

文章编号:1001-4888(2016)04-0483-12

拼焊板形式结构件动态轴向压溃特性实验研究^{*}

徐峰祥^{1,2}

(1. 武汉理工大学汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 湖北武汉 430070;

2. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北武汉 430070)

摘要:拼焊形式构件因配置灵活的优势已成为性能卓越的车身轻量化结构,目前还没有看到相关文献报导拼焊板形式结构件的吸能特性实验研究,故本文选用三种相同外形尺寸但不同组合的单帽型拼焊形式结构件,对轴向冲击载荷作用下的拼焊板组合试件的动态变形及吸能特性进行了实验分析。从动态压溃结果来看,拼焊板的材料和厚度的不同会直接导致实际碰撞加速度曲线波形也不同,即有上升型、平稳型和下降型;从动态变形和加速度来看,如果前后端部件的材料和厚度设计合理,前纵梁就会发生较为理想的褶皱变形。通过不同耐撞性性能参数的比较可知,载荷大小与拼焊板的材料和厚度组合以及焊缝的存在有关,而且载荷效率均达到了50%以上。通过拼焊板形式的组合匹配,可以得到更加平稳的载荷位移曲线,使得压溃变形更加平缓,吸能更加充分。碰撞模式与指标数据均显示拼焊板结构可以作为一种更加柔性的前纵梁吸能结构,可以为工程师们提供有效的设计指导,并为拼焊板结构的应用推广提供直接的基础依据。

关键词:高强度钢;薄壁管;拼焊板;耐撞性;实验研究

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-15-089

0 引言

汽车车身结构的轻量化设计要求其对材料充分利用,以达到最合理的材料组合,这是因为材料厚度的可变性以及其可靠的质量,保证了对某些重要位置的强化改进可以顺利进行,而这对车身结构的设计者而言增加了其设计的灵活性。拼焊板技术在很大程度上可以达到上述的性能要求,它可以将材料等级和厚度属性等灵活匹配。

然而,从拼焊板结构的设计基础及应用领域来讲,几乎绝大多数研究主要集中在拼焊板的冲压成形技术上,诸如材料力学性能、变形特点和成形极限等在冲压成形工艺设计中需要解决的问题^[1-5]。只是在最近几年,才有部分学者对拼焊板零件的设计进行了研究^[6-9]。比如,Omer^[10]研究了异种强度材料组合下的拼焊管件变形吸能特性,发现该结构能够吸收更多的能量且强度较高区域更不易发生变形失效。拼焊管件材料/厚度的灵活匹配使变形吸能过程中的载荷位移曲线出现多样性,可能完全不同于传统均质结构常规的“先出现全局峰值载荷→再渐进性褶皱变形→最后密实化”的三个典型变形阶段^[11, 12]。此外,冯振宇等^[13]根据性能指标提出了一种含不确定参数的薄壁结构吸能特性评估方法,并进行了算例研究,获得了稳定的结构吸能特性。也有相关学者采用优化策略对拼焊形式车身薄壁管件

^{*} 收稿日期:2015-06-01;修回日期:2016-04-25

基金项目: 中国汽车产业创新发展联合基金资助(U1564202),中央高校基本科研业务费专项资金资助(2016IVA037),机械系统与振动国家重点实验室课题资助项目(MSV201608)

通讯作者: 徐峰祥(1985—),男,博士,讲师。主要研究领域:车身轻质材料和结构轻量化设计。Email: xufx@whut.edu.cn

耐撞性和轻量化进行设计研究,比如陈吉清等^[14]建立了车身钢—铝混合拼焊前纵梁结构轻量化和耐撞性多目标优化数学模型,能够在改善耐撞性的同时提高轻量化水平;雷飞等^[15]从侧碰的角度,采用近似模型和优化算法对车身 B 柱拼焊板结构进行了设计,可以有效提高侧面碰撞的安全性能;施欲亮等^[16]从吸能能力等角度出发,推导并提出了车身拼焊板薄壁梁的轻量化控制方程和设计方法。

但是,仅有很少学者从实验方法的角度对拼焊板结构的吸能特性进行研究,比如 Xu 等^[17, 18]从准静态压溃和弯曲的实验角度出发,研究了不同组合下拼焊板结构的压溃和弯曲性能,并验证了拼焊板在吸能方面的优越性。拼焊板结构在车身耐撞性中的研究潜力主要体现在通过对材料厚度以及质量的严格筛选,改良了结构;同时可以控制更多的能量得到吸收,从而改良车身部件的抗击冲撞能力,提高车身的被动安全性。所以非常有必要分析动态碰撞条件下的拼焊板结构的吸能特性。

一般来说,结构变形的次序是由各个部位的强度决定,最薄弱的部位将首先发生变形,逐渐扩展到邻近的区域,这种变形次序的控制是汽车正面碰撞结构设计时需要关注的一种非常重要的内容,而拼焊板结构正好可以达到控制变形次序的目的。合理的变形次序不仅能够使结构有效发挥变形吸能作用,同时也能够在一定程度上引导结构的稳定变形模式。如果前纵梁的后端在碰撞时先发生屈曲变形,则很容易引起整个前纵梁结构的未变形区域的相对转动,形成效率较低的弯曲失效。同时,这种设计还应该保证前纵梁具有一定的承载能力,具体结构设计时,可以考虑将拼焊板前纵梁分为若干段,每一段设计为不同的承载能力,这样整个前纵梁结构的未变形区域就不会发生相对转动,这对于乘员保护是非常有利的。

本文通过动态台车碰撞实验,对不同拼焊板组合在不同给定初始速度条件下的动态变形及吸能特性进行了研究,比较了各种组合拼焊板薄壁结构的吸能和耐撞性参数,包括峰值载荷($F_{\max}$)和平均载荷(F_{avg})、总能量吸收(E_a)和比质量能量(SEA)吸收、载荷效率(CFE)、有效利用率(η)等。通过最合理的材料厚度性能组合,改变材料厚度以保证对某些重要位置的强化,增加了产品设计的灵活性。拼焊板薄壁结构能够很好地平衡不同耐撞性指标之间的关系,是耐撞性和轻量化设计中较为理想的功能结构。

