工程车油底壳失效过程的动态仿真与设计优化

张杨，丁培林，周曦，赵幼平，黄嘉靖，谢庆喜，付尧

（东风商用车有限公司技术中心，湖北武汉 430056）

摘要：针对市场反馈的工程车通过高低石块路面时铸铝油底壳发生擦碰产生失效问题，应用 LS-DYNA 软件并通过结合用户使用极限工况，再现了实车碰撞工况，将深拉延成形模拟分析结果映射于碰撞模型，最终确定了油底壳零件的结构设计和材料选取，解决了市场反馈问题，取得了比较好的效果。

关键词：工程车，油底壳，成形模拟，碰撞

1 项目背景

油底壳是发动机产品中重要的一个零部件，它的功能主要是为发动机润滑系统储存机油，保证发动机在各种工况下能正常运转，油底壳安装于发动机的底部，故需要足够的强度、韧性、密封性。通常油底壳使用材料为铸铁、球铁、铸铝、冲压钢板、塑料等。铝合金是最普遍的专用铝合金，因为它集合了易铸模，便于机械加工，热传导好等特性。变移性，承压力，和抗高温分裂性都很强。

东风某型号发动机是东风商用车公司为适应国家高速公路建设的迅速发展条件下，运输车辆和工程作业车辆向重型化发展的需求，满足国家排放法规要求，公司经营战略向重型商用车扩展而实施的重大战略开发项目。

该发动机配套的油底壳采用带有散热肋片的铝合金铸造而成，其平均壁厚 4mm，深约 300mm，重量 14kg。对于普通压铸件，延伸率约为 1%至 3%，硬度不小于 80HB。由于油底壳处于发动机的底部，在车辆行驶过程中经常遭到撞击，造成油底壳底部出现裂纹或者破面。例如：在用户车进行工程作业时，东风大力神通过高低石块路面常发生油底壳擦碰导致破损情况（如图 1）。针对市场反馈，需要根据工程车的使用工况，查明失效原因，重新对油底壳进行设计及验证。

图 1 油底壳破损情况

2 设计方案与用户工况

2.1 传统设计方法

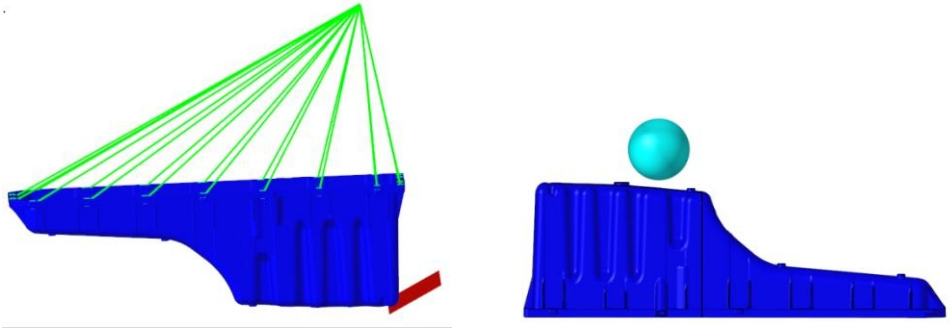
传统的油底壳设计与开发工作多采用类比的方法，或解剖进口车辆的结构，移植国外一般成熟技术，或参照已有相似车型或关键部位的相似性，根据整车各部位空间尺寸空隙要求进行经验设计，然后进行刚度、强度试验验证。考虑到用户使用环境恶劣性，对于匹配工程车等特殊用途的油底壳，对其强度要求较高，需要针对极限工况进行强度校核，通过采用有限元分析[1]——虚拟样机仿真替代物理试验验证设计方案，快速再现问题、分析问题、解决问题，大大节约了零部件开发成本和缩短了开发进度。

