融金属不会在室温下进入出液沟。因此，我们仿真的第一个阶段是基于 500 °C 的煤气燃烧器来预热所仿真的出液沟。该模型还提供给我们用于进一步研究的

设置为仅使用传导传热，忽略空气对流，并假定煤气燃烧器具有固定温度。这些设置是进行进一步研究的起点。

沟盖下的空气是否发生流动？

紧接刚刚介绍的预热仿真，模型的下一个阶段研究高炉中的熔融金属第一次出液并流过出液沟。此时，我们获取沟盖下方空气的温度，并观察它随着时间的推移如何变化。为此，我们建立以下情形的模型，即对高炉进行出液，并将熔融金属送过出液沟，持续 75 分钟的

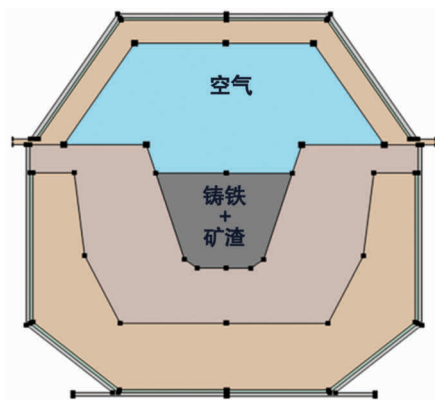


图 2：沟盖出液沟的二维几何。熔融金属与混凝土内衬接触，外壳为铸铁。

空气分布几乎静止（见图 4），这一现象在后续建模步骤中发挥着重要的作用。具体来说，

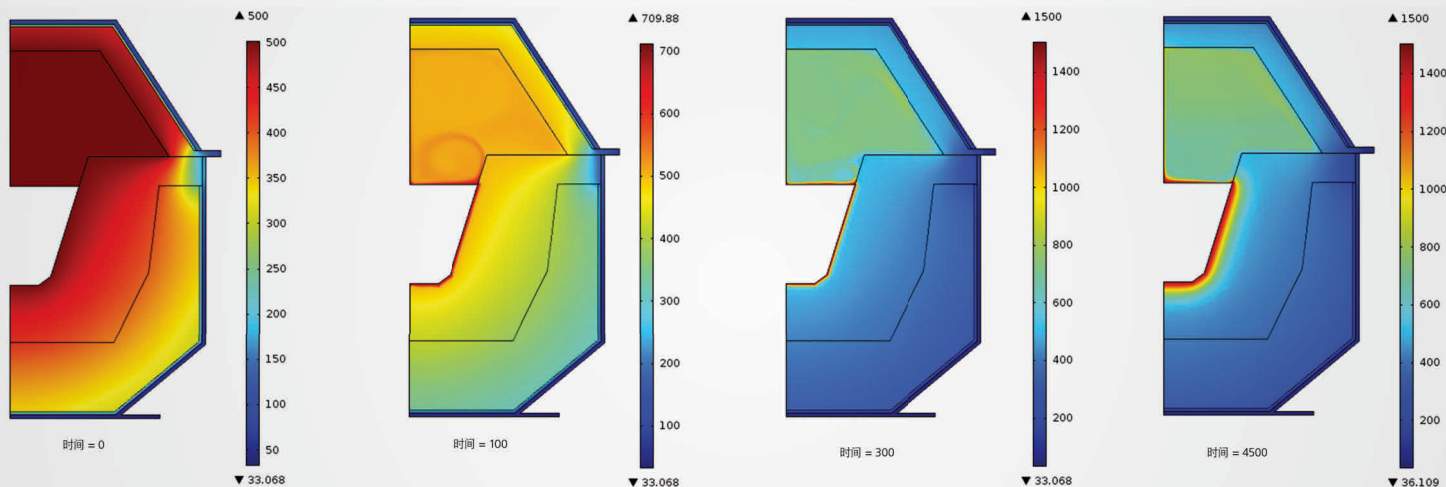


图 3：仿真结果显示在 300 秒之后，达到 1500 °C 的正确条件，传热主要通过传导发生。

截面二维几何图（见图 2）。在该图中，可以注意到两种深浅不同的棕色，分别对应于两种不同类型的混凝土。一种与熔融金属接触，必须抵御金属液、腐蚀和热冲击。在该模型中，我们只考虑混凝土的这种内层。第二种类型的混凝土从不与熔融金属接触，用作机械框架。为了研究预热对混凝土的影响，我们将仿真设

