

轻便、坚固、零缺陷的激光焊接： 完善汽车工业的工艺流程

在降低排放量、提高驾驶安全性的同时，还要保持成本低廉，汽车工业当前正面临着向环保汽车转型的挑战。安赛乐米塔尔 (ArcelorMittal) 公司的工程师们正着手优化汽车设计中对材料的使用，使设计既能符合安全标准，又能减轻对环境的影响。

作者 **LEXI CARVER**

在顾及产品的安全性及对环境影响的同时，还要控制设计的成本，汽车制造商在产品开发过程中需要考虑的因素之多，令人震惊。对于不断提升的驾驶安全标准以及越来越受关注的减排和成本控制，车辆的设计和车身重量是能够对上述关注点产生重要影响的两大因素。

汽车制造商依靠激光拼焊板 (laser welded blank, 简称 LWB) 来控制或减少车辆各部件 (如车架和车身) 的材料用量。LWB 是由厚度和等级不同的钣金组成，参见图 1 中的 LWB 应用示例。在满足其他相关规定的同时，这些焊板还必须符合车辆碰撞安全性的要求。

安赛乐米塔尔 (ArcelorMittal) 是一家生产高强度优质钢的公司。这家公司利用数值仿真不断优化 LWB 焊接工艺，通过寻找焊接钢板的等级和厚度这两项参数的最优组合，使他们制造出的焊板既能保证优良的性能，又可将零件的重量减至最轻。

» 符合碰撞和排放要求

“通过采用先进的高强度压力硬化钢，我们对钢板的安装进行了优化，从而使汽车的特定区域在保持强

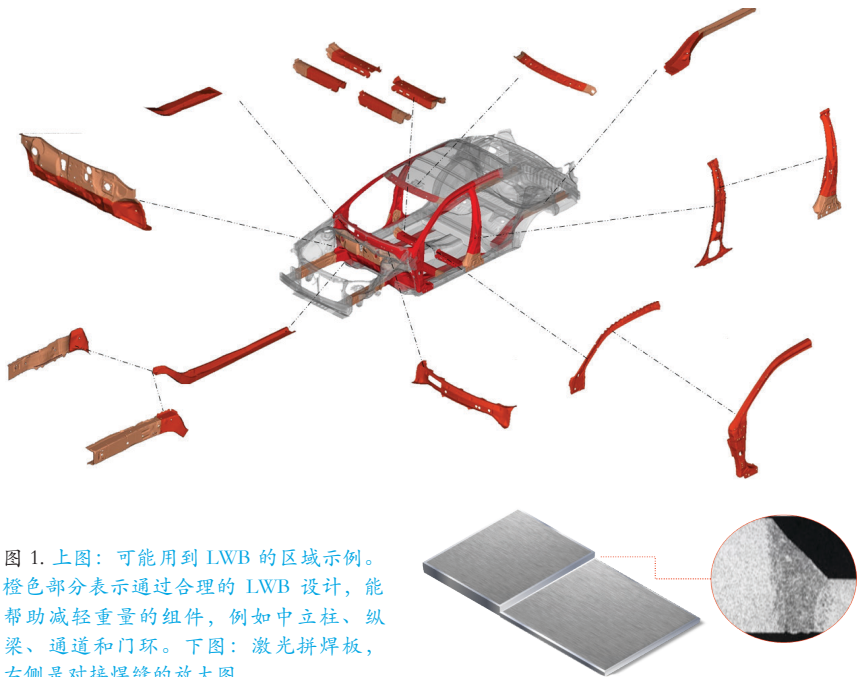


图 1. 上图：可能用到 LWB 的区域示例。橙色部分表示通过合理的 LWB 设计，能帮助减轻重量的组件，例如中立柱、纵梁、通道和门环。下图：激光拼焊板，右侧是对接焊缝的放大图。

度性能的同时更加轻薄。最终，我们期望获得卓越的焊接质量，以确保焊接符合碰撞测试的安全要求”，安赛乐米塔尔公司焊接过程建模及仿真研究团队的负责人 Sadok Gaied 博士如是说。一个安全的焊接不能在测试过程中发生断裂或折断，否则焊接件将无法通过安全性测试。

