

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.03.010

基于可制造性的汽车 B 柱轻量化设计分析*

王 涛

(安阳工学院 机械工程学院,河南 安阳 455000)

摘要:针对 B 柱采用激光拼焊进行轻量化设计的问题,基于 B 柱的可制造性分析,采用了正交试验法,对 B 柱拼焊材料选定、焊缝位置设计、拼焊材料厚度等进行了研究。以 B 柱侧面碰撞安全性分析为基础,以碰撞过程中的最大侵入量和最大侵入速度为评价目标,对原设计方案和新设计方案的安全性进行了对比分析;在满足侧碰五星标准的前提下,将减重最多的方案作为最优的轻量化设计方案;对实际生产 B 柱的型面公差、最大减薄率、碰撞安全性进行了分析。研究结果表明:焊缝位置距离底端 380 mm 位置最优;当材料组合为 DP800/DP600,厚度为 1.8 mm/1.6 mm,B 柱质量由 4.449 kg 降为 3.50 kg,减重了 21.3%;通过配合调整冲压工艺参数,B 柱产品经检测后,型面合格率 100%,最大减薄率 21.1%,符合要求;侧面碰撞试验表明强度满足要求,且仿真与实验结果基本一致,误差在 4% 以内,分析结果可靠。

关键词:汽车 B 柱;轻量化;激光拼焊板;侧面碰撞;可制造性

中图分类号:TH16;U467.1

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)03-0277-06

Lightweight analysis of vehicle B-pillars based on manufacturability

WANG Tao

(School of Mechanical Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, China)

Abstract: Aiming at the problem of lightweight design by laser beam welding for B-pillar, based on the B-pillar manufacturability analysis, the orthogonal test method was used. The safety analysis of the B-pillar under side collision, based on the maximum intrusion volume and intrusion speed in the collision process, the safety comparison analysis was carried out. Under the premise of meeting the five-star standard of side collision, the scheme with the most weight loss was the optimal lightweight design. The profile tolerance, maximum thinning rate, and collision safety of the actual production B-pillar was analyzed. The results indicate that the position of the weld seam is finally selected from the bottom end of 380 mm is optimal. The final material combination is DP800/DP600, and the thickness is 1.8 mm/1.6 mm, the quality of the B-pillar is reduced from 4.449 kg to 3.50 kg, and the weight loss is 21.3%. By adjusting the stamping process parameters, the B-pillar product is tested. The pass rate of the profile is 100%, and the maximum thinning rate is 21.1%, which is in line with the requirements of the OEM. The side impact test shows that the strength meets the requirements and the simulation and experimental results are basically the same, and the error is within 4%, indicating the reliability of the analysis.

Key words: vehicle B-pillars; lightweight; tailor-welded blank; side collision; manufacturability

0 引 言

汽车的轻量化设计必须以不损失相关性能为前提。由于强度较高,高强钢材料主要应用于车身结构件和安全件^[1]。B 柱是汽车侧面最重要的承载结构件,其零件尺寸较大,零件不同部位的承载力具有较大

差异,不同材料的激光拼焊很好地满足了这种需求。激光拼焊 B 柱设计实现了材料、加工工艺、零件性能的统一,既保证了零件的性能不损失,也保证了零件实现轻量化设计^[2]。

本文将汽车 B 柱为研究对象,在保证可制造性和碰撞安全性满足要求的前提下,采用激光拼焊技术

收稿日期:2019-06-13

基金项目:河南省高等教育教学改革研究与实践项目(2017SJGLX117);河南省高等学校青年骨干教师培养计划资助项目(2016GGJS-151)

作者简介:王涛(1985-),男,河南安阳人,硕士,讲师,主要从事工业设计、机械设计等方面的研究。E-mail:ljdsdz@126.com

对其进行轻量化设计。

1 B 柱可制造性分析

B 柱是汽车侧面位置重要的承载零件,同时 B 柱内侧安装有安全带等重要零部件,因此 B 柱必须具备足够的强度,同时形状必须与汽车侧面曲线保持一致,这就要求 B 柱所用材料必须具备较高的强度,同时也要有良好的成形性能^[3]。

