

# 提高车辆小偏置碰撞安全性的A柱结构研究

刘多加<sup>1</sup> 钱梅林<sup>1</sup> 陈海琴<sup>1</sup> 李灿<sup>1</sup> 赵坤民<sup>1,2</sup>

(1.合众新能源汽车股份有限公司, 嘉兴 318000; 2.大连理工大学, 大连 116024)

**摘要:**基于中国保险汽车安全指数25%偏置碰撞工况,对某新能源汽车A柱的结构设计方案进行了研究。对比分析了基础结构、复合车身解决方案(Composite Body Solutions, CBS)胶块增强结构、热气球形管梁增强结构对碰撞安全性的影响,介绍了CBS胶块和热气球形的制造工艺,并对热气球形工艺进行了仿真分析,对比分析2种增强结构的工装投入和单件成本。研究发现,在均能实现小偏置碰撞安全性优秀等级的前提下,1500 MPa热气球形管梁方案在单件成本及轻量化方面比CBS胶块方案更具优势。

**关键词:**碰撞安全性 小偏置碰撞 车身A柱 热气球形 CBS胶块

中图分类号:TH162

文献标志码:B

DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20230355

## Research on the A-Pillar Structure to Improve the Safety of Automobile Small Offset Collision

Liu Duoja<sup>1</sup>, Qian Meilin<sup>1</sup>, Chen Haiqin<sup>1</sup>, Li Can<sup>1</sup>, Zhao Kunmin<sup>1,2</sup>

(1. Hozon New Energy Automobile Co., Ltd., Jiaxing 318000; 2. Dalian University of Technology, Dalian 116024)

**Abstract:** Based on the 25% offset collision condition defined by the China Insurance Research Institute, this paper studies the structural design scheme of the A-pillar of a new energy vehicle. The effect on the crash safety of the basic structure, CBS rubber block reinforced structure, and hot blow forming tube reinforced structure are evaluated and compared. The manufacturing process of CBS rubber block and tube hot blow forming are introduced, and the hot blow forming process is simulated and analyzed. The tooling capital investment and unit cost of the two reinforced structures are further analyzed. The study shows that in the case of achieving an excellent level of small offset collision safety, the 1500 MPa tube hot blow forming scheme has more advantages than the CBS rubber block scheme in terms of unit cost and light weight.

**Key words:** Crash safety, Small offset collision, Auto body A-pillar, Hot blow forming, CBS rubber block

## 1 前言

美国公路安全保险协会(Insurance Institute for Highway Safety, IIHS)于2012年率先推出了应对汽车前端局部碰撞交通事故的25%小偏置碰撞测试<sup>[1]</sup>,中国保险行业协会在2020年正式将25%小偏置碰撞引入测评<sup>[2]</sup>,各大主机厂也随之将小偏置碰撞安全性列入车身设计开发的性能目标<sup>[3-4]</sup>。

小偏置碰撞的评价分为假人伤害、车身结构、约束系统和假人运动4个方面,单项评价和整体评价分为优秀(G)、良好(A)、一般(M)和较差(P)4个等级。车身结构是小偏置碰撞的基础,良好的车身结构设计匹配更好的约束系统可以最大程度减少假人伤害,采用乘员舱上10个关键位置的侵入量来评定车身结构等级。

针对小偏置碰撞,前机舱要尽量充分变形以

**作者简介:**刘多加(1983—),男,学士学位,中级工程师,研究方向为车身设计。

**通讯作者:**赵坤民(1971—),男,博士学位,高级工程师,研究方向为车身设计与制造。

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51775160)。

**参考文献引用格式:**

刘多加,钱梅林,陈海琴,等.提高车辆小偏置碰撞安全性的A柱结构研究[J].汽车工艺与材料,2024(8):1-6.

LIU D J, QING M L, CHEN H Q, et al. Research on the A-Pillar Structure to Improve the Safety of Automobile Small Offset Collision[J]. Automobile Technology & Material, 2024(8): 1-6.

