

# 以磁体提升高能激光束焊接的质量

研究人员在研究静磁场对激光束焊接质量的影响时，仿真帮助他们找到了最佳磁体。

作者：MARCEL BACHMANN、VJACESLAV AVILOV、ANDREY GUMENYUK 和 MICHAEL RETHMEIER（BAM 联邦材料研究与测试研究所）

照片由 BAM 提供

从船舶到反应堆容器，焊接是构建可靠金属结构的最关键操作之一。一旦焊

会有少量金属发生气化。这种熔焊会在工件中形成一个称为锁孔的垂直空腔。在该工艺中，

由于粘度低而具有高度动态行为。再加上高导热性，所产生的焊接熔池会非常宽。焊缝表面会变得不稳定：焊接物飞溅、焊接金属中喷出熔滴，导致凹陷、咬边、弧坑、气孔或开裂——所有这些都会对焊缝的机械性能产生不利影响。如果发生缺料，通常需使用弧焊进行后处理，以填充缺料部位或让焊缝更美观，这是表面质量的一个指标。此外，平滑的焊缝表面在一些行业非常重要（例如食品行业），因为粗糙表面可能会滋生细菌。

“这种焊接工艺极其复杂，得益于 COMSOL Multiphysics，我们设法获得了精确的结果。”

缝出现问题，往往整个结构都会出问题，对焊缝质量的期望空前高涨。诸如焊接之类任何使用局部热源的工艺都可能导致变形。过厚金属构件的焊接工艺本身就不稳定，无外力时几乎不可控。

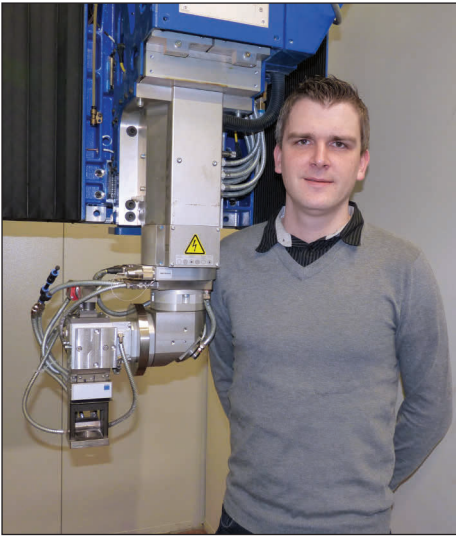
激光束不仅会熔融金属，而且会产生气体。弥散的气体会对熔融金属施加压力，并部分取代它。与此同时，材料会继续熔融，产生一个围绕着熔融金属的深而窄锁孔。当激光束沿焊缝前进时，锁孔会随之穿向工件。熔融金属将绕锁孔流动，并在其路径上发生凝固。产生一个具有均一内部结构的深而窄的焊缝。

不受控焊接工艺的一个副作用是从焊道中喷射的熔滴。这些熔滴会使该工艺变“脏”，导致焊缝在冷却后缺料。其次，热毛细作用会

## 制造锁孔

在高能激光束焊接中，在激光强度最大的区域，

在铝的深熔焊接中，众所周知的问题是熔体



Marcel Bachmann 是德国柏林 BAM 联邦材料研究与测试研究所的一名研究人员。图中他站在一台激光束焊接机前。

导致焊缝不均匀，它可能会导致工件残余应力和 / 或变形。焊接熔池的一部分会由于表面张力和电磁力的作用而移动，从而在焊接熔池的不同部位产生不均匀的材料分布和不同的凝固速率。在焊道凝固之后，由于不均匀分布和冷却时间不同，可能会引起材料组成不一致。

## 减慢熔融速度

是否能消除这些影响？在 German Research Foundation 的资助下，BAM 正在研究各种控制和降低这些影响的方法。对于这种特定情况，我们对激光焊接工艺施加静磁场。借助 COMSOL Multiphysics，我们已经确定了改善焊缝均匀性所需的磁场分布。

