

白车身胶接的失效分析及解决措施

□ 北京奔驰汽车有限公司/于跃

讨论了胶接技术的失效模式，分析了其缺陷原因，并提出了各种缺陷的有效解决方案，为白车身用轻质材料的连接技术提供借鉴。

随着汽车节能、安全、环保等多个方面的发展，汽车轻量化逐渐成为汽车设计的重要课题，越来越多的铝、镁、塑料、复合材料和高强度钢等不同种类的先进轻质材料同时在现代汽车车身中混合使用。点焊等传统的连接技术由于其在不同种材料上表现较差，而逐渐被其他技术取代，胶接等冷连接技术就是很好的替代连接方式。胶黏剂不仅工艺简单，适应性高，而且其作为冷连接方式对于整车的强度、刚度、耐久性都有显著提升，同时胶黏剂具有减震、防腐等功能。

胶黏剂

装焊胶黏剂可以被定义为由聚合物、填料、助剂及固化剂等组成的高分子混合物，该混合物可以高温固化，并且固化后的材料可以满足特定的功能要求。装焊用胶按照基材分类可分为环氧类胶黏剂和橡胶类胶黏剂。环氧胶在固化后由

于其强度较高，因此主要为整车提供强度、刚度、防腐等功能，橡胶类胶黏剂由于固化后会形成类似橡胶的状态，因此主要为整车提供减震、密封等功能。胶黏剂的固化通常发生在喷漆车间的电泳烘房内，常见的固化条件为 $160\sim 180^{\circ}\text{C}$ ， $15\sim 20\text{min}$ 。胶黏剂只有完成固化过程，才能发挥最终的作用。

粘接原理

粘接的基本原理是胶黏剂与被黏物表面之间发生机械、物理和化学变化的作用，由此牢固地连接在一起。胶接机理十分复杂，目前比较典型的胶接理论包括机械理论、扩散理论、吸附理论和化学键理论等，如图1所示。

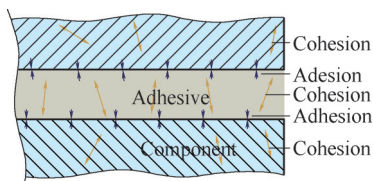


图1 胶接原理

1.机械理论

任何固体表面均有缺陷，胶接时，胶黏剂渗入被粘物凹凸不平的多孔表面内，并排除其界面上吸附的空气，固化产生锚合、钩合、契合等作用，使胶黏剂与被粘物结合在一起。

2.扩散理论

扩散作用又称为分子渗透作用，聚合物的粘接是由扩散作用形成的。由于聚合物的链状结构和柔性，使胶黏剂大分子的链段通过热运动引起相互扩散，大分子缠结交织，固化后则粘接在一起。

3.吸附理论

粘接是与吸附作用类似的表面过程。胶黏剂的大分子通过链段分子与分子链的运用，逐渐向被粘物表面迁移，极性基团靠近，当距离小于 0.5mm 时，原

子、分子或原子团之间必然发生相互作用，产生分子间力，它能吸附液体和气体，有时由于电负性的作用还会产生氢键力，从而形成粘接。

4. 化学键理论

粘接作用是由于胶黏剂分子与被粘接物表面通过化学反应形成化学键而结合。化学键能比分子间力要高1~2个数量级，因此使粘接层获得高强度的粘接。

上述4种作用既可以单独存在也可以同时存在。

失效模式

内聚失效、被粘物失效、粘附失效和混合失效是胶接接头的四种典型失效模式，其实内聚失效即胶层失效，失效面在胶层中间，此时胶层的内聚力低于胶黏剂和被粘物界面上的粘附力，如图2a所示。被粘物失效是指失效面发生在强度较低的被粘物，说明此时胶接强度已足够大，如图2b所示。粘附失效也成界面失效，即失效发生在胶层和被粘物界面处，这说明胶层未与被粘物形成很好的粘结，是粘结失效，如图2c所示。混合失效是指内聚失效、粘附失效、和被粘物失效同时发生的情况，如图2d所示。