本文将零件模型以 IGS 格式导入 Autoform 软件中,在此基础上构建工艺补充面及压料面。由于台阶处拉延深度较深,台阶又分布在产品内侧,进料困难,需要添加工艺补充面,并采用大圆弧过渡,以免拉深时开裂。工艺补充面必须保证切边强度及过渡光滑^[4]。笔者在此基础上偏置出压边圈、凸模、凹模,建立有限元模型。

本零件采用异形原料,原设计选用 DP600 牌号,板料厚度为 2.2 mm,长宽方向分别为 1 485 mm×650 mm,摩擦系数取 0.15,单位压边力为 $F=500\text{ kN}$,计算精确度按常规进行计算^[5]。通过设置各项参数后提交计算,进行有限元模拟分析,可以得到 FLD 图、成形性能、变薄率、材料厚度、主次应变等分析结果。

仿真分析获得成形后零件的厚度、减薄率和 Z 向回弹量分布云图如图 1 所示。



图 1 成形后零件厚度、减薄率和 Z 向回弹量分布云图

由图 1 可知:零件成形后网格应变分布接近成形极限曲线 FLC,在部分区域有破裂趋势;最大减薄出现在底端侧壁处,最大减薄率为 19.6%;Z 向回弹量最大最小值分别为 2.48 和 -2.45。

笔者以成形极限图 FLD 作为判断成形发生破裂的标准,并以最大减薄率判断成形性能的好坏,最大减薄率越小则成形性能越好。

2 轻量化方案设计

2.1 拼焊线初始位置设计

考虑侧面碰撞侵入量和侵入速度对乘员的伤害影

响,并参照乘员在车内的位置^[6],需要在 B 柱零件上部使用较高强度材料。零件下部门槛位置需使用较低强度材料,在侧面碰撞中起到吸能作用,对上部碰撞产生缓冲^[7-8]。

焊缝设计如图 2 所示。

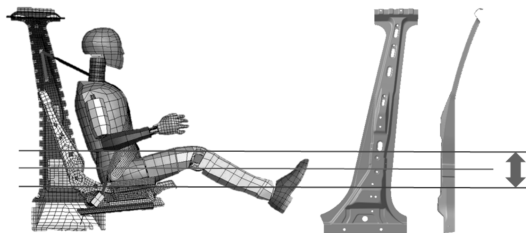


图 2 焊缝位置设计

由图 2 可知:在保证乘员头部胸部安全的前提下,需要使 B 柱上部具有高强度和刚度,焊缝须布置在乘员腰部以下,即距离底端 540 mm 以下;B 柱底部宽,并且有较大的凸台设计,焊缝须避让此凸台,布置在距离底部 380 mm 以上;初始焊缝位置选取蓝距离 B 柱底端 460 mm 处。

2.2 拼焊材料选定

原材料为 DP600,在轻量化设计中,B 柱上部(A 区)需要使用高强度级别的 3 种材料:DP600、DP800、DP1000,厚度选定 1.6 mm、1.8 mm、2.0 mm;B 柱下部(B 区)使用稍低强度级别的材料:DP500、DP600、DP800,厚度选定 1.4 mm、1.6 mm、1.8 mm。

以四因素三水平设计正交试验,得到的零件拼焊材料正交试验方案如表 1 所示。

表 1 拼焊材料正交试验方案

试验	因素 1	因素 2	因素 3	因素 4
	A 区牌号	B 区牌号	A 区厚度 /mm	B 区厚度 /mm
试验 1	DP600	DP500	1.6	1.4
试验 2	DP600	DP600	1.8	1.6
试验 3	DP600	DP800	2.0	1.8
试验 4	DP800	DP500	1.8	1.8
试验 5	DP800	DP600	2.0	1.4
试验 6	DP800	DP800	1.6	1.6
试验 7	DP1000	DP500	2.0	1.6
试验 8	DP1000	DP600	1.6	1.8
试验 9	DP1000	DP800	1.8	1.4

