

A Study on Spotweld Failure in the Side Member Impacts

Qian PENG¹, Jikuang YANG¹, Bin CHEN², Shenrong WU²

¹State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Changsha;

²Automobile Engineering Research Institute, Chery Automobile Co. Ltd, Wuhu, China)

Abstract: This study aimed to investigate the failure mechanisms of the spotweld of the longitudinal beam in front impacts. For this purpose, a side member FE model was established and validated using sled crash tests. The failure parameters were defined based on the failure mode at the combined loading condition. The validated FE model of the side member was used to analyze the effect of spotweld failure on the side member. The spotweld failure was also analyzed and discussed at different impact speed. The results from this study indicated that the spotweld failure could result in varying deformation modes of side member, which can make the changes of energy absorbing of side member.

Key words : spotweld failure , impact speeds ,energy absorption

焊点失效对前纵梁高速碰撞影响的分析研究

彭倩¹, 杨济匡¹, 陈斌², 吴沈荣²

(1 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙, 410082; 2 奇瑞汽车股份有限公司汽车工程研究院, 芜湖, 241009)

摘要: 本文研究了焊点在碰撞中的失效机理。建立了前纵梁碰撞的有限元模型, 基于焊点受载荷的合成失效模式, 定义纵梁上焊点的失效参数。结合相关的台车试验, 来验证前纵梁的模型。针对验证的有限元模型, 从前纵梁受力, 能量吸收等方面, 来讨论焊点失效对前纵梁碰撞结果的影响。并研究不同碰撞速度对焊点所受载荷以及失效情况的影响。研究结果显示: 焊点失效会引起纵梁变形模式的变化, 而引起吸能情况的改变。

关键词: 焊点失效, 碰撞速度, 吸收能量

1.前言:

电阻焊是汽车车身上最主要的连接方式, 在车身上分布了大约 2000~5000 个焊点。在整车碰撞过程中, 焊点失效的情况经常发生。焊点失效对碰撞力的传递带来直接的影响, 关键吸能区域焊点的失效, 容易对车身的变形模式及吸能特性带来显著的变化。当前, 焊点在高速碰撞中失效机理的研究以及焊点失效在仿真分析中的应用相对较少。随着 CAE 技术的迅速发展, 碰撞仿真的精度要求逐渐增加, 因此, 研究焊点失效对提高整车碰撞仿真精度有非常重要的意义。

在热循环过程中, 焊点以及其周围区域产生了部分异质结构, 从材料特性来看, 划分为三块区域: 焊核, 热影响区域, 母材区域^[1]。焊点失效主要有两种形式 (如图 1, 2 所示): 拔拉模式与界面断裂模式。在焊点内部及其周围, 界面断裂模式主要表现为熔接区域出现裂痕及其延伸, 而拔拉模式主要表现为焊核从母材上的脱离^[2]。在低强度材料试件的连接中, 容易出现拔拉模式失效, 对于高强度材料的连接, 截面断裂失效模式则相对较多^[3]。



图 1.界面断裂失效模式



图 2. 拔拉失效模式

2.焊点失效机理的研究

为了研究焊点的失效准则, 国内外研究机构开展了多种形式的焊点力学试验, 其中包括单焊点的拉伸试验以及多焊点

的部件拉伸试验。关于单焊点的拉伸试验，常见的有KSII实验，搭接剪切实验，十字剥离实验等（如图3，4）；对于多焊点的试验，常采取多焊点的部件拉伸试验方式，常见的有T型截面部件实验等^[4]。



图3 剥离实验

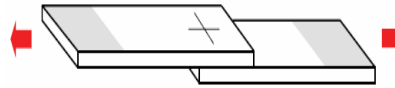


图4 搭接剪切实验

焊点失效的机理比较复杂，与焊点的分布以及所受载荷等多方面原因有关。在国内外研究中，P. Wung研究认为：焊点失效与切向受力，法向受力，所受转矩以及剥离弯矩等有关^[5, 6]。Manuel Marya研究表明：焊点失效强度与母材的断裂强度及厚度，焊点直径密切相关^[7]。