1 实验方法

1.1 试件准备

本文所要进行的是薄壁结构的耐撞性实验研究,所用的试件是单帽型拼焊板薄壁构件,该拼焊板结构由两种不同材料和厚度的部件通过激光焊接工艺连接在一起,再经过折弯等机械加工工艺并通过电阻点焊等操作构造所研究的单帽型拼焊板吸能梁(如图 1 所示),该结构的几何长度等同于典型乘用车的前纵梁,详细的几何尺寸如表 1 所示,每侧均匀分布有 20 个焊点。表中 L 是总长度; D 是焊点直径; d 是焊点间距; x 是焊缝距离碰撞端的距离; a 和 b 分别是单帽型梁的宽度和高度; f 是法兰盘宽度; R_1 、 R_2 是圆角半径; t 是薄壁构件厚度。焊缝位置位于薄壁构件的中间(即 x 等于 200mm),薄壁构件在碰撞过程中不会出现焊点开裂,故本文不考虑焊接界面及残余应力的影响^[19, 20]。

表 1 单帽型拼焊板吸能梁几何参数(单位:mm)

Tab. 1 Geometry parameters of top-hat structures for dynamic impact (unit: mm)

L	D	d	x	a	b	f	$R_1 = R_2$	t
400	5	20	0~400	80	80	30	4	0.8~1.8

1.2 材料特性

随着汽车轻量化要求越来越高,越来越多的先进材料被应用于车身结构上。双相钢(DP-steel)是一种典型的高强度钢,由于其较好延展性和较好的强度而被认为可以用来制作像吸能梁这种车身结构件。本文所考虑的拼焊板结构由两种具有不同厚度的双相钢(DP590 和 DP780)组成,其相应的组合情况如表 2 所示。这里的三种材料/厚度组合可以代表真实工程应用中的任一种拼焊形式:(1) 同材异厚;(2) 异材同厚;(3) 异材异厚。由于汽车结构的碰撞过程是一个瞬间过程,经常涉及高应变率特性,

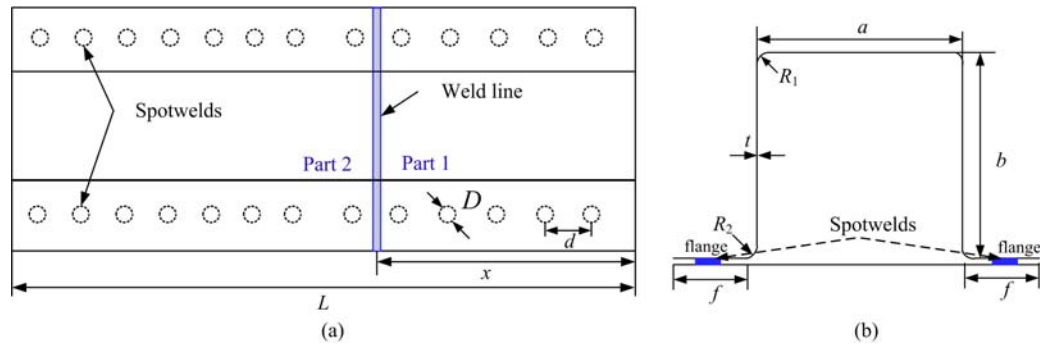


图 1 单帽型拼焊板吸能梁几何形状:(a) 俯视图;(b) 横截面(侧视图)

Fig. 1 Geometry dimensions of energy-absorbed specimen with the single top-hat for impact test
(a) top view; (b) cross section shape (side view)

故本文也测试了这两种高强度钢母材在不同的应变率下的材料特性,如图 2 所示。

表 2 碰撞实验所用单帽型拼焊板试件组合情况

Tab. 2 Combinations of single top-hat TWB columns for impact tests

No.	Description	Material	Thickness
Case 1	Same grade and different thickness	DP590/DP590	1.0mm/1.5mm
Case 2	Different grade and same thickness	DP590/DP780	1.5mm/1.5mm
Case 3	Different grade and different thickness	DP590/DP780	1.0mm/1.5mm

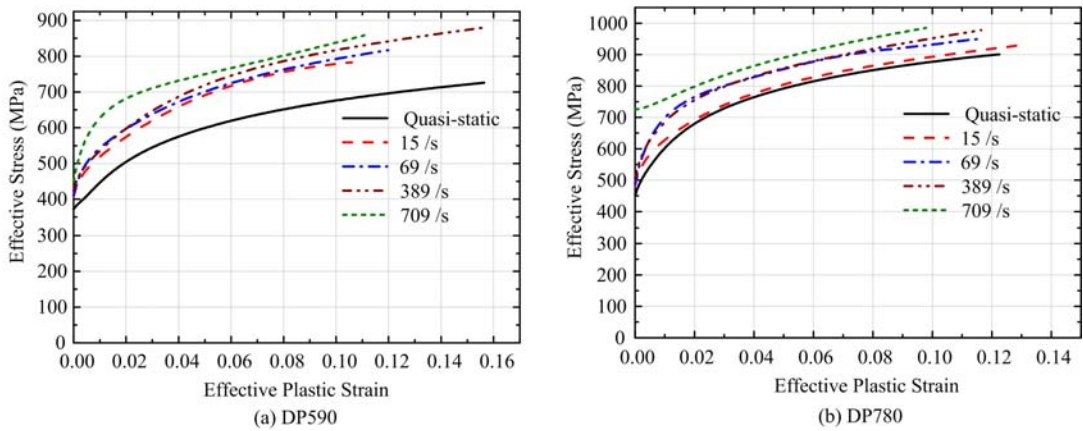


图 2 单帽型拼焊板吸能梁所用高强度母材率相关材料特性

Fig. 2 Material properties of both HSS at different strain rates

1.3 实验方案

从冲击响应和零部件损伤来看,对台车模拟实验有重要影响的参数有三个,即:冲击时的速度,加速度峰值,到峰值加速度的上升时间或总的脉冲持续时间。事实上,这三个参数不一定是相关的,因此理想的台车实验应能对速度、加速度峰值和上升时间或脉冲持续时间进行单独的控制和调整,即必须能改变脉冲变形,以满足不同标准的要求。

为了对拼焊板结构的动态耐撞特性进行更加全面的分析,加上实验成本的限制,本文仅对速度这一参数进行单独控制,研究了两种给定的初始速度下的动态碰撞特性,即 30km/h 和 40km/h。相同的实验在相同的条件下重复三次,所有实验均在室温下进行。台车的总质量 536kg,用其来产生足够的动能,以碰撞刚性墙,拼焊板试件被焊接在台车的前端。碰撞实验台车装置及拼焊板试件如图 3 所示。