吸收大部分冲击能量,而乘员舱结构要足够强以承受前机舱传递的载荷,变形应尽量小以保证乘员的安全。贾丽刚等<sup>[5]</sup>在车架前端增加结构导向件、上纵梁区域增加结构吸能并提高驾驶舱区域刚度,崔莹莹等<sup>[6]</sup>利用环状车身和横向边梁引导车身侧滑,方柘林等<sup>[7]</sup>将上纵梁构成环形结构并组成大接触面以充分吸能,刘辉晖等<sup>[8]</sup>基于传统的前机舱、乘员舱和上车体结构设计提出了局部改进和加强方案。

乘员舱在小偏置碰撞工况下的主要承载结构是 A 柱和门槛梁,其中 A 柱结构主要影响乘员舱上部变形,门槛梁主要影响乘员舱下部变形。Lanzerath 等<sup>[9]</sup>用管梁热气胀形工艺制造出 1 500 MPa 的 A 柱,Hamasaki 等<sup>[10]</sup>用机器人驱动管梁三维弯曲的同时边感应加热边喷水淬火的工艺制造出超高强度的 A 柱加强梁,李彦云等<sup>[11]</sup>将 2 000 MPa 热成形钢用于 A 柱上内板和上加强板,李超等<sup>[12]</sup>将 2 000 MPa 管梁热气胀形工艺用于 A 柱,程超等<sup>[13]</sup>对管件热气胀形工艺进行了深入研究,Funada<sup>[14]</sup>直接热气胀形出法兰边,刘业鹏等<sup>[3]</sup>采用复合车身解决方案(Composite Body Solutions, CBS)实现了小偏置碰撞的优秀等级。

研究能够达到小偏置碰撞优秀等级的车身 A 柱结构,在传统内外板冲焊结构的基础上,提出 CBS 胶块增强方案和热气胀形管梁增强方案,综合对比分析 2 种设计方案的性能、质量、单件成本和工装投入,介绍 CBS 胶块制造工艺和管梁热气胀形工艺。

## 2 设计方案

小偏置碰撞工况试验如图 1 所示,车辆以 64.4 km/h 的时速及 25% 的重叠率(驾驶员侧)正面撞击固定刚性壁障。小偏置壁障(Small Overlap Barrier, SOB)与车前宽度方向 25% 重叠。

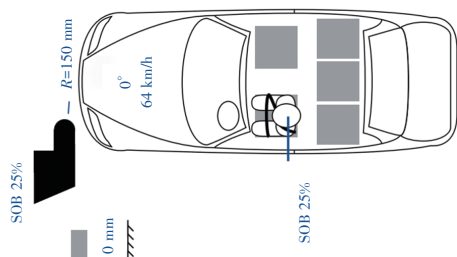


图 1 小偏置碰撞工况示意

图 2 所示为车辆在小偏置碰撞工况下的移动和变形过程<sup>[7]</sup>,除前机舱压溃变形外,车辆还发生了侧向移动。车辆碰撞前的动能与碰撞后的动能和势能之间的关系为:

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv_x^2 + \frac{1}{2}mv_y^2 + E_c + E_o \quad (1)$$

式中: $v_0$ 为车辆的初始速度, $v_x$ 、 $v_y$ 分别为车辆离开避障时刻的  $x$  方向和  $y$  方向的速度, $E_c$ 为前机舱吸收能量, $E_o$ 为乘员舱吸收能量。

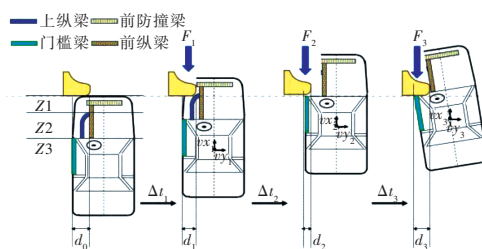


图 2 小偏置碰撞过程示意

由图 3 所示的传力路径可以看出, A 柱和门槛梁是乘员舱的主要承载结构,既要吸收一定的冲击能量,又要有足够的强度来抵制过量变形以保障乘员安全。增大 A 柱的型腔可以有效提高结构的刚度和强度,但是型腔截面尺寸又是影响视野盲区的重要因素,因此 A 柱的结构设计具有较大挑战。