安赛乐米塔尔公司利用激光焊接的集中热源将固态钢转变成熔融金属，用来形成窄而深的焊缝，激光焊接过程见图 2。“大功率激光器可以产生大量的能量，致使部分金属蒸发。钢在熔化过程中，密度会迅速减小，体积会相应增加，并且物质运动也会增强，从而产生高压蒸气。这时会生成一个‘匙孔’，它是

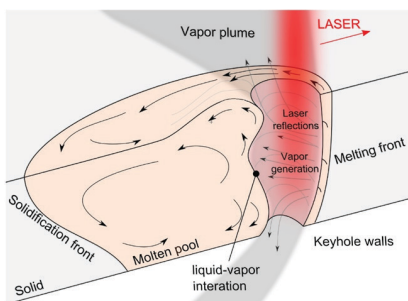


图 2. 激光焊接过程中的匙孔和钢水池。当激光沿两块钢板之间的焊缝移动时，匙孔也会随之移动，在此过程中，钢水会不断注入匙孔周围和后部的空间。图注：Vapor plume - 蒸气羽；LASER - 激光；Laser reflections - 激光反射；Vapor generation - 蒸气发生；Melting front - 熔化前沿；Keyhole walls - 匙孔壁；liquid - vapor interaction - 液体 - 蒸气相互作用；Molten pool - 熔池；Solidification front - 凝固前沿；Solid - 固态

激光冲击点上的一个窄孔。”Gaiied 解释道，“这个孔周围的钢会熔化，形成一个熔池。液态钢冷却后，就会将两块钣金连接起来。”

“多数机械故障发生的根本原因在于焊缝中存在缺陷，这是因为焊接点连接着不同的材料。如果连接的处理不当，最终会导致其中的应力过大。”焊接参数不当还可能造成焊接点不稳定，导致焊缝中出现气孔、部分熔透或咬边，最终造成连接不牢固。图 3 显示了不同焊接缺陷的示例。

“我们可以测试工作条件对缺陷发生概率的影响，而且还能预测流体动力学、热力学行为和焊接点的最终形态。”

— SADOK GAIED, 安赛乐米塔尔公司项目经理

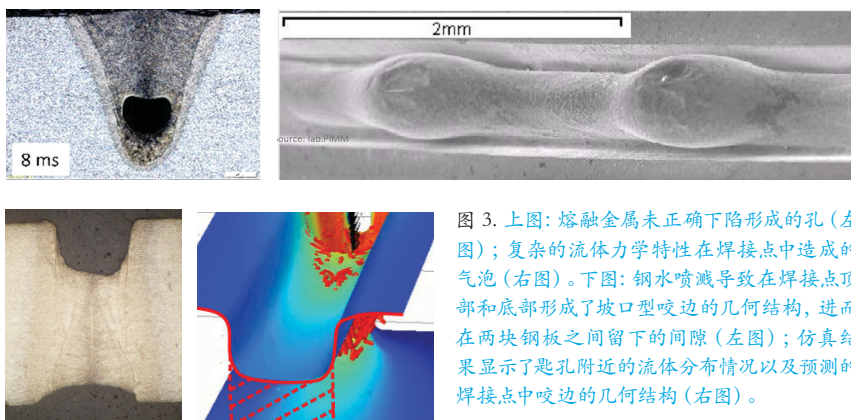


图 3. 上图：熔融金属未正确下陷形成的孔（左图）；复杂的流体动力学特性在焊接点中造成的气泡（右图）。下图：钢水飞溅导致在焊接点顶部和底部形成了坡口型咬边的几何结构，进而在两块钢板之间留下的间隙（左图）；仿真结果显示了匙孔附近的流体分布情况以及预测的焊接点中咬边的几何结构（右图）。