图 3 碰撞实验台车装置及拼焊板试件

Fig. 3 Photographs of experimental set-up of the crashing system and the TWB specimen

试件类型共有三种方案:(1)同材异厚,材料为 DP590/DP590,相应的厚度为 1.0mm/1.5mm;(2)异材同厚,材料为 DP590/DP780,相应的厚度为 1.5mm/1.5mm;(3)异材异厚,材料为 DP590/DP780,相应的厚度为 1.0mm/1.5mm。将试件遵循前弱后强的原则安装在台车上,比如:试样为异材同厚时,DP590 端在前,DP780 端在后;试样为同材异厚时,1.0mm 端在前,1.5mm 端在后;试样为异材异厚时,DP590_1.0mm 端在前,DP780_1.5mm 端在后。这种前弱后强的设置原则是为了使结构件的前端部分尽量完全变形,这样可以使结构的吸能特性能够得到最大程度地发挥。

2 结构耐撞性指标

薄壁结构的动态碰撞载荷与位移之间的典型关系如图 4 所示,拼焊板结构件作为一种典型的承载吸能元件,稳定的承载力和较高的比吸能是其基本要求,较为常用的耐撞性评价指标有以下几个:

总吸能 E_a 是载荷和位移曲线所围成的面积,即

$$E_a = \int_0^{\delta_e} F(\delta) d\delta \quad (1)$$

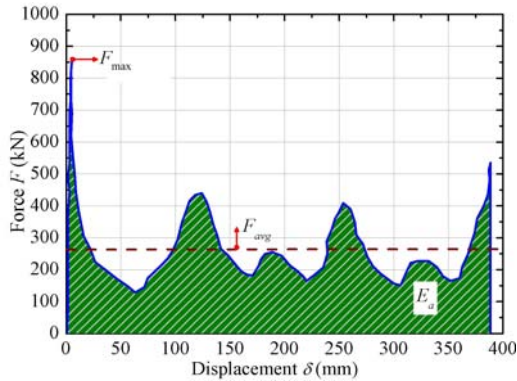


图 4 动态碰撞载荷与变形位移之间的典型关系

Fig. 4 Typical relationship of crashing force and deformed displacement

平均碰撞力 F_{avg} 是总吸能与有效压溃位移之间的比值,即

$$F_{avg} = \frac{E_a}{\delta_e} \quad (2)$$

比吸能是薄壁结构件在单位质量上的吸能,即

$$SEA = \frac{E_a}{m} \quad (3)$$

载荷效率 CFE 也是评价耐撞性的一种重要的指标,它是平均碰撞力与峰值载荷之间的比值,即

$$CFE = \frac{F_{avg}}{F_{max}} \quad (4)$$

根据能量守恒原理(式(5)),加速度与位移曲线所围成的面积应该等于初始的总动能,故加速度位移曲线可以被一个方形波或者矩形脉冲所包围,其高度和宽度分别为峰值加速度(G_{max})和最大压溃量(D_{max})(图 5 中的 A 点和 B 点)。车身前段结构的有效利用率也是非常重要的,被定义为上述矩形框的面积除以加速度位移曲线所包围的面积(式(6))。

$$\frac{1}{2}mv^2 = \int_0^{D_{max}} mG(x)dx \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\int_0^{D_{max}} mG(x)dx}{mG_{max} D_{max}} \times 100\% \quad (6)$$

3 结果与讨论

3.1 变形模式

图6~图8是三种拼焊组合的最后变形模式对比,总体来说,所有的拼焊板试件均是碰撞端即较弱点先发生屈服变形,当前段材料变形非常充分时,后端即较强端才发生褶皱变形。另外,从图6可以看出,即同材异厚(DP590/1.0mm_DP590/1.5mm)碰撞结果进行分析可知,在初始速度30km/h时的碰撞变形结果基本一致,说明实验结果是可靠的。其主要的变形模式为褶皱,这种变形模式是一种吸能效率较高的模式,并没有出现明显的弯曲和断裂等其他的变形模式。另外,这种变形模式中前一半结构基本全部变形且压溃充分,后端(强端)有部分压溃。与此不同的是,在初始速度为40km/h时,该结构组合不管前段部分还是后端部分都能够得到充分压溃(图6(b))。这种变形模式对于前纵梁来说是非常有利的,因为前纵梁结构的一个作用在碰撞过程中通过变形吸能能量,另一个重要的用途是后端部分还可以用来支撑发动机等装置,这就要求结构的后端部分尽量不发生变形。

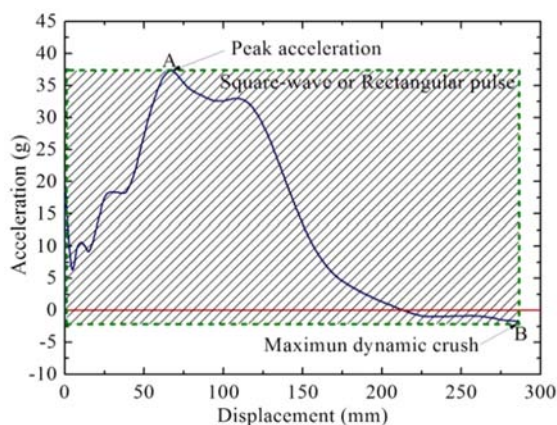


图5 碰撞加速度与变形位移之间的典型关系

Fig. 5 Typical relationship of crashing deceleration versus displacement

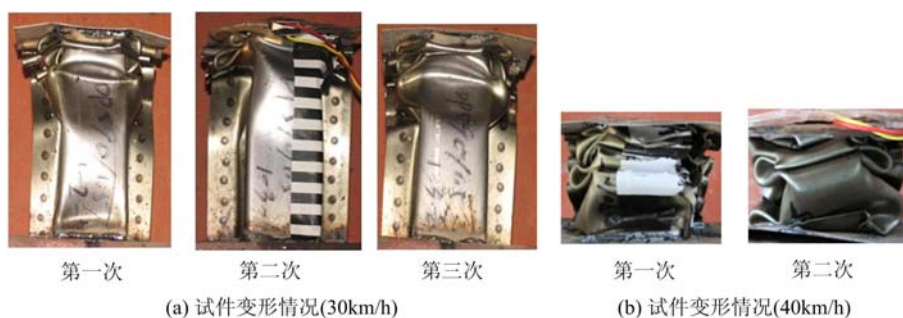


图6 第一种拼焊组合(同材异厚)碰撞变形模式

Fig. 6 Final deformation mode of combination 1 (the same material and different thickness)