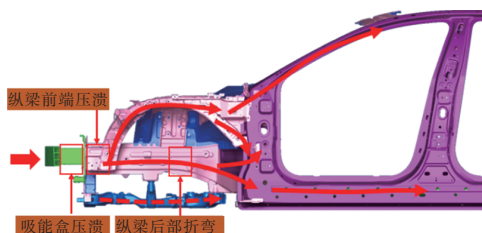


图 3 小偏置碰撞车身传力路径

图 4 所示为某电动轿跑车 A 柱的结构设计方案,型腔由 2 件热冲压件点焊而成,其中上加强板为 1.2 mm 厚的 1 500 MPa 硼钢,内板为 1.8 mm 厚的 1 800 MPa 硼钢。在第 1 轮碰撞摸底试验中,该车身结构在小偏置碰撞工况下的表现为良好,乘员舱上部的侵入量没有达到优秀级别的要求,需要进一步加强。

图 5 所示为用 CBS 胶块增强的 A 柱结构设计方案,其中的 CBS 是由工程塑料 PA6、玻璃纤维 GF35 和热膨胀结构粘胶结合而成的工程化骨架。当车身通过涂装被烘烤时,CBS 胶块发泡并硬化,最终填充整个腔体,起到增加作用。原始 CBS 胶

块的截面尺寸见图5。

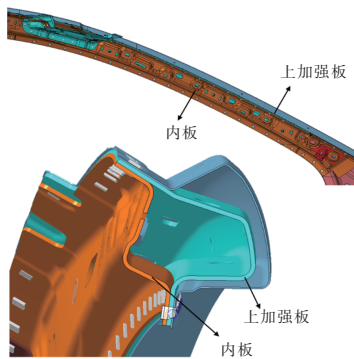


图4 基础方案及型腔示意图

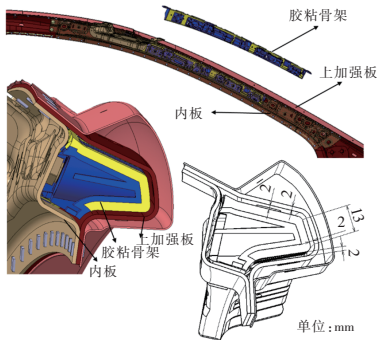


图5 CBS胶块增强方案及型腔截面

同时考虑热气球形管梁增强方案,结构设计和截面尺寸如图6所示。管梁采用1.6 mm厚的1 500 MPa 硼钢,通过电阻加热、充气胀形、模具淬火的工艺加工而成。

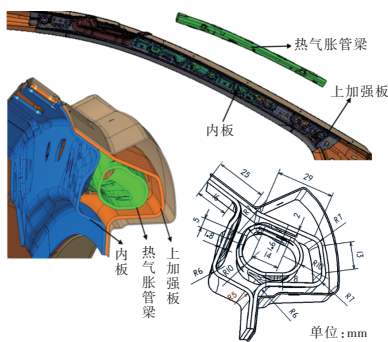


图6 热气球管梁增强方案及型腔截面

上述2种增强方案的材料、厚度、零件数量、成形方式及连接工艺如表1所示。

### 3 制造工艺

#### 3.1 CBS胶块制造工艺

复合车身解决方案(Composite Body Solutions, CBS)中骨架通常采用强度较高的工程塑料PA6添加玻纤GF35,结合可膨胀粘合剂采用双组分注射成型工艺生产,过程如图7所示。

