

汽车车身激光焊接技术的现状与发展趋势

汽车产业的迅猛发展加速了汽车制造技术的不断创新、发展和应用。汽车车身作为汽车其他零部件的载体，其制造技术和制造水平直接决定了汽车整体的制造质量。在汽车车身制造过程中，焊接是重要生产工序。目前用于汽车车身焊接的焊接技术手段主要包括电阻点焊、MIG和 MAG 焊接以及激光焊接。其中，激光焊接从 20 世纪 80 年代开始应用于汽车车身焊接，之后随着汽车行业对汽车生产效率和生产质量要求的提升和激光技术的不断发展，激光焊接技术逐渐成为汽车车身焊接的核心技术。

激光焊接技术作为光机电一体化的高级焊接技术，与传统的汽车车身焊接技术相比具有能量密度高、焊接速度快、焊接应力及变形小、柔性好等优势。汽车车身结构复杂，车身部件以薄壁、曲面构件为主，汽车车身焊接过程面临车身材料变化、车身部件厚度不一、焊接轨迹及接头形式多样化等焊接难点，同时对焊接质量和焊接效率有很高的要求。通过探索合适的焊接工艺参数，激光焊接能保证汽车车身关键部件焊接的高疲劳强度和冲击韧性，从而保证车身焊接质量和使用寿命，满足汽车对安全性能需求的日益提升；激光焊接技术能适应不同接头形式、不同厚度以及不同材料类型的汽车车身部件焊接，满足汽车车身制造过程的柔性化需求。因此，激光焊接技术是实现汽车产业高质量发展的重要手段。

本文首先介绍了激光焊接在汽车车身焊接中的应用，然后主要从汽车车身激光焊接工艺、汽车车身激光焊接智能化技术两个方面介绍

汽车车身激光焊接技术的主要研究现状，最后对汽车车身激光焊接技术的发展趋势提出分析。

一. 汽车车身激光焊接工艺

汽车车身主要由两大部分组成，分别是车身框架和车身蒙皮。其中，车身框架主要包括上边梁、下边梁、纵梁、横梁、立柱等部件；车身蒙皮主要包括顶盖、侧围、隔板、翼子板、前后车门盖等部件。通过将车身框架部件和车身蒙皮部件焊接在一起，形成完整的汽车车身。当前主流汽车制造过程中，其车身材料仍主要使用金属材料，主要包括钢、铝合金、镁合金等，此外复合材料有少量的应用。汽车车身各部件常用金属材料如表 1 所示。

Materials of automotive body	Type of material	Material Features	Application
Steel	General steel	Low hardness, low tensile strength	Fenders, bumpers, etc.
	Special Steel	High tensile strength	Exterior body panels, wings, doors, roof, side panels, etc.
Aluminum alloy	Al-Mg	High tensile strength, High elongation, Good fatigue strength	Body frame, hood outer panel, doors, top cover, seats, wings, etc.
	Al-Mg-Si	Good corrosion resistance, oxidation resistance and processability	
Magnesium alloy	Mg-Al-Zn	High specific strength, good workability, good absorption of vibration and shock	Steering wheel skeleton, Seats, etc.
	Mg-Zn-Zr		

表 1 汽车车身常用金属材料

Table 1 Commonly used metal materials for automotive body

汽车车身焊接过程中针对不同车身材料和不同接头形式使用不同的激光焊接工艺。目前应用在汽车车身焊接领域的主要激光焊接工

艺包括激光深熔焊、激光填丝焊、激光钎焊以及激光电弧复合焊接。几种不同的汽车车身激光焊接工艺特点如表 2 所示。

Process Characteristics	Laser deep penetration welding	laser wire filling welding	laser braze welding	Laser-arc hybrid welding
Laser power	Higher	High	Low	Low
Welding speed	Faster	Slow	Fast	Faster
Welding stability	Unstable	Stable	Stable	Stable
Gap Tolerance	Low	High	High	High
Application	Top cover, door cover, body frame, etc.	Door cover, battery housing, etc.	Top cover, door cover, body frame, etc.	Door cover, top beam, etc.
Component Materials	Steel, aluminum alloy	Steel, aluminum alloy	Steel, aluminum alloy	Steel, aluminum alloy
Joint form	Overlap, corner joint	Overlap, corner joint	Overlap, corner joint	Butt joint, corner joint
Weld depth/width ratio	Big	Adjustable	Small	Adjustable
Tensile strength of weld seam	Higher	High	Low	High

表 2 汽车车身常用激光焊接工艺

Table 2 Commonly used laser welding processes for automotive body

1、汽车车身激光深熔焊工艺

激光深熔焊是指激光功率密度达到一定水平时，使材料表面发生汽化而形成匙孔，孔内金属蒸汽压力与四周液体的静压力和表面张力达到动态平衡，激光可通过匙孔照射到孔底，随着激光束的运动形成连续的焊缝。激光深熔焊焊接过程中不需要添加辅助焊剂或填料，完全利用工件自身材料焊接为一体。激光深熔焊工艺的示意图如图 1 所

示。激光深熔焊得到的焊缝一般光滑平直，变形量小，有利于提升汽车车身的制造精度；焊缝的抗拉强度较高，保证了汽车车身焊接质量；焊接速度快，有利于提高焊接生产效率。在汽车车身焊接中，激光深熔焊工艺可以满足车身组焊和拼焊的焊接需求。在车身组焊中主要用于车身顶盖、侧围、车门等区域的焊接，采用该工艺的相关企业包括福特、通用、沃尔沃等；在车身拼焊中主要用于不同强度、不同厚度、不同涂层的钢板焊接。在汽车车身焊接过程中使用激光深熔焊工艺可以大幅减少零件、模具及焊接工装数量，从而降低车身自重和生产成本。然而，激光深熔焊工艺对待焊部件的装配间隙容忍度较差，需要将装配间隙控制在 0.05~2mm 之间，若装配间隙过大，则会产生气孔等焊接缺陷。