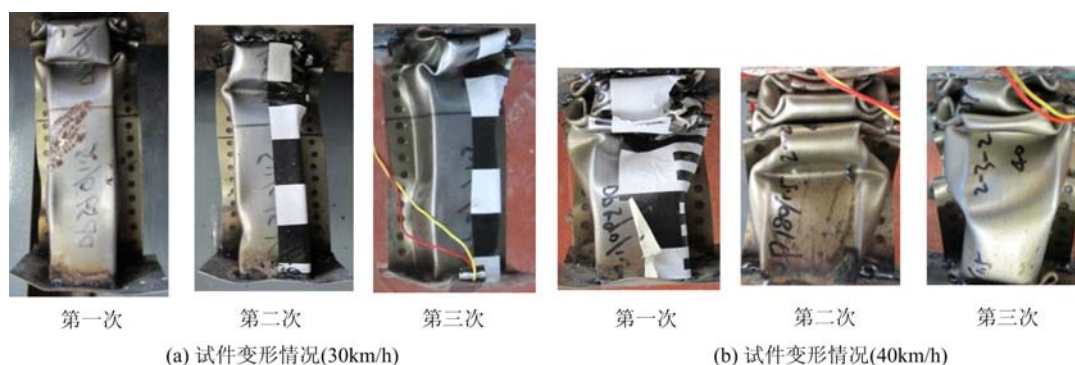


图7 第二种拼焊组合(异材同厚)碰撞变形模式

Fig. 7 Final deformation mode of combination 2 (different material and the same thickness)

图7给出了第二种拼焊组合在两种初始速度下的碰撞变形结果,与第一种拼焊组合的变形模式相比,之间存在的差异体现了材料组合匹配对碰撞性能有着直接且较大的影响,即与刚性墙发生接触的材料强弱(前段材料)将影响碰撞力的传递路径,没有发生非常充分变形的主要原因是前端材料等级是更

高的(DP780);而在初速度 40km/h 下的碰撞变形与初速度 30km/h 时相比,变形更加剧烈,前面的较弱材料变形更加充分(图 7(b))。

图 8 列出了第三种拼焊组合,即异材异厚(DP590/1.0mm_DP780/1.5mm)在初始速度 30km/h 和 40km/h 下的碰撞变形结果,三次实验试件的变形模式基本一致,前段全部变形且压溃充分,后端有些许变形。第二种拼焊组合和第三种的材料匹配之间唯一的不同在于前段材料厚度,对比图 7 和图 8 的变形结果可知,第三种拼焊组合的前段变形更加充分,这说明材料的厚度差异会引起动态碰撞模式的较大不同。

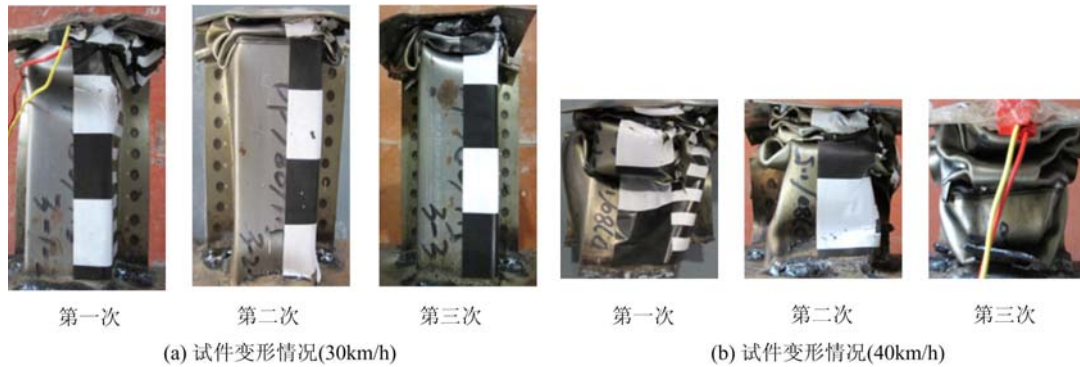


图 8 第三种拼焊组合(异材异厚)碰撞变形模式

Fig. 8 Final deformation mode of combination 3 (different material and different thickness)

上述的变形模式只能从直观上对拼焊板碰撞的特性进行定性的分析,下面就碰撞加速度曲线以及耐撞性指标对不同拼焊板组合的动态碰撞性能进行定量的分析和讨论。

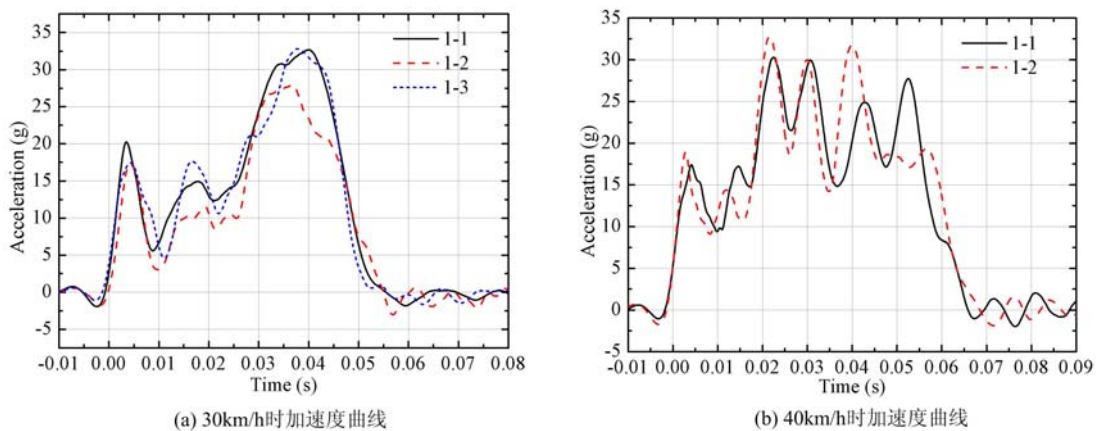


图 9 第一种拼焊板结构组合在不同初始碰撞速度下的加速度时间关系曲线

Fig. 9 Relationship of acceleration and time of the first type of TWB specimens under different initial impact velocities