基于P. Wung的研究结果^[8]，当焊点所受载荷满足表达式1时，焊点发生失效，表达式中的分母分别代表在基于剪切，剥离，法向拉伸以及平面转矩等失效形式下，焊点失效的临界载荷。

$$\left(\frac{f_s}{F_c}\right)^\alpha + \left(\frac{m_b}{M_h}\right)^\gamma + \left(\frac{f_n}{F_n}\right)^\mu + \left(\frac{m_t}{M_t}\right)^\beta = 1. \quad (1)$$

在软件LS-DYNA中，针对焊点失效的模拟分析，开发了基于不同失效机理的定义方式^[9]，其中包括了基于应变失效，剪切，正向，转矩合成载荷作用失效以及以上载荷的单一形式失效等。焊点材料的模拟使用各向同性硬化塑性材料。表达式2是对基于合成载荷失效的方程。

$$\left(\frac{\max(N_{rr}, 0)}{N_{rrF}}\right)^2 + \left(\frac{N_{rs}}{N_{rsF}}\right)^2 + \left(\frac{N_{rt}}{N_{rtF}}\right)^2 + \left(\frac{M_{rr}}{M_{rrF}}\right)^2 + \left(\frac{M_{ss}}{M_{ssF}}\right)^2 + \left(\frac{M_{tt}}{M_{ttF}}\right)^2 - 1 = 0 \quad (2)$$

3 模型的建立与验证

为了研究焊点失效对车身关键结构件在碰撞吸能方面的影响，开展了台车前纵梁的碰撞试验。本次试验的试件取自于国内某车的前纵梁，该前纵梁试件总长470mm，前后分为两段，通过激光拼焊的方式连接起来，如图5，6所示。拼焊前段长度为250mm，使用厚度为1.8mm的双相钢DP600；后段长度为220mm，使用厚度为2.2mm的材料SAPH440。前纵梁左右由内板和外板组成，内板与外板通过电阻焊连接在一起，纵梁的截面如图7所示。焊点均匀分布在纵梁的翻边上，焊点直径为7mm，平均间距为48mm。为了便于识别，给焊点进行编号如图6所示。纵梁的后端通过电弧焊的方式固定在台车前端面的中部，台车的质量为1020kg，以25km/h的初速度与固定刚性障碍壁发生碰撞。为了避免台车与障碍壁发生刚性碰撞，在台车前端面固定两根保护吸能梁。在台车碰撞区域顶部放置高速摄像机，来拍摄纵梁碰撞的全过程，台车的加速度由固定在台车质心位置的传感器测得，台车如图8所示。

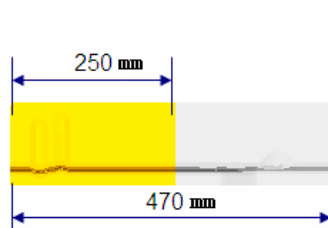


图5 左侧视图

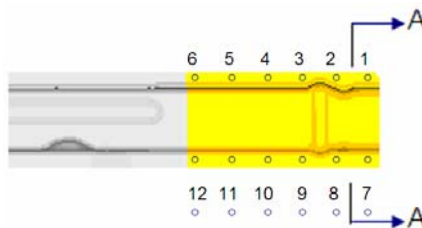


图6 右侧视图

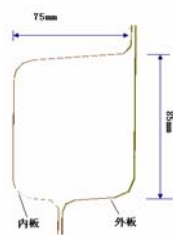


图7 前纵梁截面 A-A



图8 前纵梁台车试验

前纵梁模型用 5×5mm 大小的 Belytschko-Tsay 壳单元来模拟。纵梁材料 DP600 及 SAPH440 的材料特性,通过高速拉伸试验获取,其高速应力-应变特性通过 Cowper-Symonds 的方式来定义,具体的材料特性见表 1。台车有限元模型按照原尺寸建立,台车有限元模型与试验台车具有相同的形状,质量及质心位置。

表 1 纵梁材料的材料特性表

材料	厚度(mm)	屈服强度(mpa)	断裂强度(mpa)	延伸率	C (1/S)	P
DP600	1.8	370	650	0.2	1800	3
SAPH440	2.2	340	550	0.18	8000	5