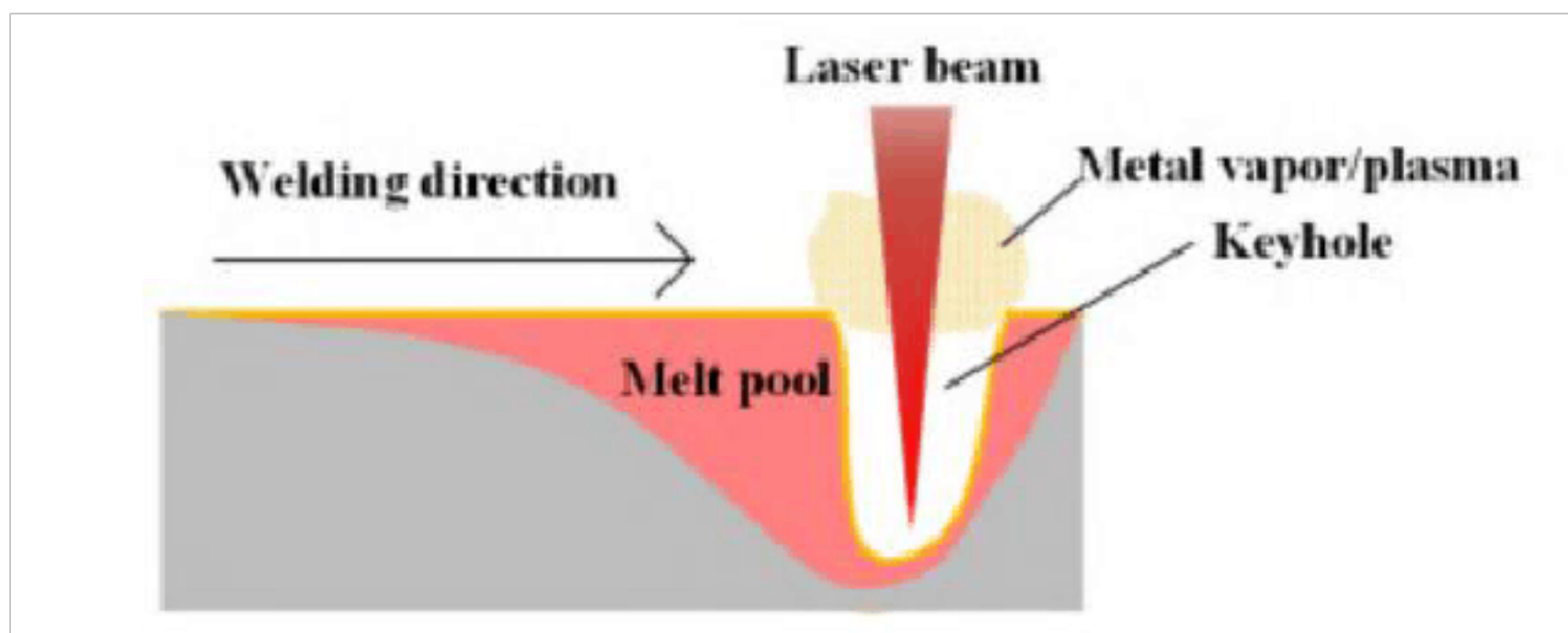


图 1 激光深熔焊工艺示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser deep penetration welding

在汽车车身焊接中，同种材料焊接的需求量大，以车用高强钢和铝合金为代表的同种金属汽车车身激光深熔焊工艺得到广泛研究。王顺利等对汽车高强钢进行激光深熔焊工艺探索。研究结果表明，当激光功率在 2~2.5kW 时，焊缝形貌良好，且焊缝深宽比较大。李志伟通

过改变激光功率和焊接速度对 DP780 车用镀锌高强钢进行焊接实验。结果表明，在零间隙条件下，焊接质量随激光功率增加而提高，随焊接速度增加而降低。黄坚等发现在保证焊缝适度熔透的基础上，最小临界速度和最大临界速度随激光功率的增加而线性增加，随钢板厚度的降低而增大。董丹阳等分析了脉冲 Nd:YAG 激光器的焊接速度对 1.4mm 厚 DP780 车用高强钢焊接质量的影响，结果表明其他参数不变的情况下，焊接速度为 400mm/min 时焊缝表面光滑，内部无气孔缺陷，但是在不同焊接速度下焊缝均存在熔合区硬化和热影响区软化现象。可见，通过调节激光功率和焊接速度，影响焊缝熔深、熔宽等焊缝形貌。Mei 等结合汽车车身激光焊接镀锌钢构件的特点，对比了不同激光入射角对焊接质量的影响，研究认为当镀锌钢板厚较小、焊缝宽度较窄时，可适当增大激光入射角；当装配间隙较小时，激光束的入射角不应过大。Franz 等使用不同直径的激光光斑对车用镀锌钢进行焊接实验的对比，研究发现较小的光斑直径有利于减少焊接过程的飞溅和焊缝中的气孔缺陷。在保证焊缝表面成形质量良好的基础上，减少焊缝内部气孔、裂纹的缺陷能显著提升焊缝力学性能和焊接构件的使用寿命。周丽等分析了某白车身镀锌钢板激光深熔焊的焊缝气孔缺陷，在调整工艺参数的基础上，优化了激光焊接机器人的运动速度和轨迹。结果表明，焊缝在起始和结束端的烧穿问题得到改善，焊缝内部气孔缺陷显著减少。Chen 等使用双激光束工艺对 1mm 厚车用铝合金 AA6014 进行焊接，通过与单激光束焊接效果对比，证明双光束焊接有利于减少焊缝裂纹，提高焊缝抗拉强度，提高焊接质量和生产效率。

