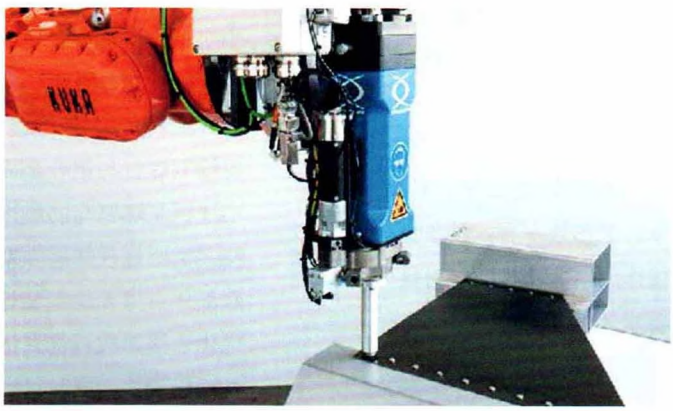
轻量化车身连接关键技术应用及发展

□ 中国汽车工业工程有限公司工艺工程院/高海东 高建超

本文详细介绍了自冲铆、热熔直钻和高速冲铆连接工艺的工作原理、适用条件及质量检测方法。



汽车排放污染物对环境造成的危害日益严重，节能减排成为社会及制造商关注的焦点，车身轻量化成为汽车工业未来发展的趋势。大量轻量化材料如铝合金、碳纤维和复合材料不断引入，对连接工艺提出了新的要求，铆接工艺正在逐步取代传统的焊接工艺，成为轻量化车身连接的关键技术。

结构优化和轻量化材料是车身轻量化的主要途径，轻量化材料的应用对车身减重的效果更为明显。据美国铝学会的报告，汽车上每使用0.45kg铝就可减重1kg，理论上铝合金汽车可以比碳钢汽车减重40%左右。碳纤维和复合材料的引入，减重效果比铝合金更强。在保证足够的车身强度下，新材料的使用对车身的连接工艺提出了新的要求，铆接工艺正在逐步取代传统的焊接工艺，成为轻量化车身连接的关键技术。

自冲铆SPR连接工艺

SPR（Self-Piercing Rivet）具体铆接过程如图1所示，首先铆鼻压住板材，保证待连接板材无缝搭接，然后铆钉被铆杆施压嵌入，铆钉穿透上层板材，并向下层板材扩张，在压力的作用下，板材与铆钉一起发生塑性变形并充满铆模，铆

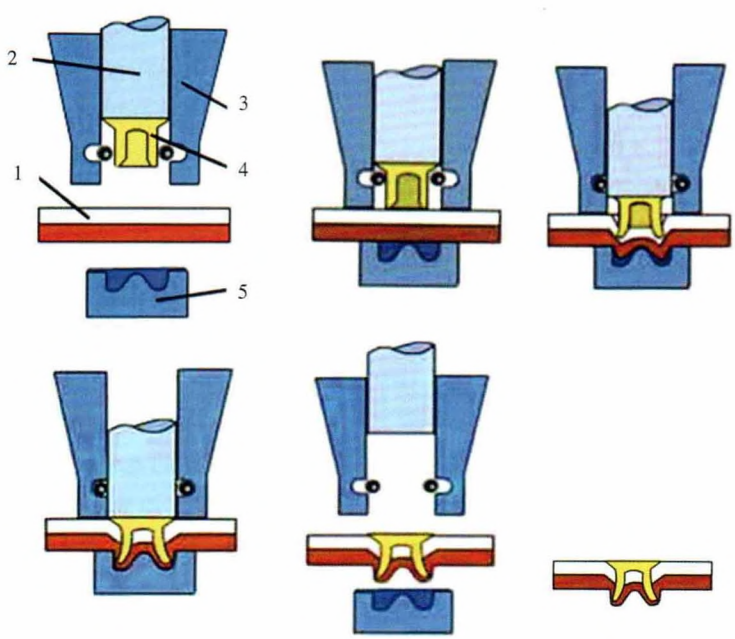


图1 SPR连接过程示意

1.板材 2、4.铆钉 3.铆鼻 5.铆模

钉腿部向四周翻开形成“纽扣”，断面为“π”形，从而完成上下板材牢固的连接，每个连接点大概1~2s。

1.自冲铆SPR应用条件

空间分析：SPR的连接通过铆杆与铆模共同挤压板材和铆钉实现，类似于点焊的双面连接，因此铆枪多为C形结构（见图2），由于铆接压力最大可达50kN，为保证强度，C形钳体部分体积较大，铆接结束后还须保证凹模5mm以上的脱模距离。以上这些限制因素对铆枪的可达性产生了较大影响，车身结构设计及工装夹具设计均需重点考虑。