时间为 300 秒。这一阶段我们耦合了表面固体组成部分中发生的热传导和由于自然对流产生的空气对流。在模型中，需要 300 秒的仿真时间让与流体接触的沟壁达到与金属相同的温度 (1500°C)。达到该条件之后，将在层之间缓慢地发生传导，如图 3 所示。

有趣的是，可以注意到在大约 500 秒时，

我们通过不考虑空气流动来简化问题，空气流动并不会增加太多有用信息。

仿真 7 天的加热循环

但是，研究第一次出液时，所提供的不足以使整个出液沟变热，因而无法给我们提供能

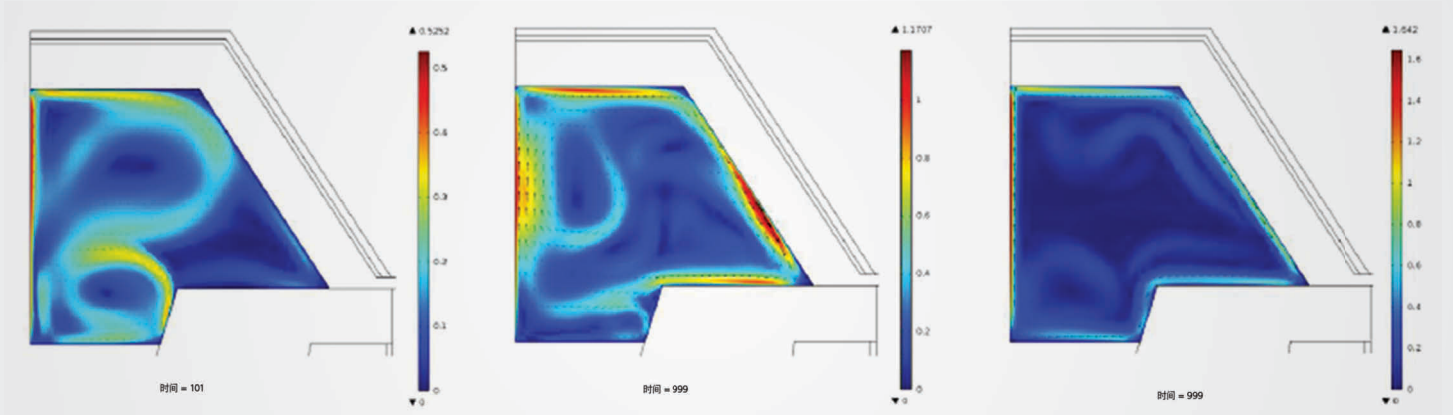


图 4: 在第一次出液期间, 使用 COMSOL Multiphysics 执行的仿真显示在 500 秒之后, 沟盖出液沟下的空气几乎静止。

够与实际验证的结果, 而这才是我们的最终目标。为了近似模拟高炉的实际工作方式, 下一个阶段先让熔融金属流出出液沟 75 分钟, 然后让出液沟置空 75 分钟, 并不断循环这

但是, 目前所作的假设中有可能会影响结果, 所以我们需要进一步改善我们的模型。具体地说, 在先前的模型中, 我们将内衬空气界面的温度设置为固定值 500 °C。但是, 当金