随着汽车轻量化进程的不断推进，对车身异种金属焊接需求逐渐提高，近年来针对汽车车身铝合金-钢激光深熔焊接工艺研究取得一定进展。由于铝合金和钢的物性参数相差较大，Al元素和Fe元素相互反应易生成脆性相，因此对铝合金和钢进行搭接焊时，需考虑对Al-Fe金属间化合物(IMO)进行调控。Yuce等探究了不同热输入大小条件下，金属间化合物厚度、焊缝硬度、焊缝抗拉强度等变量的变化趋势。该研究表明，在实现有效焊接的基础上，减小热输入的值可以获得力学性能良好的焊缝。从图2中可以看出，当热输入值为28.5J/mm时，抗拉强度可以达到108.7N/mm。然而，当不填充过渡金属时，铝合金-钢的激光深熔焊的焊缝强度难以满足使用需求。相关研究表明，在铝合金和钢之间添加过渡层能显著改善焊缝成形，提升焊缝的力学性能。在铝合金和钢之间添加合适的过渡金属有以下优势：

(1) 减少Al元素和Fe元素的混合，改变IMC的微观结构；(2) 添加的金属元素可以与Al元素或Fe元素反应生成非脆性化合物；(3) 当添加的金属元素熔点在铁和铝之间时，能使熔池中温度分布更加均匀。

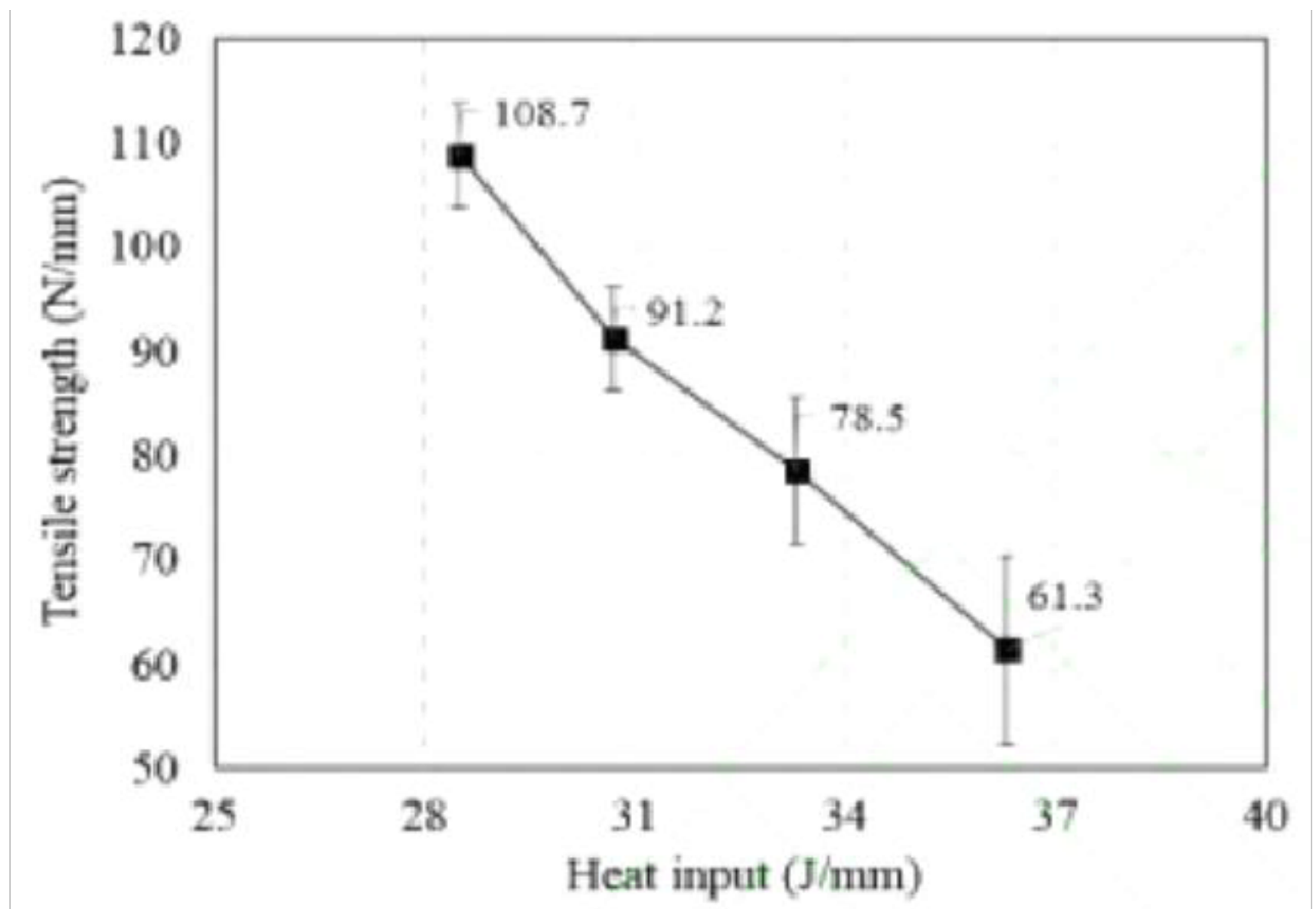


图 2 不同热输入水平下焊缝抗拉强度

Fig.2 Overall tensile strength depending on the heat input

当前研究表明，在汽车车身同种材料焊接中，通过优化激光深熔焊的工艺参数可以获得表面成形良好、内部缺陷较少、力学性能优良的焊缝，可以满足汽车车身焊接构件的使用需求。然而，汽车车身焊接中以铝合金-钢为代表的的异种金属激光深熔焊工艺还不成熟，虽然通过添加过渡层的方法获得了性能优异的焊缝，但是不同过渡层材料对 IMC层的演变影响机制，以及对焊缝微观组织的作用机理尚不明确，需要进一步深入研究。

