Proceeding of the 14th International Forum of Automotive Traffic Safety, 2017, pp 277-285 No.ATS.2017.403

Theoretical and Simulation Study on the Ridgeline Strengthening Thin-walled Square Tube Subjected to axial Crushing

Yuqing ZHENG, Xichan ZHU, Zhixiong MA

¹School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai, 201804, China Email: 812york@tongji.edu.cn

Abstract: Theoretical expressions of mean crushing force were theoretically derived out based on an ideal folding element model of square tube, the method of energy dissipation decomposition during its plastic deformation process and modified energy balance equation of thin-walled square tube with strengthened ridgelines subjected to static axial crushing. Secondly, The crushing test results of Q235 square tube verified the accuracy of theoretical expression. The four ridgelines of Q235 square tube were hardened by plastic strains during manually fabricating process. Crushing test result correlates well with theoretical result and simulation result, among which the biggest deviation is lower than 2%. Then finite element models of original square tube and ridgeline strengthening square tube subjected to quasi-static axial crushing were both built using Hypermesh9.0 and subsequently imported into LSDYNA971 one by one to conduct elastic-plastic dynamics simulation calculations. Simulation result comparisons show that the section force of thin-walled square tube can be increased dramatically by selectively strengthening ridgelines by locally laser quenching, which is very suitable for rigidity and strength design for some core components in vehicle body structure.

Keywords: thin-walled square tube; ridgeline strengthening; crushing test; numerical simulation; mean crushing force

棱边强化薄壁方管轴压理论和仿真研究

郑玉卿,朱西产,马志雄 *同济大学汽车学院,上海,中国,201804 Email: 812york@tongji.edu.cn*

摘 要:基于方管理想化折叠单元模型、塑性挤压过程能量耗散分解法以及棱边强化薄壁方管在轴向静态压溃作用下的能量平衡修正方程,导出了棱边强化薄壁方管的平均压溃力理论公式。其次,采用 棱边塑性应变强化的 Q235 方管压溃试验验证了理论公式的准确性,理论结果和仿真结果与试验结果 都吻合地非常好,且三者之间偏差不超过 2%。然后,基于 Hypermesh 9.0 建立了 440 钢原始和棱边强 化薄壁方管准静态轴向压溃有限元模型,导入 LS-DYNA 971 程序进行仿真计算,仿真结果对比表明:通过局部激光淬火实现选择性棱边应力强化可使得薄壁方管的截面抗力显著提升,这非常适用于车身 结构中关键承载部件的刚强度设计。

关键词:薄壁方管; 棱边强化; 压溃试验; 数值仿真; 平均压溃力

1 引言

薄壁管件因其结构性能好、成本低廉、能量吸收率高和相对密度低等优点在汽车工业有广泛的应用,在汽车高速碰撞过程或长距离轴向压溃模式下它能以稳定的塑性变形来大量吸收碰撞体的冲击动能从而达到护乘员仓结构和乘员安全。有关薄壁管轴向压溃研究工作始于 20 世纪 60 年代,Alexander^[1]对薄壁圆管压溃理论进行了开创性研究工作;之后 Abramowicz 等从理论和试验方面研究了薄壁圆管和方管动态轴向压溃性能,且几何证明了折叠单元的有效压溃距离^[2-5];Wierzbicki 等提出的理想化折叠单元更好地解释了薄壁方管轴向压溃过程的能量吸收机理和力学特性^[6]。90 年代以来,随着 CPU 计算能力的长足进步和有限元数值程序如 LS-DYNA、ABAQUS 有限元程序的商业化推广,Langseth 等^[7-8]对薄壁铝型材、泡沫铝填充管进行了轴向冲击试验和吸能特性研究,验证了基于