内聚失效是当破坏力超过胶黏剂本身的内聚力而造成的失效，是对胶黏剂的内聚力的考核。粘附失效是胶黏剂未形成有效的粘结。在白车身上，胶黏剂的内聚力低于金属板材的强度，是不可能发生被粘物失效的。因此在整车胶接测试中，我们关注的是胶黏剂是否形成了有效粘结，即是否有粘附失效。

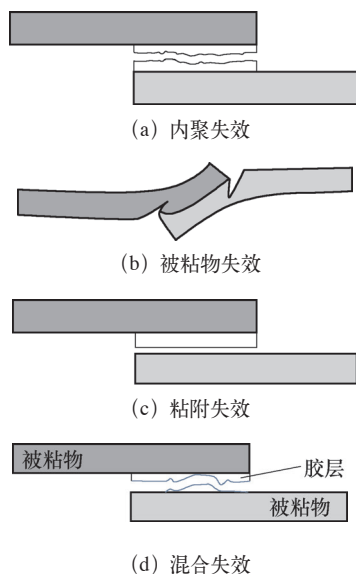


图2 胶接接头的失效模式

胶接缺陷

无论是粘附失效还是混合失效，一旦有粘附失效存在，就说明胶黏剂存在粘结失效，一旦失效面积超过公差范围，即判定为不合格的胶接。在装焊生产过程中，胶接质量的检测方法是破坏性检测即剔试。剔试过程是：车身经过电泳烘房后，胶黏剂已完成固化反应，对板材进行破坏性剥离，检查胶黏剂失效模式，从而判定胶接质量。

常见的胶接缺陷分为：胶段缺失、宽度不足、间隙过大、单面粘、蜘蛛网及位置错误。在不同的考核体系中，胶接缺陷的分类会有所不同，但缺陷的判定基本相同。下面针对各缺陷的可能原因进行分析，并给出相关解决措施。

1. 胶段缺失

胶段缺失是指根据工艺文件要求，在零件某位置应该存在的胶段并没有存在，包括整段的胶段缺失及部分胶段缺失，如图3所示。

(1) 原因分析 造成胶段缺失



图3 胶段缺失

缺陷的可能原因是人工涂胶过程中，胶段遗失或长度不足；在自动化涂胶中，程序未优化好可能会导致胶段缺失或长度不足，也可能由于出胶信号被打断等原因造成机器人虽运行了轨迹却未涂胶。

(2) 解决措施 对于人工涂胶，应在操作前给加工人进行培训，获得资格后方可进行操作，操作过程中应严格按照工艺文件要求进行操作，如果涂胶长度较难保证，可使用涂胶样板辅助涂胶。同时为便于加工人操作，可在操作工位附近，悬挂涂胶样件，方便加工人比对；同时可增加自检和互检的频率以确保涂胶质量。对于自动涂胶，首先应检查程序，确保机器人运动指令、程序初始化、信号等语句等正确，避免信号中断后出现未涂胶并无报警。自动化涂胶大多伴随自动在线监控设备，应优化监控系统，避免错检漏检，提高系统可靠性。

2. 宽度不足

在破坏性检测（剔试）评估标准中，为保证一定的胶接强度，对于胶的破坏面宽度有明确的要求，根据胶段的功能、重要等级，宽度要求有所不同。当断裂面宽度不满足要求时，即判定为缺陷点。如图4所示。

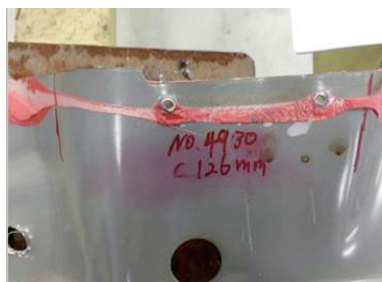


图4 宽度不足

(1) 原因分析 涂胶宽度是直接影响胶接断裂面宽度的原因，因此造成此缺陷的可能原因是人工涂胶、自动涂胶的涂胶量不足，另外如果板件角度变化大，机器人在涂胶过程中胶枪的角度如果没有随板件变化，可能会造成拐角处涂胶量不足等情况。

