

## 越野车车身前支梁内高压成形精度与性能

崔晓磊<sup>1</sup>, 杨松<sup>1,2</sup>, 韩聪<sup>1,3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 金属精密热加工国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 北京汽车集团越野车有限公司, 北京 101300;

3. 哈尔滨工达海卓智能成形科技有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150060)

**摘要:** 为获得车身前支梁内高压成形工艺稳定性和尺寸一致性的相关数据, 对批量生产的上、下前支梁典型截面的尺寸精度、环向壁厚和残余应力分别进行了抽样测量, 并对其年度废品率进行了统计分析。结果表明: 前支梁典型截面的尺寸精度可达 $\pm 0.2$  mm, 离散度均低于0.2%; 其壁厚分布均匀, 最大减薄率低于6%。成形件母材区的平均抗拉强度大于436.7 MPa, 且焊缝区的强度均高于母材区。此外, 前支梁成形件的残余应力较小, 最大残余拉应力仅为78 MPa, 大部分区域处于残余压应力状态, 且最大残余压应力达到108 MPa, 有利于提高疲劳性能。内高压成形技术可保证前支梁尺寸精度的一致性和高性能成形, 且其年度废品率低于0.3%。

**关键词:** 内高压成形; 前支梁; 尺寸精度; 力学性能; 残余应力

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.014

**中图分类号:** TG394

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 05-0103-08

## Tube hydroforming precision and performance on front support beam for off-road vehicle body

Cui Xiaolei<sup>1</sup>, Yang Song<sup>1,2</sup>, Han Cong<sup>1,3</sup>

(1. National Key Laboratory for Precision Hot Processing of Metals, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Off-road Vehicles Co., Ltd., Beijing Automotive Group, Beijing 101300, China;

3. Harbin HIT-HYDRO Intelligent Forming Technology Co., Ltd., Harbin 150060, China)

**Abstract:** In order to obtain the relevant data of the stability and dimensional consistency of tube hydroforming process on the front support beam for the vehicle body, the typical cross-section dimensional precision, circumferential wall thickness and residual stress of the mass-produced upper and lower front support beams were sampled and measured, and the annual scrap rate was statistically analyzed. The results show that the typical cross-section dimensional precision of front support beam is within  $\pm 0.2$  mm, the dispersion is lower than 0.2%, the wall thickness distribution is uniform, and the maximum thinning rate is lower than 6%. The average tensile strength in the base metal area of formed part is greater than 436.7 MPa, and the strength in the weld area is higher than that in the base metal area. In addition, the residual stress of front support beam formed part is small, the maximum residual tensile stress is only 78 MPa, most areas are in the state of residual compressive stress, and the maximum residual compressive stress reaches 108 MPa, which is beneficial to improve the fatigue performance. Therefore, the tube hydroforming technology can ensure the consistency of the dimensional precision and the high performance forming of front support beam, and its annual scrap rate is less than 0.3%.

**Key words:** tube hydroforming; front support beam; dimensional precision; mechanical performance; residual stress

随着汽车工业的快速发展, 我国已经成为世界上汽车产销量第一的国家。为了实现节能减排、提高乘客安全指数的目的, 轻量化与整体化成为目前汽车制造领域的主要发展方向。因此, 迫切需要对车身结构

进行优化, 以提高复杂路况通过性和意外碰撞安全性。前支梁作为汽车发动机舱的重要传力构件<sup>[1]</sup>, 其合理的结构设计有利于减小汽车正碰过程中乘员舱的侵入量<sup>[2]</sup>。对于承受弯扭载荷为主的结构, 采用空心变截面整体薄壁构件, 既可减轻质量又可充分利用材料强度, 被广泛应用于汽车底盘和车身构件。为此, 对发动机舱前支梁总成进行优化, 设计出包含上、下前支梁的一体结构, 大幅减少了零件的数量与重量, 提高了汽车主动与被动安全性<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2022-04-18; 修订日期: 2022-07-19

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2020M670907); 国家自然科学基金资助项目 (51805357)

作者简介: 崔晓磊 (1986-), 男, 博士, 副教授

E-mail: xiaoleicui@hit.edu.cn

管坯内高压成形是制造该类空心变截面一体结构的先进技术,具有构件质量轻、结构强度与刚度高、模具成本低等一系列优点<sup>[4]</sup>。从 20 世纪 80 年代开始,德国、美国和瑞典的大学、研究机构和公司先后开展了内高压成形的基础研究以及工艺和装备研发,并于 90 年代中期开始逐步应用于制造汽车零部件<sup>[5-7]</sup>。国内从事管坯内高压成形研究的主要有哈尔滨工业大学、宝钢集团中央研究院和北京航空航天大学等。其中哈尔滨工业大学从 1998 年开始系统地开展了变径管、弯曲轴线管以及多通管内高压成形理论、工艺、模具和装备关键技术的研发<sup>[8]</sup>,提出了起皱利用控制方法,建立了“有益皱纹”需要满足的几何条件和力学条件,扩展了工艺窗口<sup>[9]</sup>;发明了内凹构型预制坯“以推代胀”低载荷成形工艺,较现有技术降低压力 50% 以上<sup>[10]</sup>;突破了 400 MPa 超高压的建立与闭环控制,研发出液压成形工艺和装备成套技术,并应用于自主品牌汽车关键零件的批量生产<sup>[11]</sup>。近年来,针对国产越野车对发动机舱一体化结构的需求,提出了利用内高压成形工艺制造上、下前支梁<sup>[12]</sup>。基于内凹构型预制坯思想,利用数值模拟