2.2 设定用户工况

考虑到用户工况的不确定性，利用 CAE 仿真手段模拟、情景再现，采用 LS-DYNA 进行显式求解[2]。设置如下两种碰撞工况（图 2）：

a. 30 度壁障碰——油底壳处于安装位置，均匀承受发动机质量 1055.3kg。以 30km/h 速度撞击壁障；壁障完全刚性，与地面成 30 角度（图 2a）；

b. 40km/h 小球碰——油底壳水平倒放，用小球垂直撞击油底壳底部。其中，小球直径 150mm，重量 4kg（图 2b）。



（a）30 度壁障碰　　（b）40km/h 小球碰

图 2 碰撞工况示意

3 仿真结果与分析

3.1 铸件材料失效

传统汽车通常是全钢车身，钢材延展性较好，碰撞后车体结构主要发生溃缩和弯折变形，只有少量结构件可能断裂失效。所以在碰撞仿真只要求材料卡片能够准确描述材料的弹塑性行为，一般无需对材料失效进行数值模拟，少量部件失效的影响可以基于工程经验进行估计。

近年来，随着轻量化材料，如镁铝合金在汽车行工业得到了广泛的应用，这些材料的延展性远低于普通钢材，在车辆发生碰撞时极有可能发生断裂。所以有必要考虑其失效行为并在仿真分析中应用合适的材料失效模型。

如 Clausen 等[3]所述，在数值仿真中通常用两类模型来表征材料行为，一类表征塑性流动，另一类表征材料的断裂和失效。相比较其它模型，Johnson[4]等和 Zerilli[5-6]等本构关系在冲击和爆炸领域受到了更多的关注。至于断裂准则方面，金属的延性和失效长期以来就是许多研究者关注的焦点，实验和理论方面的研究都有，例如 Cockroft 等[7]，Rice 等[8]，Hancock 等[9]，Mackenzie 等[10]，Johnson 等[11]。塑性变形引起的延性断裂极大地依赖于应力三轴度[9,11]，同时应变率和温度也对材料的延性断裂有不可忽略的影响。另外，最近的一些研究展示了断裂应变可能也依赖于 Lode 参数[12]，但其与断裂准则的关系还在进一步的

研究之中。在涉及到材料动态断裂的计算领域，Johnson-cook 断裂准则[11]应用的最为广泛，并且可以找到许多成功预测的案例，例如 Teng 等[14]，Gupta 等[15]。

铝合金汽车构件在撞击过程中，构件的应力状态和应变率各点均不相同，而且在撞击过程中各点的应力状态和应变率还随着时间变化而变化。文献[16]研究了 6063 铝合金在不同应变率、不同温度下的流变应力的变化规律，但是并没有给出具体的本构方程。本文采用 Johnson-cook 本构模型及其断裂应变模型对 6063 铝合金在不同应力状态及不同应变率下的力学性能进行表征，并采用 Grunesien 状态方程联合描述其动力响应的过程。材料表征实质上就是对 6063 铝合金不同应力状态和不同应变率下力学性能参数的测定，并考虑了应变、应变率和热软化效应对材料力学性能的影响，从而得到适合不同应力及不同应变率下材料的 Johnson-cook 本构关系和失效模型的参数，为下一步进行有限元奠定基础。

Johnson-cook 本构关系表达式如下：

$$\sigma = (\mathrm{A} + \mathrm{B}\varepsilon^n)\left(1 + \mathrm{C}\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon_0}}\right)[1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

式中，A、B、n、C 和 m 为模型参数；σ 为等效应力；ε 为等效应变；$\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon_0}}$为无量纲等效塑性应变率，$\dot{\varepsilon_0}$为参考应变率；$T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$为无量纲温度，其中，$T_r$，$T_m$ 分别为参考温度和材料的熔点，T_r 一般取室温。方程右边三项分别代表等效塑性应变，应变率和温度对流动应力的影响。

Johnson-cook 失效模型表达式如下：

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2\exp(D_3\sigma^*))(1 + D_4\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 + D_5T^*) \quad (2)$$

式中，D_1、D_2、D_3、D_4 和 D_5 为材料参数；$\sigma^* = p/\sigma_{eff}$，p 为压力，$\sigma_{eff}$为等效应力，$\sigma^*$为应力三轴度。方程右边三项分别反映材料破坏应变随应力三轴度的增大而减小、应变率对破坏应变的影响、温度的热软化效应对材料韧性的影响。