2、汽车车身激光填丝焊工艺

激光填丝焊接是在焊缝中预先填入特定焊丝或在激光焊接过程中同步送入焊丝来形成焊接接头的工艺方法。相当于在激光深熔焊的同时向焊缝熔池中输入近似同质的焊丝材料。激光填丝焊工艺的示意

图如图 3 所示。相比激光深熔焊，激光填丝焊应用于汽车车身焊接有两个方面的优势，一是可大幅提升待焊汽车车身部件之间装配间隙的容忍度，解决激光深熔焊对坡口缝隙要求过高的问题；二是可以通过使用不同成分含量的焊丝改善焊缝区域的组织分布，进而调控焊缝性能。在汽车车身制造过程中，激光填丝焊工艺主要应用在车身铝合金和钢材部件的焊接，如奔驰 C 级车后立柱焊接、奔驰及江淮的商务车顶盖和侧围的焊接、大众某车型的车门盖焊接等。特别是汽车车身铝合金部件焊接过程中，其熔池表面张力较小，易导致熔池下塌，而激光填丝焊工艺在激光焊接过程中通过焊丝的熔化可以较大程度上解决熔池塌陷问题。

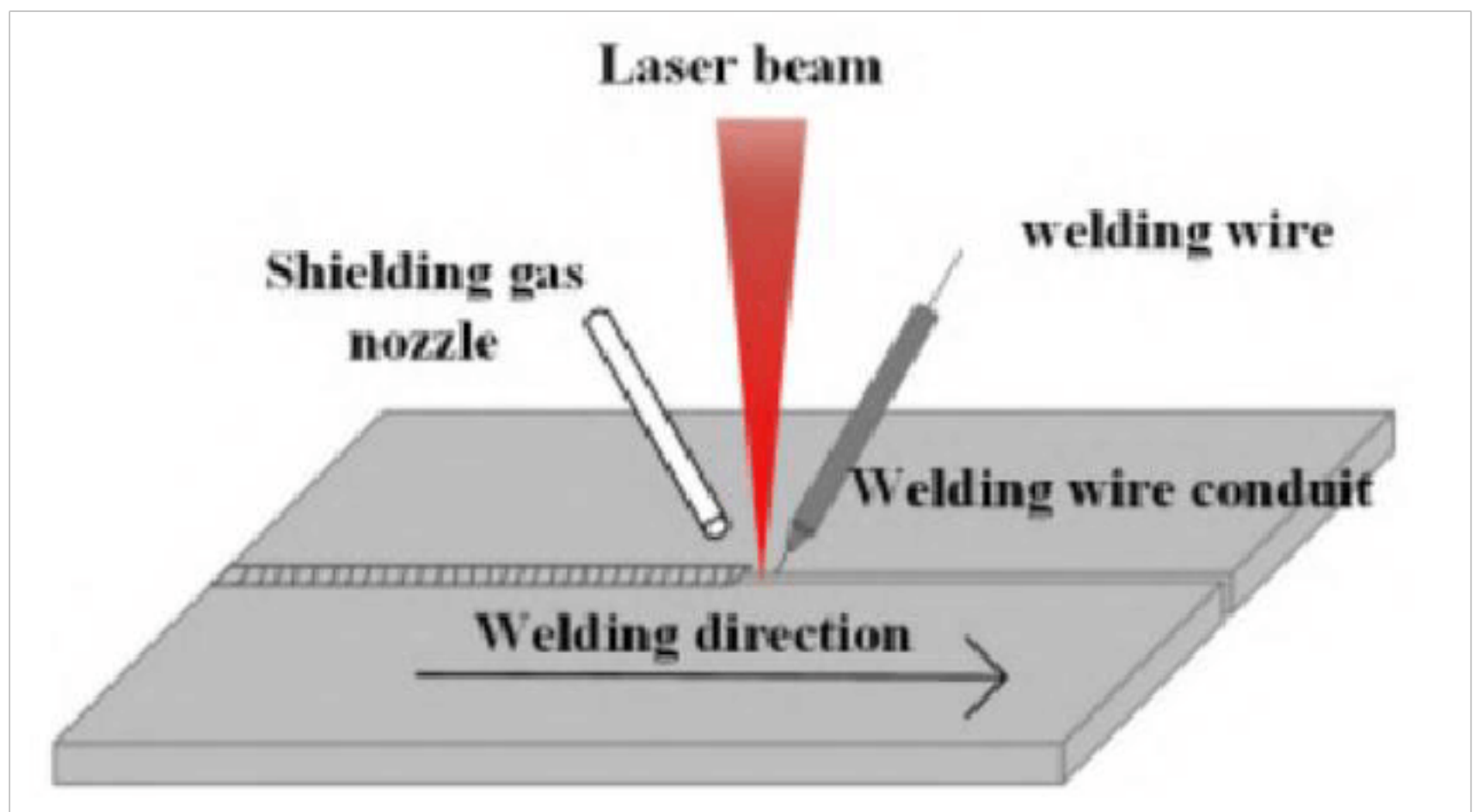


图 3 激光填丝焊工艺示意图

Fig.3 Schematic diagram of laser filler welding process

汽车车身中使用激光填丝焊工艺能显著提升焊接过程中对不同对接间隙的容忍度。张屹等探究了 1.2mm 厚的车用高强钢 DP800 在不

同对接间隙下的激光填丝焊焊接效果。实验结果表明，当对接间隙小于母材厚度 83%时，焊缝拉伸强度高于母材，从而证明激光填丝焊能降低对待焊部件的装配间隙要求。汽车车身激光填丝焊工艺中，送丝速度与激光焊接工艺参数的匹配程度决定了焊接质量。徐景波研究了 1.5mm 厚的车用 7075 高强铝合金的激光填丝焊接工艺。研究表明，当送丝速度加快时，接头裂纹数量减少，但过快的送丝速度不利于表面成形。薄春雨对汽车车身前纵梁区域的激光填丝焊接中出现的各类缺陷提出相应的优化方案：针对飞溅问题需优化激光光斑尺寸；针对焊缝背部凹陷问题需优化激光功率、光丝间距及控制板材间隙；针对气孔缺陷应设计上下板材最佳间隙。