

汽车覆盖件拉延缩颈开裂改善中的 典型误区

宁海涛

一汽-大众汽车有限公司天津分公司 天津 300000

摘要：通过总结如何规避汽车覆盖件拉延缩颈开裂改善中存在的典型误区，提升问题解决效率，减少质量损失和重复工作。

关键词：冲压生产；缩颈开裂；板料；润滑；模具基础状态；拉延模拟；网格实验；尺寸优化

冲压件缩颈开裂是汽车覆盖件冲压生产中最严重的质量问题，可直接导致冲压件甚至总成和车身报废。各整车厂近十年新建的高速冲压线工作节拍普遍达到了15~18次/min，比6轴机器人时代快了1倍，但同时期内，冲压件人工抽检的检验方式并没有发生质的改变和提升，导致了生产过程中一旦发生缩颈开裂，产生的报废损失也比之前翻倍。因此，如何更为高效、精准地解决批量生产中缩颈开裂问题显得比以往更迫切。

同样在近十年，随着汽车市场的爆发式增长，有经验的模具工和工程技术人员紧缺，新模具调试状态与工艺设计的理论状态存在较大差异。而工艺设计人员和工程技术人员往往现场经验不足，对缩颈开裂缺陷件缺乏细节观察和整体了解，发现实际缺陷与理论分析不符时对分析结论信心不足，现场模具工难以得到及时有效的理论支持。

笔者所在的模具团队通过一年时间的缩颈开裂专项攻关，把4款车型覆盖件（含前后地板、轮罩等结构件）非材料原因和主动调整（尺寸回弹、拉延油量等）导致的冲压缩颈开裂产生次数，从2022年的平均0.41次/万冲程优化到0.2次/万冲程以内。结合在此工作过程中走过的弯路和以往工作经验，总结出缩颈开裂调试过程中的常见误区及规避方法，供一线模具同行参考。

汽车覆盖件拉延缩颈开裂改善过程中的 典型误区

1. 新车型项目期对新模具基础状态缺乏有效 把控

对比笔者从业16年中经历的自主品牌、韩系、德系三家不同风格主机厂以及对标交流过的多家主机厂

发现，对新模具基础状态的有效把控是德系车冲压件质量和缩颈开裂基础状态显著优于其他厂家的重要原因之一。

主机厂新车型模具调试一般由ME主导，这些部门多以项目管理见长，对新模具调试状态的管理更多依赖于模具厂的自我把控。主机厂模修对新模具调试缺乏经验，并且往往从SOP才开始介入，而SOP前新模具母线调试次数和压件数量有限，致使从新模具进厂到SOP这至少6个月的宝贵时间里成形性问题不能充分暴露，模具厂人员缺乏对模具基础状态主动优化的动力。直到SOP缩颈开裂成为制约新车型产量的瓶颈时才开始引起重视，但此时优化缩颈开裂导致的回弹变化又直接影响了零件尺寸，量产阶段来自整车匹配的尺寸压力导致拉伸模具状态已不敢大动，只能通过气垫压力和垫片的调整以及R值的放大临时保产，遗留下缩颈开裂的祸根。

得益于大众、奥迪的技术传承和整车厂模具工在新项目模具调试中的经验积累，一汽-大众形成了一套从机加合模到底开始的新模具标准化调试方法。通过在模具入调前给调试人员进行培训，贯彻一汽-大众的调试标准和调试理念，结合主机厂模具工以最终用户身份的早期介入，让模具一开始就按照“长期稳定”的原则进行调试。并通过首次上线即按最高节拍生产、增加SOP前每批次压件数量等方式，主动提前暴露成形性问题并及时优化，在SOP时即获得较好的模具基础状态。

2.对板料的关注点过于局限

不管是新项目期还是量产阶段，冲压件发生缩颈开裂时冲在最前面解决问题的永远是模具工。模具工出于职业本能，会更多地把眼光放在自己擅长的模具本身，对板料的着眼点往往局限于延伸率和屈服强度。而实际板料对拉伸缩颈开裂的影响因素远不止这两个参数。表1列出了板料对拉伸成形性能的主要影响因素。

