



主要对轻型越野汽车底盘传动系统的驱动桥用桥壳本体的设计性能及工艺成型进行对比分析研究，得出驱动桥壳本体工艺成型的轻量化差异性竞争优势和新技术应用趋势，为越野汽车驱动桥桥壳的高强度、轻量化研究与应用提供了一条切实可行的实施途径。

越野车桥壳本体轻量化高强度技术研究与应用

□ 北京汽车研究总院有限公司 / 赵正彩 席玉岭 肖军

在全球汽车工业聚焦“绿色、智能、网联”三大主题的今天，对传统汽车整车的轻量化和安全性要求也日渐提高，而实现汽车整车轻量化和安全性能的目标离不开汽车各总成和零部件的轻量化技术发展。整体式驱动桥作为轻型硬派越野汽车五大关键子系统总成，其重要零部件之一的桥壳本体，直接影响整车的使用安全性能，直接决定传动系统驱动桥的质量。

桥壳本体的成形技术对驱动桥的刚度、强度、寿命等安全性能参数和材料利用率、自身质量等参数都有直接的影响。而成形工艺技术与人工、设备投入等生产成本息息相关，材料利用率又直接影响着桥壳本体原材料的有效使用，也影响着产品成本。下面通过对桥壳本体的设计性能及工艺成型进行对比分析研究，得出桥壳本体工艺成形的轻量化差异性竞争优势和新技术应

用趋势。

桥壳本体制造工艺简介及特点分析

在轻型越野车板块，就驱动桥的桥壳制造工艺分析，相对于铸造成型桥壳对比而言，钢板冲压焊接、钢管成形的桥壳在轻量化方面，具有无可比拟的优势。文章旨在针对钢板、钢管成形的桥壳分析研究。

1. 桥壳本体四种制造工艺简介

如图1所示，钢板、钢管成形的制造工艺桥壳本体，主要分为以下四种：

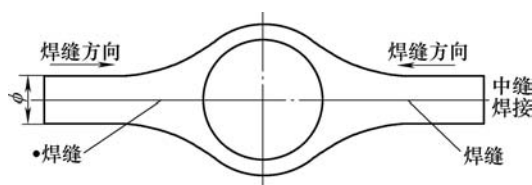
(1) 钢板冲压成桥壳半片、两半片前后两条焊缝对边焊接成桥壳本体，不带桥壳后盖，简称半片冲焊工艺桥壳。如图1a所示。此工艺有加热冲压和冷冲压。

(2) 钢板冷冲压、包裹成形，桥壳本体装主减一侧有两条直焊缝和四条三角板（或称菱形板）焊缝，后盖和桥壳本体是一体式冲压成形，即桥壳本体后盖侧无焊

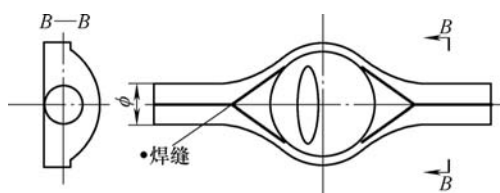
缝、无三角板，简称“包饺子”冲焊工艺桥壳。如图1b所示。

(3) 无缝钢管固体填料内高压胀芯拉延成形，桥壳本体前后侧均无直焊缝，但均有三角板焊缝，且后盖与桥壳本体焊接而成，属于机械胀形拉延工艺，简称拉延工艺桥壳。如图1c所示。此内高压胀芯成形也有热胀和冷胀两种工艺；无缝钢管可以是方管，也可以是圆管。

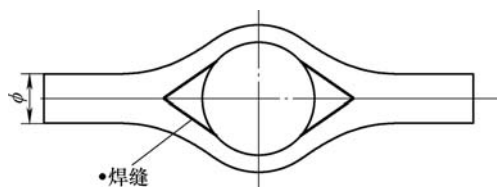
(4) 无缝钢管充液内高压成形，液体介质为水。桥壳本体完全无焊缝，壳体实现了“零”焊缝，此种桥壳本体为液压胀形工艺，简称为液胀工艺桥壳。如图1d所示。