Gaiied 补充道：“为了预测各种焊接情况中可能存在的缺陷，我们用仿真来研究诸如激光功率等参数对焊接结果的影响。通过这种方式，我们可以虚拟测试加工条件对缺陷发生概率的影响，并且还能预测焊接过程中的流体动力学、热力学行为以及焊接点的最终形态。”

了解工作条件如何影响焊接质量

在影响焊接质量的诸多因素中，激光功率、材料对激光束的反射、焊接速度及波长等细节都会对匙孔周围的传热、相变和流体流动产生影响。特别是由于存在相变和热载荷，匙孔角度和熔池形状会对流体流动特性产生较大的影响。

“流体、热力学和电学行为在这里交织在一起。”Gaiied 说，“只有清楚地了解焊接中发生的具体情况，才能防止这些缺陷的产生。我们需要将所有的物理现象放在一起研究，才能跟踪匙孔内部及周围的流体流动，并明确地知道其对焊接稳定性产生的影响。”

Gaiied 的团队与南布列塔尼大学

的 Mickael Courtois、Muriel Carin 和 Philippe Le Masson 合作，使用 COMSOL Multiphysics® 软件分析了钢水和固态钢中的温度分布、匙孔角度以及流场在整个焊接工艺中的变化情况。他们使用 COMSOL® 软件在同一仿真模型中进行了多项研究，从电磁模型开始着手，根据激光反射角确定了反射和材料的能量吸收特性（见图 4）。

不仅如此，他们还测试了改变功率水平、波长和焊接速度，用于预测各种工况下的匙孔形状。由于这个模型模拟了金属熔化时的传热和相变情况，因此，团队成员能够使用该模型分析焊接过程中产生的蒸发现象、液体-蒸气界面的流体动力学，以及熔池的扩大情况（如图 5 所示）。

对耦合现象的建模揭示了最终的焊接结果

为了预测焊接点的最终形态，Gaiied 的团队和来自南布列塔尼大学的研究小组在前期研究的基础上，根据焊接速度、激光功率及匙孔大小这三个参数，对焊接熔深进行了建模。

高质量焊接需要对钢板全熔透。当能量密度有限、功率过低或焊接速度较快时，将会发生局部熔透。局部熔透会引起材料咬边，最终在两块焊板之间留下间隙。图 6 显示了焊接熔深和焊接缺陷形态的 COMSOL 分析结果与实验结果的对比。