实际在整车厂和钢铁厂的订货技术协议中，钢板延伸率和屈服强度、抗拉强度、*n*值及*R*值是最基本的要求，一线钢厂控制手段也相对成熟。上述参数发生严重偏离的情况并不多见，以笔者所在年产30万辆主机厂冲压车间为例，过去10个月中反查到的材料原因

相关缩颈开裂次数统计如图1所示。

表1 板料对拉伸性能的主要影响因素^[1]

维度分类	具体影响因素
力学性能	<i>n</i> 值、 <i>R</i> 值、屈服强度、抗拉强度及延伸率等
表面状态	粗糙度、涂层状态、后处理及表面缺陷状态等
金相组织	金相组织、夹杂物颗粒度和分布等
尺寸	尺寸偏差、厚度偏差
润滑性	库存期间表面油膜分布变化、润滑脂黏度
其他	时效性、校直辊参数、卷头卷尾参数波动

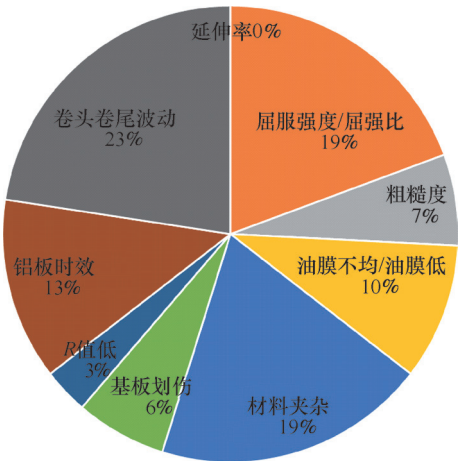


图1 全年因材料导致缩颈开裂中各因素占比

图1数据通常重点关注的延伸率和屈服强度导致的缩颈开裂实际占比并不高。而表1和图1中的其他因素也在一定程度上解释了一直困扰我们的“换料时或临近换料时发生缩颈开裂，调气垫压力及垫片无效，再换料就好”或“连续生产中偶发几件缩颈开裂，尚未来得及停线调整即恢复正常”但板料取样检测机械性能却完全合格的现象。另外很有意思的是，有悖于各种文献中描述的屈服强度越低，屈强比越大越有利于成形的理论，发现了三次屈服强度低导致冲压件开裂的情况（并未因屈服强度低调皱），其原理还有待进一步分析和积累。

现场如何辨别板料是否存在上述问题呢？铝板热处理时间直接可查，除了用仪器测量延伸率、屈服/抗拉强度、*R*值、*n*值、粗糙度、板料厚度以及板料表面油膜外，对缩颈开裂零件断口的观察也是现场最简单

直观，但却经常忽略的细节。

如图2所示，团队通过对缺陷件断口的目视观察，发现板料夹杂、分层迹象，取样后由材料厂家进行电镜检查和能谱分析，最终确定为氧化铝夹杂的过程。最终钢卷供应商通过增加结晶器浸入水口深度、延长精炼循环时间、提高下渣检测精度等措施有效减少了夹杂缺陷的发生。