与实验研究对上前支梁的弯曲、预成形及内高压成形多工步过程进行研究,分析了弯曲角度和预制坯形状对成形的影响,发现通过改变预成形模具的结构形式,获得合理的预制坯形状,可避免成形缺陷的产生<sup>[13]</sup>。

为了获得前支梁内高压成形工艺稳定性和尺寸一致性的相关数据,本文对批量生产的越野车上、下前支梁分别进行了抽样测量,并对其典型截面的尺寸精度、环向壁厚和残余应力进行了测量分析。此外,对前支梁的年度废品率的变化规律与基本应用情况进行了统计分析。

## 1 零件形状与材料

### 1.1 前支梁零件形状

图 1 为越野汽车上、下前支梁的三维模型及典型截面形状,其中,  $W$ 、 $H$  分别为横截面宽度和高度。由图 1 可以看出,上、下前支梁均为弯曲轴线异形截面管件,其中上前支梁为 2D 轴线,下前支梁为 3D 轴线,截面形状以矩形为主,局部有凹槽和安装孔等特征。

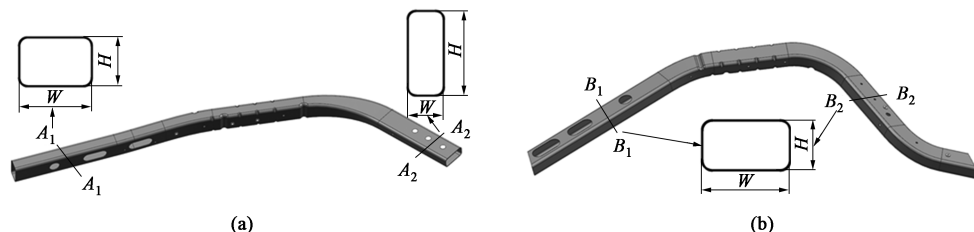


图 1 前支梁三维模型及典型截面形状

(a) 上前支梁 (b) 下前支梁

Fig. 1 3D models and typical cross-sectional shapes of front support beam

(a) Upper front support beam (b) Lower front support beam

### 1.2 管坯及性能

上、下前支梁均使用 SS400 电阻焊低碳钢管进行成形,其管坯的原始外径分别为  $\Phi 57.0$  和  $\Phi 63.5$  mm,壁厚均为 1.5 mm。原始管坯均由 SS400 冷轧薄板卷制而成,冷轧薄板的屈服强度为 236 MPa、抗拉强度为 403 MPa、伸长率为 45%。卷制成管坯后,沿其轴向在母材与焊缝位置分别切取试样进行单向拉伸测试,得到管坯的力学性能如图 2 所示,其中实线为拟合曲线。表 1 给出了初始管坯的力学性能参数。

## 2 批量零件抽样检测方案

### 2.1 成形模具装置

图 3 为前支梁内高压成形模具装置,主要包括上

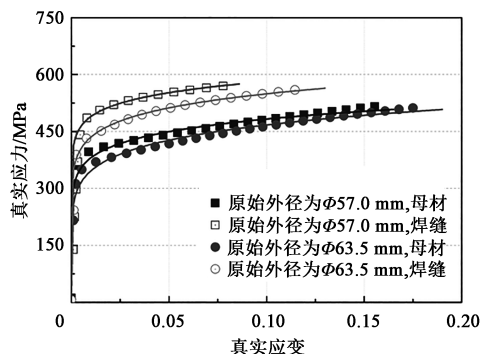


图 2 SS400 电阻焊低碳钢管的轴向真实应力-真实应变曲线

Fig. 2 True stress-true strain curves of SS400 resistance welded low carbon steel tubes along axial direction

模、下模、左冲头、右冲头及两个冲孔缸,其中上、下模分别由铸造模架和模芯组成。在 20 MN 内高压成

表1 前支梁用 SS400 电阻焊低碳钢管的力学性能参数

Table 1 Mechanical performance parameters of SS400 resistance welded low carbon steel tubes for front support beam

参数	原始外径为 $\Phi 57$ mm		原始外径为 $\Phi 63.5$ mm	
	母材	焊缝	母材	焊缝
屈服强度 $R_{eL}/\text{MPa}$	372.8	452.2	334.9	418.3
抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	441.4	527.3	430.0	498.8
总伸长率 $A_u/\%$	30.2	29.4	36.9	31.4
均匀伸长率 $A/\%$	17.4	8.4	20.0	12.7
强度系数 $K/\text{MPa}$	612.0	691.4	630.4	693.2
应变硬化指数 $n$	0.103	0.075	0.130	0.101