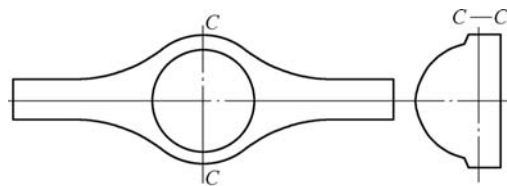
(a) 半片冲焊工艺桥壳



(b) “包饺子”冲焊工艺桥壳



(c) 机械胀形拉延工艺桥壳



(d) 液压胀形工艺桥壳

图1 钢板、钢管成形的四种制造工艺桥壳本体简图

2. 桥壳本体四种制造工艺对比分析

(1) 半片冲焊制造工艺。

切割钢板、下料→压制桥壳半片（热压：采用中频加热炉或空气电阻炉加热至一定温度，再压制；冷压，无需设备，直接压制）→校正桥壳半片落差→对桥壳半片抛丸、去除氧化皮→铣削焊接面→对靠两桥壳半片、点焊→焊接桥壳中缝（埋弧焊或气体保护焊）→气割桥壳本体前后中心孔→打磨焊缝→校正本体→机加工本体。

半片冲焊制造工艺过程如图2a所示。

(2) “包饺子”冲焊制造工艺。

切割钢板、下料→拉延后盖→整形、冲缺→切边、冲孔→纵向直翻边→侧翻边、桥壳本体初步成形→整形→切割本体（等离子）→清理本体内腔切割渣→点焊→焊接桥壳本体直缝→打磨焊缝→校正本体→机加工本体。

“包饺子”冲焊制造工艺过程如图2b所示。

(3) 机械胀形拉延制造工艺。

圆管下料→推方（管料中间段推压成方身）→缩径（管料两端镦缩成圆口）→切割管料中间段轴向拉伸槽口→机械胀拉（固体填充）管料中间段、本体成形→焊接三角板→热处理（调质18~23HRC）→本体抛丸→本体校正→气割中心孔→机加工本体。

机械胀形拉延制造工艺过程如图2c所示。

(4) 液压胀形制造工艺。

圆管下料→端部缩径（管料

两端镦缩成符合尺寸要求的圆口)→中间端扩张(液压胀形,介质为水,可循环使用)、预成形→热处理(退火,根据需要)→整体充液整形(液胀)→一般不需要(特别要求时,综合考虑性能、成本等按需进行调质等热处理)→本体抛丸(根据需要,抛丸可以去除残余应力,提升性能和疲劳寿命)→本体校正→气割中心孔→机加工本体。

液压胀形制造工艺过程如图2d

所示。

(5) 桥壳本体四种成形工艺对比、轻量化方面分析。不同工艺的特点对比、分析如表1所述。

从上表可以看出,液胀工艺成形的桥壳本体轻量化程度高,优势明显。

桥壳本体强度性能及轻量化分析

文章涵盖的几种桥壳本体材料

均为低合金高强度结构钢,工艺过程不同,性能就会有不同,为能达到同样的力学性能,性能过剩的工艺可以通过减薄壁厚来满足,从而实现轻量化。下面通过对半片冲焊和机械拉延两种工艺成形的试样进行检测,得出力学性能检测结果差别很大;通过数模对“包饺子”冲焊和液压胀形两种工艺成形的样件理论分析,得出不同工艺的轻量化程度。