INFATS Conference in Changsha, December 1-3, 2017

LS-DYNA 程序建立的数值仿真模型,并在 AA6060 铝合金方型薄壁管材耐撞性研究中讨论了数值仿真预测的有效 性以及质量比例和冲击速度对冲击性能的影响。

面对日益严峻的交通事故伤亡和更严格的碳排放政策,汽车车身结构被越要求有更好的耐撞性和轻量化,这对 薄壁管件的截面抗力和吸能能力提出了更大的挑战,而改善薄壁管件轴向压溃屈曲行为和能量吸收特性主要通过几 何结构拓扑优化和材料改进来实现^[9]。为了提供前部吸能管的吸能效率,Reddy等^[10]通过增加稳定的棱边专门设计 了一种十二棱边薄壁结构,试验和仿真表明其吸能效率显著提高,对乘员保护也有不少改善。目前,车身结构中的 高强度或超高强度钢板使用比例不断提高,价格虽昂贵,但优势是利于轻量化^[11]。对于 980 MPa 级以上超高强度 钢板,由于冷间冲压的成形特性和回弹制约,需加热至其延展性较好的高温状态,压力成形后马上进行冷却硬化处 理,这种热冲压成形技术已被成功开发并普遍使用,但成本较高^[12]。超高强度钢材料具有超高强度特性优势,但存 在塑性延展性小、易断裂等缺点,碰撞冲击时容易整体崩裂而导致其他部件变形失稳,且后期开孔、切削等加工工 艺困难重重,另外焊接过程还存在熔解热影响区(Heat Affected Zone, HAZ)导致母材软化现象^[13-14],因此,有部 分生产商对热冲压成形工艺进行改进升级,根据零部件在车身结构中承担载荷和变形分布的必要性,在同一个零部 件中分开制造高强度区和高延伸区,单个零件的成本就更加高昂。

为克服上述汽车高强度钢脆性、焊接热影响区、机加工困难和冲压成本高等缺点,棱边强化技术被创新地引入 薄壁箱型结构抗压、抗弯能力的强度设计中。嵇明等介绍了对 440 级钢板进行局部棱边调质处理的棱边强化技术, 并论述了单帽型结构在压弯作用下受压侧平板的弹塑性屈曲失稳过程和全截面抵抗力增强的影响因子,试验和仿真 均表明其截面抗压和抗弯性能有显著提高^[15]。鉴于汽车吸能盒截面普遍为矩形和理论推导的便利性,本文从理论上 分析棱边强化对准静态轴向压溃作用下方管力学特性和能量吸收的影响,为车身轻量化和加工、焊接工艺成本降低 提供技术支持。

2 轴向压溃理论分析

2.1 方管塑性变形能量耗散模式

结合 Wierzbicki 和 Abramowicz 提出的 1/4 理想化方管折叠单元模型(见图 1)和能量耗散解析式^[7],模型中水 平固定塑性铰为 AB 和 BC,倾斜移行塑性铰为 UB 和 BL,以及 2 种塑性铰在挤压移行过程中交汇形成的环形壳拉 伸曲面,H 为理想化方管折叠单元的半高度,平面 UBC 和平面 UBA 的夹角为 2ψ。将上述 1/4 方形截面塑性变形



n h

C

Figure 1. Ideal 1/4 folding element model

图 1.1/4 理想化折叠单元模型



区的能量耗散分为3个部分:薄板通过环形曲面的能量耗散W1、水平固定塑性铰能量耗散W2和倾斜移行塑性铰 耗散W3。根据能量守恒原则可得

$$W_{e} = W_{1} + W_{2} + W_{3} \tag{1}$$

式中: We 为折叠单元在轴向外力挤压作用下吸收的总能量,考虑到一般吸能特性模型顶部和底部均出现有夹 持状态下的水平固定塑性铰线,W2 能量应该加倍。

分别将郑玉卿等导出的W1,W2,W3表达式[16]代入式(1),则方管一个完整折叠单元的能量吸收为

$$2HP_{\rm mo} = 4M \left(16I_1 \frac{bH}{h} + 2\pi a + 4I_3 \frac{H^2}{h} \right) \tag{2}$$

式中: Pmo 为原始方管平均压溃力; M 为单位长度塑性极限弯矩; b 为环形壳相关的圆环子午线方向的半径; h 为方管壁厚; a 为方形截面等效宽度,若为矩形,则 a 取边长平均值; 11,13 分别为褶皱单元压溃过程第 1 和第 3 部分能力耗散的几何相关系数,均为关于 ψ 的函数,当方管的一个褶皱完全折叠时, ψ=π/4,则 11=0.58,13 =1.11。

2.2 吸能特性分析和仿真验证

棱边强化(Ridgeline Strengthening, RS)方管的截面尺寸参数见图 2,其中: c 为平板部宽度; s 为强化棱边弧 长; r 为棱边部半径。棱边强化方管的母材选用 440A 级钢板,化学成分见表 1,棱边用粗实线标出,平板用细实线 标出。棱边部经激光局部超高强度化和调质处理,两者具有不同屈服强度,引入棱边与平板之间屈服强度比为 λ=Yr/Yp,其中 Yr 为超高强化棱边的屈服强度; Yp 为平板母材的屈服强度。