两个方程的三个影响因素为乘积关系、互不耦合，因而可以单独变化单一因素而确定材料参数。例如，在同一应力状态、同一应变率下，材料的失效应变与温度呈线性关系，则通过对实验数据的线性拟合，其斜率即为 D_5。；在参考温度下，同一应力状态，材料的失效应变与应变率的对数成线性关系，其斜率即为 D_4；在参考温度下，在确定 D_4 后，采用最小二乘非线性拟合即可得到 D_1、D_2 和 D_3。

Johnson-cook 失效模型考虑了应力状态、应变率和温度等影响因素，具有更大范围的适应性。由于考虑因素比较全面，而且参数较容易获得，因而在有限元程序中得到了广泛的应用。本文以 LS-DYNA 软件为有限元计算平台，选用 Johnson-cook 模型，涉及的 6063 铝合金材料物理参数、模型参数部分数据如下表 1、图 3。为节省篇幅，根据材料试验曲线的参数拟合过程不一一罗列。

密度（kg/m³）	剪切模量（MPa）	弹性模量（GPa）	泊松比	屈服强度（MPa）
2700	26	70	0.3	176.5
A（MPa）	B（MPa）	n	C	T_m（K）
176.5	64	0.07	0.0036	650
D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
0.07413	0.0892	-2.441	-4.76	0

表 1 铝合金材料的物理参数

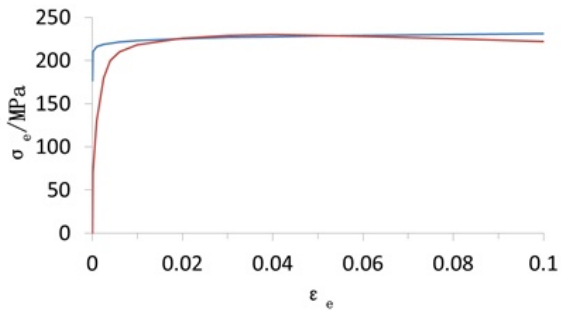


图 3 试件拉伸试验曲线与拟合曲线（确定参数 A、B、n）

Grunesien 状态方程是由 S_1、S_2 与 S_3 三个参数拟合的三次多项式。此状态方程定义压缩材料的压力为：

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^2]}{[1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}]} + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (3)$$

式中，E 为初始内能；C 是 V_s-V_p（冲击波速度-质点速度）曲线的截距；S_1、S_2 与 S_3 是 V_s-V_p 曲线斜率的系数；γ_0是 Grunesien 系数；a 是γ_0的一阶体积修正。

压缩由相对体积定义：

$$\mu = \frac{1}{V} - 1 \quad (4)$$

定义拉伸材料的压力为：

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu)E \quad (5)$$

铝合金材料模型相应的 Grunesien 状态方程参数见表 2：

C（cm·μs^{-1}）	S_1	S_2	S_3	γ_0	a
0.4548	1.4	0	0	1.97	0

表 2 Grunesien 状态方程参数

3.2 设计方案变更

根据油底壳的使用特点，设计思路如下：

a. 根据整车安装的边界尺寸，满足整车各部位空间尺寸空隙要求，同时油底壳的具体形状的设计要根据油底壳实际使用过程中油量的设计要求确定，初步确定油底壳的外形尺寸。

b. 根据整车使用工况要求，确定发动机工作倾角，作为油底壳设计校核的输入。

c. 考虑发动机的排量及发动机寿命等的要求，初步确定发动机基本储油量值。首先考虑储存最小油量时，主要满足发动机的各种倾角及特殊情况如刹车等条件的使用要求。

d. 根据整车的使用条件、环境及匹配要求，确定油底壳使用的材料。

实测油底壳底平面离地间隙 514mm，前端采用直角过渡。根据车型边界输入，在保证油底壳机油容量不变、通过率相当的前提下，进行调整。经发动机系统内油底壳间隙、油底壳内机油量、液面高度这些校核后，确定形貌更改如下（见图 4）：

（a）铸铝油底壳　　（b）冲压油底壳

图 4 CAD 模型结构对比

压铸铝油底壳结构稳定性好，密封严实、不易漏油，但是加工复杂，成本较高，且重量较重；本身铸造容易产生缩松、缩孔等缺陷，次品率远高于冲压，生产效率低。由钢板冲压而成的油底壳，生产简单，成本低，且重量较轻。对于工程车使用工况，与冲压方案相比，原铸铝油底壳经不起磕碰。表 3 为两种材料的材料特性对比。