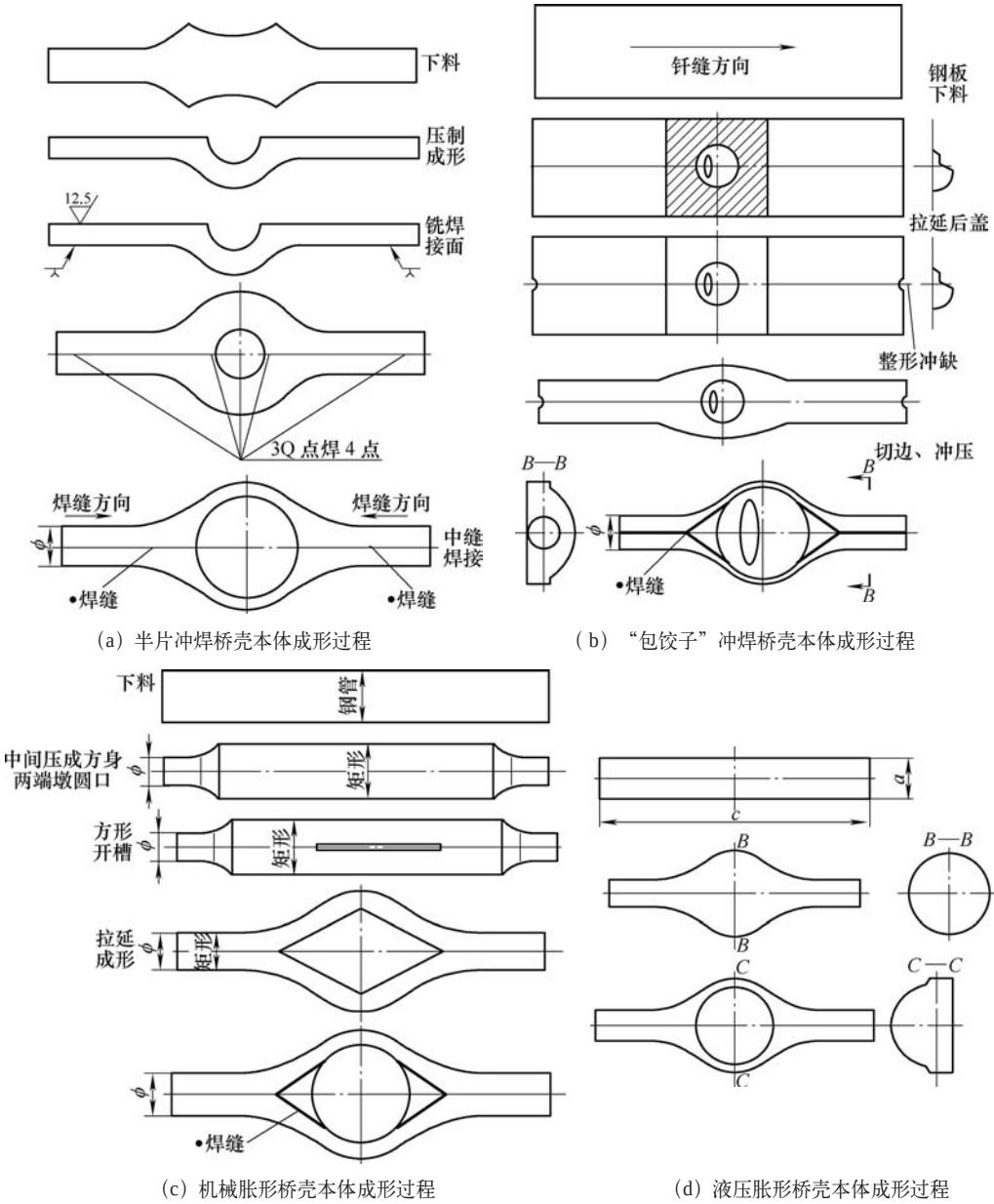


图2 四种桥壳本体成形过程示意图

1. 冲焊和拉延两种成形工艺的性能分析、对比

抽取A公司一重型越野车或大型汽车用桥壳本体为例，采取半片冲压焊接和机械拉延两种成形工艺对本体抽样，进行机械强度检测分析、对比。

(1) 冲焊工艺。通过对同一批钢板在桥壳半片热烘压压制前后进行力学性能检测，结果见表2。

(2) 拉延工艺。钢管经中间推方、端部缩径镦圆口、中端开槽拉伸、成形后，制造过程中产生的冷、热加工应力必须通过热处理予以消除。调质处理工艺既能消除残余应力又可保证桥壳本体的强度。对拉延成形的桥壳本体抽样，进行力学性能检测，结果见表3。