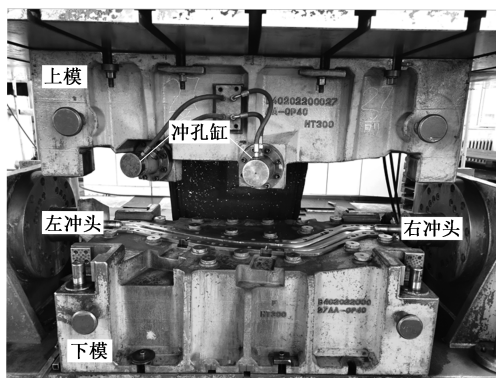
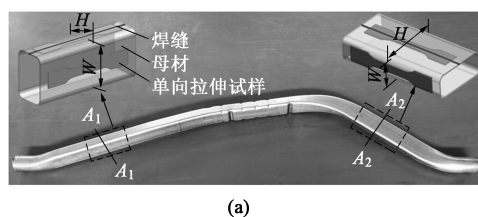
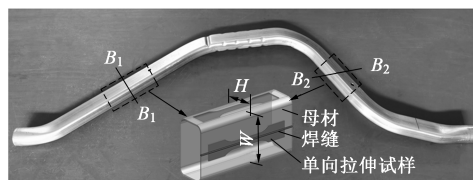


图3 前支梁内高压成形模具装置

Fig. 3 Tube hydroforming die equipment of front support beam



(a)



(b)

图4 典型截面的尺寸精度与性能测试取样位置

(a) 上前支梁 (b) 下前支梁

Fig. 4 Sampling positions of dimension precision and performance tests for typical cross-sections

(a) Upper front support beam (b) Lower front support beam

宽度与高度的尺寸精度分别为 $\pm 0.150$ 和 $\pm 0.075$  mm, 尺寸偏差分别为 $0.05 \sim 0.27$ 和 $0.01 \sim 0.13$  mm。对于下前支梁,  $B_1-B_1$  截面的宽度与高度的尺寸精度分别为 $\pm 0.186$ 和 $\pm 0.117$  mm, 尺寸偏差分别为 $0.02 \sim 0.38$ 和 $0.11 \sim 0.29$  mm;  $B_2-B_2$  截面的宽度与高度的尺寸精度分别为 $\pm 0.078$ 和 $\pm 0.096$  mm, 尺寸偏差分别为 $0.01 \sim 0.12$ 和 $0.04 \sim 0.17$  mm。可以看出, 精度均在 $\pm 0.200$  mm 范围内, 最大值为 $\pm 0.186$  mm, 最小值为 $\pm 0.075$  mm。

尺寸精度的分散度(或一致性)可以利用离散系数  $C_v$  来表示, 其计算公式为:

形设备上完成前支梁成形, 成形压力为 110 MPa。

## 2.2 尺寸精度与力学性能测试方案

对上述批量生产的上、下前支梁分别随机抽取 21 件进行测量。首先, 对典型截面  $A_1-A_1$ 、 $A_2-A_2$ 、 $B_1-B_1$  和  $B_2-B_2$  处的宽度  $W$ 、高度  $H$  和环向壁厚进行测量; 然后, 以典型截面为对称中心, 沿轴向分别在母材和焊缝区域切取单向拉伸试样, 如图 4 所示。利用 Minitab 软件对截面尺寸进行统计分析, 利用岛津 AGXplus 万能实验机进行单向拉伸力学性能测试。此外, 根据 GB/T 7704—2017<sup>[14]</sup>, 利用 Proto iXRD 高速残余应力分析仪对上前支梁典型截面不同位置以及弯曲内、外侧的残余应力进行测量。

## 3 结果与讨论

### 3.1 典型截面尺寸精度

图 5 和图 6 分别为上、下前支梁典型截面的宽度与高度方向的尺寸精度分布图, 表 2 给出了具体的尺寸精度数据。对于上前支梁,  $A_1-A_1$  截面的宽度与高度的尺寸精度(用 $\pm 3\sigma$ 表示, 其中  $\sigma$  为样品标准差)分别为 $\pm 0.090$ 和 $\pm 0.102$  mm, 尺寸偏差分别为 $0.05 \sim 0.22$ 和 $-0.11 \sim 0.09$  mm;  $A_2-A_2$  截面的

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{X}} \quad (1)$$

式中:  $\bar{X}$  为样本平均值。

根据式(1), 可计算得到上、下前支梁典型截面尺寸精度的离散系数  $C_v$  值, 如表 2 所示。由表 2 可以看出, 尺寸精度的离散系数值均在 0.200% 以下, 其最大值为 0.165%, 最小值为 0.036%。获得如此高精度主要与两方面因素有关: (1) 内高压成形过程中管材受全断面拉应力作用, 回弹小; (2) 通过控制内压使模具弹性变形量基本等于管件回弹量, 进一步提高了管件截面的尺寸精度。