工艺	材料	密度（kg/m^3）	弹性模量（GPa）	屈服强度（MPa）	抗拉强度（MPa）	伸长率（%）
铸铝	6063	2700	70	≥170	≥205	≥9
冲压	DC06	7850	205	≥140	≥260	≥37

表 3 材料特性参数对比

3.3 冲压成形映射

在汽车零部件的 CAE 分析中，尤其是碰撞仿真分析中，一般不需考虑零部件本身的初始状态，都假定为理想的给定状态（即统一壁厚），材料参数也是由标准或者静态拉伸试验得到的应力应变曲线。钣金成形件在经过复杂的冲压成形后，其厚度分布是不均匀的，而且存在残余应力和应变。同样，由于零件加工硬化效应，使得零件再次发生塑性应变的能力延迟，屈服强度变大，抗拉强度变大，屈强比变大，塑性变差。这样在随后的碰撞分析中，发生失效或断裂的部位将会出现较大的偏差。二者的碰撞结果差别较大，则塑性应变、关键位移测量等相差更大。因此，为了减小仿真误差，本文采用 DYNAFORM 软件先后进行了板材成形性分析和结果映射（图 5）。

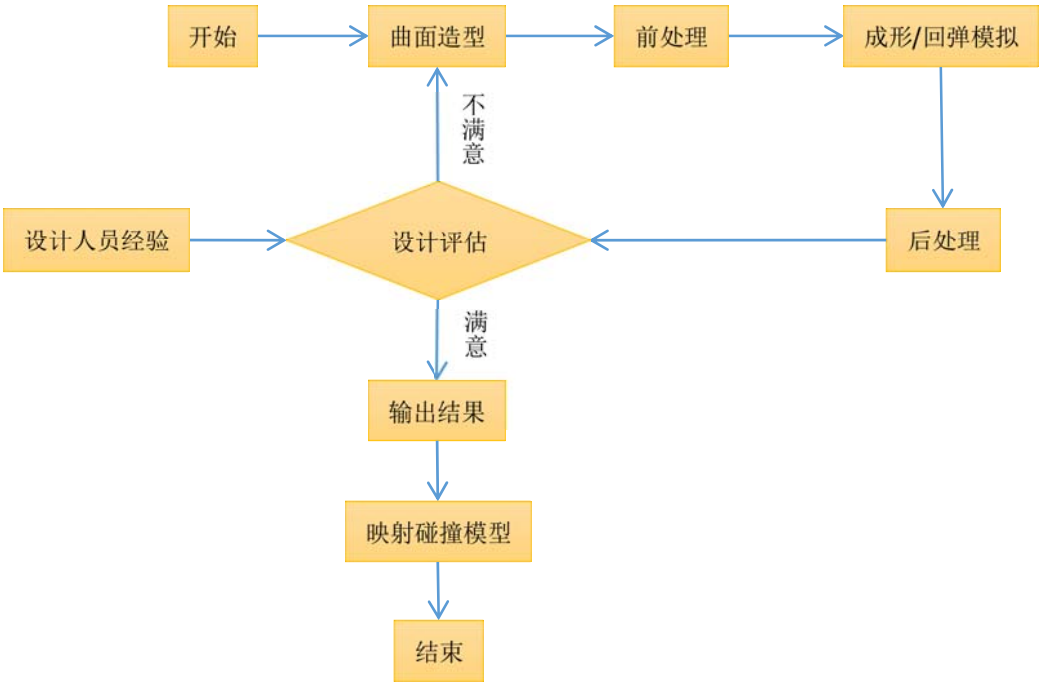


图 5 冲压映射仿真全流程

冲压油底壳属于长盒形深拉延件，通常选用拉伸性能较高的软钢。本文介绍的油底壳零件厚度选取 2mm，该制件具有材料薄、表面质量要求高、硬度强度要求大等特点。通常薄板成形需要经过落料、拉延、整形、切边、冲孔等多道工序才能完成，其中拉延成形是最关键的工序，也是最难的一道工序，拉延成形质量将直接影响后续工序的制造质量。起皱、破裂和回弹是油底壳拉延成形过程中的主要缺陷，单凭经验很难预先估计成形中的缺陷，利用 CAD、CAE 技术，可以及早的发现问题，改进模具设计。