属时, 我们将液体 — 内衬界面的温度设置为 1500 °C; 当没有金属时, 我们将其设为热绝缘, 而不是设置为 500 °C。

然后, 我们运行该模型, 进行 24 小时的

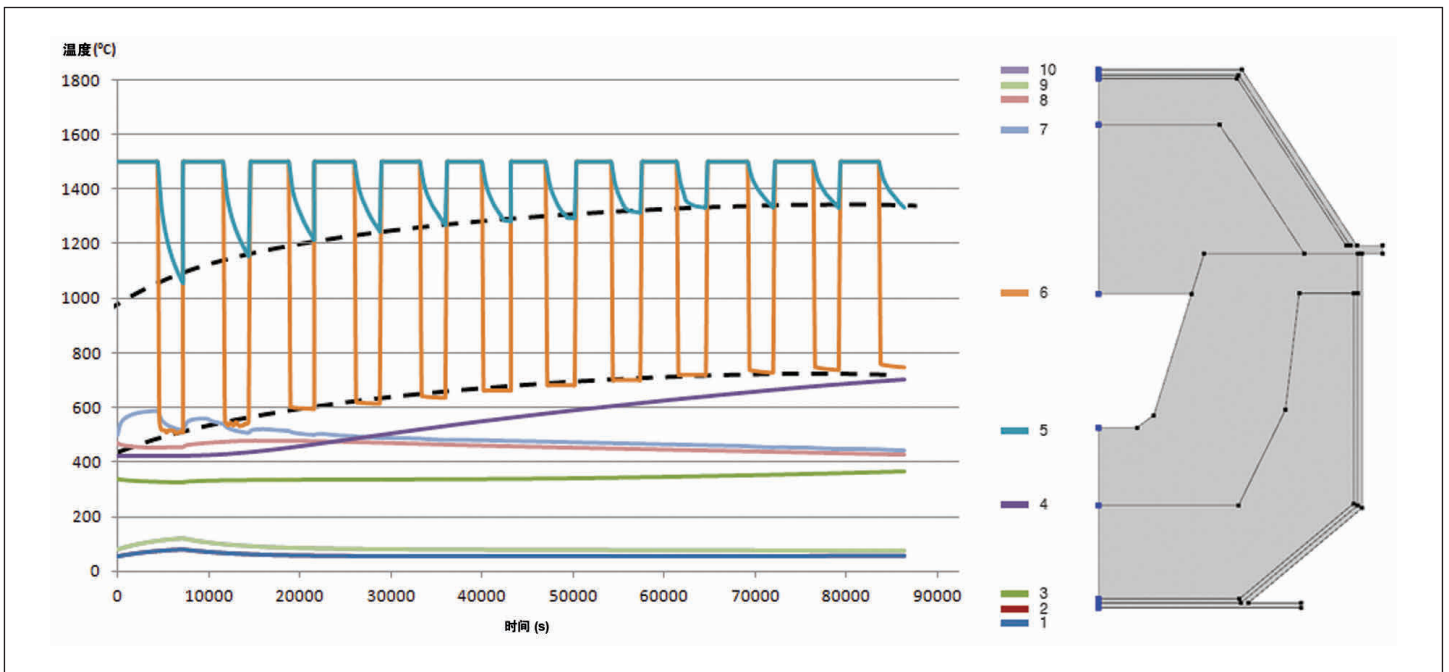


图 5: 24 小时仿真时间的结果。轨迹线 6 和 7 分别跟随熔融金属和顶部内衬界面处的空气温度。

种操作, 直至达到 7 天的仿真时间。正如刚刚所提到的, 这个阶段不包含空气对流; 我们将与空气接触的内壁上的温度设置为在上一步中确定的温度。

属停止流动时, 底部内衬的温度不会立即从金属的 1500 °C 下降至我们指定的 500 °C。我们需要进一步改善我们的模型, 与先前阶段非常类似, 但存在一个很大差异。当存在熔融金

仿真出液, 之后暂停。结果如图 5 所示。

轨迹线 6 熔融金属界面处的空气温度, 它在界面处达到所设定的温度 1500 °C (上方虚线); 没有熔融金属时, 空气温度会一直下

降，直至达到大约 750°C （下方虚线）。我们可以注意到，该温度比先前模型的 500°C 打开出液沟，并使用成像技术来测量内衬的温度（见图 7）。我们发现，当打开沟盖时，内部

“得益于仿真，我们实现了 10°C 范围内的精确计算。”

高得多。轨迹线 7 表示与顶部内衬接触的空气的温度，该温度在 24 小时之后稳定于 430°C 左右。

最后，我们研究持续上述过程一个星期的情形，以观察外部铸铁壳最终会达到什么温度。为使仿真时间合理，我们通过将空气温度设置为在前一阶段确定的值来简化它；这是合理的，因为图 5 显示了内部空气温度基本上已经稳定。类似地，我们将流体接触边缘处的温度设置为图 6 中的结果。再经过六天的出液和间断之后，可以看到外壳达到了大约 80°C 。