表1 A柱增强方案对比

零件名称	材料	料厚/mm	质量/kg	成形工艺	连接方式	
CBS胶块方案	A柱上加强板	1500HS	1.2	1.05	热成形	卡接
	CBS-胶粘骨架	PA6+GF35+胶	2.5	0.68	注塑	卡接
	A柱内板	1800HS	1.8	1.37	热成形	点焊
热胀气方案	A柱上加强板	1500HS	1.2	1.05	热成形	烧焊
	热气球管梁	1500HS	1.6	0.59	热气球	烧焊
	A柱内板	1800HS	1.8	1.37	热成形	点焊

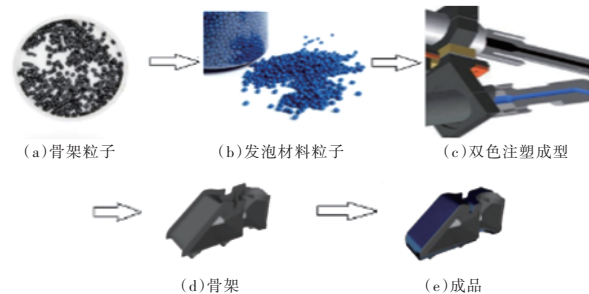


图7 CBS胶块生产过程

一般通过卡接方式将CBS胶块在焊装车间预定位于车身骨架处,当车身过涂装烘烤时,CBS发泡填充胶粘整个腔体并硬化,有效增强空腔各方向的性能,起到提高结构强度和抗折弯的作用,如图8所示。

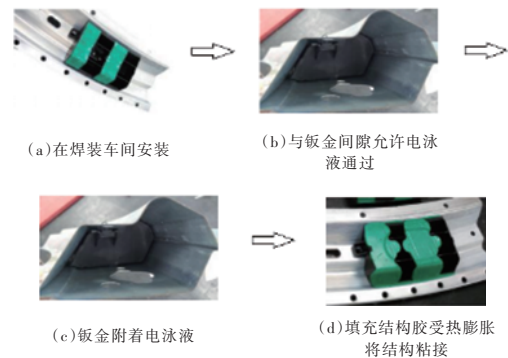


图8 CBS胶块焊装、涂装发泡过程

CBS发泡硬化后的力学性能如图9所示,其应力-应变曲线受温度影响较大,强度随温度升高而降低。0~23 范围内的性能变化有限,整个变形区间弹性占大部分,弹性模量约为12.4 GPa,比钢的弹性模量小很多。

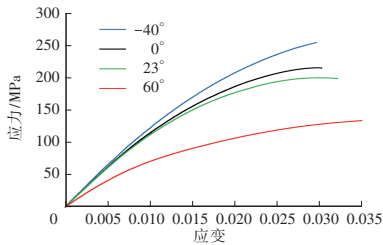


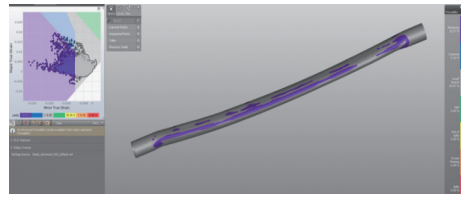
图9 不同温度下CBS材料性能曲线

### 3.2 热气胀形工艺

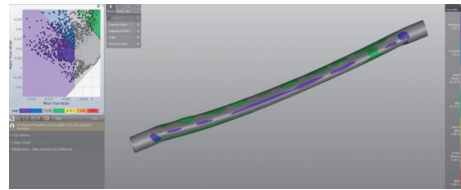
管件热气胀成形是指管件在热态下向管内充高压惰性气体实现快速胀形,首先通过炉内或者感应加热将管件加热至一定温度,如将 B1500HS 硼钢加热至奥氏体化温度,以提高材料的变形能力、降低材料的变形抗力,然后利用高压气体的压力使坯料发生变形,并在保压下模内冷却淬火,从而获得超高强度和尺寸精度的管件<sup>[13]</sup>。其主要工艺流程如下:高频或激光焊管、管件预弯曲或模具内预成形、炉内或感应加热、热态管坯转移至模内、快速合模、充气胀形、模具水冷淬火、激光切割。毛坯管梁采用  $\Phi 30$  mm、长度为 520 mm、厚度为 1.6 mm 的 1 500 MPa 硼钢 22MnB5,具体工艺参数如表 2 所示。