从表2、表3中记录的数据变化来看，虽然设计同为Q345B材料，但由于制造工艺的不同，成形件的力学强度有很大差别。

作为装有整体式驱动桥的汽车来说，在抗拉强度满足要求的前提下，桥壳本体的强度优劣主要看屈服强度的比值。对比冲焊和拉延两种工艺成形的本体屈服强度（中间值），拉延本体的屈服强度 $\sigma_s=505\text{N/mm}^2$ 、冲焊本体的屈服强度 $\sigma_s=357\text{N/mm}^2$ ，两种屈服强度的比值 σ_s 为1.4。

结论如下：

(1) 相比冲焊工艺，拉延工艺的桥壳本体高强度性能优势明显。

(2) 满足相同整车性能要求，拉延本体可通过减薄管材壁厚实现等强度，从而减轻驱动桥质量，达到轻量化的目的。

2. “包饺子”冲焊和液压胀形两种成形工艺的性能分析、对比

抽取B公司一轻型越野车用桥壳本体为例，采取“包饺子”工艺和内高压液胀两种成形工艺对比分析。

(1) “包饺子”工艺，通过钢板坯料冷冲压成形。如图3a、3b

所示，分别为“包饺子”工艺桥壳成形本体和前盘面焊接了菱形加强板后的桥壳体。

采用厚度为5mm的SAPH440低碳高强度合金钢，经数模测得理论质量和实物的实际质量见表4。

(2) 液胀工艺。选取壁厚为4.2mm的冷拔Q345B无缝钢管经过预成形后进行最终液压胀力成形。

表1 四种成形工艺特点对比

成形工艺分项	半片冲焊桥壳本体	“包饺子”冲焊桥壳本体	拉延桥壳本体	液胀桥壳本体
材料	Q345B	SAPH440	Q345B	Q345B
坯料	钢板	钢板	无缝钢管	无缝钢管
材料利用率	不大于60%	不大于52%	约90%	约95%
压制/拉胀成形前	≥12mm，加热到890~910℃再压制≤10mm，无需加热，冷压成形	一般料厚≤6mm，无需加热，机械设备冷冲压成形	管料壁厚范围8~18mm，分冷拉延、热拉延两种。	适合料厚≤12mm，无需加热，对桥壳本体内腔充液，内高压液胀成形
成形后热处理	一般不需要	一般不需要	调质，18~23HRC	一般不需要，特别要求时，综合考虑性能、成本等按需进行。
焊缝焊接量	多前部、后部共4段长的焊接中缝	中前部2段长中缝、4段短的三角板焊缝	少前后共4段短的三角板焊缝	无
本体轻量化	无减重	无减重	可减重约5%	可减重约10%

表2 冲焊工艺桥壳热烘压前后力学性能检测结果

工艺方式	材料	阶段	抗拉强度 $\sigma_b/\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	屈服强度 $\sigma_s/\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	伸长率 δ (%)
半片冲焊工艺	Q345B	热压前	555~565	380~390	26.5~28.6
		热压后	532~542	350~364	28~30.5
		说明：对比热压前、后，钢板的力学性能在加热成形过程中，强度有所下降			

说明：对比热压前、后，钢板的力学性能在加热成形过程中，强度有所下降。

表3 拉延工艺桥壳力学性能检测结果

工艺方式	材料	阶段	抗拉强度 $\sigma_b/\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	屈服强度 $\sigma_s/\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	伸长率 δ (%)
拉延工艺	Q345B	调质后	615~635	495~515	21.8~22.1
		说明： 与冲焊桥壳本体相比，抗拉强度和屈服强度大幅提升 与冲焊工艺相比，延伸率有所下降。该工艺经无数次的生产制造过程、台架试验、道路试验、客户验证，延伸率可以满足桥壳本体的有效成形			