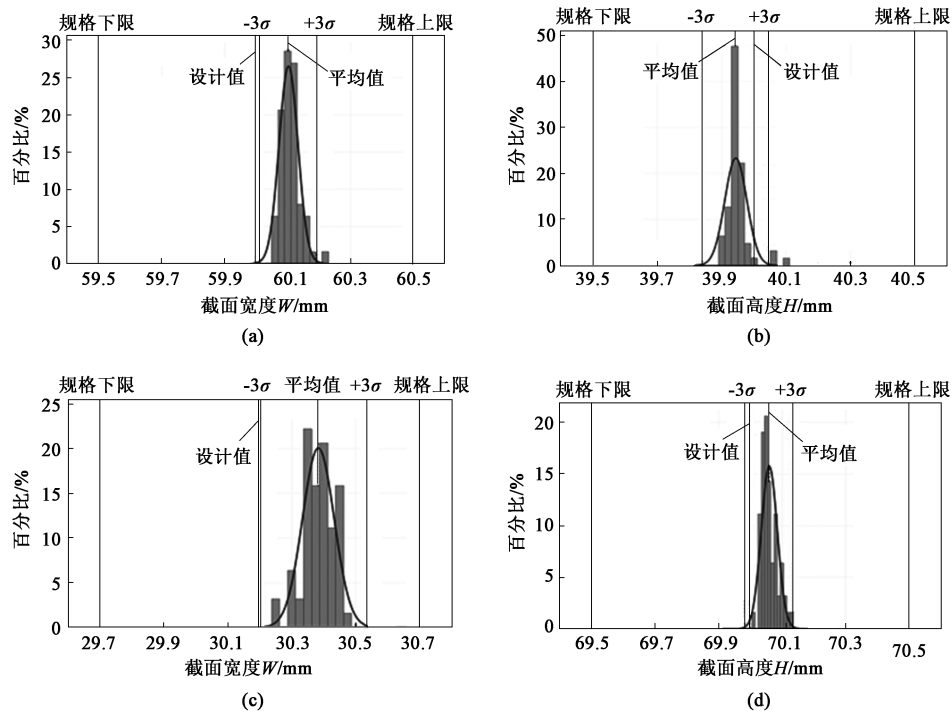


图 5 上前支梁典型截面的尺寸精度

(a)  $A_1-A_1$  截面宽度 (b)  $A_1-A_1$  截面高度 (c)  $A_2-A_2$  截面宽度 (d)  $A_2-A_2$  截面高度

Fig. 5 Dimensional precision of typical cross-sections for upper front support beam

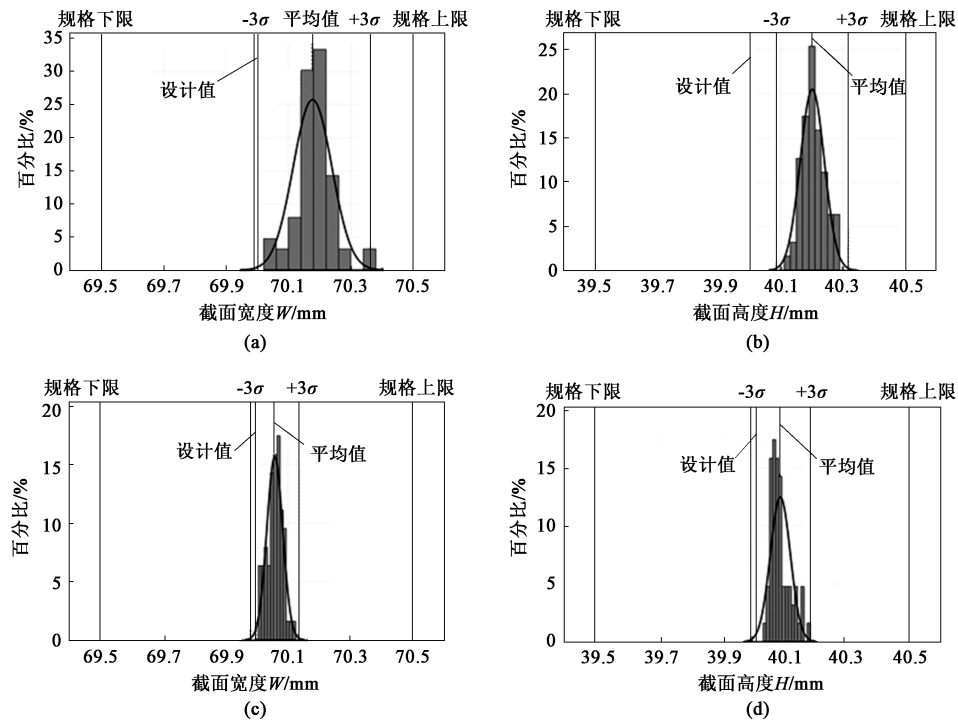
(a) Width of cross-section  $A_1-A_1$  (b) Height of cross-section  $A_1-A_1$  (c) Width of cross-section  $A_2-A_2$  (d) Height of cross-section  $A_2-A_2$ 

图 6 下前支梁典型截面尺寸精度

(a)  $B_1-B_1$  截面宽度 (b)  $B_1-B_1$  截面高度 (c)  $B_2-B_2$  截面宽度 (d)  $B_2-B_2$  截面高度

Fig. 6 Dimensional precision of typical cross-sections for lower front support beam

(a) Width of cross-section  $B_1-B_1$  (b) Height of cross-section  $B_1-B_1$ (c) Width of cross-section  $B_2-B_2$  (d) Height of cross-section  $B_2-B_2$