在冲压成形设计过程中，为求解料片轮廓或中间工艺的修边轮廓线需要对零件展开，是以产品三维数模、板料的初始厚度以及材料力学参数作为已知条件输入，可以实现零件可 成形性的高效分析及料片的快速求解展开。此构形的展开过程，考虑了全部几何三维数模的边界轮廓多重合于实际拉延模具的“模口线”。因此，实际的拉延坯料形状可以通过展开的初始构形的外轮廓等距外延一定的距离得到[17]。在 DYNAFORM 中采用一步法求解器可以基于最终的产品模型——逆算法，精确而快速地反推坯料的尺寸和形状，并计算成本和虚拟计算产品的可成形性等（图 6）。

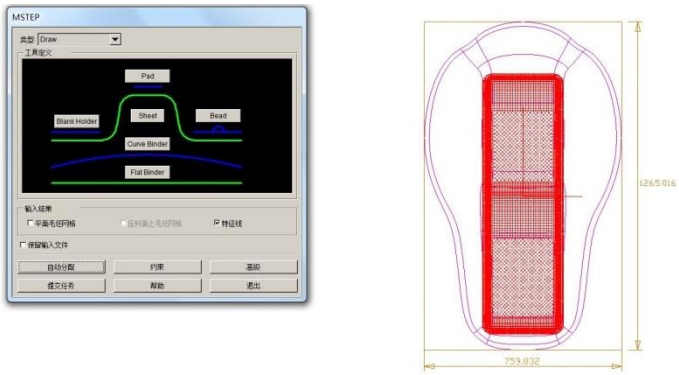


图 6 一步法求解坯料

由于材料特性参数对板料成形数值模拟结果的准确性有显著的影响，为保证模拟结果的准确性平和稳健性，在软件中可实现材料的自定义和管理。通过对材料名称等信息、材料弹性及比重参数、硬化曲线、屈服准则、成形极限曲线等的定义完成油底壳材料的定义。通过增量法模拟成形过程，前处理工作主要包括对工具进行有限元网格剖分与修复；在网格意义下对工具进行等距复制；对等距复制的工具实

施拆分，分离出凸模和压边圈；建立坯料的网格数据；装配定位；拉深筋模型建立；设置材料参数；施加位移边界约束；设置控制参数；生成输出数据。

在拉延工序中，不仅是设置拉延工步，还需要设置重力和闭合工步。其设置过程是首先导入模型，设置冲压方向、各工具及其工作方向和位置，有限元模型和最终成形模拟结果如图 7、8：

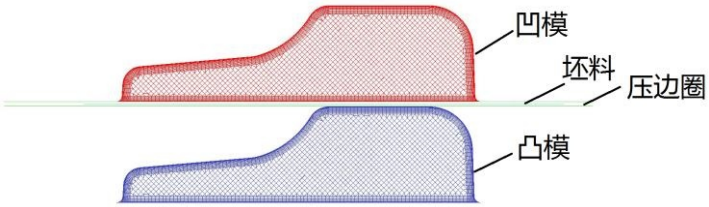


图 7 拉延工序的有限元模型

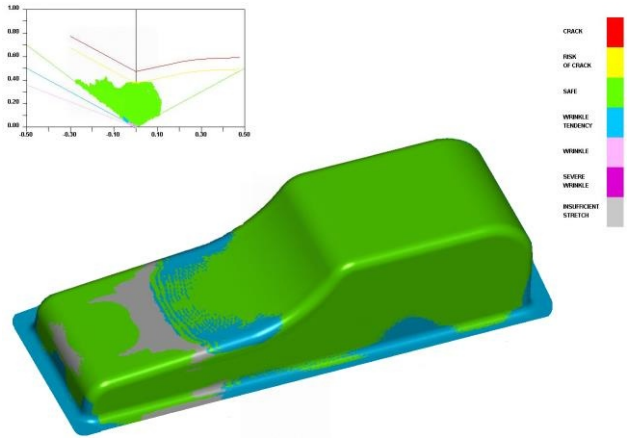


图 8 成形模拟结果

通过模拟油底壳成形的关键工序后，由成形极限曲线 FLC 判断出该工序的模拟结果未开裂或者起皱。从应变图（图 9）中可以看出分布均匀，整个模拟过程有效；由材料的变薄率（图 10）可以看出，制件最薄处为 1.52mm，最厚处为 2.06mm。进一步说明整个设计过程是合理的。