特别是，我们希望降低热毛细效应的影响。在焊接表面，激光束冲击金属的位点存在极高的温度，并且温度随着焊缝距离的增加而迅速下降。由于表面张力随温度而变化（热毛细作用），所产生的高温梯度会导致金属从焊接熔池中心流向外边界。我们的目标是形成完美的

焊缝，这意味着我们需要抑制这种流动，使能量进入熔池的深度方向，而不是在表面上散布。

可以想象，完美的焊缝将具有平行的侧壁，凝固在各深度同时发生。未施加外力的实际焊缝常具有酒杯形状（图 1a），凝固前沿具有大曲率。在冷却后，这会在工件中产生较大应力，以及相对较大的变形。但是，当在垂直于焊接方向施加静磁场时，焊缝会具有更类似于 V 形的均匀形状（图 1 b-d），这更接近所需。

改变焊缝形状的这种能力来自于 Hartmann 效应。具体来说，对于熔融金属等导电液体，磁场会感应产生电流，而电流会产生洛伦兹力场，力场的一个分量与原始熔体流动方向相反。

为了模拟这种效应，我们在三维传热、流体动力场和电磁场下进行仿真，使用了 CFD 模块和 AC/DC 模块。首先，我们模拟电磁场来计算洛伦兹力；然后，以其为体积力来计算焊接熔池中湍流的速度和压力。这使我们能够计算传热，其速度场来自先前的湍流仿真。当然，温度会影响材料性质，所以我们要回头重新计算洛伦兹力，该力也会随流动速度而变化。不断进行这个循环，直至仿真达到所需精度的稳态解，此时的解是自洽的，即满足涉及到的所有物理场。

为了验证该模型，我们获取了在有磁体和无磁体情况下的实际焊缝，切开并抛光截面。和仿真结果对比，它们具有良好的吻合度（图 3）。这种焊接工艺极其复杂，得益于 COMSOL Multiphysics，我们设法获得了精确的结果。

在我看来，COMSOL 的优点包括友好的界

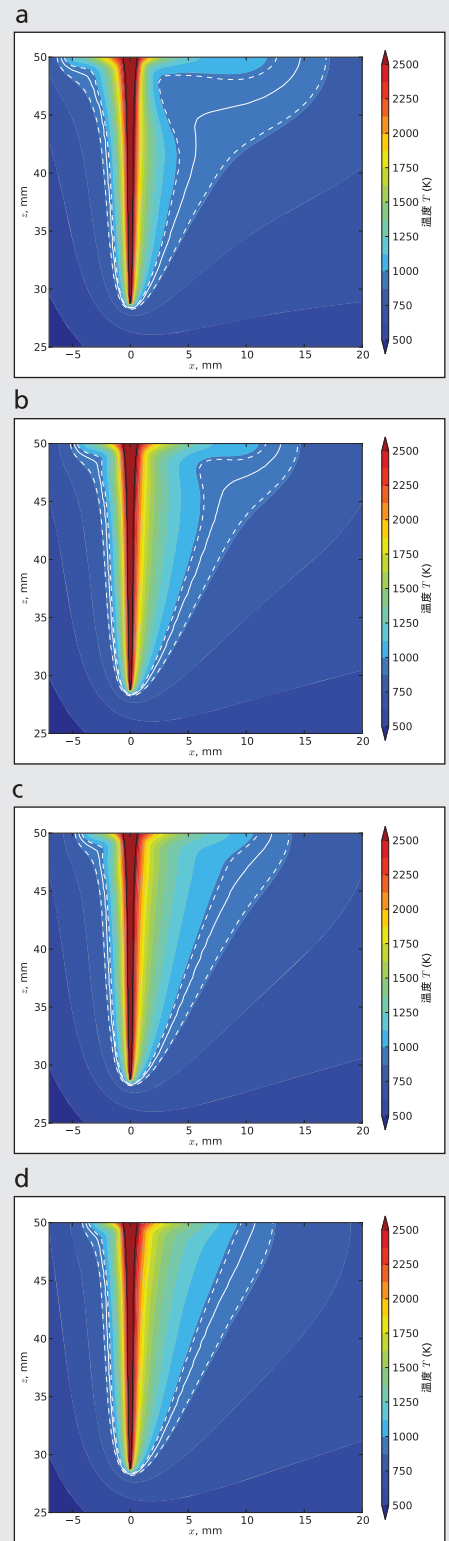


图 1：焊缝对称部分的温度图显示，在未施加任何磁场时 (a)，焊缝具有酒杯形状。加上磁场 ( b = 0.50 T, c = 1 T, d = 2 T ) 之后，形状开始具有 V 形。