张林阳等提出了顶盖、侧围等汽车车身铝合金覆盖件激光填丝焊接的质量控制方法，如：针对焊缝表面不平滑缺陷，可通过改善功率、送丝以及焊接速度之间的匹配性获得平整焊缝；针对气孔缺陷可以通过增大保护气流量的措施保护焊缝熔池；针对表面塌陷可以通过增大光斑直径提升对间隙的容忍度方面进行优化。韩荧等针对轿车座椅骨架开展了激光填丝焊工艺研究。研究发现不同送丝速度下熔滴过渡形式不同，当熔滴为液桥过渡形式时，焊接稳定性较好，减少了咬边和下塌等缺陷。在汽车车身激光填丝焊过程中，虽然通过改变激光功率、焊接速度、离焦量等工艺参数可以改善汽车车身激光填丝焊焊缝成形，但是送丝速度也在很大程度上影响焊接质量。只有当送丝速度与激光功率、焊接速度、离焦量等参数相互配合时，才能得到表面成形质量好、内部缺陷较少的焊缝。

3、汽车车身激光填钎焊工艺

激光束经过聚焦后照射到焊丝表面使焊丝熔化，熔化的焊丝滴落并填充到待焊工件之间，钎料与工件之间发生溶解和扩散等冶金效应，从而使工件达到连接的效果。与激光填丝焊接工艺不同，激光钎焊工艺只熔化焊丝而不熔化待焊工件。激光钎焊具有良好的焊接稳定性，但得到的焊缝抗拉强度较低。图4为激光钎焊工艺在汽车行李箱盖焊接中的应用。在汽车车身焊接过程中，激光钎焊工艺主要对接头强度要求不高的车身部位进行焊接，如车身的顶盖和侧围之间的焊接、行李箱盖上下部之间的焊接等，大众、奥迪等中高端车型的顶盖均采用激光钎焊工艺。

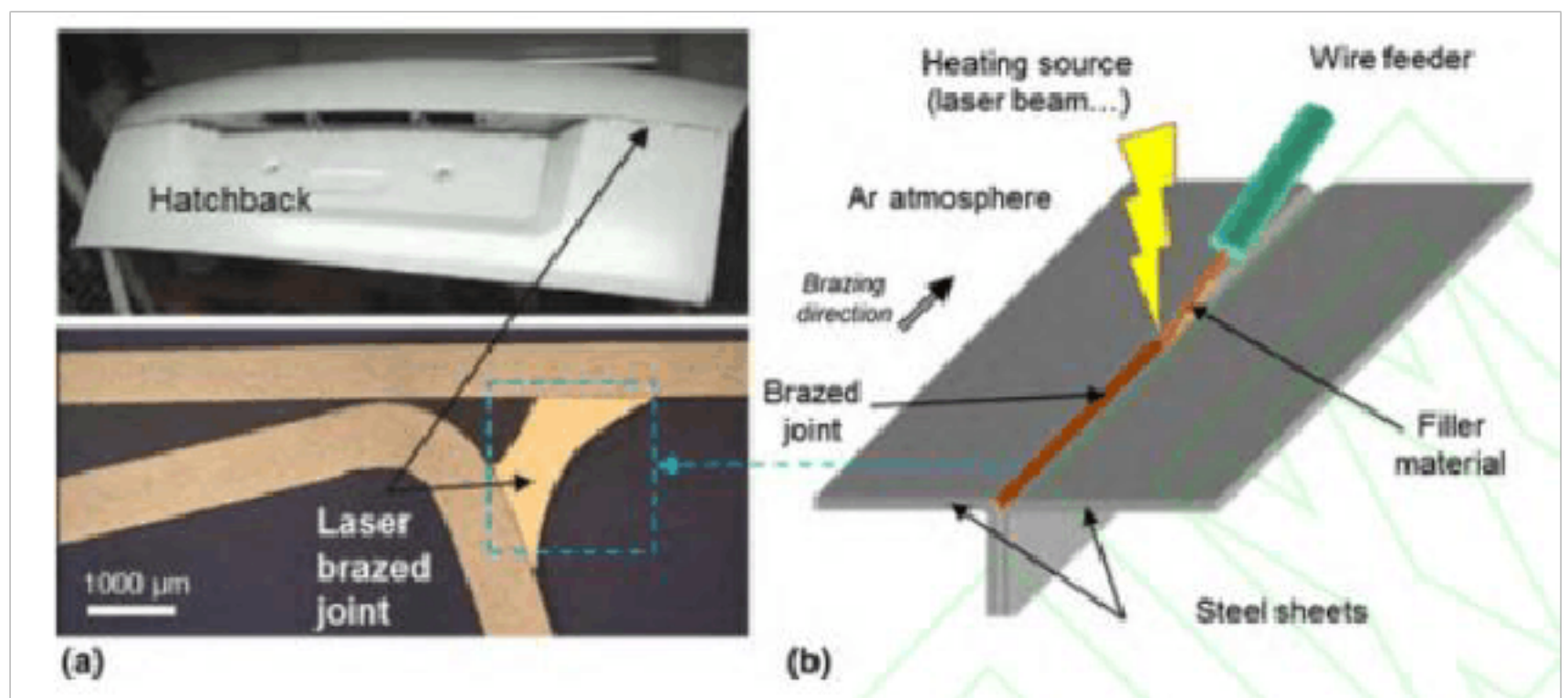


图4 激光钎焊在汽车中的应用：(a) 后车盖激光焊接；(b) 激光钎焊原理图

Fig.4 Applications of laser brazing in the automotive industry:(a)laser joining of hatchback parts;(b)principle of laser brazing