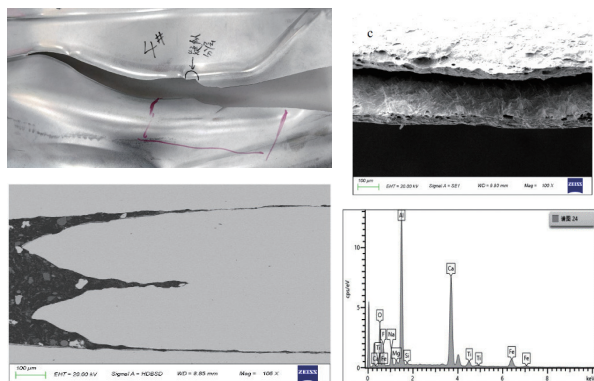


图2 开裂件断口形态及电镜检测、能谱分析

3.仅关注设备自身精度，忽略设备与模具的配合状态以及对设备的合理运用

缩颈开裂问题在线调整过程中，气垫（液压垫，以下按传统习惯简称气垫）压力和平衡块垫片高度是最常用的手段，二者分别通过调整压料力和压料间隙来实现调节材料流入量的目的。压机滑块与工作台之间的平行度和气垫自身平行度决定了模具整体压料间隙和压料力是否均匀，也是所有冲压车间重点关注的设备参数。但经常遇到以下情况：静态测量气垫平行度没问题，但把压边圈上的平衡块设成等高时，有的平衡块就是不着色，而下气垫的动态平行度又无法测量。通过图3来分析下气垫力的传递过程^[2]。

如图3所示，下气垫（液压垫）的压力来源于液压缸，设备自身会严格确保两个液压缸之间的压力平衡，但液压缸的压力要通过箱体/垫板和工作台气垫顶杆传递给压边圈接腿，然后才传递到压边圈的压料面上。大家往往只关注液压缸的压力和箱体/垫板的静态平行度，却忽略了气垫顶杆和压边圈接腿的影响。在机加环节，气垫顶杆和压边圈装配式接腿的长度公差要求通常都是 $\pm 0.2\text{mm}$ ，而随着各主机厂普遍采用了拉延全气垫顶杆模式，气垫顶杆在工作台的安装位置固定，使用频次高的部位气垫顶杆变形会大于其他顶

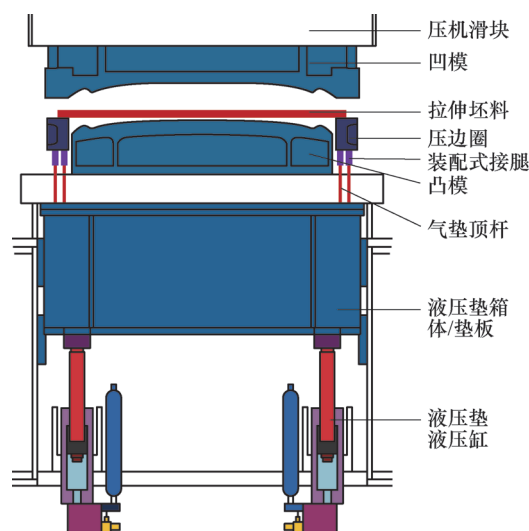


图3 下气垫力传递给压边圈的过程

杆，两种因素叠加，导致了原本均衡的气垫力被不均等地传递到了压料面。

除此之外，气垫的初始顶起高度与凸模的关系决定了板料预弯程度即成形前在型腔内“储料”的多少，气垫“预加速”功能也会直接影响成形初期的材料流入量。因此，压机对拉延成形的影响并不仅限于设备自身精度，设备参数的合理设置以及设备与模具的完美配合才能帮我们得到好的成形状态。

4.对成形过程中润滑的作用理解不全面

拉延成形过程中，拉延油和板料表面残留的清洗油可在一定程度上减少模具和板料之间的有害摩擦系数，润滑效果的提高可以改善成形性能，从而降低对金属材料拉伸等级的要求，可以允许使用级别更低的金属材料，并大幅度降低废品率，可节约金属成本10%~20%^[3]。

在很多人的理解中，增加板料润滑的主要作用是通过改善压边圈压料面的润滑，增加成形时的外部材料流入量。但实际在前、后门内板、后盖内板等零件的拉延成形中，多次遇到在涂油条件下正常生产的零件，取消涂油后，没有出现缩颈开裂，反而出现大皱的情况。对比拉延件收料线发现，不涂油的零件实际材料流入量也确实明显增大。在烧焊拉延筋槽R、降低平衡块高度以增加进料阻力的过程中，导致了零件内部多个部位的缩颈开裂。为求证取消涂油后零件出现皱的原因，团队进行了手工涂油对比试验。发现板料

