本文根据上汽大众某项目的实际情况，介绍了车顶超高速激光钎焊的工艺方案和设备性能。据此，对焊接参数和焊缝缺陷的形成进行了深入解读，旨在揭示实现 110 mm/s 速度下激光钎焊所需的前提条件和调试方法，以及相关的经验数据。本文展示了项目实验过程和研究成果，并对这一课题进行了总结。

上汽大众汽车有限公司 冯翰章

白车身超高速激光钎焊技术探索

随着上汽大众 SUV 车型家族的扩大，越来越多的长车顶引入生产线，同时对产能需求的提升，导致传统激光钎焊的焊接速度成为了瓶颈。而建造两条车顶激光焊平行线，不仅投资更高，而且需要更多的操作工和占地面积，经济性很低。因此，在质量标准不变的前提下，提升激光钎焊工艺的速度成为一个亟待攻克的难题。经计算，只有当焊接速度达到 110 mm/s 才能满足某电动车项目工位节拍要求。

关键环境搭建

通过对相关文献、车间现场和德国大众相关经验的调研，激光功率、送丝精度及后道打磨，对焊缝的成型至关重要。因此，在方案规划阶段就相应选择了一批高规格的设备，包括首次应用的 7 kW 二极管激光源，实测送丝比达到 96% 的高精度送丝设备，带自适应焊缝跟踪功能的 ALO 3 激光镜组，以及能对打磨下压力实现精确控制的自适应打磨设备。这些技术的使用有效保证了在高速焊接工况下的焊缝质量和稳定性。

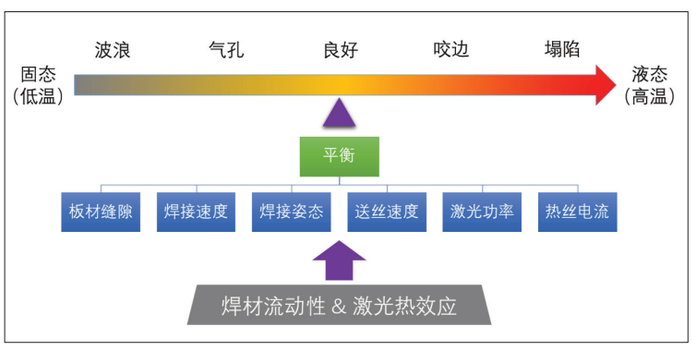

图 1 参数与焊缝缺陷关联图

工艺参数与焊缝质量

激光焊参数的调试和质量优化，本质上主要围绕着焊材的流动性和激光的热效应两个因素展开。如图 1 所示，在满足焊缝厚度的前提下，只有当这些参数达到平衡时才能获得较好的焊缝状态。因此，了解焊缝缺陷与各项参数的关系对焊缝质量的优化极为重要。

1. 零件匹配的影响

车顶与侧围外板之间的间隙，根据大众标准，最大不能超过 0.2 mm，且 0 mm 最佳。另外，间隙值波动的情况也是一大负面因素。如果间隙值变化过快，超过设备可以适应的程度，如图 2 所示，就会发生咬边（焊缝边缘锯齿状）的现象，这在高速焊接时尤为明显。因此，对零件匹配状态的确认是进行焊缝质量优化的第一步。

2. 热源使用策略

在两种焊丝加热的方式中，激光作用于焊丝被照射部分。因此，如图 3 所示，焊丝横截面中，上部温度总是较高，优先融化，流动性相比下部更好。热丝机采用电阻加热原理加热焊丝，截面上温度分布较均匀。而通过观察成型的焊缝截面可以发现，即使是零件间隙为 0，焊缝底部也是悬空的，而上表面焊材需要充分、均匀地流淌、展开。因此，理想的焊接过程需要焊丝上表面的流动性大于底部，底部流动性低有助于形成有力支撑，防止焊缝下陷造成咬边，甚至塌陷。

实验结果表明，较低的热丝电流更有益于焊缝的成形质量，避免咬边的发生，且可以一定程度上缓解间隙不稳定对其造成的负面影响。事实上热丝电流对焊丝终端温度的影响是非常明显的。