铆点位置分析：如图3所示，铆枪铆鼻的外径为18mm，铆点的设计必须保证铆点中心线与钣金翻边的距离大于铆鼻半径与翻边R角半径之和，若翻边半径R=2mm，则图3中需保证$D\geqslant$（9+2）=11mm。与此同时，铆点之间的中心间距也必须大于18mm。

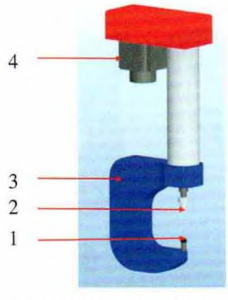
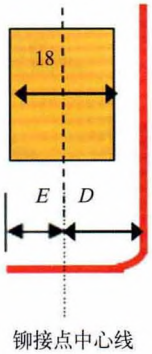


图2 C形SPR铆枪结构图

1.凹模 2.脱模机构 3.C型钳体 4.伺服压力机构



铆接点中心线

图3 铆点位置分析

图3中另一个必须保证的尺寸E是铆点中心与板材边缘的距离，此距离影响铆接点的力学性能，如图4所示。一般而言，对于直径5mm的铆钉，铆接点距离边缘至少8mm，直径3mm的铆钉，铆接点距离边缘至少6mm。

图4 铆接点抗拉力学实验

板材组合分析：自冲铆SPR连接工艺适用于两层及以上板材的铆接，但必须遵循以下规则：

（1）二层连接：底层板材厚度大于总厚度的1/2。

（2）三层连接：底层板材厚度大于总厚度的1/3。

（3）全钢材料总厚度最大8mm，全铝材料总厚度最大14mm。

对于多层板材的连接，铆接点的强度能否满足车身强度要求，需要根据铆接试验的结果确定。同时，改变连接板材的层数、板材的厚度、板材之间的涂胶和板材的搭接顺序，都会影响铆接点的强度，均需要重新进行铆接试验。

2. SPR连接质量控制与检测

自冲铆SPR连接所用的铆钉型号、铆接压力、底厚值是通过铆接力学试验确定的，铆接点的抗拉、抗剪强度必须满足车身强度要求。伺服自冲铆SPR枪可以实时检测铆接过程中铆钉位置、铆鼻压力、铆杆压力、铆杆行程、脱模拉力等参数。当检测参数超差时，控制系统报警，修复后才能进入下一连接点的铆接。

自冲铆SPR连接点的质量检查，主要分为外观与尺寸检测、力学实验和金相检测三类。外观与尺寸检测，首先通过观察外观，检查铆点的形态是否正常，然后通过数显高度表等测量仪器检查铆钉的高度是否超差。这种检查方法简便易行，一般在生产线的质量检查工位完成。