涂油后，虽然压料面处进料阻力变小了，但在拉伸油的帮助下，零件在模具凸、凹模内部，减薄更充分，因此在成形到底的过程中需求的外部材料流入更少。而不涂油的零件，内部减薄不充分，成形到底的过程中需要从外部要料来补充成形所需，外部材料流入不均导致了褶皱的产生。

结合以上实际现象和试验结论，拉伸油/残留清洗油在拉伸成形过程中的作用为：通过增加板料润滑性能，减少模具和板料之间的有害摩擦系数，使材料减薄更加均匀，从而减少了危险断面处的材料变薄（应力集中）。简单来说，拉伸油涂在凸、凹模型腔内部和涂在压料面上可以取得不同的效果。因此，通过科学合理地设置涂油机在板料上涂油位置、涂油量，以及巧妙控制板料表面残留的清洗油油膜，有助于提升拉伸成形质量，减少缩颈、开裂和褶皱的发生。

5. 对拉伸模拟和网格试验结果缺乏有效运用

拉伸模拟是在冲压工艺设计（甚至可制造性分析）阶段就进行的成形基础分析，整个零件的成形方案和工艺造型都以此为基础。而网格试验则是最早在新模具零件首件验收阶段要求进行的实际成形性检查。前者理论性较强，往往在新模具调试阶段就已经与实际情况体现出差异。后者虽然直接反映了实际成形过程中的减薄率和缩颈开裂风险，但由于和批量生产阶段实际发生的缩颈开裂直接对应性不强（网格试验与批量生产中实际发生的缩颈开裂符合率不到10%），往往被现场模具工认为参考价值不高，实际调试过程中很少参考拉伸模拟和网格试验的结果。

分析拉伸模拟和网格试验结果与实际成形状态存在差异的原因如下。拉伸模拟过程中，一般针对模拟后出现的破裂和起皱这些缺陷通过反复调整拉伸筋的阻力，多次模拟分析，最终得到破裂风险、最大减薄率、起皱趋势等模拟结果^[4]。但软件模拟时真实拉伸筋需要额外建模及网格处理，较等效拉伸筋处理复杂，影响计算效率且不容易对其修改。故多采用等效拉伸筋，不对拉伸筋进行模型的构造，只在相应的网格节点上设置代表拉伸筋的线并施加单位长度上的流动阻力来模拟真实拉伸筋^[5]。等效筋中流动阻力的设置无法与实际拉伸筋的状态做到完全一致，调试阶段压料面实际研合状态、强压间隙、筋与筋槽实际间隙及模具R

角抛光状态也会在一定程度上造成实际成形状态和理论的差异。

网格试验虽然是基于实际的模具状态和成形过程测算的减薄率和FLD状态，但单张板料的成形无法体现生产中模具发热后走料的变化。另外，板料印制网格前后存在擦油和手工涂油过程，网格件表面的油膜状态会与批量生产有差异，导致批量生产中偶发的缩颈开裂很难通过网格试验直接体现。

以下通过两个实际案例分别说明拉伸模拟和网格试验结果在缩颈开裂问题优化过程中的运用和帮助。

1) 除了在新拉伸模调试初期需要让实际拉伸收料线尽可能与理论收料线接近，零件内部的拉伸模拟理论减薄率也是模具成形裕度优化的重要参考依据。图4所示的3处R角局部的理论减薄率达到了32.8%，局部的最大失效0.86，但此处在后工序工作中没有进一步减薄，从FLD图看，缩颈开裂尚在安全区间。