40-50 车身制造工程.indd 44 2023/1/31 9:40:58

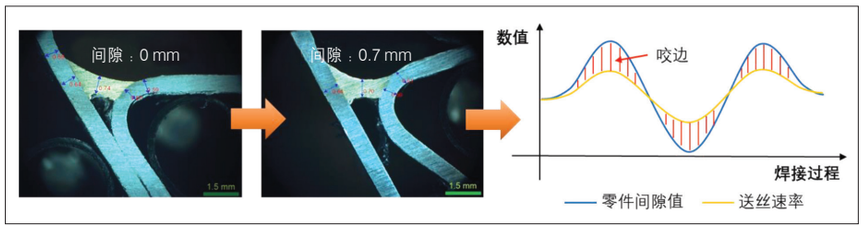

图 2 零件匹配间隙波动对焊缝的负面影响

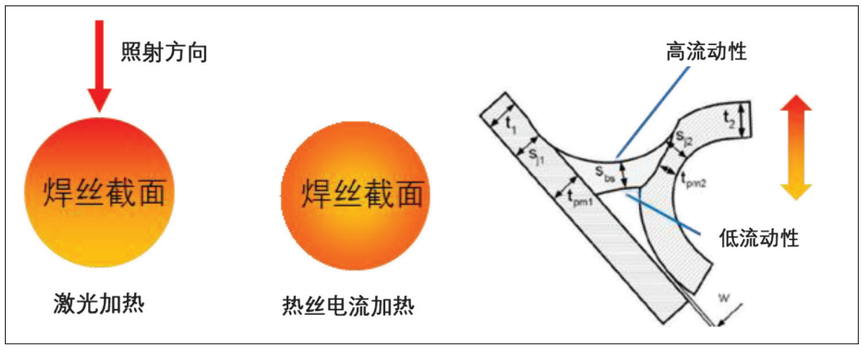

图 3 激光照射与电流热丝的区别

结合现场调试经验，110 mm/s 的焊接速度，建议热丝电流不高于 40 A，在激光功率足够的情况下甚至可以关闭热丝功能，激光功率为 5300 W 左右。

3. 气孔的发生与应对

焊缝表面气孔的产生，主要源于镀锌层和油污、杂质等受到激光加热后汽化所致。这里主要讨论镀锌层汽化的问题。

在焊接过程中，由于焊缝熔池的降温固化主要依靠搭接的金属板材散热，因此理论上，熔池在完全凝固前将焊接过程中渗入的锌蒸气排出即可。所以，处理好气孔问题，关键在于控制好焊材的流动性和镀锌层的蒸发量。

首先，需要确认焊丝处于光斑居中位置。如图 4 所示，光斑如有偏移，一方面会导致相同功率下焊丝受热不足，影响焊材流动性，降低气体排出速率；另一方面，会使单侧板材集中受热，造成镀锌层大量蒸发。二者因素叠加，极易产生气孔缺陷。