本研究按照表 1 试验设计参数,设置拼焊材料进行仿真建模,分别进行计算。

经过计算分析,各方案可制造性分析结果如表 2 所示。

表2 各方案可制造性分析结果

试验	成形结果	最大减薄率/(%)	Z向最大回弹量/mm	是否有效
试验1	细小圆角有破裂趋势	22.1	4.51	有效
试验2	底部立面有破裂趋势	23.9	3.45	有效
试验3	破裂	——	——	无效
试验4	中部局部有破裂趋势	24.4	3.62	有效
试验5	底部焊缝位置有破裂	——	——	无效
试验6	破裂	——	——	无效
试验7	破裂	——	——	无效
试验8	破裂	——	——	无效
试验9	破裂	——	——	无效

由表2分析结果对比可知:在9个试验中,试验1、2、4成形后没有发生破裂,属于拼焊有效数据,其他均发生破裂,属于无效数据;试验7、8、9中,B柱零件上部选取 DP1000 时,成形均发生破裂;试验4、5、6中,零件上部选取 DP800 时,只有在下部选取 DP500 (试验4),并且拼焊材料无差厚时才可以成功完成冲压。当上部使用 DP800、下部使用 DP600 时(试验5),差厚达到了 0.6 mm,不能成形此零件,且开裂部位在焊缝位置;试验1、2、3中,上部使用 DP500 时,下部使用 DP500 和 DP600 都能成形该零件,下部使用 DP800 时,不能成形。

由此可知:零件上部可以使用 DP800,下部可以使用 DP600,差厚要小于 0.6 mm。

2.3 焊缝位置确定

本研究以试验4为基础,找出焊缝的最佳位置。前文提到焊缝选取位置区域较宽,中心线为距离B柱底端为460 mm。在可选取的范围内每隔40 mm选取5条拼焊线,分别为距离底部540 mm、500 mm、460 mm、4200 mm、380 mm。随拼焊线向底部移动,危险区域的最大减薄率并不是线性增减,而是在距离380 mm拼焊线位置出现最小值22.1%。

危险区域最大减薄率 η 与距离底部距离 d 之间的关系如图3所示。

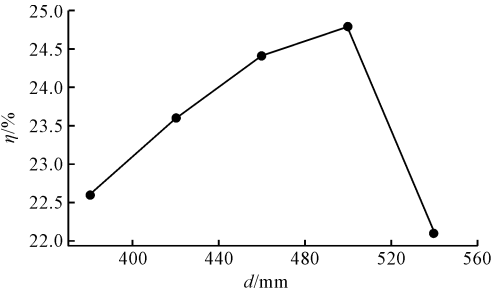


图3 危险区域最大减薄率与距离底部距离的关系

由图3可知:在可选取范围内,将焊缝位置确定为距离底端380 mm的位置。

2.4 拼焊材料厚度确定

从表2数据可以知道,零件上部选取 DP800 时,只有在下部选取 DP500 (试验4),并且拼焊材料无差厚时才可以成功完成冲压。当上部使用 DP800、下部使用 DP600 时(试验5),差厚达到了 0.6 mm,不能成形此零件,且开裂部位在焊缝位置。

在差厚小于 0.6 mm 的前提下,对试验5进行细致的拼焊材料厚度设计如表3所示。

表3 拼焊材料厚度设计

试验	A厚度/mm	B厚度/mm	危险区域最大减薄率/(%)	是否有效
试验1	2.0	1.8	22.7	是
试验2	2.0	1.6	22.9	是
试验3	1.8	1.8	21.7	是
试验4	1.8	1.6	21.8	是
试验5	1.8	1.4	21.7	是
试验6	1.6	1.6	20.8	是