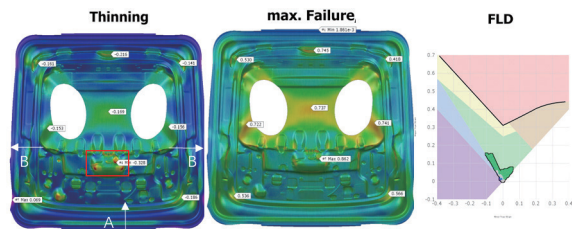


图4 某车型后盖内板拉伸模拟结果

基于拉伸模拟情况，虽整体综判为通过，但减薄超过30%的三处R角仍存在缩颈开裂风险，调试阶段通过研放凸R、在压边圈实际行程设置时让板料适当预弯，合理设置下气垫预加速距离，增加成形初期内部储料，并在涂油机参数选择上，在对应部位增大涂油量，让R成形时有良好的润滑条件下均匀减薄。从而增加成形时的安全裕度。得到的实际网格试验验证结果如图5所示。

由图5可见，除产品造型凸台外，其他两处凸R的实际减薄率已降到24%以下，凸台处实际减薄率32.3%。FLD图中，最小安全裕度10.163%，虽在安全范围内，但根据FLD图和主、次应变状态，仍可通过减小主应变（减小图4中A处进料阻力）或增加次应变（加大图4中B处进料阻力）来进一步提升缩颈开裂安全裕度，为批量生产中的进一步优化调整提供了参考依据。

2) 以下案例则通过网格试验的分析结果为缩颈开

(单位: %)

测量点编号	主应变	次应变	厚度减薄率	成形极限裕度
f_1 安全裕度最小	33.98	10.355	32.308	10.163
f_2 厚度减薄最大	33.98	10.355	32.308	10.163

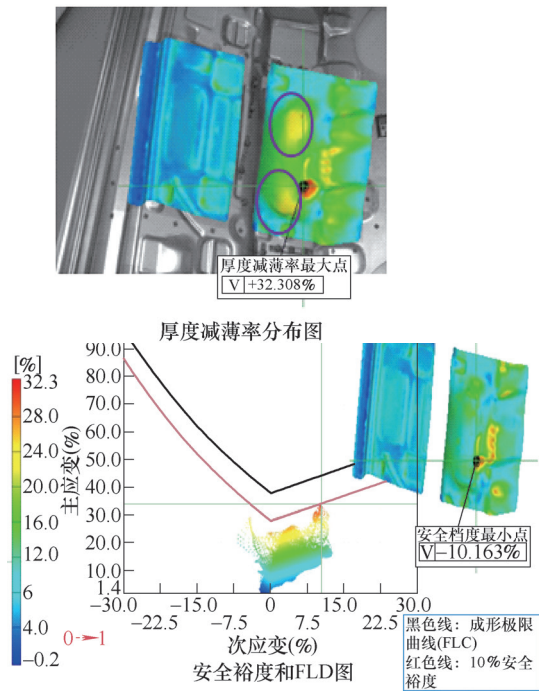


图5 后盖内板优化裕度后的网格试验状态

裂问题提供了改善方向。如图6所示,某车型前门内板B柱顶端拉伸开裂,研放拉伸筋槽R和调整平衡块垫片后,对应位置拉伸收料线完全进入拉伸筋槽底部,但仍偶发缩颈和开裂。此处成形深度不深,最大减薄率也在22%左右,但偶发缩颈开裂的问题并未得到彻底解决。