力学实验和金相试验属于破坏性的检测方法，一般用于抽检（见图5和图6）。

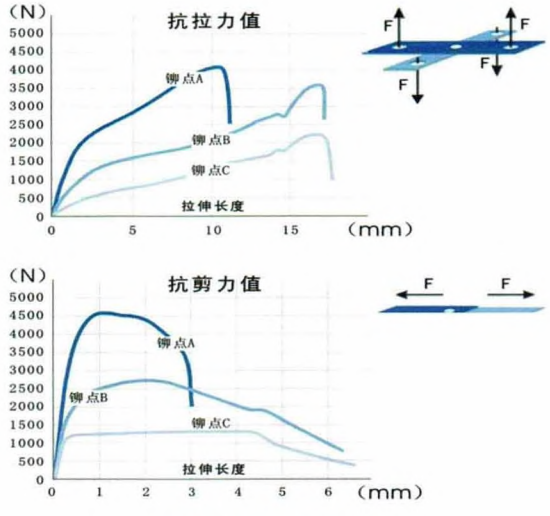


图5 铆接点抗拉、抗剪力学试验

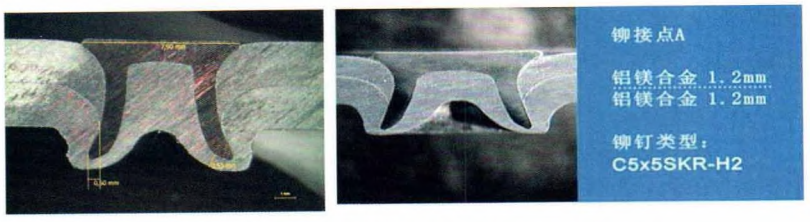


图6 铆接点剖面金相试验

热熔直钻FDS

1.FDS工作原理

高速热熔直钻FDS（Flow Drill Screw）通过高速旋转的螺刀带动特制的螺钉，在强大下压力作用下与待连接对象进行摩擦，使带连接板材发生热熔，螺钉穿透后形成螺纹副联接，具体连接过程如图7所示：定位预热→热熔穿透→锥孔成形→螺纹行程→螺钉拧入→紧固落座，虽然分了6个步骤，但每颗螺钉连接大概只需要2s。

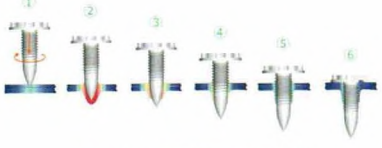


图7 热熔直钻FDS连接过程

在连接过程中，有许多参数需要实时监测。FDS连接设备较为复杂，控制系统要求较高，为便于控制，更是出现了下压和拧紧双伺服电动机驱动的FDS连接设备。下压力可达3 500kN，最高转速可达8 000r/min，转矩可达15N·m，最大行程可达30mm，下压机构压力可到1 200kN。

FDS所用铆钉是特制的，具体结构如图8（a）所示，一颗螺钉从上到下分为：螺帽、紧固螺纹、攻丝螺纹、特殊尖部，紧固螺纹部分断面为圆形，攻丝螺纹部分断面为类三角形，螺钉表面有特殊涂层，连接后剖面效果如图8（b）所示。

2. FDS应用条件

空间与位置分析：热熔直钻FDS连接的明显优势在于可实现单面连接，即在考虑铆点的可达性时，只需考虑单面接近性，降低了对铆接的空间性要求。图9为FDS连接设备，在铆点及工装设计时，只需考虑铆枪自身尺寸限制，一般要求铆点中心距离板材边缘大于10mm，距离翻边大于12mm，锚点间距大于20mm。

板材组合分析：由于FDS连接是单面连接，在铆接过程中将有强大下压力（最大3 500N）作用于板材表面。这将要求下层板材具有一定的结构强度，保证铆接过程中不会发生较大变形，同时保证由薄到厚、由软到硬的板材搭接顺序；另外，FDS连接后螺钉的尖端部分会裸露在板材外，因此FDS连接更多用于板材与空腔型材、板材与铸件的连接，如图10所示。

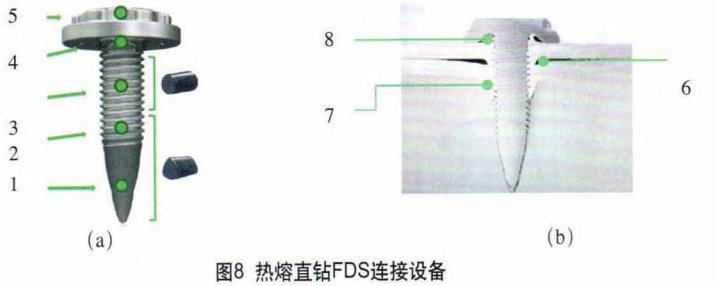


图8 热熔直钻FDS连接设备

1.尖部设计 2.攻丝螺纹 3.紧固螺纹 4.底面槽沟 5.螺钉头部 6.板材间隙 7.锥孔螺纹 8.上层材料充盈凹槽

FDS连接过程中下压力、下旋速度、转速、紧固扭矩等参数及选用的螺钉规格，均需要通过连接实验确定，保证连接点的抗拉强度、

图9 热熔直钻FDS连接设备

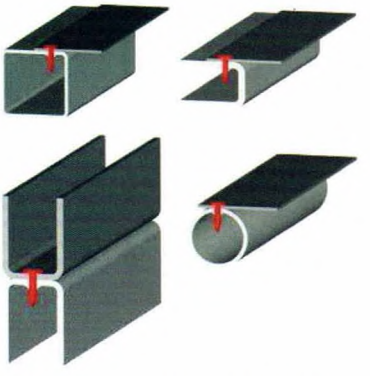


图10 热熔直钻FDS连接板材组合

抗剪强度满足车身力学性能要求。一般而言，这类力学试验由螺钉供应商负责实施，选择满足车身强度要求的螺钉，FDS连接设备一般可以兼容多种螺钉，如Deprg公司的自适应FDS铆接设备可以用于Arnold公司的多款螺钉。