其次，在金相检验达标的基础上减小焊缝厚度，减小气孔的排出行程。多次实验结果表明，适当减小送丝量可以改善焊缝成形的稳定性以及表面质量。

最后，如果出现图 4 所示的排气孔的情况（一般更靠近车顶），且焊丝和光斑位置也检查无误。可使激光镜组向侧围外侧（y 向）倾斜，减小车顶侧的照射功率。

4. 焊接姿态

在焊接过程中，机器人的姿态也对焊缝的成形状态起着不可忽视的作用。如图 5 所示，可分解为拖拽角和侧向角两个部分。

（1）拖拽角

送丝管的出丝方向与钣金角度越大，熔池中焊材的湍流现象越为明显，容易出现焊缝波浪。另一方面，由于当前

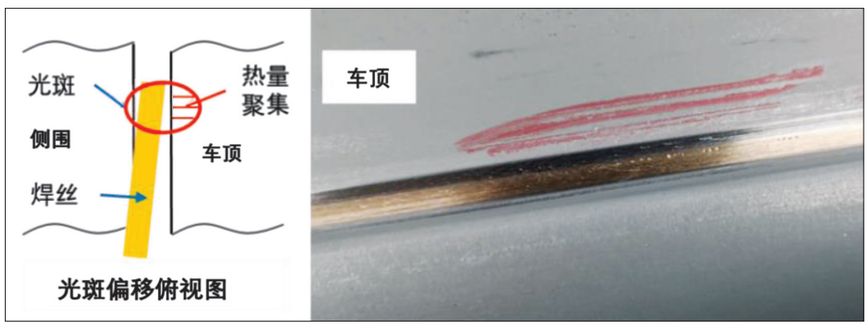

图 4 光斑位置对焊缝质量的影响示意图

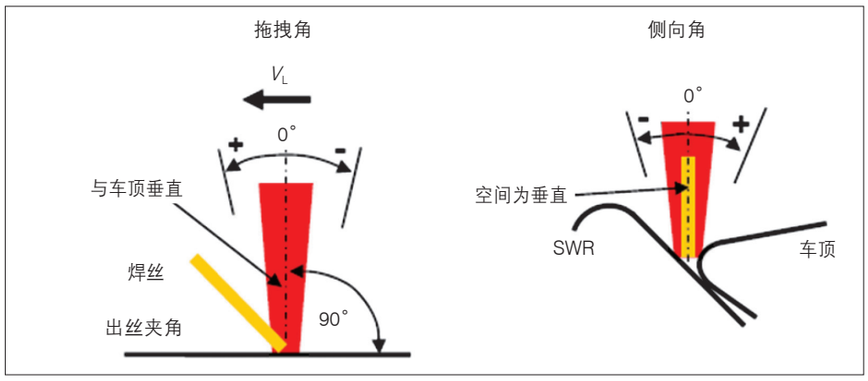

图 5 拖拽角与横向角的定义

40-50 车身制造工程.indd 45 2023/1/31 9:40:59

使用的 ALO 3 激光镜组出丝角与激光入射角绑定，减小出丝夹角的同时，也会导致激光照射到焊丝和钣金后的反射量急剧增加，降低了实际的输入热量。

当前 110 mm/s 速度的激光焊工艺，出丝方向与板材夹角为 42°，对应拖拽角为 3°，能够满足质量要求。

（2）侧向角

侧向角主要与焊缝横截面的形状相关。如图 6 所示，激光镜组角度向焊缝左侧倾斜则焊材也会向左侧堆积。如果送丝量不变，焊缝右侧会相应变薄，增加了金相检测不合格的风险。当然，如确有需要，可以在此基础上适当增加送丝量和激光功率。原则上，建议使用较小的侧向角，可以使焊缝更加匀称的同时，节约焊丝辅料和激光能源消耗。

5. 连接强度与送丝速度

保证焊接强度是质量优化的前提。前文提到，适当减小送丝量可以改善焊缝成形的稳定性和表面质量，而这也意味着焊缝变薄。110 mm/s 的速度究竟需要多大的送丝速度，以及如何在减小送丝量的情况下还能通过金相检验，也是本课题重点探究的问题之一。

图 7a 所标注的各符号即金相实验所关注的指标，评判标准如下：

1）t_1,t_2: 与焊缝搭接的左右两侧板材厚度，为金相实验的基础输入信息。

2）S_{bs}: 打磨后焊缝横截面最薄处的厚度。$S_{bs} \geqslant 0.8\,t_{min}$（即 t_1, t_2 中最薄的值）。

3）S_{j1},S_{j2}: 焊缝与两侧板材最上部搭接点的板材厚度。$S_{j1} \geqslant 0.8\,t_1$ 且 $S_{j2} \geqslant 0.8\,t_2$。

4）T_{pm1},T_{pm2}：板材经激光和焊缝烧蚀后搭接面的残留厚度。$T_{pm1} \geqslant 0.5\,t_1$ 且 $T_{pm2} \geqslant 0.5\,t_2$。

对于 S_{bs} 和 S_j，以实验车型为例，车顶和侧围外板板厚 0.7 mm，所以 S_{bs} 和 S_j 大于 0.56 mm 为合格，如图 7b 所示。图 7c 和图 7d 分别为焊缝搭接处板厚过薄及焊缝过薄的案例。