由表3可知:基于上部为 DP800、下部为 DP600 拼焊材料时,当拼焊材料厚度差在 0.2 mm、0.4 mm 时均可以成形。

3 汽车B柱侧面碰撞安全性分析

3.1 侧面碰撞仿真模型

以某轿车为研究对象,按照法规要求,基于 VPG 建立侧面碰撞模型^[9-10],B柱原始设计材料为 DP600,厚度为 2.2 mm,碰撞仿真时间设定为 150 ms。

3.2 侧面碰撞B柱变形分析

本研究采用模型进行分析,获得侧面整车碰撞中能量变化曲线如图4所示。

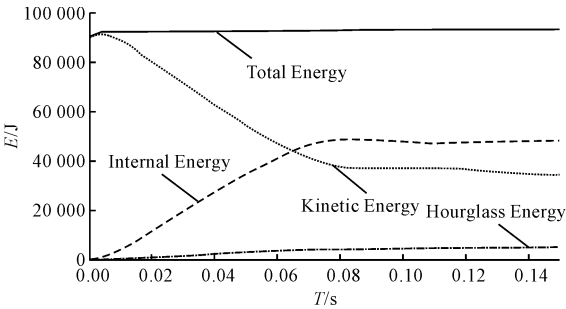


图4 侧面整车碰撞能量变化曲线

由图4可知:整个过程中能量变化平稳,碰撞前后系统的总能量保持平衡。沙漏能的最大值为4.11 kJ,而整个碰撞过程中的总能量大约为91.5 kJ,车体通过碰撞变形吸收50.23 kJ,动能下降至54.34 kJ,沙漏能最大值约占总能量的4.49%,符合5%的要求,可见仿真结果是可靠的。

3.3 侧面碰撞 B 柱侵入速度及侵入量分析

(1)侧面碰撞性能指标。根据 C-NCAP 整车侧面碰撞变形测试分析方法^[11-12],在 B 柱对应位置选取测量点,如图 5 所示。

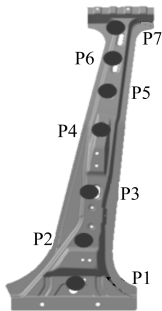


图 5 B 柱侧面碰撞测点选取

(2)侧面碰撞 B 柱性能。以材料为 DP600,厚度为 2.2 mm,对 B 柱进行侧碰仿真分析。

选取 C-NCAP 侧面碰撞工况,碰撞速度为 50 km/h, B 柱侧碰结果性能如表 4 所示。

表 4 B 柱侧碰结果性能

测量位置	目标值		侧碰结果	
	侵入量/ mm	侵入速度/ (m·s ⁻¹)	侵入量/ mm	侵入速度/ (m·s ⁻¹)
P1	100		-92(8)	-2.9(2.1)
P2	120		-113.9(6.1)	-3.5(1.5)
P3	130		-125.5(4.5)	-3.9(1.1)
P4	150	5.0	-135.7(14.3)	-4.1(0.9)
P5	135		-123.8(11.2)	-3.7(1.3)
P6	100		-92.8(7.2)	-2.9(2.1)
P7	25		-23.2(1.8)	-0.85(4.15)

由表 4 可知:基于原始设计材料及厚度的 B 柱侧碰性能都满足目标要求;从数值上看,在保证侧碰安全性的基础上,B 柱还有优化空间。

4 B 柱轻量化方案侧碰安全性分析

4.1 B 柱轻量化设计方案

根据 B 柱可制造性分析结果可知:B 柱采用激光拼焊板结构可以将高强钢 DP800 应用到该结构上,并且在保证成形性能的基础上,厚度也可以降低,实现车身零部件的轻量化设计。根据 B 柱成形分析结果,拼焊板结构 B 柱上部材料 A 区用 DP800,下部材料 B 区采用 DP600,并且由于要保证人的头部和胸部等关键位置,上部材料 A 区还需要一定的刚度和安全性,厚度应该不小于下部材料 B 区的厚度。

