

电阻点焊断裂模式

电阻点焊 (RSW) 是一种非常稳健的连接金属材料的工艺。尽管电阻焊行业一直在发展，但真正使RSW工艺稳定性和控制得到改善的，是中频直流电源与现代焊接控制器的结合。配置得当的焊接控制器能够利用各种输入信号，在焊接过程中实时调整特定参数，并记录这些结果以供历史追溯，这简直堪称革命性的进步。其中一个重要原因是，它让电阻焊领域的人们几乎能够"看到"焊接过程中的内部情况。我们在这方面所见证的进步确实令人惊叹。

然而，即使我们面对的是一个经过认证的、稳健的RSW工艺，一旦焊点完成，我们如何判定其合格性呢？在我看来，关于焊点合格性的问题，有时既涉及焊接的物理特性，也引发了对焊接本质的哲学性讨论。我这样说是因为：我们无法最终确定使用哪种评估流程或验收标准来判断焊点的质量。主要原因是，对于什么构成一个令人满意的焊点，并不存在一个普遍接受的定义或理解。简而言之，对一个应用或材料而言合格的焊点，对另一个可能就不合格。确定焊点质量要求的一个重要方面，是了解那些能够表征焊点的可用测试程序。

确定焊点合格性的方法可能有很多种，包括利用破坏性和非破坏性评估元素。需要指出的是，各种NDE方法正变得越来越可靠，并且理所应当地成为任何RSW质量计划中不可或缺的一部分。它们也使得可以减少、甚至可能完全消除某些破坏性评估环节。话虽如此，破坏性评估过程仍有其用武之地，其中较常用的一种方法就是机械分离有问题的点焊部件。

众所周知，破坏性分离点焊件有其自身的局限性。这些局限性包括但不限于：Associated with scrap, 支持这项工作所需的时间和设施要求，以及分离某些组件的潜在困难。随着过去多年来汽车车身结构所用钢材的发展，最后一点正日益凸显。最后，尽管下面的讨论可能也适用于有色金属合金，但由于其强度较低，在进行破坏性评估时通常不会遇到像钢材和其他铁基合金那样多的问题。

尽管如此，一旦实际焊点被分离，人们所能了解到的东西仍然可以非常有启发性。然而，在我们进一步讨论之前，现在或许是一个好时机，先预先定义一些我们将用来讨论分离后点焊的术语。

- **熔核**：点焊过程产生的重铸结构。就我们的目的而言，最好的检验方法是进行横截面金相评估。
- **纽扣**：在破坏性评估过程中撕裂出来的那部分点焊，包含全部或部分熔核。
- **贴合面**：被连接金属材料之间的接触界面。
- **断裂模式**：破坏性评估后点焊的外观。可能的类型包括：纽扣拔出、部分厚度断裂、全界面断裂，或三者的任意组合。
- **熔合区**：在贴合面处熔核的可测量区域。它可能包括纽扣拔出、部分厚度断裂、全界面断裂，或三者的任意组合。

一点历史

要回答如何在破坏性分离后解读点焊的问题，我们需要回顾和理解在先进高强度钢出现之前，与RSW相关的人员关于焊接完整性的普遍认知。

从质量和工程的角度来看，当时的理解是希望在电阻点焊的破坏性评估中获得一个纽扣。人们认为，存在一个尺寸足够的纽扣，就证明了该焊点能够为应用提供必要的工程性能。'足够尺寸'的定义因制造商而异，但大家都认为焊点纽扣是必要的。

焊点纽扣还有其他好处。从质量角度来看，在操作员重复性/再现性的限度内，它们提供了一种判定焊点质量的客观方法。另一个好处是，焊点纽扣的尺寸可以随时间进行跟踪和趋势分析，因此焊点质量可以以一种主动的方式被用来衡量并在必要时改进工艺稳健性。

钢材变得更强

然而，开始在更硬的部件中使用更强材料的需求，对破坏性评估持续产生焊点纽扣的能力产生了影响。发生的情况是，在更大厚度下，使熔核失效所需的力量比剪切周边区域所需的力量要小。这意味着较厚的材料常常无法拉出纽扣。

解决此问题并确保产生纽扣的一种方法是增加要求的最小焊点尺寸。这个想法不仅得到了检测界的 support，也得到了设计界的 support，他们认为需要更大的焊点才能充分利用更强材料的性能。

电阻点焊断裂模式

然而，增大焊点尺寸的潜力是有限的。具体来说，从实用角度出发，能够经济且稳健地生产的点焊尺寸有多大。此外，很快人们就发现，焊点尺寸的增加会迅速达到一个临界点，超过之后机械性能的提升将微乎其微。