表 2 热气胀形工艺参数	
工艺参数	数值
管坯加热温度/°C	950
加热件传递时长/s	5
模具工作温度/°C	20
加热件模内等待时长/s	4
压机下行时长/s	5
压机合模力/t	1 000
轴向进给/mm	0
胀形时长/s	5
保压淬火时长/s	12

使用 Autoform 软件对预成形和热气胀形进行有限元仿真分析,仿真模型包括上模、下模和管坯 3 个部分,为简化模型,选用片体进行建模,上、下模具设置为刚体,管坯设置为可变形体,网格类型为三角形网格及自适应网格划分,单元类型为弹塑性壳单元,接触类型为面-面接触。从减薄量和成形极限图判断,预成形和胀形过程均满足要求,没有开裂和起皱风险,如图 10 所示。



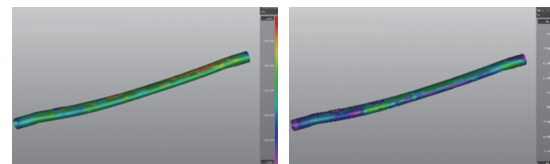
(a) 预成形过程仿真



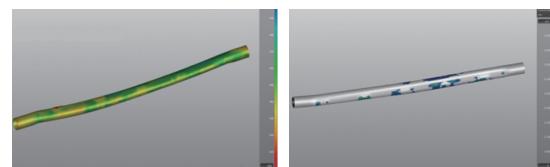
(b) 热气胀形过程仿真

图 10 热气胀形工艺仿真

通过优化气体压力和增压速率,零件成形截面的贴模情况良好,保压淬火后零件尺寸精度较高。最终的马氏体转化程度、维氏硬度分布和抗拉强度均满足要求,如图 11 所示。



(a) 抗拉强度过程分布 (b) 马氏体转化程度



(c) 维氏硬度分布情况 (d) 成形贴膜分析

图 11 零件性能仿真分析

B1500HS 和 B1800HS 这 2 种硼钢经过热成形(包括热冲压和热气胀)、模具淬火后的材料性能如图 12 所示。为清晰对比 2 种材料的强度差异,只呈现了准静态下的应力-应变曲线,需与不同应变率对应的曲线共同输入碰撞仿真模型。

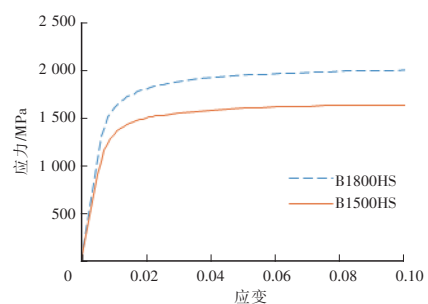
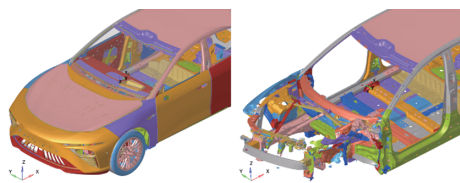


