

连铸：通过仿真优化设备和工艺

随着制造工艺变得日益复杂，对于更大更好的钢铁产品的需求也在增加。SMS Concast 通过仿真技术确保他们的客户在降低能耗的同时，钢铁冶炼的尺寸、质量和复杂性方面也能上升到新的层次。

作者：JENNIFER HAND

在二十世纪中叶，随着模铸的批量生产工艺被连续铸造取代，炼钢工艺发生了转变。利用连铸技术，源源不断的钢液被转化为炽热的固态金属铸坯（见图 1 和图 2）。



图 1：连铸机的输出辊道，凝固后的铸坯被切割和输出。

模铸过程中，每个铸块从模具中取出之后，必须切去头部，这会产生金属废料。但在连铸中，只需在每个序列的最初和最后进行这种切割，而每个序列会铸造数百吨的钢坯，意味着产生的废材要少得多。此外，铸坯的形状更接近于最终轧后

产品的形状。与从前的方法相比，连铸可以提高产量、质量和成本效益。因此，如今 95% 的钢材用连铸法生产。

60 年来，SMS Concast 一直是这一领域的领导者，致力于设计并制造用于钢的熔炼、精炼、连铸的技术设备，占据了超过 40% 的全球市场份额。“在我们持续改进连铸技术和提高对其认知范围的同时，连铸技术展现出大量需要分析的可变因素，” SMS Concast 冶金与工艺连铸部门主管 Nicholas Grundy 解释道：“我们正在不断挑战极限，而理解一些之前未接触过的工作的唯一方法是对它进行仿真。”

横跨所有领域的仿真

在连铸中，熔融的精炼之后的钢液通常被送至容量为 30 至 350 吨的连铸机。钢液被注入中间包，中间包则将钢液分配到一至八个铸坯中。在敞口的水冷铜模中形成最初的固态钢坯，成形的铸坯通过驱动辊以 0.1 至 6 米每分钟的速度（取决于断面大小）被拉出模具（见

图 2）。经过充分凝固之后，炽热的铸坯被切割成 3 到 15 米长的坯段，并让它们自行冷却。

连铸工艺可以产生形状与最终产品相近的半成品，极大地降低进一步轧制或锻造处理的成本。根据模具的形状，可以铸造方形轮廓的方坯，然后轧制成

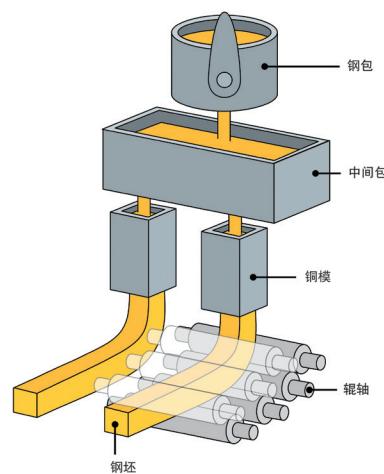


图 2：连续铸造过程示意图。钢液被送到连铸机钢包。中间包将钢液分配到铜模，并使用驱动辊从模具中拉出成形的铸坯。

棒材和线材，以用于制造钢筋混凝土和钢琴弦等产品。此外，也可以锻造大的方形块钢，例如，曲轴或棒材与轨梁。板坯被轧制成金属板材，可用于制造汽车、油轮等。

SMS Concast 对铸造工艺的每个阶段进行了仿真：分析中间包内的流体流动、模具中的初始凝固、铸坯的凝固和机械变形，以及切割之后大方坯的淬火或缓慢冷却过程。“在凝固过程中，我们必须最大程度减少合金元素在铸坯中心的偏析、去除非金属杂质，以及改善凝固钢坯的微观结构，” Grundy 描述道。

“实现这些改进的一种方式是对钢液进行搅拌，”他说（见图 3）。电磁搅拌器在铸坯周围产生强旋转电磁场，使铸坯液芯中的钢液旋转。搅拌器产生的电磁场和钢液流场使用 COMSOL Multiphysics® 进行仿真。为了正确设计电磁搅拌器和生产质量最好的钢材，仿真是关键的一步。由于对清洁度（非金属尽可能少）、甚至是组分（低偏析）和微观结构晶粒的高要求，搅拌对高合金化钢种（如滚



图 3：使用 COMSOL Multiphysics 的 CFD 模块建立的中间包模型（上），以及排空熔融钢液过程中的实际中间包（下）。

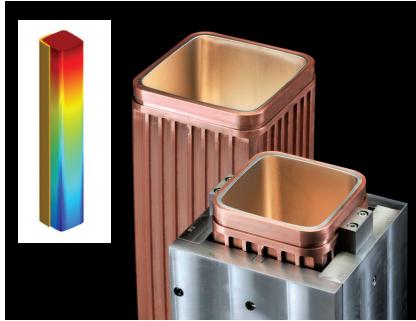


图 4：形成最初固态钢壳的水冷模具铜管是每个连铸机的核心。插图：铜模内的初步凝固和钢壳生长的模型。

珠轴承钢）至关重要。

“基本上，我们面临的大部分问题都必须结合电磁学、液体或气体流动、力学、传热等各种物理领域来进行研究。这就是我们使用 COMSOL Multiphysics 的原因；没有任何其他工具能像 COMSOL 一样无缝地将所有这些物理领域关联到一个单一平台中。”

预测凝固和收缩

炼钢工艺的一个最新发展趋势是在铸钢的铸坯仍处于高温状态时就对它们进行轧制，而不是先将它们冷却然后在加热炉中重新加热。这种工艺称为热装，可以避免热能浪费，但这要求更加准确地了解铸坯是如何凝固的。Grundy 解释说：“铜模是每个连铸机的核心。最初的固态钢壳在其中成形。只有铜管的内部形状完全跟着钢的收缩而变化，小方坯才会没有缺陷，而要进行热装，小方坯表面必须毫无缺陷。”

SMS Concast 团队通过他们的 COMSOL 模型来了解模具内钢的最初凝固过程中发生的复杂换热过程。在所获得结果的指导下，设计了一种新型的模具，可铸造具有大圆角的铸坯（见图 4）。这些圆角可以在铸造之后保持高温，

产生更为均匀的表面温度。这样就可以直接将小方坯热装到轧机，而无需像传统钢厂那样，让它们自行冷却，然后重新在加热炉中使用矿物燃料燃烧加热。

2010 年，台湾东和钢铁成功实施了这种新型的模具设计，这家钢铁厂在完全没有燃气加热炉的情况下运转，产生了巨大的环境和经济效益。这样可以每年减少 4 万吨的 CO₂ 排放，大约相当于二万辆汽车的排放量。

仿真并进行验证

Grundy 总结说：“只要可能，我们都会使用真实世界的结果或物理模型来验证我们的仿真。例如，为了验证我们的中间包流动仿真，一个客户构造了一



Nicholas Grundy 展示了连铸工艺的一个 CFD 模型的仿真结果。

个有机玻璃制作的缩小的水模型，而我们发现物理模型和我们的流动仿真结果很好地吻合。随着对我们模型的信心增长，我们有信心探索更优秀的设计。”这种方法显然非常适合该公司；全球最宽的异型坯（1150 x 490 x 130 毫米）已经在德国的 SMS Concast 连铸机中铸造出来，而有史以来制造的最大圆断面（直径 1000 毫米）将于 2015 年在一家韩国工厂投入生产。■