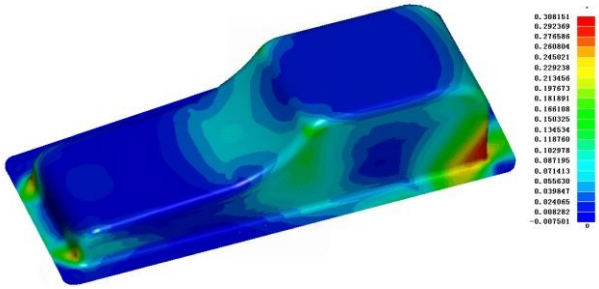


图 9 应变云图

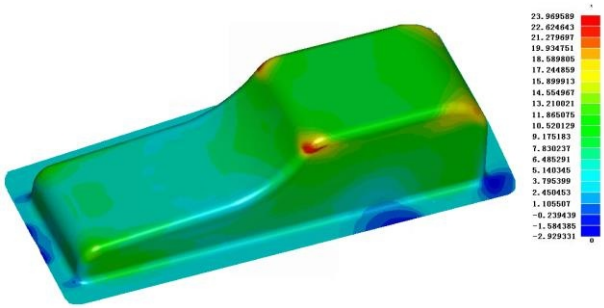
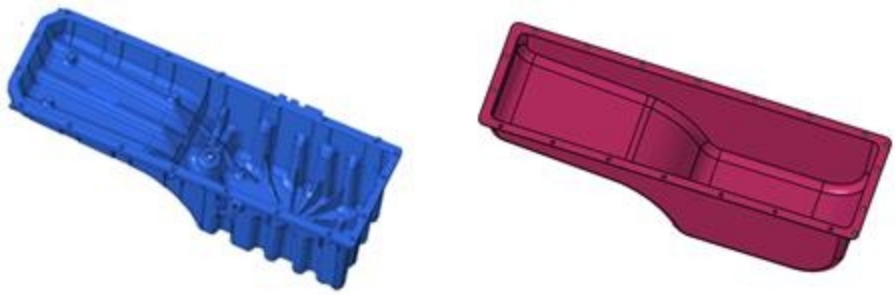


图 10 减薄率云图

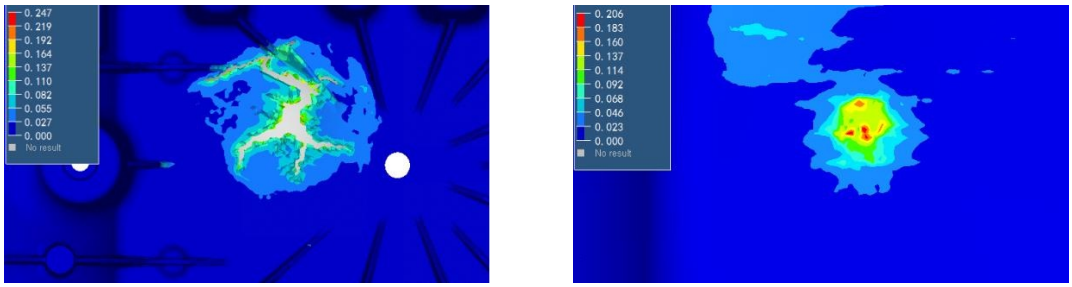
3.4 设计方案对比

对以上两种方案分别进行有限元分析（见图 11），用 LS-DYNA 进行求解。对冲压油底壳是否失效仍然是依照传统的米塞斯屈服准则，即通过静态下拉伸试验得到的等效应力和等效应变判断碰撞过程中的部件应力和应变水平。相同工况下，冲压油底壳考虑冲压映射后的最大有效塑性应变均低于限值，判断不会出现破坏，根据前面提到的材料特性和失效准则，铸铝油底壳易发生穿透破坏。列出部分仿真结果，图 12 为 40km/h 小球碰工况下的应力云图对比。