Table 1. Chemical components of 440A steel %	
--	--

表 1 440A 钢化学成分%										
元素	С	Mn	Cr	Ni	Мо	Si	S	Р	Fe	
含量	0.60~0.75	≤1.0	16~18	≤0.6	≤0.75	≤1.0	≤0.030	≤0.035	remain	

显然棱边强化方管具有 2 种材料属性,在塑性变形模式上会与原始单材质方管的能量耗散机理存有不同。接下 来设定方管尺寸建立棱边强化方管准静态压溃仿真模型,如图 3 所示。模型中设λ≈4,c=50 mm,s=5 mm,h=1 mm, r=3.18 mm,方管长度为 l=400 mm。方管一端固定,另一端刚性压板轴向挤压压溃,采用自动单面接触,总压溃距 离为 320 mm,计算时间为 0.32 s,为避免沙漏采用 16 号全积分壳体单元,平均边长尺寸为 2 mm,厚度方向 5 个 积分点,选用 Mat24 多线性材料模型,方管平板部屈服强度为 328 MPa,强化棱边屈服强度为 1300 MPa,材料单 向拉伸试验得到的真实应力-真实应变曲线如图 4 所示,其中母材为 440 级钢板^[15]。



仿真模型导入LS-DYNA 程序进行准静态轴向压溃仿真计算, 棱边强化方管和原始方管的仿真压溃过程分别见

图 5、6,显然棱边强化方管平板区的褶皱宽度 dr 比原始方管的褶皱宽度 do 要小,这说明棱边强化加剧了平板部的 塑性变形,提高了能量吸收水平。通过仿真变形全过程比较,不同点主要表现在如下 3 个方面^[17]:

(1)平板区的环形曲面能量耗散大部分仍是通过环形面内塑性拉伸,从而能实现运动许可的塑性变形模式,当第 1 个褶皱形成后会受到第 2 个褶皱棱边的挤压影响,这是因为棱边强化导致棱边本身塑性变形困难同时平板易发生 塑性变形,就出现了同一棱边由对折变成 Z 型错位拉伸卷曲平板的情形,故前一个褶皱棱边附近平板的能量耗散将 近提高一倍,经测定受棱边强化影响的平板区约占总平板区域的 1/3,故单个褶皱平板部耗散能量 W1 约增大 1/3, 即(λ-1)/9;

(2)水平固定塑性铰(AB和 BC),通过平板和棱边的弯曲塑性变形来实现能量耗散,弯曲变形过程中红色的强化棱边会直接参与,故W2也会上升;

(3)对于倾斜移行塑性铰(UB和BL),主要由棱边部的塑性移动弯曲来实现能量耗散,棱边屈服强度提高到4倍左右,只有约1/3棱边部参与塑性铰移动弯曲,故W3实际也提高了约1/3,即(\\-1)/9。



Figure 5. Plastic deformation of RS square tube

图 5. 棱边强化方管塑性变形



Figure 6. Plastic deformation of original square tube

图 6. 原始方管塑性变形

分别将 W1、W2、W3 各自的修正能量表达式代入式(2),可得方管棱边强化后整个正方形折叠单元的吸能 平衡方程式为

$$2HP_{\rm mr} = M \left\{ 64I_1 \frac{bH}{h} (1 + \frac{\lambda - 1}{9}) + 8\pi (c + \lambda s) + 16I_3 \frac{H^2}{h} (1 + \frac{\lambda - 1}{9}) \right\}$$
(3)

式中: Pmr 为棱边强化方管平均压溃力。

将式(3)改成一般形式

$$\frac{P_{\rm mr}}{M} = A_1 \frac{b}{h} + A_2 \frac{c + \lambda s}{H} + A_3 \frac{H}{b}$$

$$\tag{4}$$

$$A_1 = 32I_1(\lambda + 8)/9 \tag{5}$$

$$A_2 = 4\pi \tag{6}$$

$$A_3 = 8I_3(\lambda + 8)/9$$
 (7)

代入 I1, I3 和 λ 计算可得 A1=24.747, A2=12.56, A3=11.84, 式(4) 仅含有 2 个未知数 b、H, 可分别令一阶 偏导等于 0, 即

$$\begin{cases} \frac{\partial P_{\rm mr}}{\partial H} = 0\\ \frac{\partial P_{\rm mr}}{\partial b} = 0 \end{cases}$$
(8)

求解式(8),可得

$$\begin{cases} b = \sqrt[3]{A_2 A_3 / A_1^2} \sqrt[3]{(c + \lambda s)h^2} \\ H = \sqrt[3]{A_2^2 / A_1 A_3} \sqrt[3]{(c + \lambda s)^2 h} \end{cases}$$
(9)