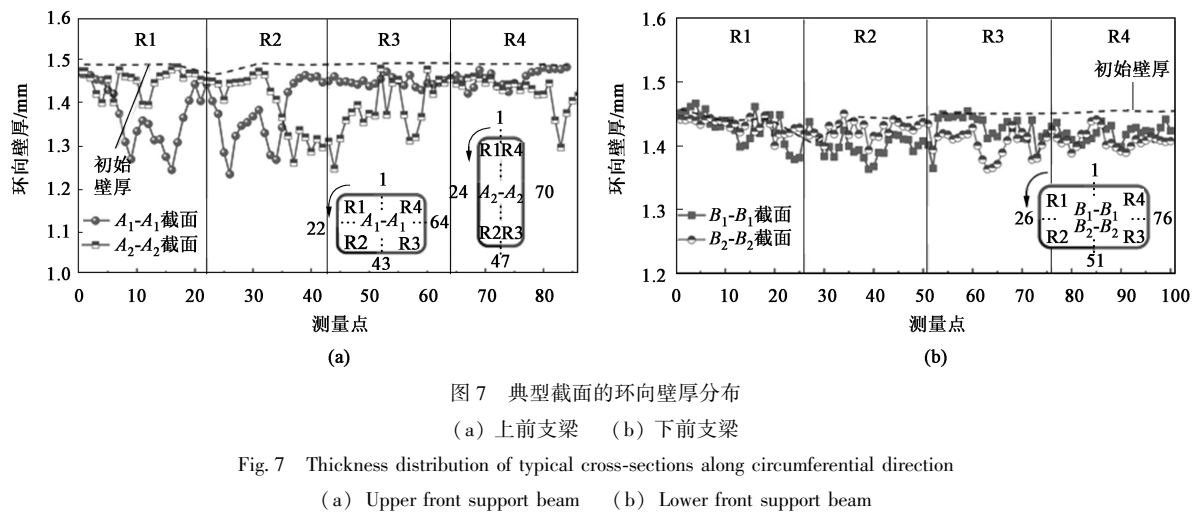


表 2 前支梁典型截面的尺寸精度数据

Table 2 Dimension precision data of typical cross-sections for front support beam						
零件	典型截面	方向	设计值/mm	平均值 $\bar{X}/\text{mm}$	尺寸偏差/mm	$\sigma$ $C_V/\%$
上前支梁	$A_1-A_1$	宽度	60.0±0.5	60.103	+0.05~+0.22	0.030 0.050
		高度	40.0±0.5	39.943	-0.11~+0.09	0.034 0.085
	$A_2-A_2$	宽度	30.2±0.5	30.384	+0.05~+0.27	0.050 0.165
		高度	70.0±0.5	70.060	+0.01~+0.13	0.025 0.036
下前支梁	$B_1-B_1$	宽度	70.0±0.5	70.177	+0.02~+0.38	0.062 0.088
		高度	40.0±0.5	40.201	+0.11~+0.29	0.039 0.097
	$B_2-B_2$	宽度	70.0±0.5	70.058	+0.01~+0.12	0.026 0.037
		高度	40.0±0.5	40.090	+0.04~+0.17	0.032 0.080

3.2 壁厚分布规律

图 7 为上、下前支梁典型截面处的环向壁厚分布规律，其测量点分布如图 7 中截面形状图所示。由图 7 可以看出：在上前支梁  $A_1-A_1$  截面处，R1 和 R2 区域的减薄量较大，最小壁厚为 1.234 mm，最大减薄率达到 16.4%，R3 与 R4 区域的壁厚分布较为均匀；在  $A_2-A_2$  截面处，R1 区域的壁厚分布比较均匀，而 R2、R3 和 R4 区域减薄严重，最薄处位于 R2 区域，最小壁厚为 1.247 mm，对应的最大减薄率也为 16.4%。对于下前支梁，成形后典型截面  $B_1-B_1$  和  $B_2-B_2$  处的环向壁厚分布均较均匀，其最小壁厚为 1.364 mm，减薄率均小于 6%。这是因为：在预成形阶段形成了内凹构型管坯，内高压成形时减小了与模具的接触面积，使材料更容易向圆角区流动，有效提高了管件壁厚均匀性。



3.3 力学性能

上、下前支梁的力学性能如图 8 所示。由图 8 可以看出：上前支梁母材区的屈服强度在 364.4~432.0 MPa 之间，平均值为 398.2 MPa；焊缝区的屈服强度在 436.9~454.5 MPa 之间，平均值为 445.7 MPa；母材区的抗拉强度在 437.7~478.6 MPa 之间，平均值为 458.2 MPa；焊缝区的抗拉强度在 493.0~510.0 MPa 之间，平均值为 501.5 MPa。下前支梁母材区的屈服强度在 362.0~410.1 MPa 之间，平均值为 386.1 MPa；焊缝区的屈服强度在 419.1~428.8 MPa 之间，平均值为 424.0 MPa；母材区的抗拉强度在 431.3~442.1 MPa 范围内，平均值为 436.7 MPa；焊缝区的抗拉强度在 490.0~491.1 MPa 之间，平均值为 490.6 MPa。相比原始管坯，上、下前支梁母材区的屈服强度和抗拉强度的平均值均较高，这是由于管坯在内高压作用下发生胀形而产生了应变硬化所

致。此外，焊缝区材料的屈服强度和抗拉强度均高于母材区。需要注意的是，由于原始管坯来自不同批次，力学性能存在一定差异，导致前支梁某些位置的强度稍低。然而，内高压成形前支梁的力学性能均能满足要求。