3.2 加速度时间曲线

图 9 是经过数据处理后(包括数字滤波、标定、零漂消除等)的第一种拼焊组合下的碰撞加速度曲线。可以看出,在碰撞速度 30km/h 时测定的三次加速度曲线基本吻合。另外,由于拼焊板结构本身的特性以及焊缝的存在,导致峰值加速度值不是出现在碰撞的初始时刻,而是出现在 40ms 左右,三次实验重复性较好,碰撞数据可靠,真实可信,说明在碰撞瞬间台车并没有发生倾斜,即正对刚性墙。另外,从碰撞加速度全过程的变化趋势来看,该速度下的加速度曲线呈现逐渐上升趋势,这主要是因为变形的部分仅有前段的均匀材料,而后端材料还没有来得及变形。另外,从图 9(b)可知,初始碰撞速度为 40km/h 时的加速度曲线有着较多的波峰和波谷,即有着较多的褶皱变形,且峰值加速度出现在大约

25ms 左右,但总体上仍然保持稳定的变化趋势。两种碰撞初始速度下具有不同的加速度变化模式的主要原因在于前后两段材料具有不同的厚度,且在 40km/h 时后端材料开始变形且充分压溃。虽然变形模式和加速度曲线不尽相同,但是它们的最大加速度值基本一致,即最终的峰值加速度值均在同一水平上。

图 10 是测得的第二种拼焊组合在两种初始速度下的碰撞加速度曲线,可以看出变化趋势基本一致。但是从总体上来看,与第一种拼焊板组合即同材异厚组合的加速度曲线不同,这里是呈现逐渐下降的趋势,即在碰撞开始时刻瞬间达到最大值,再逐渐慢慢降低,这足以说明不同的拼焊板组合对动态碰撞性能有着直接的影响。

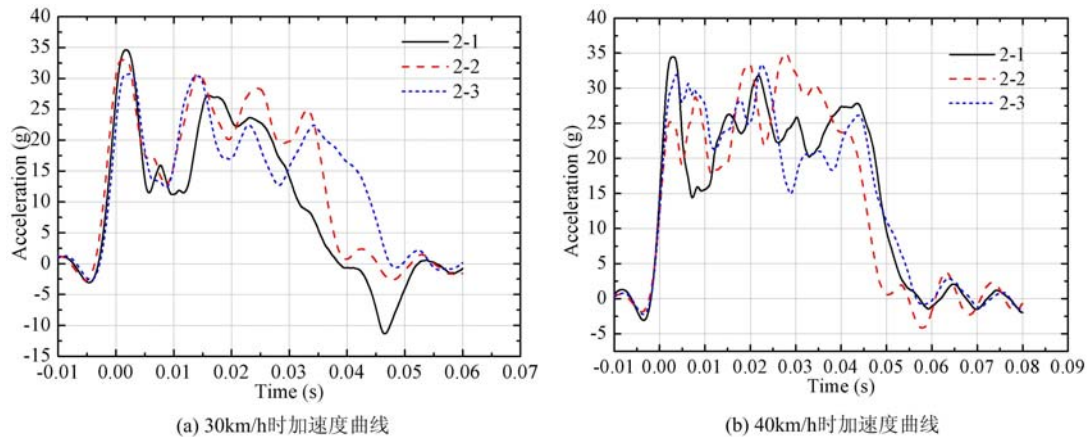


图 10 第二种拼焊板结构组合在不同初始碰撞速度下的加速度时间关系曲线

Fig. 10 Relationship of acceleration and time of the second type of TWB specimens under different initial impact velocities

图 11 是测得的第三种拼焊组合经过滤波后的碰撞加速度曲线,同样可以看出变化趋势基本一致。初速度为 30km/h 时的碰撞加速度具有逐渐上升的趋势,而当初速度为 40km/h 时,加速度变化稍微平稳,这说明碰撞初始速度对加速度的变化趋势有着一定的影响。两种情况下的峰值加速度分别出现在 40ms 和 25ms,与第一种拼焊板组合的情况一样,是因为这两种拼焊板组合的前段材料等级和厚度都是相同的,这就会造成加速度的变化趋势相近且峰值出现在同一时刻。

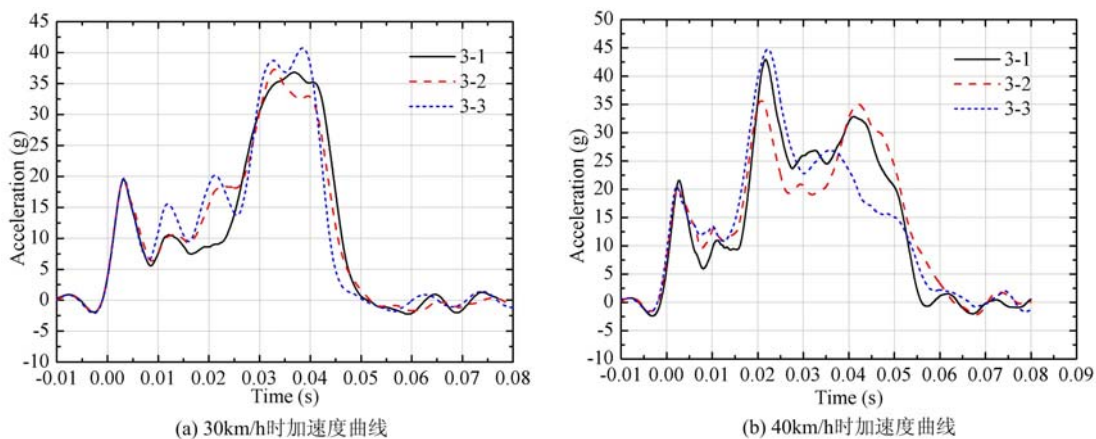


图 11 第三种拼焊板结构组合在不同初始碰撞速度下的加速度时间关系曲线

Fig. 11 Relationship of acceleration and time of the third type of TWB specimens under different initial impact velocities