焊点材料根据关键字*MAT_SPOTWELD_DAMAGE_FAILURE来定义焊点的可失效模式。焊点单元使用Bar2 单元来模拟,设定焊点直径为 7mm。Manuel Marya文献提到,在焊点的准静态拉伸试验中,连接 1.8mm厚DP600 钢板的焊点,直径为 7mm时,该焊点在仅受轴向载荷作用下,拉伸失效时,拉力的大小为 21.5~23.5KN。而其轴向载荷极限为其切向载荷极限的 60%~70%。在本次研究中,定义轴向失效载荷为 22.5KN,切向失效载荷为 36KN,根据文献^[10],两片板厚为 2.2mm的钢材SAPH440 的轴向失效载荷为 26KN~28KN,切向的失效载荷为 45 KN。

3.2 模型的验证

高速摄像机拍摄到了纵梁变形全过程,包括了纵梁的压缩过程,焊点失效位置以及相应的失效时间等。纵梁与刚性障碍壁的碰撞作用时间为 60ms,纵梁在碰撞过程中出现溃缩变形,台车的保护吸能筒没有接触到刚性障碍壁。纵梁的长度变化如表 2,纵梁的前段总共有 6 处焊点失效,上翻边有 4 处失效,下翻边有 2 处失效,纵梁后段没有出现焊点失效。由于高速摄像机只能拍摄到上翻边焊点的失效,因此,本文模型的验证主要讨论上翻边焊点的失效。

表 2 前纵梁的变形结果

	变形区间长度 (mm)	压缩后长度 (mm)	拼焊前段变形(mm)
仿真	270	73	55
实验	265	69	52

纵梁的变形以及焊点的失效如图 9 所示,包含了界面断裂以及拔拉失效两种模式。如表 3 所示,上翻边上 ID 号为 2, 3, 4, 5 的焊点发生失效,与仿真中对应焊点的失效模式以及失效时间进行对比,在仿真中没有分别定义界面断裂以及拔拉模式,主要对比失效焊点的位置以及失效的时间。仿真与实验具有相同的失效焊点,失效时间也基本一致。

表 3 焊点失效的位置及对应的失效时间

失效焊点 ID	实验		仿真
	失效形式	失效时间 (ms)	失效时间 (ms)
1	未失效	-	-
2	界面断裂	10	9.5
3	界面断裂	6	7.3
4	界面断裂	19	18.5
5	界面断裂	40	38.7
6	未撕裂	-	-

台车质心位置的传感器测得了加速度曲线,将仿真中的曲线与试验曲线进行对比,如图 10。从加速度曲线来看,试验与仿真的加速度曲线具有近似的加速度波形以及相近的加速度峰值。从台车速度曲线来看,仿真与试验具有很接近的速度变化以及相同的碰撞时间。

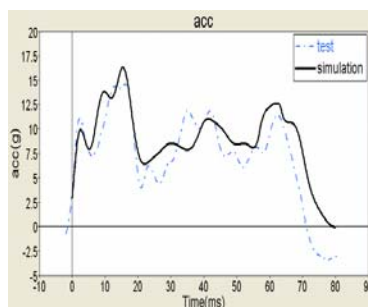


图 10 碰撞加速度曲线对比

从纵梁的溃缩模式以及变形细节来看（如图 11，12），仿真中出现的细节特征与试验非常近似，其溃缩的模式和溃缩的长度也非常近似。



图 11 前纵梁变形的左视图



图 12 前纵梁变形的俯视图

从以上几个方面的对比来看，仿真结果在加速度曲线，碰撞作用时间，失效焊点的位置和时刻，以及纵梁的变形等方面，与实验结果吻合较好。可以认为仿真与实验具有了较高的近似程度，建立的仿真模型可以为后面的分析工作提供可靠的依据。

4. 焊点失效对前纵梁碰撞的影响

4.1 焊点失效的影响

为了研究焊点失效的影响，在建立的台车纵梁有限元模型的基础上，取消对焊点失效的设置。对比定义焊点失效与未定义焊点失效两种模型的结果，从纵梁截面的受力，纵梁前段的压缩情况，能量吸收等方面来考察焊点失效对碰撞结果造成的影响。