3.4 残余应力

利用 X 射线衍射方法，分别在  $A_1-A_1$  与  $A_2-A_2$  截面上 5 个位置测试了沿环向的残余应力，在弯曲处分别在内外侧（O 点和 N 点）测试了沿轴向的残余应力，结果如图 9 所示。由图 9 可以看出：在  $A_1-A_1$  截面，短边中点 1 处环向存在 54 MPa 的残余拉应力，其余位置均存在残余压应力，最大残余压应力位于长边中点 5 处，为 97 MPa；在  $A_2-A_2$  截面，同样在短边中点 5 处存在沿环向残余拉应力，为 78 MPa，其余位置处均存在环向残余压应力，且最大残余压应力同样位于长边中点 1 处，为 108 MPa；在弯曲处，内侧沿轴向存在较小的残余拉应力，为

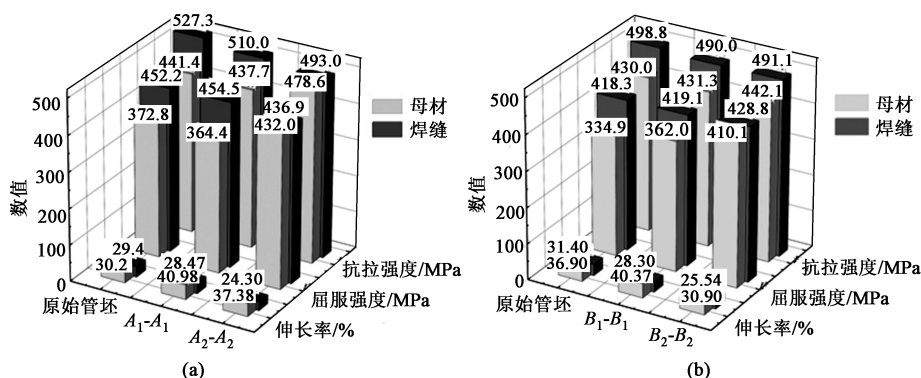


图 8 前支梁内高压成形件的力学性能

(a) 上前支梁 (b) 下前支梁

Fig. 8 Mechanical properties of hydroformed part for front support beam

(a) Upper front support beam (b) Lower front support beam

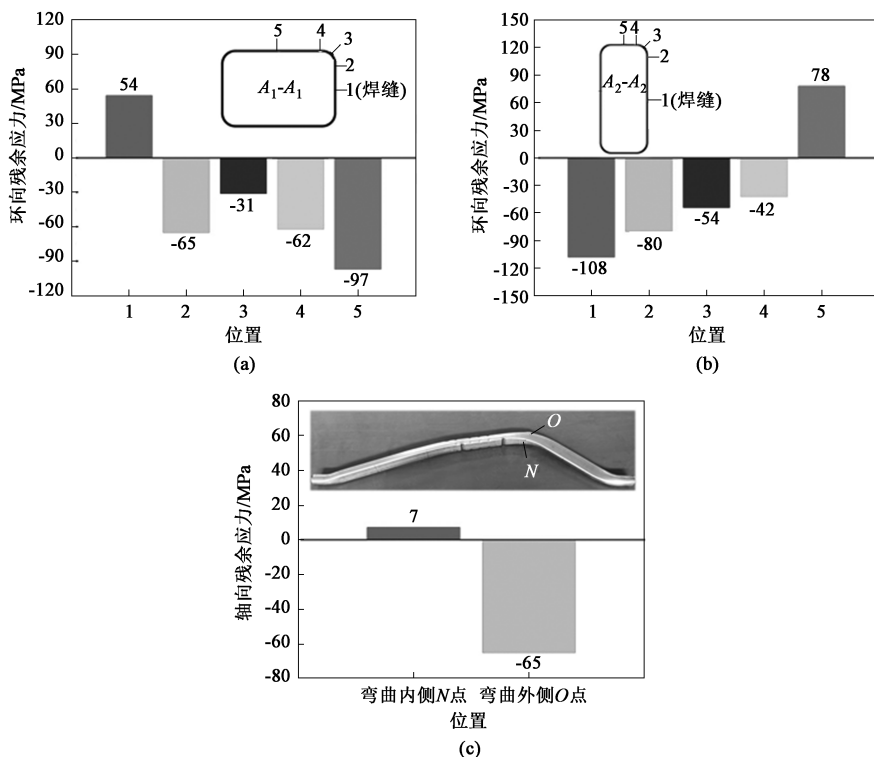


图 9 上前支梁典型位置的残余应力分布

(a) A1-A1 截面 (b) A2-A2 截面 (c) 弯曲处

Fig. 9 Residual stress distributions in typical position of upper front support beam

(a) Cross-section of A1-A1 (b) Cross-section of A2-A2 (c) Bending position

7 MPa, 而外侧沿轴向存在的残余压应力为 65 MPa。由此可知, 内高压成形得到的上、下前支梁的残余应力非常小, 且主要以压应力为主, 这是因为: 内高压成形过程中管坯主要受全断面拉应力作用, 卸载后在拉应力位置形成较小的残余压应力。对于 N 点, 弯曲过程会产生较大的轴向压应力, 但在内高压成形时由于内压作用又会使轴向压应力显著降低, 因此, 最终形成的轴向残余拉应力仅为 7 MPa。