图 12 热成形钢材料性能曲线

### 4 碰撞仿真及试验

依据中国保险汽车安全指数 2020 版 C-IAI 规程,对该车型进行 25% 小偏置碰撞分析,采用 LS-DYNA\_R7.1.2 版本求解器,模型用基本尺寸为 8 mm 的网格划分,单元数量为 419 万个,节点数量为 381 万个,最小单元为 3 mm,最大翘曲角度为 15°,SHELL 单元采用 10 号单元公式。对沙漏较严重的零件,采用类型 16 的全积分单元;对于厚度小于 1.5 mm 的零件,厚度方向采用 3 个积分点;厚度大于等于 1.5 mm 的零件,厚度方向采用 5 个积分点。弹塑性材料采用 MAT24 号材料模式,考虑应变率材料曲线。对于动力总成、制动盘等碰撞过程中几乎不产生变形的部分以及壁障模型采用 MAT20 号刚体材料。图 13 展示了该车型发生小偏置碰撞 0.15 s 后车身的变形情况,图 14 所示模型中沙漏能和质量增加比例小于 5%,曲线平滑未见突出,能量模式满足要求,仿真模型基本可靠,可用于初步方案优化。通过仿真对比分析,选择 1 500 MPa 热气球管梁能够满足碰撞要求,来选择 1 800 MPa 或者 2 000 MPa 的管梁,以适当降低成形性及氢脆断裂风险。



(a) 碰撞开始时刻 (b) 碰撞结束时刻

图 13 小偏置碰数值仿真变形情况

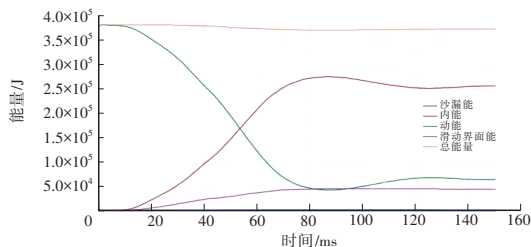


图 14 小偏置碰数值仿真能量模式

数值仿真分析与实际碰撞结果总会存在差异,车身结构设计最终要通过试验验证。将不同开发阶段的工程样车送到国家级碰撞试验中心进行验证,图 15 所示为该车型发生小偏置碰撞的变形情况,2 种增强结构的车身变形情况十分接近,

故用 1 幅图代表。



(a) 碰撞过程



(b)基础 A 柱结构车身变形情况 (c)增强 A 柱结构车身变形情况

图 15 小偏置碰撞试验过程及车身变形情况

仔细观察车身变形情况可以看出基础 A 柱结构有一定折弯,会导致乘员舱关键位置的侵入量偏高,达不到优秀等级。3 种 A 柱方案对应的乘员舱 10 个测量点的侵入量汇总如表 3 所示,从表中数据可以看出,基础 A 柱方案下的乘员舱下部侵入量基本达到优秀等级,但是乘员舱上部 4 个测量点的侵入量均未达到优秀等级,导致整个车身的等级为良好。2 种增强 A 柱方案均有效提高了乘员舱的抗变形能力,10 个测量点的侵入量都满足优秀级别的要求。如图 16 所示将不同设计方案的侵入量绘入小偏置碰安全级别测评图上,更能直观看出增强方案的贡献。

表 3 乘员舱测量点侵入量 mm

测点位置	优秀	基础方案	CBS 胶块方案	热气球方案	
乘员舱下部	A 柱下铰链	<150	84	32	40
	左侧搁脚板	<150	109	20	25
	左侧足板	<150	143	16	18
	制动踏板	<150	139	33	30
	驻车制动踏板	<150	0	0	0
	门槛	<50	24	3	4
乘员舱上部	转向管柱	<50	75	36	32
	A 柱上铰链	<75	76	30	29
	上仪表板	<75	93	37	35
	左下方仪表板	<75	90	33	34