3.FDS连接的质量控制和检测

FDS连接设备采用闭环伺服控制，在连接过程中实时监测关键技术参数：下压力、下旋速度、转速、紧固扭矩，并能自动识别与捕捉连接过程中上述参数的切换临界点，每颗螺钉的参数都控制在要求的公差范围内，保证每颗螺钉联接参数的可追溯性，确保连接质量。

与自冲铆SPR连接类似，FDS的连接质量也可以从外观检查、力学实验、金相检测三方面实现。力学实验即抗拉试验、抗剪试验，检测抗拉强度、抗剪强度是否能够满足标准强度要求，金相检测便于从微观尺寸上分析连接缺陷产生的原因，图11为FDS连接的剖面金相电子图像，可从图中检测螺纹牙高、螺纹长度等尺寸信息。

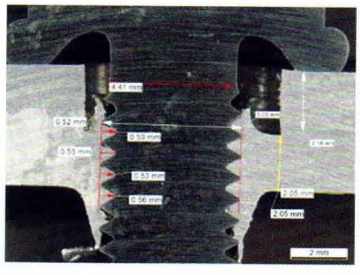


图11 热熔直钻FDS剖面金相图片

高速冲铆

1.高速冲铆工作原理

高速冲铆是指瞬间在铆钉施加强大冲压力，使铆钉快速地穿透待连接板材，形成稳定可靠的连接方法。高速冲铆的铆钉与热熔直钻FDS铆钉类似，不同之处在于，高速冲铆的铆钉没有螺纹，而是带自锁功能的倒刺环牙，如图12所示。目前高速冲铆设备主要为Bollhoff公司的Rivtac，已在奔驰等车身连接中应用，Arnold公司在2016年底推出了类似于Rivtac的高速冲铆Flow-Push铆钉。

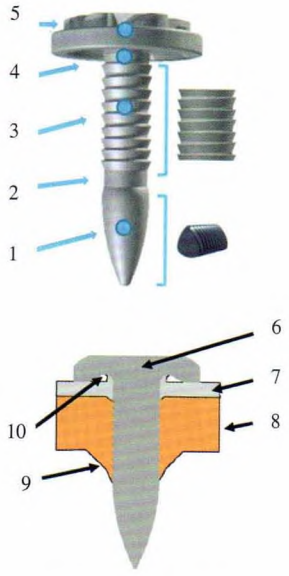


图12 高速冲铆的铆钉

1.尖部设计 2.加速段 3.齿牙圈 4.底部槽沟 5.螺钉头部 6.铆钉帽 7.上层板材 8.基础板材 9.基础延伸 10底部沟槽

Rivtac的连接过程比FDS简单，如图13所示：定位→插入→穿刺→铆紧。Rivtac也是单面连接，而且连接速度比FDS要快得多，每个连接点只需1s左右，不足之处在于，在连接过程中产生较大噪声（≥105dB），一般需要采取隔音措施。

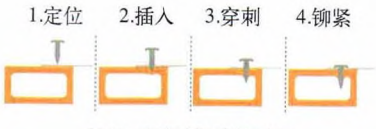


图13 高速冲铆连接过程

高速冲铆Rivtac铆接系统组成如图14所示，铆钉从存储箱内滑入振动盘，对铆钉进行方向调整，然后进入铆钉填装导轨；当机器人携带铆枪完成铆接工作后，铆钉不足时，机器人自动到换装站进行铆钉的填装，继续进行铆接。

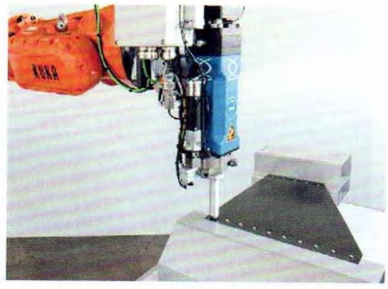


图14 高速冲铆Rivtac设备组成

2.高速冲铆应用条件

空间与位置分析：高速Rivtac类似于热熔直钻FDS，也可以实现单面连接。图15为Rivtac铆枪实物图，其结构特点导致对铆点中心距离翻边的尺寸要求更高，铆点的设计需要在车身结构设计时仿真确认。