### 3.5 批量生产及应用情况

本文研究的上、下前支梁从 2014 年投产以来累计生产近 160 万件。该前支梁的废品率逐年降低, 平均年度废品率降至 0.3% 以下。图 10 为批量生产的前支梁以及其装配在越野车车身上的照片。实验数据显示, 前车身采用内高压成形的上、下前支梁 (共 4 件) 取代传统冲焊件, 在质量上实现减重 43.6% (12.3 kg), 零件数量上减少 46.3%

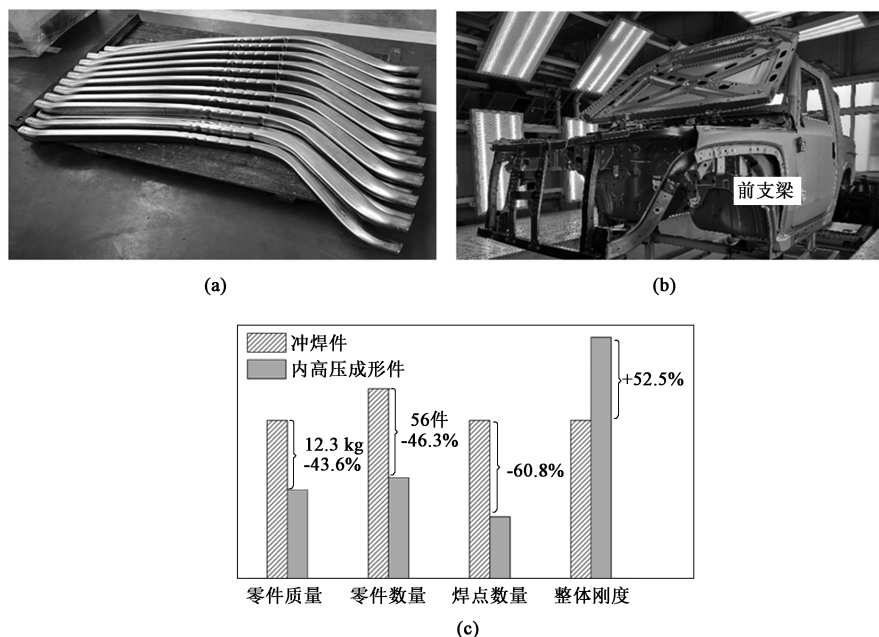


图10 批量生产的前支梁及其在越野车身上的应用

(a) 内高压成形件 (b) 车身总成 (c) 性能比较

Fig. 10 Mass production of front support beam and its application in off-road vehicle body

(a) Hydroformed parts (b) Assembled vehicle body (c) Performance comparison

(56件), 焊点数量减少60.8%, 而整体刚度提高了52.5%, 在显著实现轻量化的同时提高了性能。

## 4 结论

(1) 前支梁典型截面的尺寸精度达到 $\pm 0.2$  mm范围, 截面尺寸的离散系数 $C_v$ 值均低于0.2%。典型截面的环向壁厚分布均匀, 上前支梁的壁厚最大减薄率达到16.4%, 而下前支梁的壁厚减薄率均低于6%。

(2) 内高压成形得到的上、下前支梁母材区的屈服强度平均值分别为398.2和386.1 MPa, 抗拉强度平均值分别为458.2和436.7 MPa, 均高于初始管坯, 这是由于管坯在内压作用下发生胀形而产生了应变硬化所致。此外, 焊缝区的强度均高于母材区。前支梁强度满足力学性能要求。

(3) 由内高压成形得到的上、下前支梁的残余应力较小, 最大残余拉应力仅为78 MPa, 大部分区域处于残余压应力状态, 最大残余压应力达到108 MPa, 对前支梁疲劳性能有利。

(4) 利用内高压成形技术实现了前支梁的高精度与高性能成形, 累计生产近160万件, 并成功应用于某越野车车身结构, 其年度废品率从2017年开

始降至0.3%以下。

## 参考文献:

- [1] 张晶, 魏福林, 田宇黎, 等. 一种前指梁结构及汽车[P]. 中国: 201921965267.9, 2020-06-26.  
Zhang J, Wei F L, Tian Y L, et al. A front support beam structure and an automobile [P]. China: 201921965267.9, 2020-06-26.
- [2] 李林峰, 刘卫国, 张君媛, 等. 基于25%小偏置正面碰撞的某乘用车前端结构改进设计[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2400-2405.  
Li L F, Liu W G, Zhang J Y, et al. Design and improvement of a passenger vehicle frontal structure based on 25% small overlap frontal crash [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2400-2405.
- [3] 刘玉博. 前指梁总成、发动机舱及汽车[P]. 中国: 201220672819.9, 2013-06-12.  
Liu Y B. Front support beam assembly, engine compartment and automobile [P]. China: 201220672819.9, 2013-06-12.
- [4] 苑世剑, 韩聪, 王小松. 空心变截面构件内高压成形工艺与装备[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 21-27.  
Yuan S J, Han C, Wang X S. Hydroforming processes and equipments of hollow structures with various sections [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 21-27.
- [5] Dohmann F, Hartl C. Tube hydroforming-research and practical application [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71(1): 174-186.
- [6] Ahmetoglu M, Altan T. Tube hydroforming: State-of-the-art and future trends [J]. Journal of Materials Processing Technology,