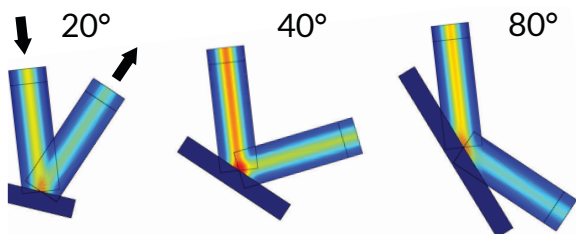


图 4. COMSOL® 软件运行的激光反射仿真结果显示了不同反射角下的电场模，这些不同的反射角导致吸收的能量大小也各不相同。

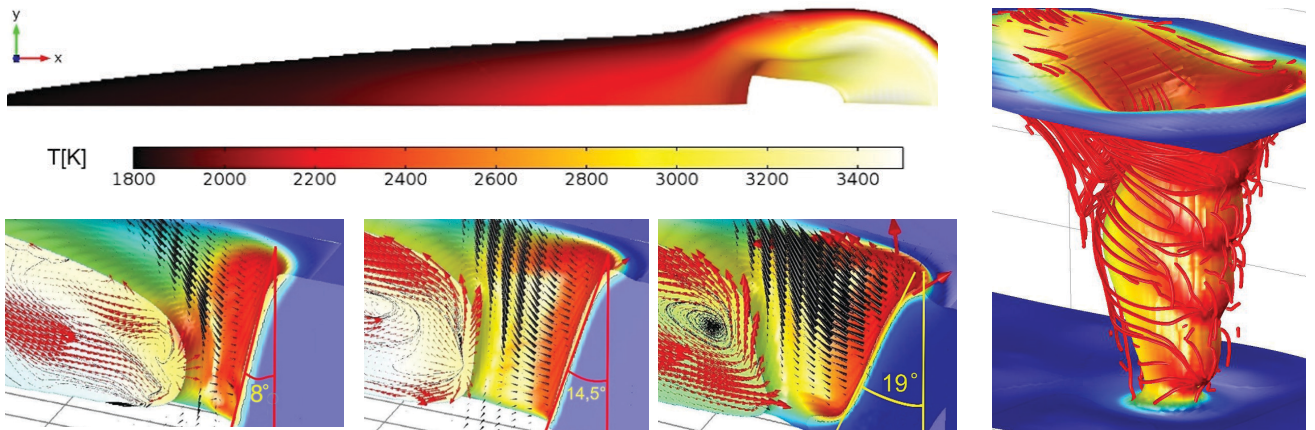


图 5. 左上图：匙孔周围流动钢水的温度场。左下图：不同焊接速度下的毛细管倾角（匙孔角度）及周围金属的温度场结果，箭头表示熔池和匙孔中的流体流动。右图：匙孔形成过程中，其周围的流体流动三维视图。^[1]

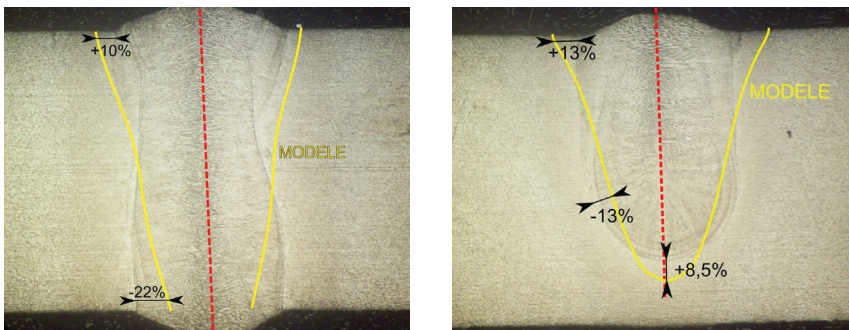


图 6. 焊接熔深和焊接缺陷形态的 COMSOL 分析结果（黄色曲线）与实验结果的对比如。左图和右图分别为当激光功率为 4 kW、焊接速度为 6 m/min 和 8 m/min 时的焊接熔深。速度较慢时可实现全熔透，说明熔敷能量密度足够高。速度较快时仅仅实现了局部熔透，说明能量不足，无法达到高质量的焊接。^[2]

» 不断完善的焊接技术以确保安全与减排要求

为客户提供合适的激光拼焊板，需要选择正确的焊接参数组合。通过调整钢板的等级和厚度才能为客户供应符合汽车碰撞测试规范、重量要求以及成本要求的激光拼焊板。Gaided 的团队通过仿真来确定一系列工艺条件，以确保生产出无缺陷的焊接点。

“了解这些相互作用的物理现象，并将它们耦合起来进行仿真，而不是并行进行多个研究，这给我们的工作带来了极大的便利。” Gaided 总结道，“我们一直致力于帮助汽车行业减轻车身重量，并确保我们的焊接产品拥有卓越的质量，从而保障驾驶员在驾驶汽车时的安全。”



从左到右依次为：安赛乐米塔尔公司的 Sadok Gaided，南布列塔尼大学的 Philippe Le Masson、Mickael Courtois 和 Muriel Carin。

“我们一直致力于帮助汽车行业减轻车身重量，并确保我们的焊接产品拥有卓越的质量，从而保障驾驶员在驾驶时的安全。”

— SADOK GAIED, 安赛乐米塔尔公司项目经理

参考文献

¹ M. Courtois, M. Carin, P. Le Masson, S. Gaided, M. Balabane. Guidelines in the experimental validation of a 3D heat and fluid flow model of keyhole laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics* (2016), 49 (15)

² M. Courtois, M. Carin, P. Le Masson, S. Gaided, M. Balabane. A new approach to compute multi-reflections of laser beam in a keyhole for heat transfer and fluid flow modeling in laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics* (2013), 46 (50)