为确定合适的送丝量，我们进行一个研究送丝速度与焊缝厚度关系的实验。如图 8 所示，一共 6 组数据，送丝量从 6.1 m/min 等量增加到 7.1 m/min，在保证侧围和车顶最小间隙为 0 的前提下，左右两侧各取 14 段试片送金相室检测。

图 8 中，菱形点和圆点分别为每组 28 个金相试片 S_{bs} 值的平均数与中位数。点画线为平均值的线性趋势线。实线为 S_{bs} 值合格线，即 0.56 mm。可以看到，当镜组侧向角不变，随着送丝速度的逐步增加，最小焊缝厚度 S_{bs} 值也呈线性增长。

此外，将侧向角减小 6°，得到了图 8 中的虚线修正值数据。这表明 6° 的侧向角可以造成焊缝 0.07 mm 的厚度差异。由此可见，侧向角的调整对金相结果有着明显的影响。

经分析，以上每组实验数据 28 个试片 S_{bs} 值的上、下四分位数均为 15% 左右。所以，参考 ±15% 的波动量以及实际的现场调试经验，以 110 mm/s 速度焊接，送丝速度设置在 6.6 ～ 6.9 m/min 之间较为合理。

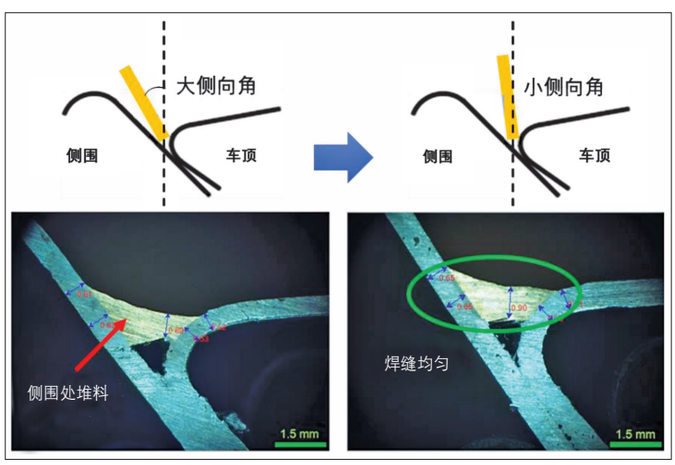

图 6 相同送丝量下侧向角与焊缝横截面形状的对应关系

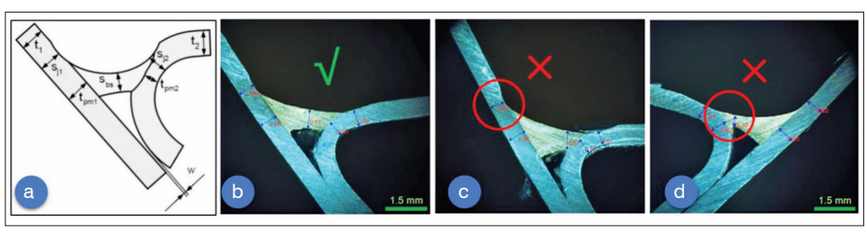

图 7 金相标注图与实拍图片

40-50 车身制造工程.indd 46 2023/1/31 9:40:59

6. 缺陷的统一性

综上所述，焊材的流动性和激光的热效应对于焊缝缺陷的生成是内在统一的。受热温度由低到高，机理如下：

1）焊丝在初始的固体状态下受热升温液化。如果热量输入不足，熔池在完全展开前就凝固了，则会在表面出现凹凸不平的波浪和鱼鳞纹。

2）持续加热的同时，板材镀锌层也持续蒸发。如果熔池流动性不足，在内部锌蒸气排放完毕前凝固，那么残留在焊缝内部的气孔就会在打磨后显露在表面。

3）温度继续升高后，焊料流动性愈发充裕，开始有了下坠的趋势。如果流动性过剩，原本与板材搭接，还未完全凝固的焊材开始剥离，并在轻微下陷的过程中冷却固化，则会出现咬边的情况。