汽车车身激光钎焊焊缝中主要存在缺陷包括咬边、气孔、焊缝变形等缺陷，通过调控工艺参数和使用多焦点激光钎焊工艺均能明显抑

冯振坡等对汽车顶盖激光钎焊焊缝缺陷原因进行了分析，指出焊缝质量主要取决于光丝间距、激光功率以及出丝稳定性。李成整等通过正交实验法分析了钎料直径和装配间隙大小对汽车白车身顶盖激光钎焊成形质量的影响，该团队的研究表明钎料直径在1.15~1.21mm内，焊缝填充效果良好，焊缝强度最高；控制装配间隙在0.3mm以内可保证焊接质量。Heuberger等发现焊接速度对车用镀锌钢激光钎焊焊接过程的稳定性影响较大，焊接速度主要影响焊缝表面成形的不稳定性和焊接过程中熔池前沿的运动不均匀性。Mohammadpour等通过实验和数值模拟方法研究了激光束倾角对车用镀锌钢激光钎焊过程的影响。研究认为，激光束倾角的改变会影响钎料熔滴状态，进而影响熔池流动状态，对焊接过程中飞溅的产生和焊缝成形质量有显著影响。王晓兵等以激光钎焊一次合格率为评价指标，以激光功率、焊接速度、光束倾角为实验参数，对汽车顶盖激光钎焊工艺参数进行优化，得到激光功率3kW，焊接速度3.5m/min，光束倾角10°等最佳工艺参数。近年来三焦点激光钎焊工艺的出现为实现少缺陷焊接提供了新思路，图5为三焦点激光钎焊的原理图。李明等对比了单焦点和三焦点激光钎焊对车用镀锌钢板的焊接效果，结果表明，三焦点激光钎焊得到的焊缝成形美观，接头抗拉强度得到明显提升。侯顺华等使用三焦点模块对镀锌钢板进行激光钎焊，焊缝两侧较为平滑，气孔缺陷也得到抑制。以上研究针对镀锌钢板进行三焦点激光钎焊得到的焊缝成形和力学性能良好，原因是可通过调整三个激光