虽然三种拼焊板组合的外形结构尺寸相同,但是由于拼焊的材料和厚度的不同导致实际碰撞加速度曲线波形也不同。其中第一种拼焊组合和第三种拼焊组合的前段较弱材料相同,所以在较低速度下

(30km/h)的加速度波形有些相似(这时后端基本还没有变形)。并且同一组合在不同初始碰撞速度下的加速度波形也不一样,这是因为不同的速度导致两种材料屈服的时间和程度不同。

从上述的加速度曲线对比可知,由于拼焊板不同组合的属性以及焊缝的存在,使得三种拼焊板组合的峰值加速度出现的时刻并不同。对于第一种和第三种拼焊组合来说,峰值加速度出现的时刻比较接近,主要是因为前段材料是相同的,当焊缝参与变形时,才会出现峰值加速度;对于第二种拼焊组合而言,由于前端材料厚度比较厚,使得在碰撞初始时刻便出现峰值加速度。

三种拼焊板组合在两种初始碰撞速度下的峰值加速度值见表 3 所示,由图可知,不管碰撞初始速度设定多少,峰值加速度值均保持在 35 左右,说明在本文所考虑的碰撞初速度变化范围内对峰值加速度基本没有影响,经分析,导致此现象的可能原因是三种拼焊板组合的前段材料都是 DP590,在加速度达到峰值时后端材料还没有来得及参与吸能变形,达到峰值之前仍是前段材料在发生褶皱。从汽车安全的角度来看,加速度越低,安全性越高。从理论上来说,40km/h 时的峰值加速度值应该会高,但是两种初始碰撞速度下的加速度峰值变化相差不大,尤其是对于第一种拼焊组合结构,这正好可以说明通过不同的拼焊板组合,能够将加速度峰值进行合理消弱,进一步提高汽车安全性能。

表 3 不同拼焊组合在不同初始碰撞速度下的峰值加速度值对比(单位:g)

Tab. 3 Comparisons of peak acceleration values for different tailor welded combinations under different initial velocities(unit:g)

Combination 1			Combination 2			Combination 3		
Initial velocity=30km/h								
1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3
32.68	27.98	32.81	34.63	33.13	30.78	36.83	37.28	36.08
Initial velocity=40km/h								
1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3
30.28	32.78	—	35.20	35.71	34.08	42.96	35.61	44.80

3.3 承载与吸能特性

从上述分析可知,初始碰撞速度选择 30km/h。图 12~图 15 给出了实验所研究的各种组合拼焊板薄壁结构的吸能和耐撞性能参数的比较,包括峰值载荷($F_{\max}$)和平均载荷(F_{avg})、总能量吸收(E_a)和比质量能量(SEA)吸收、载荷效率(CFE)、有效利用率(η)等。

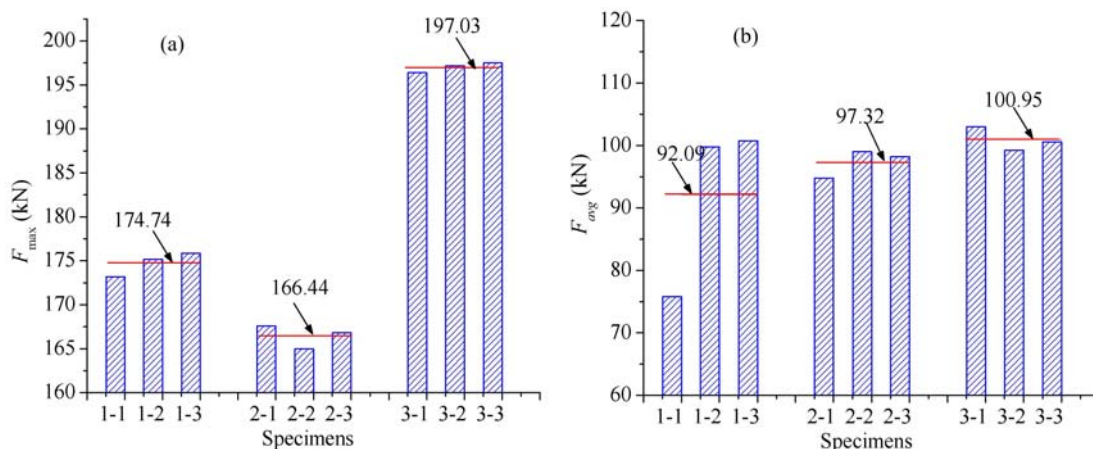


图 12 不同材料厚度组合的单帽型拼焊板结构件的峰值载荷($F_{\max}$)和平均载荷(F_{avg})

Fig. 12 Relationship of $F_{\max}$ and F_{avg} of single top-hat TWB structures with different material and thickness combinations

3.3.1 峰值载荷($F_{\max}$)和平均载荷(F_{avg})

图12给出了不同材料厚度组合的单帽型拼焊板结构件的峰值载荷($F_{\max}$)和平均载荷(F_{avg})的对比(图中的红线表示相同组合试件的平均值),峰值和平均载荷描绘的是每种组合结构类型的初始峰值载荷和平均压溃载荷。从图中可以看出,第三种拼焊板组合结构,即异材异厚组合具有较高的初始峰值载荷(197.03kN),但同时也具有较高的平均载荷(100.95kN)。载荷大小与拼焊板的材料和厚度组合以及焊缝的存在有关。虽然第一种和第三种拼焊组合的前段材料相同,但是它们的峰值载荷和平均载荷并不相同,且有着较大的差别,其原因主要在于该耐撞性指标是由整个拼焊板结构的性能所导致的,而不是其各个部件单独的作用。

3.3.2 总能量吸收(E_a)和比质量能量吸收(SEA)

图13显示的是不同材料厚度组合的单帽型拼焊板结构件的总能量吸收 E_a 和比质量能量吸收SEA。每种拼焊板组合结构的总能量吸收在40kJ左右,同时比质量能量吸收的变化也比较平稳。值得注意的是,本文所用材料的厚度差别不是很大,导致每种拼焊板组合的质量也相差不大,所以比质量能量与总能量的吸收有着一致的变化趋势,其中第二种拼焊板组合的厚度都是1.5mm,其质量是最重的,导致不易发生褶皱变形,且总能量吸收也较低,从而有着较低的比质量能量吸收。