因此,B 柱优化设计方案如表 5 所示。

表 5 B 柱优化设计方案

材料 A/材料 B	方案	A 厚度/mm	B 厚度/mm
DP800/DP600	1	2.0	2.0
	2	2.0	1.8
	3	2.0	1.6
	4	1.8	1.8
	5	1.8	1.6
	6	1.8	1.4

4.2 B 柱轻量化方案安全性分析

本研究将 6 种优化方案分别进行侧面碰撞分析,可得到 B 柱各测点的侧碰侵入量和侵入速度性能指标,分别如表(6~7)所示。

表 6 B 柱侵入量性能指标对比

测点/mm	方案 1 /mm	方案 2 /mm	方案 3 /mm	方案 4 /mm	方案 5 /mm	方案 6 /mm
P1	100	-93.2	-93.7	-93.3	-95.9	-95.8
P2	120	-118.5	-118.7	-118.5	-118.3	-116.9
P3	130	-128.5	-128.7	-129.3	-128.8	-127.7
P4	150	-137.7	-138.8	-141.7	-141.9	-142.1
P5	135	-125.7	-126.8	-132.9	-133.7	-134.7
P6	100	-93.1	-94.4	-97.5	-98.7	-99.3
P7	25	-21.2	-21.7	-21.9	-22.6	-22.5

表 7 B 柱侵入速度性能指标对比

测点/ (m·s ⁻¹)	方案 1 /(m·s ⁻¹)	方案 2 /(m·s ⁻¹)	方案 3 /(m·s ⁻¹)	方案 4 /(m·s ⁻¹)	方案 5 /(m·s ⁻¹)	方案 6 /(m·s ⁻¹)
P1	-3.0	-2.9	-3.0	-3.0	-3.0	-3.2
P2	-3.8	-3.9	-4.0	-4.0	-3.9	-4.7
P3	-4.2	-4.3	-4.3	-4.4	-4.0	-5.1
P4	-4.2	-4.3	-4.4	-4.4	-4.5	-5.1
P5	-3.7	-3.5	-3.6	-3.6	-3.7	-4.5
P6	-2.8	-2.7	-3.0	-2.9	-3.0	-4.0
P7	-0.8	-0.9	-0.9	-1.0	-1.0	-1.0

各方案减重效果及侧碰安全性评级结果如表 8 所示。

表 8 各方案减重效果及侧碰安全性评级结果

方案	材料 A/mm	材料 B/mm	减重/(%)	侧碰安全性 (计算)
原设计	DP600/2.2		—	★★★★★
方案 1	DP800/2.0	DP600/2.0	-9.1	★★★★★
方案 2	DP800/2.0	DP600/1.8	-12.1	★★★★★
方案 3	DP800/2.0	DP600/1.6	-15.2	★★★★★
方案 4	DP800/1.8	DP600/1.8	-18.2	★★★★★
方案 5	DP800/1.8	DP600/1.6	-21.3	★★★★★
方案 6	DP800/1.8	DP600/1.4	—	★★★

由表(6~8)中数据对比可知:方案 5 在保证侧碰性能达到 5 星的前提下,B 柱厚度可以减小的值最大;方案 6 的侧碰结果不理想,侵入量和侵入速度都超出

了设计目标值。

因此,该 B 柱选择拼焊板结构,上部材料为 DP800,厚度为 1.8 mm,下部材料为 DP600,厚度为 1.6 mm。

4.3 B 柱轻量化效果分析

经过优化,汽车 B 柱的质量从 4.449 kg 减小到 3.50 kg,减重 21.3%。可见在汽车 B 柱上采用激光拼焊技术,能够提高 B 柱在侧面碰撞中的安全性能,减轻 B 柱的质量,有效平衡耐撞性和轻量化的双重要求。

5 B 柱轻量化方案实施效果检测

该车型 B 柱从设计到试模,再到最后批量生产经历了 1.5 年的时间;并且根据可制造性分析和安全性分析数据进行了模具设计,在实际生产过程中很少出现冲压开裂的情况。