将式 (9) 代入式 (4),有

$$\frac{P_{\rm mr}}{M} = 3\sqrt[3]{A_1 A_2 A_3} \sqrt[3]{(c+\lambda s)/h}$$
(10)

从而,得到

$$\begin{cases} b = 1.429\sqrt[3]{(c+\lambda s)h^2/(\lambda+8)} \\ H = 4.264\sqrt[3]{(c+\lambda s)^2h/(\lambda+8)^2} \\ \frac{P_{\rm nr}}{M} = 8.836\sqrt[3]{(c+\lambda s)(\lambda+8)^2/h} \end{cases}$$
(11) (12)

和

Abramowicz 和 Jones 基于 a/h=35~50 系列软钢方管试验得到了每个折叠单元实际有效压溃距离为 2H 的 0.77~0.78 倍^[6], 故假设本文的棱边强化方管有效压溃距离也为 2H 的 0.77 倍,则式(12)可改写为

$$\frac{P_{\rm mr}}{M} = 11.475\sqrt[3]{(c+\lambda s)(\lambda+8)^2/h}$$
(13)

因此,式(13)、(14)是棱边强化方管准静态轴向压缩作用下的平均压溃力和能量吸收预测公式,其中式(13) 形式上与 Wierzbicki 提出的原始材质平均压溃力公式[7]是完全一致的。同理,由式(2)可导出原始方管平均压溃 力预测公式

$$\frac{P_{\rm mo}}{M} = 49.70 \sqrt[3]{a/h}$$
(14)

当原始方管 λ=1,代入式(13),也可得原始方管压溃力预测公式

$$\frac{P_{\rm mr}}{M} = 49.649\sqrt[3]{(c+s)/h}$$
(15)

因 a=c+2r=4s/π≈c+1.27s,当棱边强化宽度 s 较小时,式(14)、(15)预测结果几乎一致的,这表明式(13)可以实现无级预测棱边强化方管的准静态平均压溃力。将棱边强化方管的尺寸和相关参数代入式(13),可得平均压溃力理论预测值为 20.261 kN。

3 轴向压溃理论验证

目前实现选择性棱边强化的工艺主要有棱边局部淬火热处理、棱边塑性应变硬化和棱边局部粘贴材料等几种方式。为了说明上述棱边强化方管预测公式的合理性,本文采用了棱边塑性应变强化的 Q235 方管来进行试验加以验证。



与文献中大量的低碳钢方管试验值对比,发现原始方管理论预测值均偏小,这是因为理论预测公式是基于方管 所有部位材质属性相同的前提下而导出的,实际上原始方管在加工成形过程中,棱边部弯折成直角过程存在一定程 度的塑性应变强化现象。为复现成形过程中的棱边塑性应变强化现象,裁取了若干长度和厚度分别为200mm和1mm 的 Q235 平板,宽度有 20mm 和 10mm 两种,经折弯加工成直角的棱边样件,试验样件如图 7 所示,然后对平板和 棱边样件进行重复的单向拉伸试验,拉伸速度为5mm/min,两者的工程应力应变曲线如图 8 所示,其中弯折棱边选 用宽度 10mm 的试验结果,可见拉伸试验表明折弯直角工艺导致棱边部屈服强度由 276MPa 提升至 443MPa 左右。

继而又专门加工了长、宽、厚分别为 60.0mm、60.3mm、1.0mm 的 Q235 方管,在其中一侧平板部焊接封闭, 长度均为 300mm,进行三次静态重复压缩试验,方管试验现场和试验后的塑性变形状态分别如图 9 和图 10 所示, 试验速度为 5mm/min,获得的平均压溃力试验值约为 14.256kN,见图 11。此时令 s=10mm,可求得 r=6.37mm, c=47.56mm, λ≈1.605,代入棱边强化方管平均压溃力公式(13)求得理论预测值为 14.099kN,两者偏差仅为 1.1%; 而采用原始方管平均压溃力公式(14),可得 13.274kN,与试验值偏差为 7.4%。可见采用棱边强化方管平均压溃 力公式(13)来预测原始方管的平均压溃力效果更好,比公式(14)预测的准确度还高。