(2) 解决措施 对于人工涂胶，出胶量与枪的压力及枪移动的速度有关，因此，应按照工艺文件合理调整胶枪压力，控制涂胶速度。其他措施与上述缺陷一致。对于自动涂胶，应合理设定机器人轨迹，重点关注零件曲率大的位置，必要时可在重点位置适当降低涂胶速度。

3. 间隙过大

板材的压合状态对胶黏剂被压后的宽度有很大影响，如果零件尺寸超差或者匹配不良都会引起此缺陷。间隙过大就是由于板材间隙过大导致胶黏剂没有得到很好的压合，从而使胶接宽度不能满足要求（见图5）。它的缺陷状态与宽度不足类似，但是通过仔细观察，可以将它与宽度不足区分开。对于间隙过大的缺陷，可以看到胶接宽度虽然没有满足要求，但是胶层厚度较大，没有得到足够的压合，即可认为涂胶量是足够的。而宽度不

足的缺陷中，胶层厚度较小，整体胶量不足。

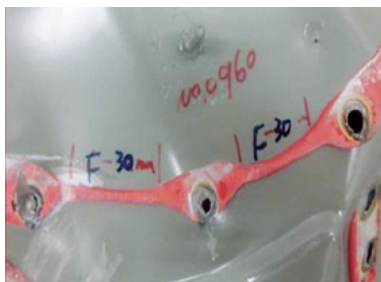


图5 间隙过大

(1) 原因分析 尺寸是造成此缺陷的主要原因，零件尺寸超过公差范围、板件在加工过程中可能由于连接后的应力造成变形、板材夹紧力不足等都是可能的原因。

(2) 解决措施 首先要检查工装夹具，不合适的定位、夹紧力等，检查零件是否在加工之后发生了变形，造成了较大间隙。如果定位、夹紧力没有问题，现场工装也没有调整的空间，需检查零件的尺寸报告，是否存在超差形成匹配不良等。零件的设计尺寸、装配尺寸通常较难保证，如果实在无法消除间隙，只能通过增加局部涂胶量的方法来弥补此缺陷。

4. 位置错误

位置错误即涂胶位置与工艺标准位置的偏差超过要求。位置错误看似是非常简单的错误，但在生产过程中却是经常出现的缺陷。工艺文件中通常对涂胶位置没有量化的位置要求，通常只是位置示意图，胶段的设计位置通常是位于零件法兰边、连接点下方等。因此胶段的位置正确和胶段能否提供其功能密切相关。位置不正确的胶段，即使连接强度满足要求，但如果没有实现其功能，也是没有意义的。如图

6所示。

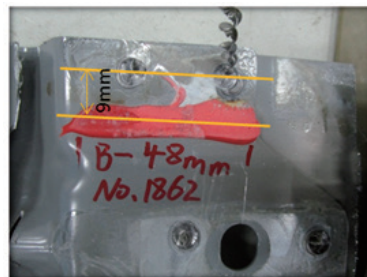


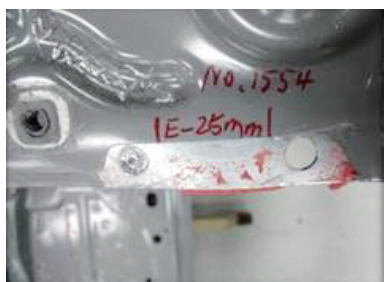
图6 位置错误

(1) 原因分析 如图5所示，胶段应该位于焊点正下方，但实际胶段位置偏移了9mm，这就不能提供焊点附近的防腐功能。造成此缺陷可能是由于胶段位置错误，也有可能是焊点位置偏移了。造成涂胶位置偏移可能的原因是工人或机器人程序未在公差范围内涂胶，如果零件摆放位置变动，相对于机器人枪嘴的位置发生了变化，或是机器人枪嘴中有异物，同样会导致胶段偏移发生。另外，如果工件表面油污过多，可能会导致在涂胶过程或是零件转运过程中的胶条位置变化。相反，如果连接点的位置相对涂胶发生变化也会导致此缺陷发生。