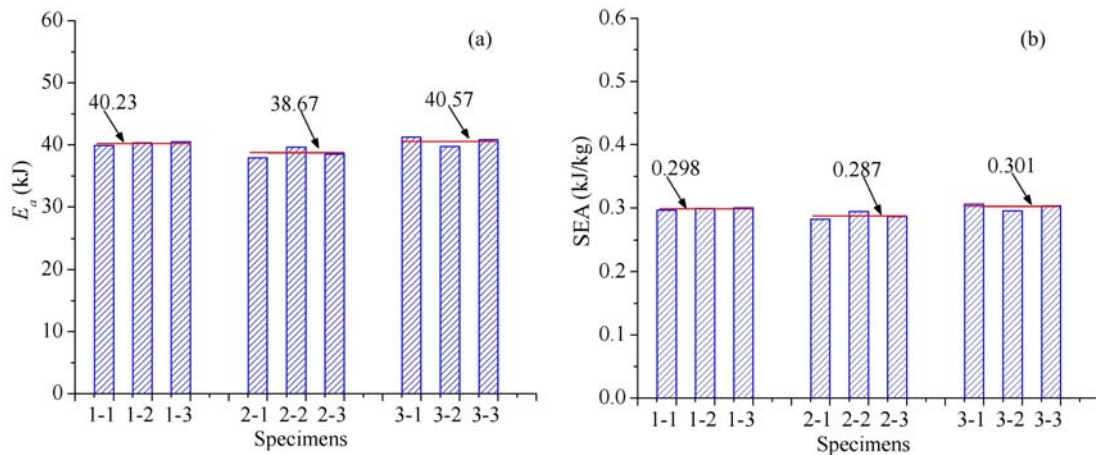


图13 不同材料厚度组合的单帽型拼焊板结构件的(a)总能量吸收 E_a 和(b)比质量能量吸收SEA

Fig. 13 Relationship of E_a and SEA of single top-hat TWB structures with different material and thickness combinations

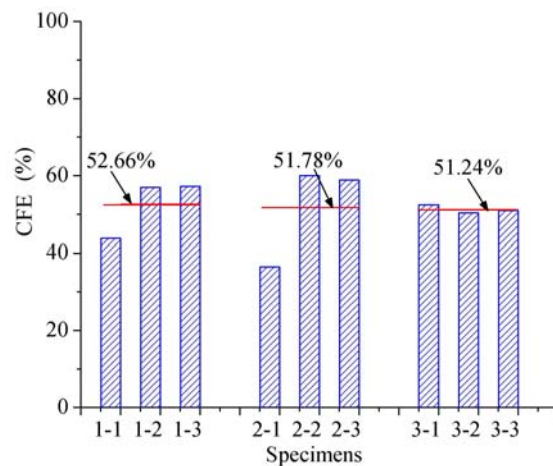


图14 不同材料厚度组合的单帽型拼焊板结构件的载荷效率(CFE)对比

Fig. 14 Relationship of CFE of single top-hat TWB structures with different material and thickness combinations

3.3.3 载荷效率(CFE)

图14对比了不同材料厚度组合的单帽型拼焊板结构件的载荷效率(CFE)指标。可以看出,三种拼

焊组合下的载荷效率值相当,均超过了 50%,说明拼焊板结构的平均载荷占峰值载荷的一半以上,这对于控制碰撞历史曲线无疑是有利的,即通过拼焊板这种形式的组合匹配,可以得到更加平稳的载荷位移曲线,使得压溃变形更加平缓,吸能更加充分。

3.3.4 有效利用率(η)

图 14 给出了不同材料厚度组合下的单帽型拼焊板结构件的有效利用率比较。三种组合材料的有效利用率 η 的平均值分别为 45.23%, 32.87% 和 35.83%。可见,第一种材料厚度组合(同材异厚)结构在碰撞过程中的 η 值最大;第三种次之;第二种最小。造成这种现象的原因可能在于第一种组合结构是同材异厚的组合,该组合在所给初始速度条件下前段部件能够发生更加充分的变形(图 6(a)),虽然第三种组合前端部分的变形也很充分,但由于后端材料等级较强和厚度较厚,导致后端发生更小的变形。这说明从有效利用率的角度来说,通过采用拼焊板技术进行组合的结构确实是有优势的。

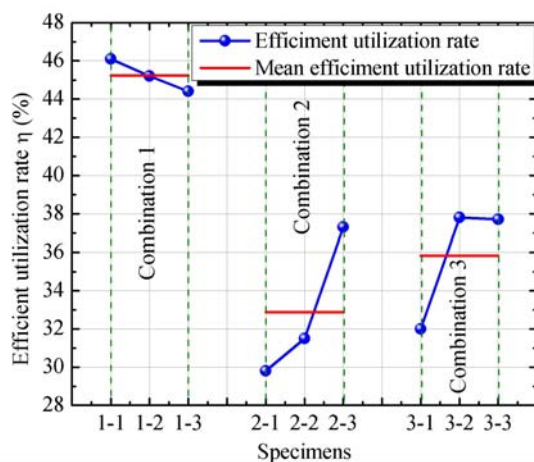


图 15 不同拼焊板组合的有效利用率比较

Fig. 15 Comparison of efficient utilization rate of the different TWBs combinations

4 结论

本文从实验角度研究了不同拼焊板组合的轴向动态变形及吸能特性,主要得到以下几点结论:

(1) 由于材料和厚度的不同,导致实际碰撞加速度曲线波形也不同,既有上升型,又有平稳型和下降型。在较低速度下(30km/h)的加速度波形有些相似,且同一组合在不同初始碰撞速度下的加速度波形也不一样,这是因为不同的速度导致两种材料屈服的时间和程度不同;

(2) 通过动态变形和加速度来看,如果前后端部件的材料和厚度设计合理,那么前纵梁的前段就会发生变形,且变形充实时后端才发生变形,说明拼焊板结构可以作为一种更加柔性的前纵梁理想结构;

(3) 通过对耐撞性能参数的比较可知,载荷大小与拼焊板的材料和厚度组合以及焊缝的存在是有关的。通过拼焊板这种形式的组合匹配,可以得到更加平稳的载荷位移曲线,使得压溃变形更加平缓,吸能更加充分。

拼焊板构件能够得到有效的吸能变形模式,从而充分利用材料性能,是耐撞性和轻量化设计中较为理想的功能结构,为拼焊板结构的应用推广提供了直接的证据。

参考文献:

- [1] Chan L, Cheng C, Chan S, et al. Formability analysis of tailor-welded blanks of different thickness ratios [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, 127:743.
- [2] Chan S, Chan L, Lee T. Tailor-welded blanks of different thickness ratios effects on forming limit diagrams [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 132(1):95-101.
- [3] Choi Y, Heo Y, Kim H Y, et al. Investigations of weld-line movements for the deep drawing process of tailor welded blanks [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 108(1):1-7.