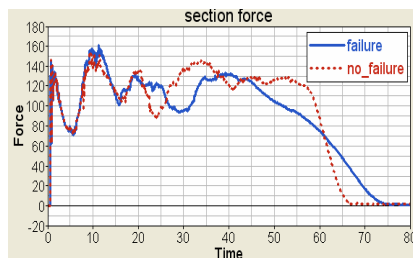


图 13 纵梁截面受力的对比

纵梁截面受力如图 13，在 7ms 以内，两种情况下碰撞作用力的情况完全相同。在 7~10ms 时刻，焊点 2 和 3 相继出现失效，纵梁截面力在 7~13ms 之间出现差异，焊点失效造成此时间段碰撞力的降低。在 20ms 以后，焊点失效数量逐渐增多，

纵梁溃缩特性逐渐发生变化。两种定义模式下，纵梁的变形模式出现了明显的区别。如图 14，定义失效时，纵梁前段变形更加充分，而未定义焊点失效时，纵梁前段出现失稳，在距离拼焊位置前部 30mm 处出现了明显的折弯，纵梁前段外板变形并不充分，但前段折弯对纵梁后段造成了强烈的挤压，导致纵梁后段严重变形。纵梁与刚性障碍壁的碰撞在 60ms 结束，而未定义失效，碰撞时间比定义失效长 3ms。

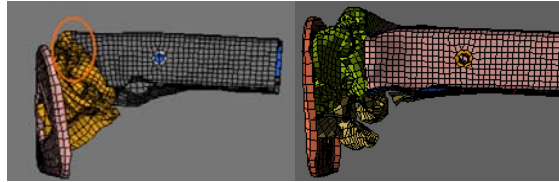


图 14 纵梁的变形对比

表 4 在焊点失效与不失效情况纵梁的对比

	压缩长度 (mm)	碰撞结束时间(ms)	吸收能量 (J)
定义失效	55	60	20820
不定义失效	64	63	20078

纵梁前段吸能如图 15，定义焊点失效时，纵梁前段吸收能量 20820J，而未定义焊点失效时，纵梁前端吸收能量 20078J。在 30ms 以前，焊点未定义失效时，纵梁前段吸收的能量比定义焊点失效时吸收能量更多，30ms 以后，未定义焊点失效的部分却吸收了更多的能量。

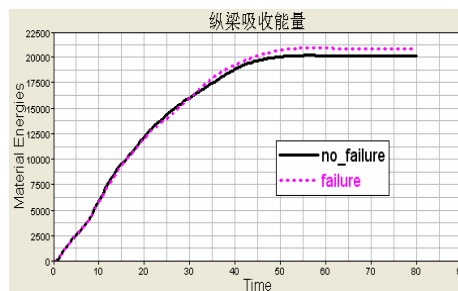


图 15 纵梁吸收能量的对比

从变形模式来看，焊点定义失效时，纵梁前段从 250mm 压缩到 55mm，而纵梁后段 30mm 部分发生了变形，而未定义焊点失效时，纵梁前部压缩到 64mm，后部变形区域为 38mm。当纵梁焊点发生失效时，其前端刚度降低，纵梁后段焊点没有失效，在后段的挤压作用下，纵梁前段的变形更加充分，前段吸收了更多能量。

4.2 碰撞速度的影响

为了研究初始碰撞速度对焊点失效造成的影响，给台车定义了不同的初始速度 12km/h~35km/h，分析不同碰撞速度下焊点所受的载荷及其相应的失效情况，纵梁前段失效焊点的个数以及对应的失效时间如图 16 所示。

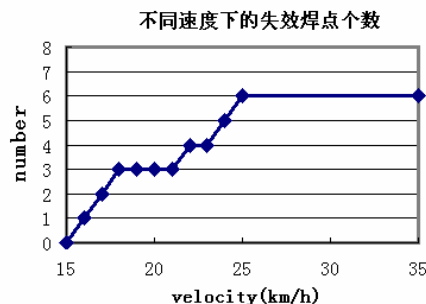


图 16 不同碰撞速度下的焊点失效

从焊点失效的情况来看，当碰撞速度在 15km/h 以下时，纵梁没有出现焊点的失效；当碰撞速度在 15~25km/h 之间时，

随着速度增大,失效焊点逐渐增多,焊点的失效区域主要集中在 2, 3, 4, 5 几个焊点。当碰撞速度大于 25km/h 时,纵梁前段完全变形,失效的焊点数量不再增加。