4）当焊丝过度受热，则焊缝完全塌陷，过程中已经与板材接触的部分会产生挂壁的现象。所以，只有处理好这些因素，使之达到一个平衡的状态，才能形成良好的焊缝外观。

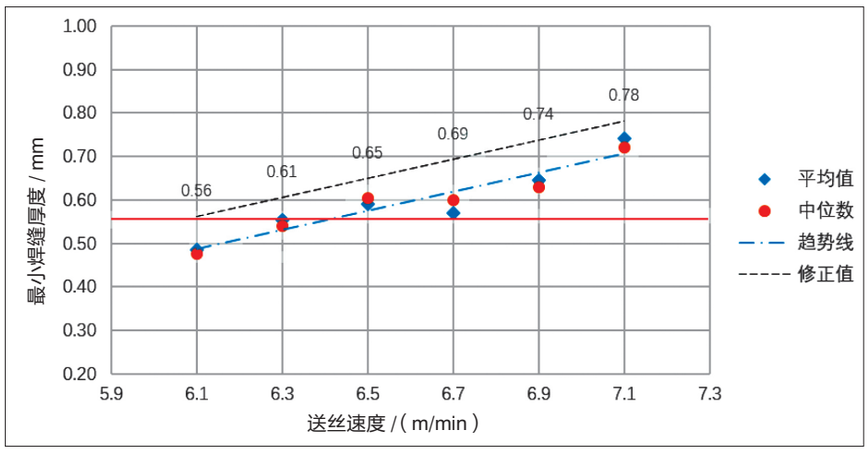

图 8 送丝速度对应焊缝厚度散点图

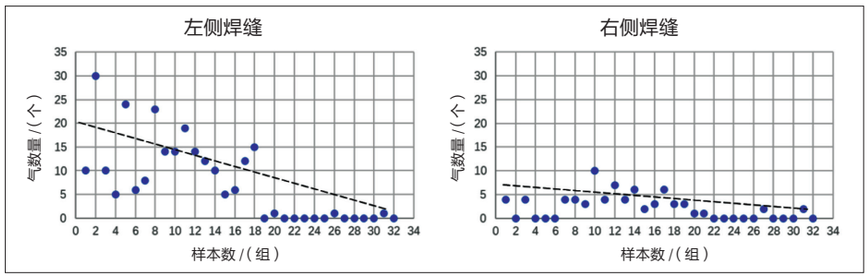

图 9 激光焊调试气孔数量趋势图

实验结果

本次超高速激光焊的课题，在现有设备及保证零件匹配间隙最小处为 0 的前提下对焊接速度、焊接姿态、送丝速度、激光功率及热丝电流进行研究和优化，并以气孔数量作为主要量化指标评判整体质量，与咬边这种在一定程度上能通过打磨处理的缺陷不同，气孔问题因其难以返工的特点，每个项目都备受关注，实验结果如图 9 所示。

整体来看，对 110 mm/s 高速激光焊成败起关键作用的主要是零件匹配、焊丝加热方式和焊接姿态这三个控制因素。图 9 中，左侧焊缝之所以状态一直不及右侧，主要还是零件间隙不稳定所致。经过不懈的探索和实践，焊缝质量最终达标，并通过白车身奥迪评价与线体压力测试，满足报交要求。

总结

白车身车顶激光钎焊工艺，由于其一次成型、难以返工、对工艺参数异常敏感以及质量优化难度大等特点，一直是整个车身车间的重点工艺，为提升焊接效率，增加产能，提升激光焊接速度势在必行。在硬件上，上汽大众电动车项目采用了迄今为止最高配置的设备组合，保证了工艺的稳定性和可控性。软件上，参数的调试尤为重要，因为当焊接达到 110 mm/s 这样的高速时，任何缺陷或者隐藏的问题都会被放大，显露无疑。所以，针对激光焊焊缝强度以及表面的四大缺陷，波浪、气孔、咬边和塌陷问题必须进行深入的研究，了解它们发生的原理与设备的关联性，有了统一的认识后才能做好各项参数的平衡工作。本项课题在试图实现 110 mm/s 车顶高速激光钎焊工艺的同时，也为获得相关经验数据做了大量的基础性实验工作。相信对今后项目中激光焊技术的发展具有良好的促进作用。AI

40-50 车身制造工程.indd 47 2023/1/31 9:41:00