(2) 解决措施 首先要保证人工/自动涂胶位置正确且稳定，在人工操作过程中应注意保证枪嘴与板件保持 $90^\circ \pm 5^\circ$ 的夹角，避免因角度过大导致位置偏移。对于位置难以把控的零件，可采用涂胶样板，人工持胶枪沿着样板进行涂胶。对于自动涂胶，应及时检查枪嘴并加强位置检测的可靠性，一旦出现缺陷及时改正，避免造成缺陷。另外，需要其他连接技术及尺寸工程师注意，一旦发生过位置调整，务必要确保其与涂胶位置的匹配性。

5. 单面粘

单面粘是指胶黏剂与被粘物发生粘附失效，如图7所示。单面粘意味着胶黏剂未与被粘物实现有效的粘附，会导致粘结强度较低，连接失效。



(a)



(b)

图7 单面粘

(1) 原因分析 单面粘是胶接缺陷中较为复杂的缺陷之一。零件表面油污过多是最易形成此缺陷的原因，胶黏剂通常具有一定的吸油能力，当被涂在板件上后一部分油被胶黏剂吸收，一部分油被排开。另外一少部分有残留在胶黏剂与板件之间，如图8所示。当油量超出可以忍受的公差范围，或是使用了错误的油，将会导致油污在胶与板件之间过多，影响胶黏剂的润湿效果，影响粘合性。另外，零件如果长时间存储，会导致表面油的黏度升高，导致涂胶后不能将一定量的油排开。时间的存储也会使油吸收大量的灰尘，阻碍胶与板件的接触及对油的吸收。

除去零件表面的原因外，另外

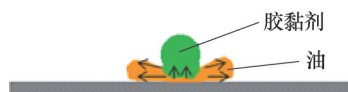


图8 油对胶黏剂的影响

一个主要的原因就是板材的移动和变形。不同板材的热膨胀系数不同，且在烤箱中由于内外温差也会导致板材受热不同。他们在烤箱中的变形量就存在不同，加之板材间的应力作用，最终导致被粘物发生错位或间隙变化。如图9所示，可以看出板材在烘烤前后由于两层板材热膨胀系数或温差等原因导致某一层板材发生形变，在两段应力作用下导致间隙增大，胶黏剂连接失效，出现单面粘。零件的间隙过大或过小也会导致单面粘的缺陷。烘房的加热和降温过程对板材的变形影响很大，过快的加热过程会导致内外板温差加大，变形增大，降温速度过快，导致热应力不能够得到释放。另外，板件夹紧力过大、其他连接技术对表面的冲击力过大等也会造成单面粘。

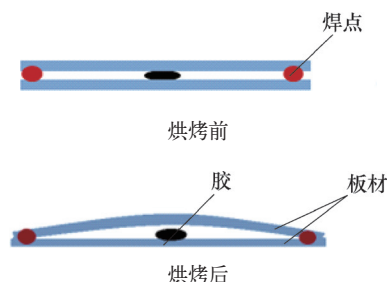


图9 板材热变形对胶黏剂的影响

(2) 解决措施 缺陷出现首先应检查表面的油污是否超过胶黏剂允许的公差范围，油的使用是否正确，是否存放过长，是否涂胶温度过低。检查零件匹配，是否存在不良的匹配，夹紧力过大等问题，如果存在，应及时联系工装尺寸的工程师进行优化。检查是否存在间隙过大或过小等问题，调整胶段附近