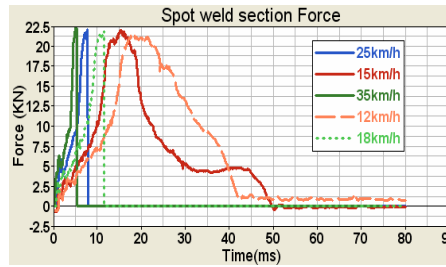


图 17 不同速度下焊点的切向受力

研究了 12~35km/h 碰撞速度下,焊点所加载荷的情况,以最早失效的焊点为例,来分析该焊点的受力情况。焊点 3 的受力如图 17 所示,当碰撞速度在 12~15km/h 以内时,该焊点的轴向力逐渐增大,而碰撞速度到 15km/h,焊点 3 所在的区域发生了溃缩变形,该焊点的受力出现临界的载荷,随着碰撞速度的增大,焊点 3 所处区域的变形更加严重,轴向拉伸作用更加明显,当碰撞速度达到 18km/h 时,焊点 3 出现失效。随着碰撞速度的增加,纵梁变形程度加剧,焊点所受轴向载荷增加,造成焊点的撕裂。

5. 讨论

本次研究的焊点模型基于合成载荷作用发生失效,经过纵梁台车碰撞试验验证,该定义模式能够较好地模拟高速碰撞下焊点的失效。

在以往的研究分析中,通常认为,焊点失效的过程中,由于焊点材料的撕裂会造成能量的流失,而随着焊点失效,结构件整体刚度出现降低,而造成吸收能量的降低。从本文的仿真分析来看,在第一处焊点失效的时刻,纵梁与刚性障碍壁的作用力发生降低。但随着碰撞进行,焊点失效引起纵梁出现不同的变形模式,未定义失效模式时,纵梁前端出现折弯,而定义失效时,该处折弯并不明显,由于焊点失效,纵梁前段变形更加充分,在碰撞过程中吸收了更多能量。

在该前纵梁的碰撞过程中,碰撞速度对焊点的失效造成了明显的影响。当碰撞速度较低时,前纵梁没有出现焊点失效;碰撞速度增加到 15km/h 时,焊点 3 出现了临界载荷。随着碰撞速度的增加,纵梁变形更加严重,该焊点所受载荷增加,引起了焊点失效。当碰撞速度在 15~25km/h 之间时,失效的第一个焊点,造成了局部刚度降低,引起了周围焊点的载荷增加而相继出现失效。当碰撞速度高于 25km/h 时,纵梁前段充分变形,焊点所受各向载荷并未出现增大,不会造成失效焊点的继续增多。

Acknowledgement

This study was supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) No. 2006AA110101 and “111 program” No. 111-2-11.

参考文献:

- [1] Wung, P., Walsh, T., Ourchane, A., and Stewart, W., (1999).The Ignored Failure Mode: Spot Weld under In-plane Rotation (Physical Test), SAE Paper No. 1999-01-3212.
- [2] CHAO Y J. (2003) .Failure mode of resistance spot welds: interfacial versus pullout, Sci. Technol. Weld.Joining, 8, 133-137.
- [3] Wung, P., Walsh, Z, Ourchane., (2001).Failure of Spot Weld under In-plane Static Loading, EXPERIMENTAL MECHANICS, 41, 100-106 .
- [4] Lin, S.H., Pan, J., Wu, S.R., Tyan, Z, and Wang, P., (2001).Failure Loads of Spot-welded Joints under Combined Open and Shear Loading Condition," SAE Paper No. 2001-01-0428.
- [5].Chow, C.L, .lie, M., and Wung, P., (2000).AnAnalytical Solution for Spotwelded Overlap Sheets,Internal report, University of Michigan at Dearborn.

- [6] S.-H. Lin, J. Pan, S. Wu and T. Tyan(2003).Failure Loads of Spot Weld Specimens Under Impact Opening and Shear Loading Conditions
- [7] Manuel Marya, (2003)"Tensile-Shear Forces and Fracture Modes in Single and Multiple Weld Specimens inDual-Phase Steels"
Journal of Manufacturing Science and Engineering. DOI: 10.1115/1.2137751
- [8] Wung, P.(2003).A Force-based Failure Criterion for Spot Weld Design
- [9] LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 970. April 2003.
- [10] Swellam, M.H., Banas, G., and Lawrence, EV., (1994)A Fatigue Design Parameter for Spot Welds,"Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures, 17, 1197-1204