- 2000, 98 (1): 25-33.
- [7] Hartl C. Research and advances in fundamentals and industrial applications of hydroforming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 167 (2-3): 383-392.
- [8] Yuan S J, He Z B, Liu G. New developments of hydroforming in China [J]. *Materials Transactions*, 2012, 53 (5): 787-795.
- [9] Yuan S J, Wang X S, Liu G, et al. Control and use of wrinkles in tube hydroforming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 182 (1): 6-11.
- [10] Yuan S J, Han C, Wang X S. Hydroforming of automotive structural components with rectangular-sections [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46: 1201-1206.
- [11] 苑世剑, 韩聪, 王小松, 等. 大型内高压成形装备及批量生产模具 [J]. *汽车工艺与材料*, 2017, (9): 46-58.
- Yuan S J, Han C, Wang X S, et al. Large hydroforming equipment and mass production tools [J]. *Automobile Technology & Material*, 2017, (9): 46-58.
- [12] 李铁, 王立敏, 邴建, 等. 车辆前指梁及车辆前指梁的成形方法 [P]. 中国: 201210103815.3, 2012-08-01.
- Li T, Wang L M, Bing J, et al. Front support beam of vehicle and its forming method [P]. China: 201210103815.3, 2012-08-01.
- [13] 任建军, 马福业, 郭群, 等. 汽车前指梁多工步成形模拟及试验研究 [J]. *塑性工程学报*, 2016, 23 (6): 30-36.
- Ren J J, Ma F Y, Guo Q, et al. Numerical simulation and experiment of automobile chassis vertical beam [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2016, 23 (6): 30-36.
- [14] GB/T 7704—2017, 无损检测 X 射线应力测定方法 [S].
- GB/T 7704—2017, Non-destructive testing—Practice for residual stress measurement by X-ray [S].

(上接第 30 页)

条件下外法兰的损伤明显小于内管; 超低温下试件抵抗损伤的能力明显高于室温, 有效抑制了塑性连接件的破裂缺陷。

#### 参考文献:

- [1] Mondol S, Alam T, Banerjee R, et al. Development of a high temperature high strength Al alloy by addition of small amounts of Sc and Mg to 2219 alloy [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2017, 687: 221-231.
- [2] Zheng K, Politis D J, Wang L, et al. A review on forming techniques for manufacturing lightweight complex-shaped aluminium panel components [J]. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2018, 1 (2): 55-80.
- [3] Lin Y T, Wang M C, Zhang Y, et al. Investigation of microstructure evolution after post-weld heat treatment and cryogenic fracture toughness of the weld metal of AA2219 VPTIG joints [J]. *Materials & Design*, 2017, 113: 54-59.
- [4] 赵满, 孙倩, 庞秋, 等. 塑性变形对 2024 铝合金拼焊接头腐蚀性能的影响 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (3): 198-205.
- Zhao M, Sun Q, Pang Q, et al. Influence of plastic deformation on corrosion performance for 2024 aluminum alloy tailored welded joint [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (3): 198-205.
- [5] 伍杰, 毛祖莉, 邹帆. 基于 Norton-Hoff 粘塑性理论的铝合金拼焊板成形性能预测与实验研究 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (5): 109-115.
- Wu J, Mao Z L, Zou F. Formability prediction and experimental study on aluminum alloy tailor welded blanks based on Norton-Hoff viscoplastic theory [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (5): 109-115.
- [6] Henriksen J, Nordhagen H O, Hoang H N, et al. Numerical and experimental verification of new method for connecting pipe to flange by cold forming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 220: 215-223.
- [7] Li Q M, Tian P, Zhou C, et al. A new method to evaluate the sealing reliability of the flanged connections for Molten Salt Reactors [J]. *Nuclear Engineering & Design*, 2015, 287: 90-94.
- [8] 孔繁宇. 2219 铝合金球壳超低温成形的各向异性行为 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- Kong F Y. Anisotropic Behavior of Ultra-low Temperature Forming of 2219 Aluminum Alloy Spherical Shells [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [9] 蔡朝灿. 复合材料薄壁管的连接设计与分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- Cai C C. Design and Analysis of Connection of Composite Thin-walled Tubes [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [10] 凡晓波, 王旭刚, 陈险烁, 等. 铝合金管材超低温介质压力胀形行为 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (4): 1-6.
- Fan X B, Wang X G, Chen X S, et al. Ultra-low temperature medium pressure bulging behavior of aluminum alloy tubes [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (4): 1-6.
- [11] 王新云, 邓磊. 塑性成形过程的精确控制 [J]. *锻压技术*, 2021, 46 (9): 1-7.
- Wang X Y, Deng L. Precise control of plastic forming process [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46 (9): 1-7.
- [12] Park J H, Park K T, Lee Y S, et al. Comparison of compressive deformation of ultrafine-grained 5083Al alloy at 77 and 298 K [J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2005, 36 (5): 1365-1368.
- [13] Saimoto S, Lloyd D J. A new analysis of yielding and work hardening in AA1100 and AA5754 at low temperatures [J]. *Acta Materialia*, 2012, 60 (18): 6352-6361.
- [14] 秦曾, 辛荣, 王宇, 等. 空心铝挤压型材焊合扩口试验失效分析 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (4): 156-161.
- Qin Z, Xin R, Wang Y, et al. Failure analysis on flaring test for welding seam of hollow aluminum extrusion profile [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (4): 156-161.