如图4所示。液胀过程中可实现不等壁厚截面的等强度桥壳成形。

对液胀桥壳三维数模测得理论重量见表4。

针对成形模拟后的桥壳，测量不同截面的管壁等几何尺寸测量数据结果见表5。

从上表4、表5中的内容分析，得出下列结论：

(1) 相比较“包饺子”钢板冲压工艺，无缝钢管液胀成形的桥壳，材料为国标普通Q345B，材料成本低。

(2) 满足整车和驱动桥相同性能要求，液胀桥壳本体可以实现不等壁厚的变截面等强度，从而减轻驱动桥质量，达到整车轻量化、高强度承载的目的。



(a) “包饺子”成形桥壳本体



(b)带菱形加强板的焊接桥壳体
图3 “包饺子”工艺桥壳产品数模

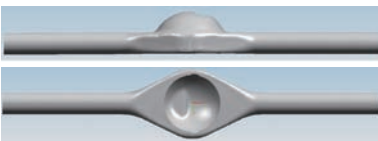


图4 液胀工艺桥壳产品数模

3. 拉伸和液胀两种成形工艺的性能分析、对比

从表1中所列的机械固体拉伸和液体介质胀形两种工艺特点也可以看出，前者属于机械胀形，后者是液压胀形；前者成形过程受干扰因素多，成形的产品不带后盖、焊缝多。无论从一体式成形还是材料利用率来看均劣于后者。两者对比，液胀桥壳的高强度、轻量化优

势更明显。

桥壳试验验证情况对比

台架试验分别对前述A公司（重型越野卡车桥壳）、B公司（轻型越野车桥壳）的同一型号某产品进行试验，根据《汽车驱动桥台架试验评价指标》（QC/T534—1999）的要求进行评价。

1. 垂直弯曲刚度试验验证

桥壳垂直弯曲刚性试验评价指标：满载轴荷时每米轮距最大变形不超过1.5mm。得出试验数据见表6。

结论，四种工艺成形的桥壳刚度f均满足：每米轮距最大变形<1.5mm。刚度指标都符合行业标准。

对刚度有特殊要求的，可通过调整桥壳截面尺寸、壁厚等适当调整

2. 垂直弯曲疲劳寿命验证

桥壳垂直弯曲疲劳寿命试验评价指标：越野车用桥壳按满载轴荷的3倍，疲劳寿命不低于80万次。四种工艺的桥壳按要求加载验证，均超过80万次，桥壳无损坏，合格；继续台架试验，甚至可以超过100万次。

3. 整车道路或市场试验情况

不可否认，前三种成形工艺的桥壳在市场上已广泛存在并使用了多年。液压胀形工艺的桥壳近两年来越趋成熟，并已在国内某大型汽车公司完成试验，现正批量生产推向市场。

表4 “包饺子”工艺和液胀工艺两种成形桥壳质量对比

工艺方式	零部件	材料	测量的理论质量/kg	实际质量/kg	轻量化对比
“包饺子”工艺	桥壳本体	SAPH440、厚5mm	18.51	—	液胀工艺桥壳本体较同边界的“包饺子”工艺桥壳实际重量相比，减重达7.5%
	菱形加强板		2.38	—	
	合计		20.89	18.5	
液胀工艺	液胀本体	Q345B、厚4.2mm	16.6	—	与理论值近似
	加强环		0.51	—	
	合计		17.11	—	

表5 液胀桥壳成形模拟尺寸

截面	距中心线距离/mm	桥管直径/mm	壁厚/mm	结果说明
A	706	80.47	5.52	初始坯料为4.2mm壁厚的钢管，经过液胀后的壁厚变化和外形轮廓与产品一致
B	560	80.46	5.51	
C	415	80.42	5.52	
D	271	80.15	5.54	
E	160	—	4.42	