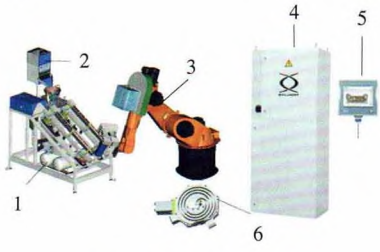
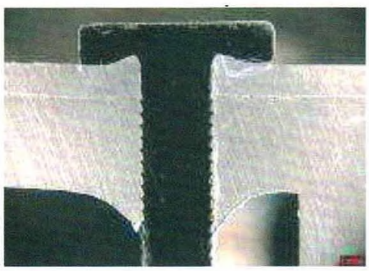


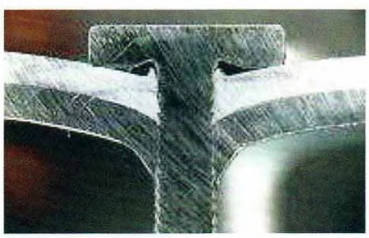
图15 高速冲铆Rivtac铆枪

1.换装工作站 2.铆钉存储箱 3.机器人 4.人机界面 5.换装弹夹 6.铆枪

板材组合分析：与热熔直钻FDS类似，高速Rivtac在连接过程中对板材产生强大下压力，所以也要求基础板材具有一定的结构强度，防止铆接过程中板材变形严重。也要遵循“由薄到厚、由软到硬”的板材搭接顺序，如图16所示，“铝+铝”连接、“铝+钢”连



(a) 铝+铝组合



(b) 铝+钢组合

(c) 钢+钢组合

图16 高速冲铆Rivtac不同板材组合的铆接剖面

接和“钢+钢”连接，不难发现，板材越硬，连接后的变形越严重，因此，高速Rivtac更适合于节拍要求高、板材硬度及厚度较小的情况。

3.Rivtac质量控制及检测

在Rivtac连接质量控制方面，同样需要实时监测下压力、铆钉位移等参数，形成闭环控制，确保连接质量。

对于Rivtac的检测，与热熔直钻FDS基本相同，此处不再赘述。

结语

以上三种轻量化车身连接工艺由于不同的工作原理，导致了不同的适用条件。下表给出了这三种铆接技术的对比，SPR适合于板材与板材组合的铆接，尤其是薄板的连接，是FDS和Rivtac很难实现的；FDS适用于板材与型材（铸件）的铆接，同时具备可拆卸能力，不足之处在于连接后存在裸露的铆钉；与FDS相比，Rivtac适用于较薄的板材与型材的铆接，铆接后板材间无缝隙，连接速度快，但工作过程中噪声很大。

SPR、FDS、Rivtac技术对比

	单面连接	可拆卸	连接强度	多材料组合	无需预钻孔	连接后裸露铆钉
SPR	×	×	✓	✓	✓	✓
FDS	✓	✓	✓	✓	✓	×
Rivtac	✓	×	✓	✓	✓	×

自冲铆SPR、热熔直钻FDS和高速冲铆Rivtac三种铆接工艺在轻量化车身尤其是铝合金车身连接中占据着重要地位，三种工艺经常混合出现在生产线中，正在逐步取代传统的电阻焊工艺，成为未来轻量化车身连接工艺的发展趋势。

AUTO1950

山特维克可乐满与PARC合作推进数字化制造

2017年4月20日，山特维克可乐满公司与世界知名创新中心，隶属施乐的PARC（帕洛阿尔托研究中心）签署战略研究协议，以加强其在数字制造领域的实力。PARC使山特维克可乐满公司在硅谷占有一席之地，并为其在数字化制造领域的研发提供专业资源。

根据协议条款，PARC将调配资源，帮助山特维克可乐满在数字化制造业领域开展技术研究与开发。山特维克可乐满还将获得PARC应用于减材制造中高级工艺规划及自动化制造成本估算相关软件的所有知识产权（IP）和技术。

“这一伙伴关系的形成山特维克可乐满实施在数字化制造和工业4.0领域开发具有吸引力解决方案的长期战略中迈出的必然一步。” 山特维克可乐满副总裁兼业务发展与数字化加工负责人MagnusEkbäck说，“通过这次合作，我们将大大加强在数字化加工中的实力。”

“随着虚拟与现实世界的融合，制造业正在进入一个充满活力的新阶段，这个复杂多样的行业需要重大创新才能真正取得进展。”PARC首席执行官Tolga Kurtoglu说，“将设计与制造有机衔接在一起一直是完整的自动化设计和复杂产品制造中缺失的一环，这也是PARC多年来开发的方向。我们很高兴能与山特维克可乐满合作，让这些创新在全球范围内得以应用。”