调整三焦点的能量分布使焊接过程

更加稳定，如图 6 所示。

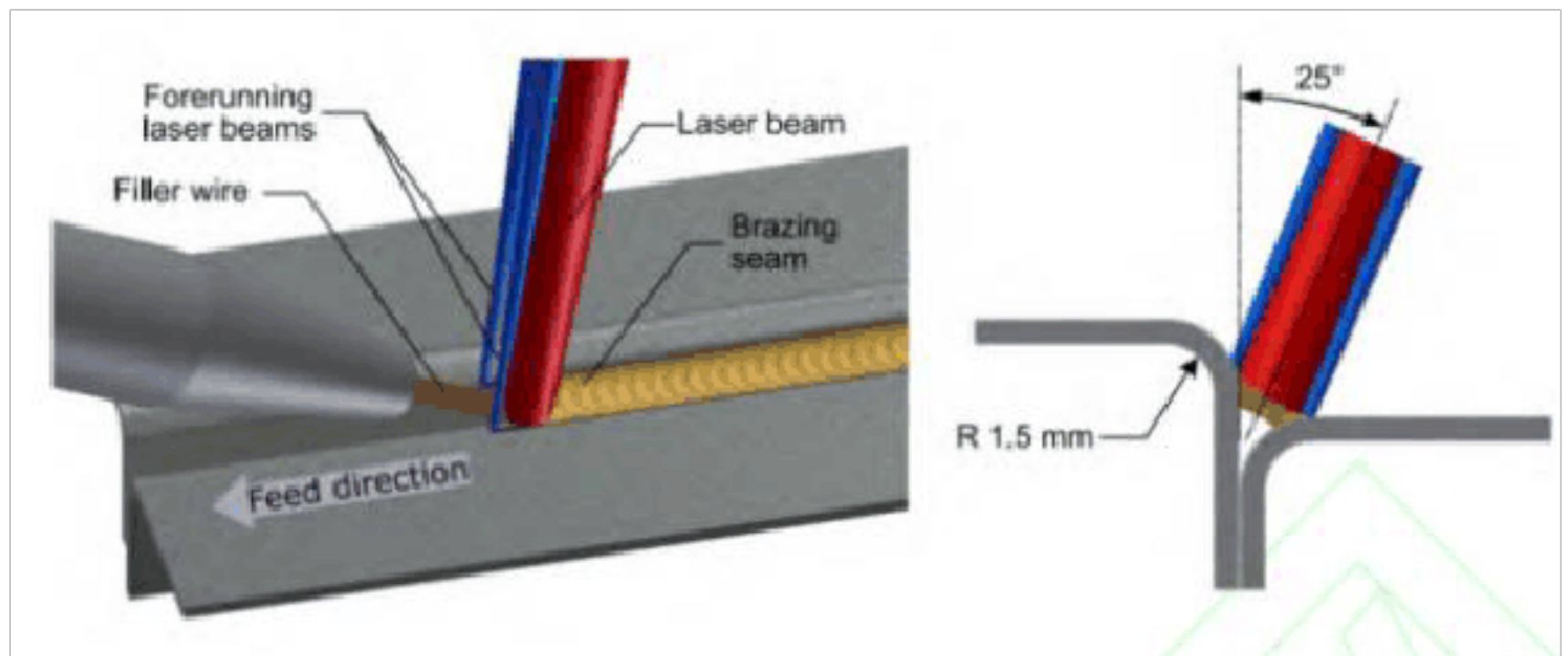


图 5 三焦点激光钎焊原理图

Fig.5 Schematic setup of the trifocal brazing process

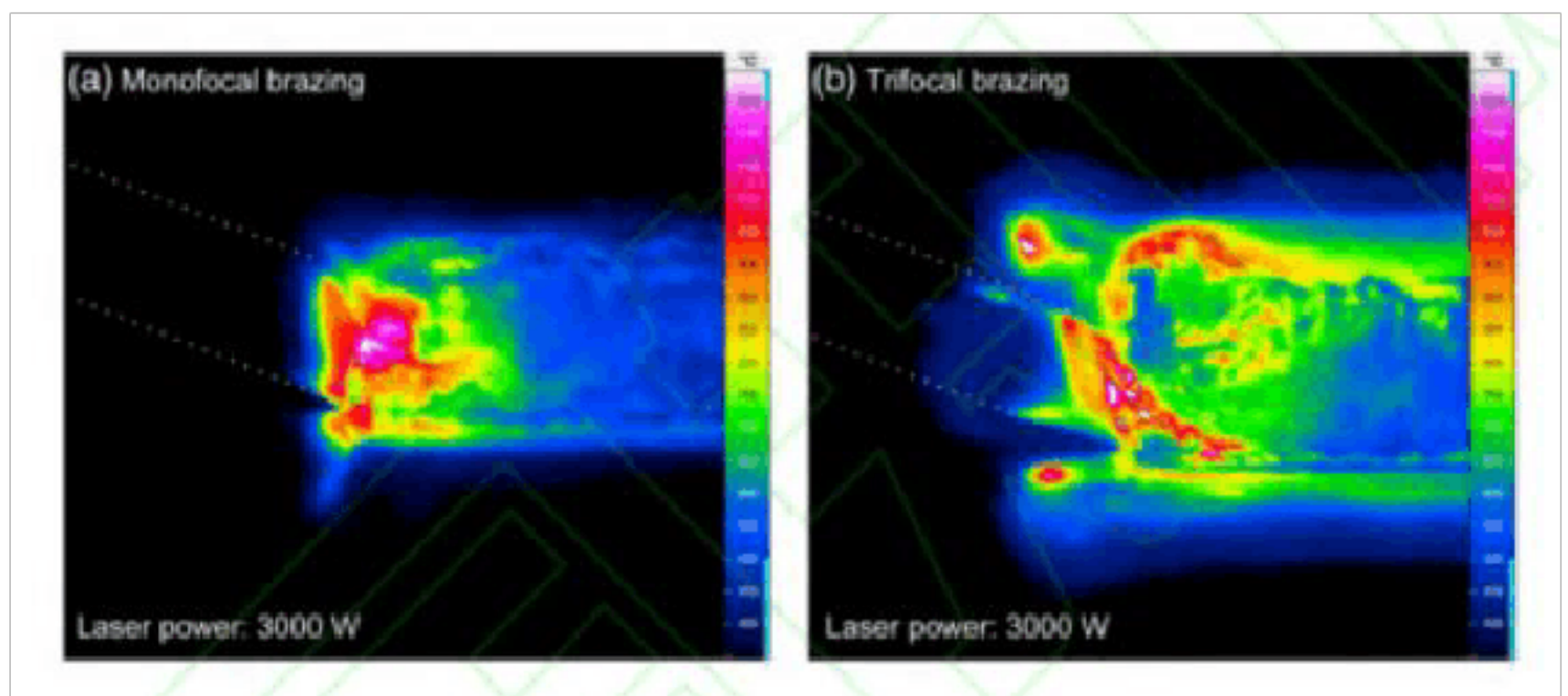


图 6 激光钎焊过程的热成像：（a）单焦点钎焊；（b）三焦点钎焊

Fig.6 Thermal images of the brazing processes:(a)monofocal brazing;(b)trifocal brazing

汽车车身顶盖和侧围材料逐渐由单一材料向异种材料转变，异种材料的激光钎焊工艺得到广泛关注。以汽车车身常见的铝合金-钢异

Xia 等认为不同的保护气体对铝合金-钢的激光钎焊质量有显著影响。该团队研究发现在保护气体中加入 **CO₂**能显著提升熔融钎料的润湿性，同时使 **IMC**变厚，原因是 **CO₂**使激光能量吸收率增加，进而通过影响熔融钎料的能量分布和流动形态，最终提升了焊缝抗拉强度。此外，当钎料中的 **Si** 含量不同时，铝合金-钢的激光钎焊质量不同。当钎料成分分别为纯 **Al**, **AlSi5** 和 **AlSi12** 时，用 **AlSi5** 钎料焊接产生的焊缝具有最高的拉伸强度，研究过程如图 7 所示。**Si** 元素的加入降低了 **IMC**对界面峰值温度变化的敏感性，抑制了 **Fe-Al** **IMC**生长，改变了界面反应机制。双光束激光钎焊工艺的引入为汽车车身异种金属焊接提供了新方法。**Yuan** 等对铝合金-钢异种金属进行了双光束激光钎焊实验，研究表明双光束条件下，通过调节激光功率可以显著改变 **Al** 和 **Fe** 反应界面的润湿性，进而改变 **IMC**层厚度，最终影响焊缝抗拉强度和断裂形式。