表6 不同工艺桥壳刚度试验数据

工艺形式	半片冲焊	拉伸	“包饺子”冲焊	液胀
垂直弯曲刚度f	0.82	0.70	1.31	0.59
结论	每米轮距最大变形，均<1.5mm		—	—

桥壳本体液胀成形技术发展及趋势应用

根据上面研究对比分析，液胀桥壳本体在高强度、轻量化方面比其他三类成形工艺具有明显的优势。

某高校王连东教授带领团队在计算机仿真、塑性有限元力学和试验验证相结合的基础上，对桥壳本体液胀成形工艺经过十几年的反复实践和探索，形成了系统的有限元模拟技术，模拟成形的精度超过95%以上，以此模拟分析的结果可以作为很重要的参考。

1. 液压胀形过程有限元模拟

针对初始的无缝钢管，利用有限元分析软件ABAQUS进行缩径、液压胀形模拟，如图5所示，得到预成形管坯；再调整充液压力，进行压制、校形。

用模拟的结果与生产的样件检测结果对比表明：模拟得到的管件外形与实际样件一致，有限元模拟得到的壁厚分布与测量值趋势相同，最大壁厚偏差不大于4%。

2. 液压胀形桥壳性能模拟

通过有限元软件对液胀桥壳进行性能模拟，分别对桥壳进行刚度分析、强度分析以及疲劳寿命分析，分析结果均符合国家标准。桥壳刚度、强度有限元模拟如图6所示，疲劳寿命分析模拟如图7所示。

随机对样件进行台架试验验证，刚度和疲劳寿命实际验证结果比国家标准要求的都要高30%以上，验证结果合格。

3. 液胀桥壳产品特点和优势及轻型越野车应用

综上所述，液压胀形桥壳具有下列特点和明显优势：

(1) 整体成形，无焊缝。液胀桥壳本体将多个焊接零件，如后盖、前加强板、三角板等集成为一个整体零件。该液胀桥壳本体带有后油盖，省去冲焊桥壳本体焊接工序、本体与后盖的焊接工序、桥壳大盘面与三角板或加强板的焊接工序。大型车用桥壳本体材料利用率可达95%以上，轻型车或微型车用桥壳本体材料利用率可达90%以上。

(2) 轻量化。与传统冲压焊接桥壳相比，液胀桥壳本体（或称桥壳中段）可减重5%~10%，减重明显，可有效实现轻量化。

(3) 性能好。液胀桥壳壁厚根据强度要求合理分布，桥壳性能趋近于等强度。在重量相同的前提下，液胀桥壳比冲焊桥壳强度提高30%以上。

(4) 尺寸精确、定形性好。液胀桥壳产品外形美观、尺寸精确，与半轴套管、簧座等附件的焊接装配工艺性好，便于实现焊接桥壳总成的自动化装焊。

(5) 绿色环保，无污染。液胀成形过程用水作为介质，且密封循环使用。

轻型硬派越野汽车兼顾野外和城市行驶，为应对汽车的减排降耗要求，底盘系统驱动桥应用轻量化、高强度优势明显的液胀工艺桥壳会越来越成为趋势。



图5 胀形过程有限元模拟

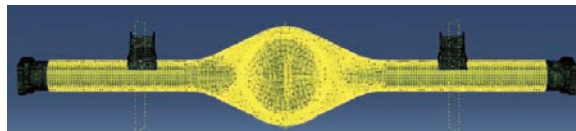


图6 桥壳刚度、强度有限元模拟

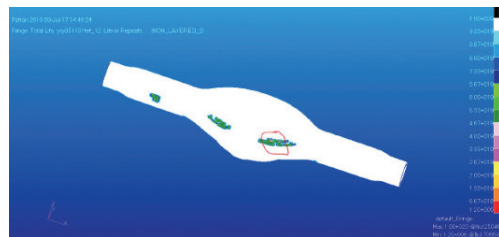


图7 疲劳寿命分析模拟

结语

用液压胀形法生产的无缝整体式桥壳本体，完全打破了现行国内外的铸造或冲压焊接法生产汽车桥壳的技术现状，显著地提高了桥壳的强度性能，减轻了桥壳本体的

质量，是一种绿色、环保、高效的全新制造工艺技术。该项技术的研究和应用会引领着国内外的轻型越野车朝着更能适应野外或城市、环保、轻量化的方向发展。

AUTO1950