- [4] Raymond S D, Wild P M, Bayley C J. On modeling of the weld line in finite element analyses of tailor-welded blank forming operations [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 147(1):28—37.
- [5] Saunders F I, Wagoner R. Forming of tailor-welded blanks [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1996, 27(9):2605—2616.
- [6] Shin J K, Lee K H, Song S I, et al. Automotive door design with the ULSAB concept. using structural optimization [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2002, 23(4):320—327.
- [7] Song S, Park G. Multidisciplinary optimization of an automotive door with a tailored blank [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2006, 220(2):151—163.
- [8] Zhu P, Shi Y, Zhang K, et al. Optimum design of an automotive inner door panel with a tailor-welded blank structure [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2008, 222(8):1337—1348.
- [9] Pan F, Zhu P, Zhang Y. Metamodel-based lightweight design of B-pillar with TWB structure via support vector regression [J]. *Computers & Structures*, 2010, 88(1):36—44.
- [10] Omer K. Development and testing of a hot stamped axial crush member with tailored properties [D]. Canada, University of Waterloo, 2015.
- [11] Fan Z, Lu G, Liu K. Quasi-static axial compression of thin-walled tubes with different cross-sectional shapes [J]. *Engineering Structures*, 2013, 55:80—89.
- [12] T Ali M, Ohioma E, Kraft F, et al. Theoretical, numerical, and experimental study of dynamic axial crushing of thin walled pentagon and cross-shape tubes [J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 94:253—272.
- [13] 冯振宇, 赵彦强, 陈艳芬 等. 含不确定性参数的复合材料薄壁结构吸能特性评估方法研究 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(12):7—12 (FENG Zhenyu, ZHAO Yanqiang, CHEN Yanfen, et al. Evaluation method for energy-absorbing composite structures with uncertain parameters [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(12):7—12 (in Chinese))
- [14] 陈吉清, 黄信宏, 周云郊 等. 钢铝混合汽车前纵梁的耐撞性优化方法比较 [J]. *华南理工大学学报 (自然科学版)*, 2012, 40(7):90—94 (CHEN Jiqing, HUANG Xinhong, ZHOU Yunjiao, et al. Comparison of crashworthiness optimization methods of steel-aluminum hybrid automotive front rail [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 40(7):90—94 (in Chinese))
- [15] 雷飞, 陈新, 陈国栋 等. 考虑顶压与侧碰安全性的轿车车身 B 柱结构优化设计 [J]. *中国机械工程*, 2013, 24(11):1510—1516 (LEI Fei, CHEN Xin, CHEN Guodong, et al. Structural optimization design of B-pillar considering roof crush and side impact requirements in passenger car [J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(11):1510—1516 (in Chinese))
- [16] 施欲亮. 基于耐撞性仿真的轿车车身零件拼焊板设计方法研究 [D]. 上海交通大学, 2008 (SHI Yuliang. Study on the design method of automotive parts with tailor welded blanks based on crashworthiness simulation [D]. Shanghai Jiaotong University, 2008 (in Chinese))
- [17] Xu F X, Sun G Y, Li G Y, et al. Experimental study on crashworthiness of tailorweldedblank (TWB) thin-walled high-strength steel (HSS) tubular structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 74:12—27.
- [18] Xu F X, Sun G Y, Li G Y, et al. Experimental investigation on high strength steel(HSS) tailor-welded blanks (TWBs) [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(4):925—935.
- [19] 付艳恕, 张宾宾, 夏萌. 铝—铝爆炸焊接界面剪切行为与断口形貌关系研究 [J]. *实验力学*, 2015, 30(2):165—172 (FU Yanshu, ZHANG Binbin, XIA Meng. On the relationship between shear behavior and fracture morphology of 2024 Al-Al explosive welding interface [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2015, 30(2):165—172(in Chinese))
- [20] 薛彩军, 林鸿志, 张俊苗. 考虑塑性和刚度不匹配的焊接残余应力估算 [J]. *实验力学*, 2013, 28(1):87—93 (XUE Caijun, LIN Hongzhi, ZHANG Junmiao. Estimation of welding residual stress by taking into account the mismatch of material plasticity and joint stiffness [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(1):87—93(in Chinese))

Experimental Study of Collapse Characteristics of Tailor-Welded Blank Structure Subjected to Dynamic Axial Impact Load

XU Feng-xiang^{1,2}

(1. Hubei Joint Center of Automotive Parts, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China; 2. Hubei Key Laboratory of Modern Automotive Parts Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: Tailor-welded blank (TWB) structure has become a vehicle body light-weight structure with excellent performance due to its flexible configuration advantage. At present, there is no experimental study of TWB energy absorption characteristics in published literatures. So, a comparative experimental study about the dynamic deformation and energy absorption characteristics of TWB assembly specimen subjected to axial impact load was carried out by using three different combinations of single hat type tailor welded structure with the same size, its results are presented in this paper. The dynamic collapse results show that the differences of both material and thickness lead to different impact acceleration curve forms, i. e. , ascending type, steady type and descending type, respectively. Dynamic deformation and acceleration results indicate that if both material and thickness of front and rear end parts are designed reasonably, there will be an ideal front longitudinal fold deformation. The comparison of different performance parameters indicate that the load size is related to the material and thickness combination of TWB and to the existence of soldering seam. The load efficiency has reached more than 50%. A more stable load displacement curve can be obtained by match combination form of TWB, which makes the compression deformation more smoothly and the energy absorption more fully. Collision model and parameters indicate that TWB structure can be as a more flexible front longitudinal beam energy absorbing structure, can provide effective design guidance for engineers and provide direct basis for TWB wider application.

Keywords: high-strength steel; thin-walled tube; tailor-welded blanks; crashworthiness; experimental study