（a）铸铝油底壳　　（b）冲压油底壳

图 11 有限元模型对比



（a）铸铝油底壳　　（b）冲压油底壳-含冲压映射

图 12 40km/h 小球碰塑性应变结果

4 结论

a. 基于 Johnson-cook 本构关系和失效模型，有效表征材料的实际断裂特性，再现工程车铸铝油底壳的市场破坏工况。
b. 根据市场反馈的整车使用条件、环境和匹配要求，基于动态仿真分析对油底壳进行强度校核，最终确定油底壳结构设计和使用材料。
c. 深拉延件的冲压成形性评估结果映射于碰撞分析中，有效的改善了仿真精度。
d. 在满足结构强度的前提下，油底壳本体减重 28%，生产成本减少 55%，总效果额超 1200 万元/年。另外，避免了因铸造工艺可能产生的缺陷问题导致零部件质量降低，节省了相应赔偿、维修等费用。

参考文献

[1] 谭继锦. 汽车有限元法[M]. 北京：人民交通出版社, 2005.
[2] 时党勇，李裕春，张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京：清华大学出版社, 2005.
[3] Clausen A H, Tore Børvik, Hopperstad O S, et al. Flow and fracture characteristics of aluminium alloy AA5083–

H116 as function of strain rate, temperature and triaxiality[J]. Materials Science & Engineering A, 2004, 364(1):260-272.

[4] Johnson G R, Cook W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures[M] In: 7th International Symposium on Ballistics. The Netherlands: The Hague, 1983: 541-547.

[5] Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation-Mechanics Based Constitutive Relations for Material Dynamics Calculations[J]. Journal of Applied Physics, 1987, 61(5):1816-1825.

[6] Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation Mechanics Based analysis of Material Dynamics Behavior: Enhanced Ductility, Deformation Twinning, Shock Deformation, Shear Instability, Dynamic Recovery[J]. Journal de Physique IV (Proceedings) /Le Journal de Physique IV, 1997, 07(C3):C3-637-C3-642.

[7] Cockcroft, M G, Latham, D J. Ductility and the workability of metals[J]. J Inst Metals, 1968, 96:33-39.

[8] Rice J R, Tracey D M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1969, 17: 201—217.

[9] Hancock J W, Mackenzie A C. On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1976, 24(2-3):147-160.

[10] Mackenzie A C, Hancock J W, Brown D K. On the influence of state of stress on ductile failure initiation in high strength steels[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1977, 9(1):167-188.

[11] Johnson G R, Cook W H. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.

[12] Wierzbicki T, Bao Y, Lee Y W, et al. Calibration and evaluation of seven fracture models[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005, 47(4-5):719-743.

[13] Bai Y, Wierzbicki T. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence[J]. International Journal of Plasticity, 2008, 24(6):1071-1096.

[14] Teng X, Wierzbicki T, Hiermaier S, et al. Numerical prediction of fracture in the Taylor test[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42(9-10):2929-2948.

[15] Gupta N K, Iqbal M A, Sekhon G S. Effect of projectile nose shape, impact velocity and target thickness on deformation behavior of layered plates[J]. Int J of Impact Eng, 2008, 35:37-60.

[16] 王孟君，杨立斌. 6063 铝合金高温流变本构方程[J]. 华中科技大学学报（自然科学版）, 2003, 31(6):6.

[17] 王恒. 汽车覆盖件拉伸模的设计现状及发展方向[J]. 电加工与模具, 2001, 1(2):13-15.

Abstract

In view of the failure problem caused by the impact of the cast aluminum oil pan when the engineering vehicle passes through the rough stone road, the collision condition of the real vehicle was reconstructed by using LS-DYNA software and combined with the special operation condition of the customer. And the simulation analysis results of deep drawing forming were mapped to the collision model. Finally, the structure design and material selection of the oil pan were determined, which solved the problem of market feedback and achieved good results.