由于基于传统钢材测试的普遍认知认为，在破坏性评估中能产生超过要求最小尺寸的完整纽扣的焊点，才能提供足够的强度，因此任何与电阻点焊相关的人都不认为呈现其他断裂模式的焊点是可接受的，这也在情理之中。对这种推理思路的挑战，来自那些需要很大力量才能分离、产生显著材料变形、但导致形成（至少在当时）不理想断裂模式的点焊。

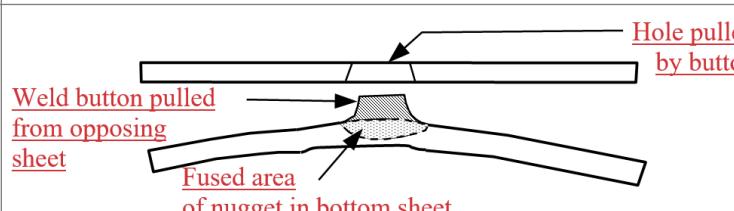
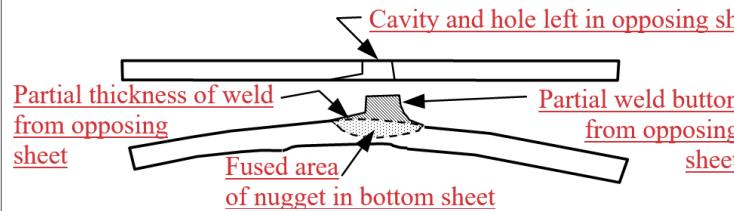
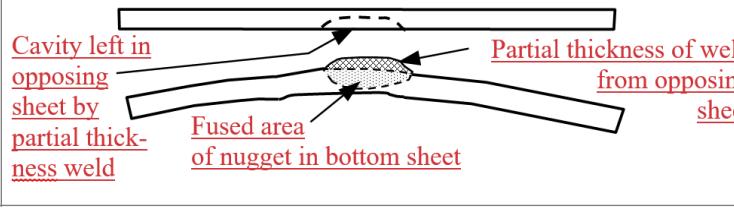
研究不同断裂模式可行性的最初动力来自制造工厂的反馈。车间辛勤工作的人员面临着独特的情况，并向其公司的工程组织寻求帮助。在那个时候，每个原始设备制造商都开始着手解决这个问题。需要解决的众多关切点，不仅包括保持他们所生产焊点强度的能力，还包括如何检验它们并确定其合格性。

尽管有证据表明，不产生焊点纽扣的电阻点焊也能实现很高的强度，但直到AHSS出现，始于HSLA材料的思维转变才得以巩固。这项工作的最终结果如下方的表-1所示。

用断裂模式进行表征

整个焊接界开始通过美国焊接学会和汽车/钢铁伙伴关系的标准委员会会议来认真理解断裂模式的问题。这些委员会会议揭示了一个事实，即这些担忧在行业内广泛存在，并且每个OEM都从略微不同的角度来处理电阻点焊中的断裂模式问题。现实情况是，尽管他们的解决方案各不相同，但都在应对一个共同的关切。具体来说，一个合格的电阻点焊在机械分离时是否需要一个纽扣？如果不需要，用什么来替代作为合格焊点的证据？

解决这些问题所采取的方法有时是艰辛的，需要来自焊接界许多方面的专业人士的辛勤工作和奉献，包括制造业、供应链基础和研究领域。他们努力的成果总结包括识别了八种不同的断裂模式，并确立了三个应用于确定电阻点焊状态的关键表征要素：熔合区尺寸、母材变形的存在，以及计算得出的纵横比。

Fracture Mode	Elements	Side View
Mode 1	Botton Pull	 <p>Hole pulled by button</p> <p>Weld button pulled from opposing sheet</p> <p>Fused area of nugget in bottom sheet</p>
Mode 2	Partial Thickness Fracture with Button Pull	 <p>Cavity and hole left in opposing sheet</p> <p>Partial thickness of weld from opposing sheet</p> <p>Partial weld button from opposing sheet</p> <p>Fused area of nugget in bottom sheet</p>
Mode 3	Partial Thickness Fracture	 <p>Cavity left in opposing sheet by partial thickness weld</p> <p>Partial thickness of weld from opposing sheet</p> <p>Fused area of nugget in bottom sheet</p>

电阻点焊断裂模式

Mode 4	Interfacial Fracture with Button Pull and Partial Thickness Fracture	
Mode 5	Interfacial Fracture with Button Pull	
Mode 6	Interfacial Fracture with Partial Thickness Fracture	
Mode 7	Interfacial Fracture	
Mode 8	No Fusion	

表1: RSW断裂模式

上述断裂模式是点焊分离时三种可能结果（除了未熔合）的组合：纽扣拔出、部分厚度断裂和/或界面断裂。虽然看似相当基础，但这些模式的创建是一个突破，使焊接界能够全面表征任何材料中的点焊。