5.1 型面公差

试模过程中,根据可制造性分析结果,实时调整冲压工艺参数(压边力、模具间隙、涂油量等)^[13],在检具上对零件的型面公差进行检测,测点选取如图 6 所示。

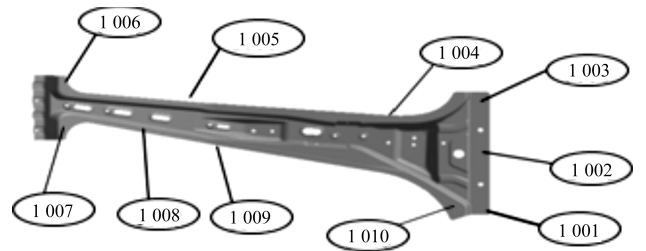


图 6 检测点选取

B 柱检具检测结果如表 9 所示。

表 9 B 柱检具检测结果

特征		型面公差					结果
检测	序号	1 001	1 002	1 003	1 004	1 005	合格率
	上偏差	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	
	下偏差	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	
	型面/mm	2.3	2.6	2.0	2.4	-1.2	
		2.3	2.4	2.1	2.6	-1.2	
检测	序号	1 006	1 007	1 008	1 009	1 010	100%
	上偏差	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	
	下偏差	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	
	型面/mm	0.8	-1.1	-0.5	0.8	0.5	
		0.9	-1.1	-0.6	0.9	0.5	

5.2 最大减薄率

对试生产的 B 柱进行厚度测量,B 柱零件的最大减薄率如表 10 所示。

表 10 B 柱最大减薄率

特征	减薄率					结果
序号	1 001	1 002	1 003	1 004	1 005	合格率
减薄率/(%)	11.2	12.1	11.2	20.6	12.2	21.1
序号	1 006	1 007	1 008	1 009	1 010	
减薄率/(%)	21.1	18.6	17.1	15.9	19.0	

由表(9~10)可知:通过调整冲压工艺参数,B 柱产品经检测后,型面合格率 100%,最大减薄率 21.1%,符合主机厂设计要求。

5.3 侧碰安全性分析

本研究将试生产后的零件进行装车,利用汽车碰撞台架,根据 C-NCAP 测试标准^[14-18],对侧碰安全性进行分析,选取与仿真过程相同的检测点,获取最大侵入量和侵入速度值。仿真与试验测试结果的最大侵入量和侵入速度对比,如表 11 所示。

表 11 最大侵入量和侵入速度对比

测点	最大侵入量/mm				最大侵入速度/(m·s ⁻¹)			
	最大值	仿真	试验	误差/(%)	最大值	仿真	试验	误差/(%)
P1	100	-95.8	-94.7	-1.15	5	-3.0	-3.11	3.67
P2	120	-116.9	-115.3	-1.37		-3.9	-4.01	2.82
P3	130	-127.7	-126.2	-1.17		-4.0	-3.89	-2.75
P4	150	-142.1	-143.3	0.84		-4.5	-4.51	0.22
P5	135	-134.7	-132.6	-1.56		-3.7	-3.69	-0.27
P6	100	-99.3	-97.9	-1.41		-3.0	-3.1	3.33
P7	25	-22.5	-23.1	2.67		-1.0	-1.02	2.0

由表 11 可知:试验测试结果满足设计目标,满足五星的标准;并且试验值和仿真值基本一致,最大误差控制在 4% 以内,满足碰撞法规要求,表明分析结果是可靠的。

6 结束语

本文以汽车 B 柱为研究对象,在保证可制造性和

碰撞安全性满足要求的前提下,对其进行了轻量化设计,主要结果如下:

- (1)将材料优化为拼焊板材料,针对拼焊材料、焊缝位置以及厚度,对零件优化设计,结果表明:上部材料可以选用 DP800 牌号,下部可以选用 DP600 牌号,厚度差须在 0.4 mm 以内;
- (2)通过不同焊缝位置对成形性能影响的仿真模