的温度会迅速下降，所以工作期间内部的实际温度会更高。在图 7 中，最高温度为 300°C ，这使我们可以合理地相信，我们 430°C 的仿真温度（图 5 的轨迹线 7）对于我们的直接目的已经足够精确，因为我们估计的温度下降大约为 100°C 。过去我们根本不知道该温度将有多高，现在得益于仿真，我们实现了 10°C 范围内的精确计算。仿真使我们可以一定程度上了解沟盖出液沟内发生的情况。

当我们发现沟盖内的温度为 400°C 至 500°C 之间时，我们很惊讶；我们曾预期它要高得多。到现在为止，我们的混凝土内衬都

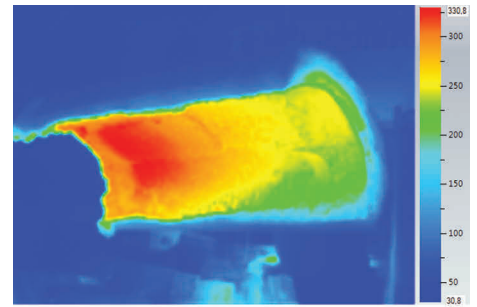


图 7：沟盖出液沟内部的热像图（上）以及同一角度的标准照片（下）。

沟盖出液沟的厚度。通过使内衬变薄，除了可以节省未来沟盖中的原材料成本之外，如果它们变得更轻，也更便于操纵，这将大大提高生

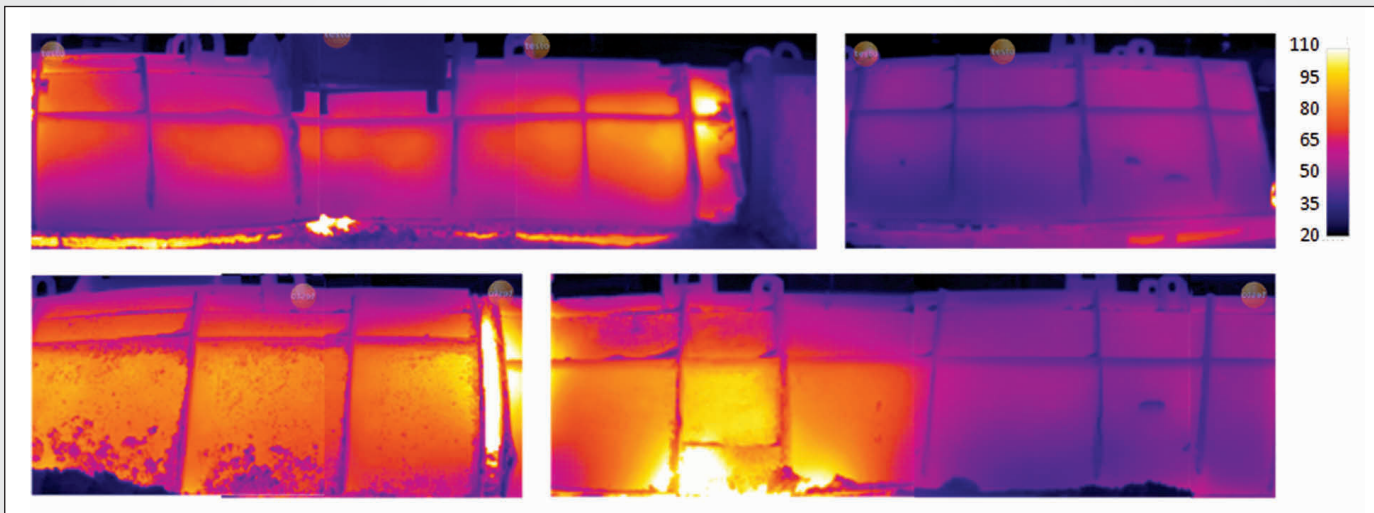


图 6：实际带盖出液沟的热像图。

验证我们的仿真来优化沟盖出液沟

为了验证该模型，我们拍摄了实际带盖出液沟的热成像照片（见图 6）。我们发现它的温度为 76°C ，与模型相当吻合。接下来，我们

非常厚，但得益于仿真，我们了解到，我们能够对它们进行了过度设计。虽然我们尚未考虑沟盖磨损等因素，但仿真已使我们获得了深入的了解：我们现在知道，我们可以降低混凝土

产速率。