所有上述项目均已记录在下列任何规范中。更多详情请参考这些规范的最新版本。

- AWS C1.1
- AWS D8.1M
- AWS D8.2M

AHSS的广泛使用突显了一个理念：看待电阻点焊质量的方式可能不止一种。正如AHSS通过不同于传统钢种的方法获得其独特性能一样，焊接界在焊接这些独特材料时，也必须从不同的角度看待其最终产品。

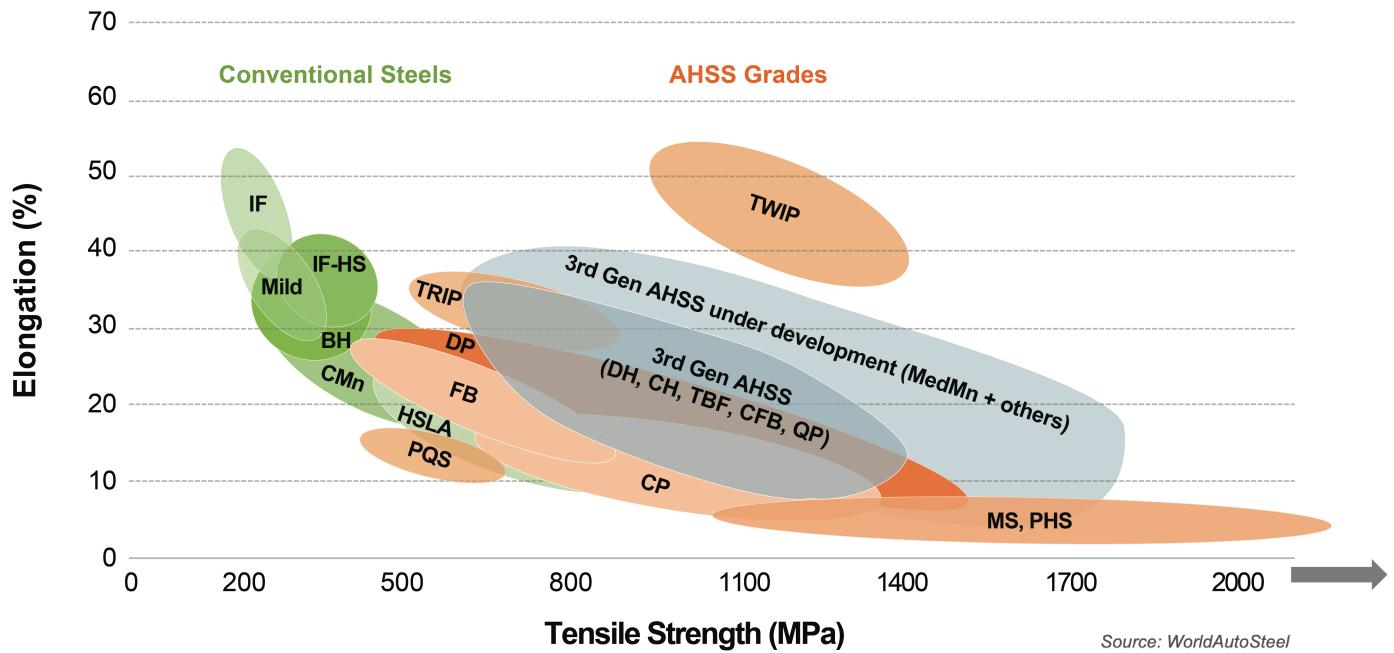
*美国焊接协会是一个非营利性组织，致力于推动焊接及相关连接与切割工艺的科学、技术和应用。

** 汽车/钢铁伙伴关系是一个由汽车和钢铁OEM组成的专业联盟。

电阻点焊断裂模式

*** 表-1中的图像由我前任主管和导师 Jim Dolfi 提供。在Jim从福特退休后，我们仍保持联系，讨论各种话题，但通常会回到焊接上。这些图像来自他分享的关于早期尝试理解焊点分离问题的文件。这些图像的后期版本已出现在各种文档中，包括前面提到的AWS标准。Jim分享的是嵌入图像，无法编辑，故有红色字体。感谢分享，Jim。安息吧，我的朋友。

Donald F. Maatz, Jr. 供职于Milco Manufacturing, 担任高级焊接工程师。他是AWS底特律分会的前任主席，担任D8和D8.9汽车焊接委员会的委员，是D8D委员会的主席，C1电阻焊委员会的顾问，是AWS认可的CWI，也是RWMA学院的讲师。他毕业于俄亥俄州立大学，获得焊接工程学士学位。若非Milco团队成员的支持，本文不可能完成。



全球可成形性图，由WorldAutoSteel提供。该图也被称为“钢香蕉图”。这是我听到并最常用于描述此图的名称。