Figure 9. Axial crushing test of Q235 square tube 图 9. Q235 方管轴向压溃试验



Figure 10. Plastic deformation of Q235 square tube 图 10. Q235 方管塑性变形



与此同时,将图 8 中 Q235 方管平板和塑性应变强化棱边的工程应力应变曲线进行数据转换为真实应力应变曲 线,导入上述棱边强化方管的仿真模型进行准静态压溃仿真计算,仿真压溃力曲线如图 12 所示,分析可得平均压 溃力为 13.995kN,比试验值吻合地非常好,仅偏低 1.8%。其次,仿真压溃力峰值稍大于试验峰值,原因是仿真模 型中平板是理想的,而试件表面存在凹凸微量变形。此外,未考虑棱边塑性应变强化的原始方管仿真模型求得的平 均压溃力偏低不少,仅为 11.371kN,这也充分解释了之前仿真结果一直偏低的原因。

4 仿真结果讨论

激光热处理是一种快速有效的选择性强化方式,而且应力提升幅度较大,故仍沿用图 4 中 440 钢的拉伸试验数 据进行方管轴向压溃的数值仿真和结果对比。图 13 为壁厚 h=1.0 mm 的原始方管和棱边强化方管的压溃力曲线对比, 平均压溃力仿真结果为 20.717 kN,这与理论值之间的偏差仅为 2.1%,棱边强化方管比原始方管的平均压溃力有明 显地提高,理论上增长幅度达到 31.062%。而峰值压溃力也有提升了不少,但这个峰值力可以通过棱边压痕或平板 开孔等手段进行条件。图 14 是原始方管和棱边强化方管的轴向压溃过程的能量吸收对比,显然棱边强化方管的能 量吸收高于原始方管,增幅达到 41.826%。

表2列出了平均压溃力仿真结果与理论预测结果的对比以及能量吸收对比,原始方管的仿真与理论偏差较大为5.66%,这是因为原始方管压溃力预测公式(14)是基于棱边倒直角的方管而导出,棱边部倒圆角在轴向压溃过程中会引起局部弱化现象^[18]。表1所列仿真与理论结果对比表明,仿真结果也验证了棱边强化方管理论预测公式(13)的准确性,对于56.36 mm•56.36 mm•1.0 mm 薄壁方管,棱边强化区域仅占截面周长的9.09%,方管平均压溃力理论上可增强31.062%。



Figure 13. Axial crushing force comparison

图 13. 轴向压溃力对比

```
图 14. 轴向压溃能量吸收对比
```

Table 2. Comparisons of mean crushing force and energy absorption of axial crushing

表2平均压溃力和轴向压溃能量吸收对比										
方管类型	$Y_{\rm p}$ /MPa	Y_r / MP a	λ	平均压溃力 /kN		偏差 %	能量吸收 /J			
	P	-		理论预测	仿真结果					
原始	328	328	1.000	15.482	14.607	5.66	4674.4			
棱边强化	328	1 305	3.979	20.291	20.717	2.10	6629.5			
增幅 %		-		31.062	41.829	-	41.826			

5 结论与展望

(1)分析了应力强化棱边对薄壁方管轴向压溃过程中能量耗散机制的影响,通过修正原始方管单个折叠单元的 能量耗散平衡方程,理论导出了棱边强化方管平均压溃力预测公式,量化分析了棱边强化对方管平均压溃力和吸能 水平的影响。

(2) 原始方管平均压溃力理论值与文献中低碳钢方管的试验值对比可知,理论预测值偏低17%左右,国际上一般采用抗拉强度来替代屈服应力求解预测值。而Q235方管轴向压溃试验结果分析表明本文导出的棱边强化方管平均压溃力公式可以较准确地预测具有棱边塑性强化效应的原始方管平均压溃力,且预测效果更好。

(3)对于棱边强化区域仅占薄壁方管截面 9.09%, 棱边应力强化 4 倍的薄壁方管, 其轴向压溃力水平理论上可提 升近 30%, 说明棱边应力强化对于薄壁方管准静态轴向压溃吸能水平提升效果是显著的。此外, 值得注意的是制备 棱边超高应力强化方管的关键工艺在于棱边局部热处理和材质选择, 更多汽车相关材料的激光淬火效果还有待进一 步开发, 比如在硼钢板方面已经取得不少的进展。

(4)棱边应力强化技术的主要优势有:激光热处理可精确控制强化区域,增强薄壁结构的截面抗力水平提高而不 增加零部件质量,同时保证平板加工区域远离焊接热影响区,低强度级别钢还可以采用普通模具进行先冲压加工, 然后采用激光热处理,根据实际工况需要进行局部应力强化,实现零部件抗压弯性能升级,降低高强度钢部件的制 造工艺成本。