连接点的压力，避免冲击力过大。如均没有发现上述问题，尽量检查烘烤前后的板件变化，是否存在间隙变化。如确实存在间隙变化，要检查烤箱的烘烤曲线是否满足要求，间隙能否通过调整烘烤曲线或焊装过程调整。如果过程中的超差不能被消除，只能通过增加涂胶量或更换其他胶黏剂进行测试。

6. 蜘蛛网

蜘蛛网缺陷是指内聚失效和粘合失效频繁交替出现，类似于混合失效，其断面的状态类似于网状结构，因此取名蜘蛛网，如图10所示。蜘蛛网缺陷使有效胶接面积变小，会导致强度不足等缺陷。



图10 蜘蛛网缺陷

(1) 原因分析 蜘蛛网缺陷是胶接缺陷中另一个较为复杂的缺陷。根本原因是板件的回弹，但是板件的回弹从何而起就是一个比较复杂的过程。工装夹紧力过大，会让零件保持较小的间隙，但是当附近的连接点完成后，零件可能并不能保持有夹具时的匹配状态，发生回弹，即形成了蜘蛛网。工艺过程中，如果夹具缺少或失效也会导致板件的回弹。工艺过程中的诸多连接技术如点焊、HSN、Impact等，枪都会在工作过程中直接作用在板材上。过大的作用力会造成过大的冲击，易对其中的胶黏剂造成不良

影响或引起板材变形等。另外，如与单面粘缺陷一样，在转运及烘烤的过程中，过大的振动及过快的烘烤都会使板材的波动，进而影响胶接结果。

(2) 解决措施 首先应排查缺陷发生的时间点。对装焊白件直接放入测试烤箱进行模拟烘烤，剔试检查缺陷是否存在。如果缺陷存在，则应对零件的工装夹具等进行检查，检查是否存在不合适的夹紧力和间隙、零件匹配是否合理，检查加工后零件的状态是否和加工前一直，是否存在间隙变化。对于工装夹具可以通过垫片进行调节，如

果加工后出现间隙变化，则应考虑零件变形的原因，可以通过调整连接点完成顺序进行优化。如果是来件尺寸超差造成，则应及时联系冲压部门进行优化。检查其他连接技术的参数设定是否合理，避免过大冲击力。若缺陷不存在，说明缺陷发生在装焊后至喷漆过程。还可继续通过剔试电泳前、电泳后进行结果对比，进一步判定发生的时间节点。若泳前存在缺陷，则需要对零件转运过程进行排查，是否存在较大的振动或转运过程中较大的温差变化。若泳前不存在缺陷，泳后出现缺陷，则需要检查电泳过程及烘

房炉温曲线。如果各项检查均无问题，可以尝试通过在缺陷附近增加连接点的方法，来控制蜘蛛网的产生。

结语

目前胶接缺陷的非破坏性检测手段尚不成熟，准确的检测方法还是以破坏性的剔试为主。生产中一旦出现胶接缺陷很难立刻发现，因此控制涂胶质量、避免批量问题发生是汽车厂应该重点关注的方向。对于重要功能的胶段、不稳定的涂胶状态应加强检查频次，避免缺陷产生。 **AUTO1950**

汽车工艺师 2019年 第5期 广告目录 Advertisement Catalogue

单位名称	查询编号	位置
汽车工艺师		封面
易格斯拖链轴承仓储贸易（上海）有限公司	1298	封二
第三十三届中国国际塑料橡胶工业展览会	0101	封三
励进展览（上海）有限公司	0089	封底
株洲欧科亿数控精密刀具股份有限公司	7125	1
第十八届国际内燃机及零部件展览会	6688	2
2018年亚洲国际动力传动与控制技术展览会（PTC ASIA 2018）	8146	3
湖北立嘉会议展览有限公司	0008	4
第二届汽车工艺师论文大赛	0088	10