拟,确定焊缝位置距离底端 380 mm 处最优;

(3)在 B 柱在侧面碰撞中,以侵入量和侵入速度为评价目标,最终确定材料组合为 DP800/DP600,厚度为 1.8 mm/1.6 mm,质量减重 21.3%;

(4)B 柱试生产后的产品型面合格率 100%,最大减薄率 21.1%,符合主机厂设计要求;

(5)侧面碰撞测试结果满足五星的标准;仿真与实验结果基本一致,误差在 4% 以内,分析模型和结果可靠。

参考文献 (References):

- [1] 谭耀武,杨济匡,王四文. 轿车 B 柱耐撞性与轻量化优化设计研究[J]. 中国机械工程,2010(23):2887-2892.
- [2] 赵 娣,陈晓磊. 汽车 B 柱轻量化设计及碰撞分析[J]. 上海汽车,2014(1):25-27.
- [3] 杨志添. 基于轿车 B 柱轻量化设计的耐撞性优化分析[D]. 长沙:湖南大学机械与运载工程学院,2012.
- [4] 陈 庆,李晓刚,李春光. 整体式侧围冲压成形仿真过程中影响因素窗口分析[J]. 四川冶金,2016(2):24-29.
- [5] 王登峰,蔡珂芳,张 帅,等. 基于激光拼焊技术的汽车 B 柱结构优化设计[J]. 北京理工大学学报,2018,38(7):35-41,52.
- [6] 刘立现,李晓刚,金 茹,等. 高强激光拼焊板 B 柱成型数值模拟及工艺优化[C]. 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会,上海:中国金属学会,2015.
- [7] MARUR P R, SRINIVAS S. A reduced-order finite element model for the simulation of automotive side structure crash response[J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2008,13(2):211-218.
- [8] 刘昌业,莫易敏,梁永彬,等. 基于某微车顶压工况下 B 柱

轻量化优化设计[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2018,42(2):181-184.

- [9] 谭耀武. 轿车侧面碰撞中 B 柱的耐撞性优化设计研究[D]. 长沙:湖南大学机械与运载工程学院,2010.
- [10] 郭文浩,沈剑平,朱西产,等. 基于整车碰撞仿真的 B 柱零部件试验设计[J]. 汽车技术,2013(12):40-45.
- [11] 曹立波,刘 衡,武和全. 某混合动力汽车侧面碰撞中 B 柱可靠性优化设计[J]. 汽车安全与节能学报,2016,7(3):272-278.
- [12] ZHANG B, YANG J, ZHONG Z. Optimisation of vehicle side interior panels for occupant safety in side impact[J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2010, 15(6):617-623.
- [13] 饶紫微. 基于拼焊技术的轿车 B 柱耐撞性研究[D]. 武汉:武汉理工大学汽车工程学院,2014.
- [14] BOK H H, LEE M G, PAVLINA E J, et al. Comparative study of the prediction of microstructure and mechanical properties for a hot-stamped B-pillar reinforcing part[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2011, 53(9):744-752.
- [15] 高新华,徐有忠,王其东. 基于台架试验与模拟的轿车 B 柱耐撞性与轻量化研究[J]. 汽车工程,2014(8):957-962.
- [16] 徐祖进,季思园,苏文献. 基于 ANSYS 的烘缸应力分析与结构优化[J]. 轻工机械,2019,37(2):99-102.
- [17] 吕仲明,徐盛林,肉 孜·阿木提. 基于 FLUENT 的烤肉炉的优化设计及试验分析[J]. 包装与食品机械,2018(1):28-32.
- [18] 叶 盛,辛 勇. 基于拼焊技术的轿车 B 柱耐撞性及结构优化设计[J]. 汽车技术,2012,44(11):54-58.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

王 涛. 基于可制造性的汽车 B 柱轻量化设计分析[J]. 机电工程,2020,37(3):277-282.

WNAG Tao. Lightweight analysis of vehicle B-pillars based on manufacturability[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020,37(3):277-282.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>