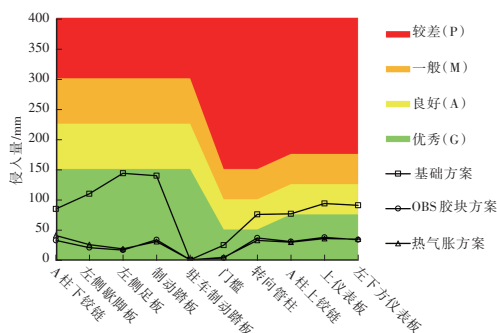


图 16 乘员舱侵入量对比

## 5 可行性分析

针对 CBS 胶块及热气胀形管梁方案进行零件综合成本对比分析,预估费用如表 4 所示。热气胀形管梁的一次性工装费用比 CBS 胶块高,开发周期长,单车费用降低 30 元,质量减轻 15%。虽然一次性工装费用有所增加,但当产销量达到 32 000 台时,2 种方案成本平衡。根据车型生命周期 20 万辆计算,热气胀形方案可为该车型降本 504 万元,具有可观的降本效益及轻量化效果。

表 4 方案成本对比

参数	CBS 胶块	热气胀管梁
质量/kg	0.68	0.59
一次性工装费用/万元	70	165
单车费用/元	73	43
开发周期/月	2	4

## 6 结束语

对某新能源汽车的 A 柱结构进行了研究,对比分析了 CBS 胶块增强结构和 1 500 MPa 热气胀形管梁增强结构的性能、质量、成本和设备投入,发现 2 种方案均能实现小偏置碰撞安全性优秀等级,热气胀管梁方案在单件成本及轻量化方面比 CBS 胶块方案更具优势,质量降低 0.09 kg(15%),单车成本减少 30 元(41%),车型生命周期内除去一次性工装投入的额外费用,可为项目降本 504 万元。

## 参考文献:

- [1] 肖锋,陈晓锋. IIHS 小偏置碰撞位移导向策略与结构评估方法[J]. 汽车安全与节能学报, 2013, 4(4): 323-333.
- [2] 中国保险行业协会. 中国保险汽车安全指数规程: C-IA-SI-SM.CC-BO[S]. 北京: 中保研汽车技术研究院有限公司, 2020.
- [3] 刘业鹏,李灿,赵坤民. 轻量化系数 2.0 级车身关键设计及制造技术[J]. 汽车工程学报, 2023, 13(3): 362-372.
- [4] 钱得柱,聂晶,戴建新,等. 超高强度一体式侧围加强板热成形工艺与侧碰安全性分析[J]. 机械设计, 2022(10), 39(增刊 2): 173-179.
- [5] 贾丽刚,吕俊成,林智桂,等. 某 SUV 小偏置碰撞仿真及车体结构优化[J]. 机械设计与制造, 2017(1): 91-96.
- [6] 崔营营,衣本钢,田洪生,等. 基于 25% 小偏置碰撞的车身结构研究[J]. 汽车技术, 2021(9): 38-43.
- [7] 方柘林,肖剑涛,曾庆烨,等. 某越野车小偏置碰撞结构优化[J]. 北京汽车, 2021(1): 1-10.
- [8] 刘辉晖,陈东平,王镝,等. 基于正面小偏置碰的车身结构优化策略[J]. 上海汽车, 2022(7): 19-22.
- [9] LANZERATH H, TUERK M. Lightweight Potential of Ultra High Strength Steel Tubular Body Structures[J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2015, 8(3): 813-822.
- [10] HAMASAKI Y, YUMOTO A. Automotive Solution (2): Equipment Development of 3-Dimensional Hot Bending and Direct Quenching (3DQ): Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report No. 112[R], 2016: 74-80.
- [11] 李彦云,张东升,李超. 基于 2000 MPa 热成形钢的 A 柱轻量化设计[J]. 汽车工艺与材料, 2022(6): 55-58.
- [12] 李超,万龙,张东升,等. 基于 25% 偏置碰撞工况下 2 000 MPa 级热气胀成形 A 柱的轻量化研究[J]. 汽车工艺与材料, 2023(3): 9-13.
- [13] 程超,韩非,石磊. 超高强钢管件热气胀成形特性与 A 柱样件开发[J]. 锻压技术, 2023(5): 95-102.
- [14] FUNADA R. STAF Process Maximizes Lightweighting of Car Body Frame[C]// Great Designs in Steel 2023.