致 谢 (Acknowledgement)

感谢湖州锦成电梯配件有限公司的周建平先生对本文理论验证试验提供了相关测试样件和加工。

参考文献 (References)

- [1] Alexander, J. M. An approximation analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1960, 13(1): 10-15.
- [2] Abramowicz, W. The effective crushing distance in axially compressed thin-walled metal columns. International Journal of Impact Engineering, 1983, 1(3): 309-317.
- [3] Abramowicz, W. and Jones, N. Dynamic axial crushing of square tubes. International Journal of Impact Engineering, 1984, 2(2): 179-208.
- [4] Abramowicz, W. and Jones, N. Dynamic axial crushing of circular tubes. International Journal of Impact Engineering, 1984, 2(3): 263-281.
- [5] Abramowicz, W. and Jones, N. Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. International Journal of Impact Engineering, 1986, 4 (4): 243-270.
- [6] Wierzbicki, T. and Abramowicz, W. On the crushing mechanics of thin-walled structures. Journal of Applied Mechanics, 1983, 50(4): 727-734.
- [7] Langseth, M., Hopperstad, O. S. and Hanssen A. G. Crash behaviour of thin-walled aluminium members. Thin-Walled Structures, 1998, 32(1-3): 127-150.
- [8] Langseth, M., Hopperstad, O. S. and Berstad, T. Crashworthiness of aluminium extrusions: validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(9): 829 854.
- [9] Yuen, S. C. K. and Nurick, G. N. *The Energy-absorbing characteristics of tubular structures with geometric and material modifications: an overview*. Applied Mechanics Reviews, 2008, 61(2): 409-420.

- [10] Reddy, S., Abbasi, M., and Fard, M. Multi-cornered thin-walled sheet metal members for enhanced crashworthiness and occupant protection. Thin-Walled Structures, 2015, 94: 56-66.
- [11] Zhang, Y. G., Deng J. S., Wei X. B., et al. A study on performance of high strength steel and application in bodywork. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(4): 64-68. (in Chinese).
- 张燕瑰,邓劲松,魏宪波,等.高强度钢性能及其在车身中的应用.精密成形工程,2013,5(4):64-68.
- [12] Altan, T. Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts, part I: process methods and uses[J]. Stamping Journal, 2006 (12): 40-41.
- [13] Hui, W. J., Zhang, Y. J., Wu, Z. Y., et al. Spot welding property of Si-Mn type ultrahigh strength hot stamping quenched steel sheet[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2012, 24(9): 51-55. (in Chinese).
- 惠卫军,张永健,吴振宇,等. Si-Mn 系超高强度热成形淬火钢板的点焊性能.钢铁研究学报, 2012, 24 (9): 51-55.
- [14] Kim, C. H., Choi, J. K., Kang, M. J., et al. A study on the CO2 laser welding characteristics of high strength steel up to 1500 MPa for automotive application. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2010, 39(1): 79-86.
- [15] Ji, M., Abiko, T., Okamura, T. Compressive and bending collapse of box structure with different strength in ridgeline. Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan. Tokyo: The Society of Automotive Engineers of Japan, 2015, 46(3): 645-652. (in Japanese). 磁明,安孫子拓也,岡村俊明. 異なる材料強度の稜線を有する箱形断面の圧縮曲げ強度. 自動車技術会論文集. とうきょう:日本自動車エンジニア学会, 2015, 46(3): 645-652.
- [16] Zheng, Y. Q., Zhu, X. C., Hu, Q., et al. Mechanical properties of thin-walled square tube with strengthened ridgelines subjected to axial crushing. Journal of Tongji University: Natural Science, 2016, 44 (6): 949-954. (in Chinese).

郑玉卿,朱西产,胡强,等. 棱线强化薄壁方管轴向压溃力学特性. 同济大学学报: 自然科学版, 2016, 44 (6): 949-954.

- [17] Zheng, Y. Q., Zhu, X. C., Hu, Q., et al. *Effect of ridgeline strengthening in thin-walled structure*. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(5): 57-65.
- 郑玉卿,朱西产,胡强,刘觐. 薄壁结构棱边强化效果. 交通运输工程学报, 2016, 16(5): 57-65.
- [18] Zheng, Y. Q., Zhu, X. C., Ma, Z. X., et al. Mechanical Properties and Application of Thin-walled Rectangular Structure with Higher Strength Ridgelines. 2016 FISITA World Automotive Congress, Busan, Korea. F2016-APSF-001.