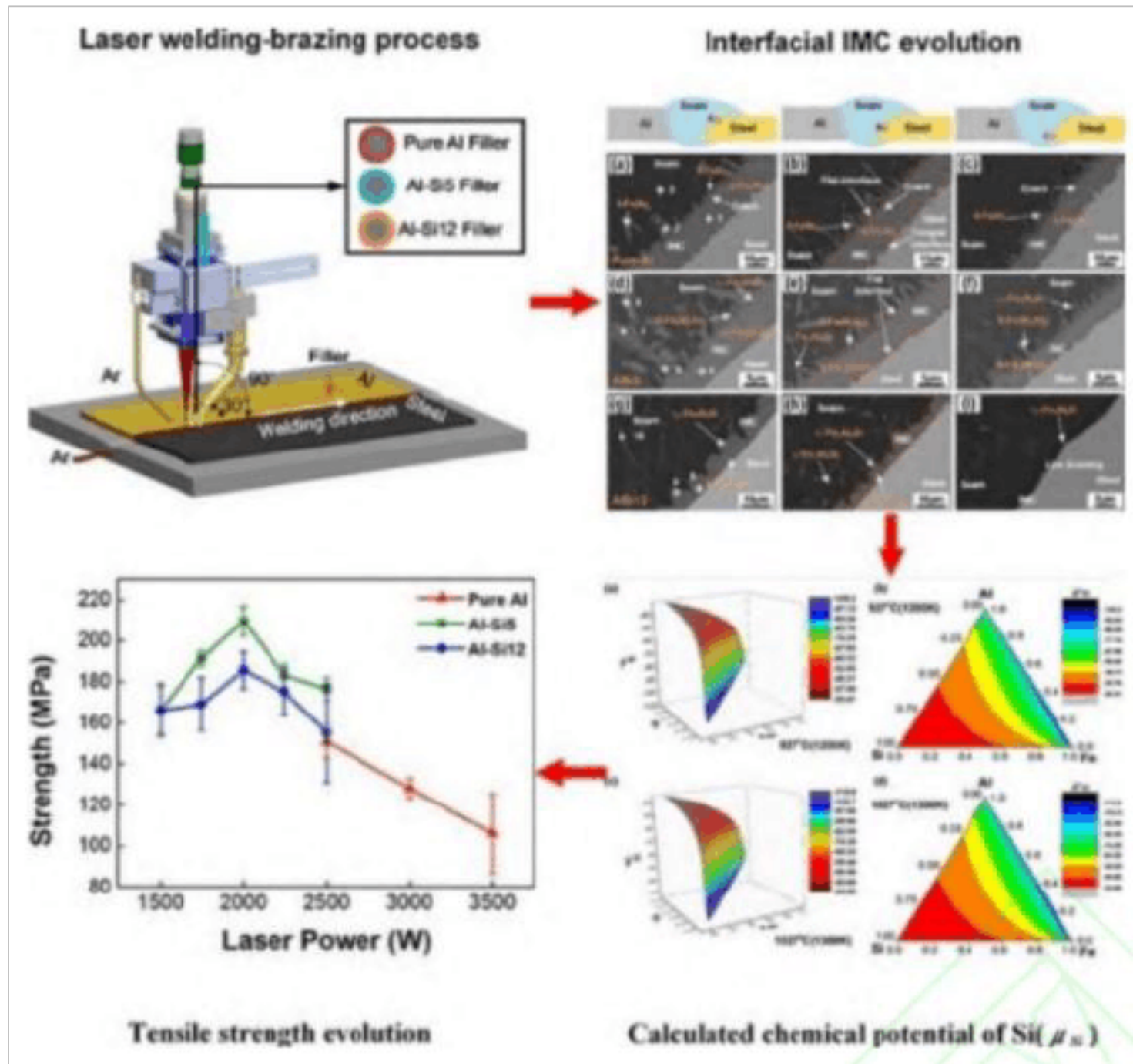


图 7 不同 Si 含量的钎料对激光钎焊焊缝质量的影响

Fig.7 Effect of different Si content of brazing materials on the quality of laser brazing

汽车车身激光钎焊工艺较为成熟，通过改变光丝间距、激光束倾角、焊接速度等工艺参数能显著减少焊缝内部缺陷；三焦点激光钎焊工艺在焊缝成形、力学性能有一定的提升作用，同时也对送丝稳定性提出了更高的要求，送丝速度不稳定反而会导致气孔等内部缺陷，因此未来还需对三焦点激光钎焊的多光束能量调控机理，结合送丝机制进行深入研究，达到无缺陷的焊接效果。汽车车身异种金属激光钎焊的焊缝成形质量和力学性能主要取决于焊缝中 IMC 成分分布，未来可

影响机理，建立能量分布和焊缝质量的对应关系。

4、汽车车身激光-电弧复合焊工艺

激光-电弧复合焊接是采用激光和电弧两种热源同时作用到待焊工件表面，使工件经过熔化、凝固后形成焊缝的一种复合焊接工艺。激光-电弧复合焊接兼具了激光焊接和电弧焊的优点，一是在双热源的作用下，焊接速度得以提高，使热输入变小，焊缝变形量小，保持了激光焊接的特点，二是具有更好的桥接能力，装配间隙容忍度更大；三是熔池的凝固速度变慢，有利于消除气孔、裂纹等焊接缺陷，有利于改善热影响区组织和性能；四是由于电弧的作用，使其能够焊接高反射率、高导热系数的材料，应用材料的范围更广。图 8 为激光-电弧复合焊工艺示意图。在汽车车身制造过程中，激光-电弧复合焊接工艺主要应用于车身铝合金构件和铝合金-钢异种金属结合处的焊接，主要是针对装配间隙较大的部件进行焊接，如汽车车门部分位置的焊接，这是因为装配间隙能发挥激光-电弧复合焊接的桥接性能。此外，激光-MIG电弧复合焊接技术还应用在奥迪 A8 车身的侧顶梁位置。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/118005022054007033>