面、非常舒适的几何构建和网格剖分操作，以及预置的多物理场模块——而且还支持手动调整和根据具体情况进行修改。比如，可以通过实验数据点或解析表达式的方式设置材料属性随温度变化，以源项形式模拟凝固速率，设置重力效应，以及熔化的潜热。在计算中可以轻松地考虑所有这些方面。

该软件能够轻松提供源于各个物理场的所有变量，对此我们也很高兴。例如，我们只需单击鼠标就可以让流体物理场知道在焊接熔池中发生作用的体积力是洛伦兹力。这只是一个示例，却可以扩展到我們可能需要的所有当前和未来的多物理场耦合。

得益于 COMSOL Multiphysics 仿真，我

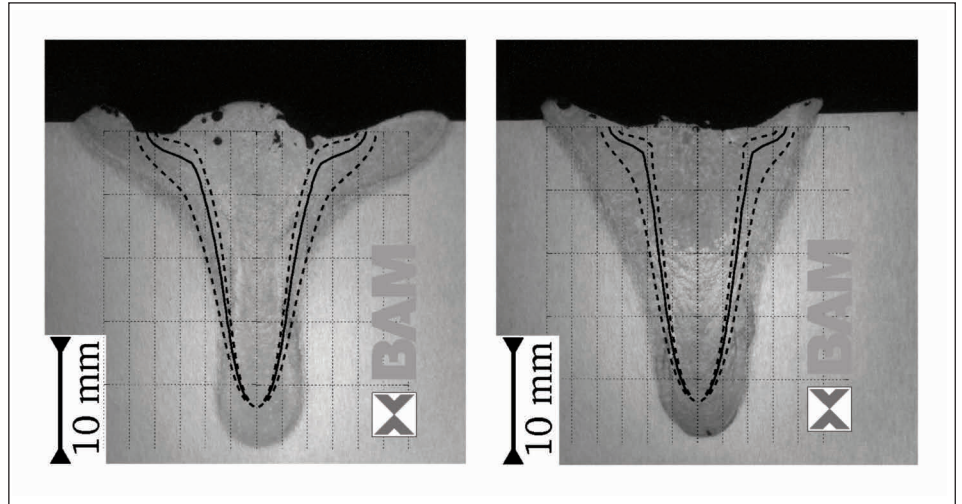


图 2：在焊接速度为 0.5 米/分钟、激光功率为 16 kW 下获得的实际焊缝的照片，叠加了 COMSOL Multiphysics 结果。左图显示了未施加任何磁场时的焊缝，以及所产生的酒杯形状。右图显示了  $B = 0.5 \text{ T}$  时的情况，焊缝更趋于 V 形与直侧边，不同于左边的酒杯形状。

们确定了底层的效应，现在知道该如何消除它们。下一步是了解如何将这种知识付诸实践。我们已经确定了怎样的磁场可以提高这种焊接

工艺的质量，我们将进一步用实验来重新定义整个焊接工艺。

## 实际上机操作的免费多物理场仿真 Workshop

参加免费的建模讲习班，观看 COMSOL Multiphysics 现场演示。我们讲习班的理念是通过动手来学习。我们的目标是教您掌握 COMSOL Multiphysics 中构建模型所需的技能。赶快加入我们，参加这种独特的动手体验。

所有参与者都可以试用两周 COMSOL Multiphysics。

查找您附近的 workshop: [www.comsol.com/workshops](http://www.comsol.com/workshops)