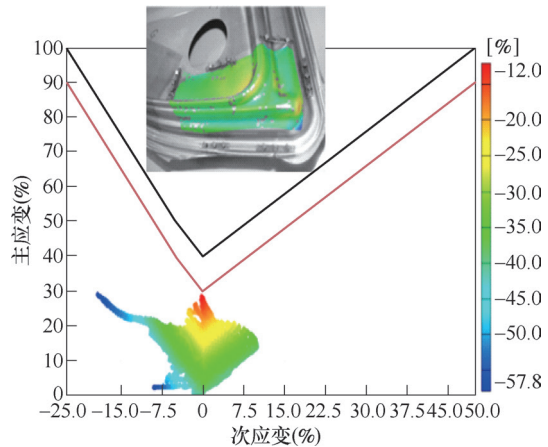
图6 某前门内板B柱开裂及对应拉伸收料线调整状态

通过对该部位进行网格试验分析,发现此处主、次应变方向复杂,并非根据常规经验和裂口方向推断的主要从上方走料,如表1和图7所示。

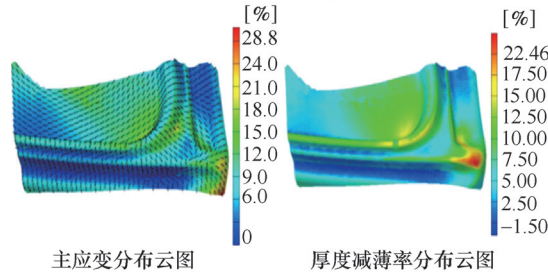
结合开裂部位主次应变方向和FLD图可看出,危险区域正对10%安全裕度线拐角,这种情况下不管是减小主应变还是增大或减小次应变,都能有效提升此处缩

表1 测量结果 (单位: %)

测量区域	H
最小成形极限值	12
最大厚向减薄率	22.46
最大主应变	28.8

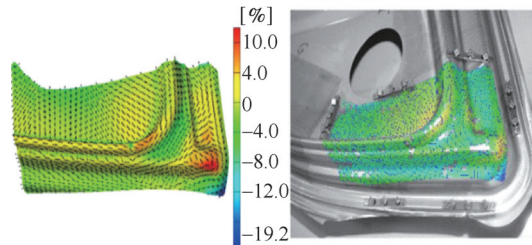


a) FLD成形极限值(%)



主应变分布云图

厚度减薄率分布云图



次应变分布云图

分析区域

b) 主次应变

图7 某前门内板B柱开裂部位网格实验FLD和主次应变

颈开裂的安全裕度。再结合此处减薄率现状,找到研放凸模R的方式作为进一步改善方向,成功解决了偶发缩颈开裂的问题。

6. 拉伸成形尚未稳定就急于更改尺寸

零件尺寸认可是新车型模具项目管理的重要里程碑,迫于项目进度压力和调试人员经验水平,在拉伸成形尚未稳定的情况下,项目管理人员经常会“头痛医头”地通过整形工序对门内板、后盖内板、发罩内

板类零件的法兰尺寸进行更改。但上述零件的法兰尺寸往往直接与成形过程中的拉延回弹直接相关，项目期一些存在偏差的法兰尺寸，往往会随着零件缩颈开裂优化过程中走料状态的变化而改变。多个项目中出现过项目期通过整形更改的法兰尺寸，在拉延调试稳定后产生变化，把前期烧焊整形的更改量做回去之后尺寸恢复正常的情况。反复更改整形，不仅是重复工作的浪费，在反复更改整形模具的过程中产生的着色损失更是难以挽回的。因此在新项目调试阶段，一定要先做好零件本身的成形性，在确认实际拉延收料线与理论收料线符合程度、各工序着色率均稳定合格的基础上，再进行整形尺寸的优化。

7. 拉延模具R放大后，零件在后工序模具符形状态未及时确认

下面通过一个实际案例说明优化缩颈开裂过程中的

零件尺寸发生变化，又通过后工序模具上排除干涉做符形恢复尺寸的过程。该零件尺寸变化过程如图8所示。

“初始尺寸状态”为该零件尺寸认可时的状态，在SOP初期，发现整个B柱法兰边平面度尺寸发生变化。排查拉延及整形模具着色状态、零件在各工序模具中定位以及零件储运过程均无异常。反查从尺寸认可到发现尺寸变化的中间过程，发现唯一的变化点在于因为左上图框线部位出现缩颈开裂，现场研放过拉延凸模R。进一步排查后工序零件在下模的贴合状态发现，拉延凸模R放大后，后工序凸模对应R未及时做空开，导致零件在后工序模具中被R略支起来，在切边压料板和整形工序作用下产生尺寸偏差。根据拉延凸模R放大过的部位，在后工序凸模R做空开后，尺寸恢复正常状态，并且比尺寸认可状态还要贴近零偏差。

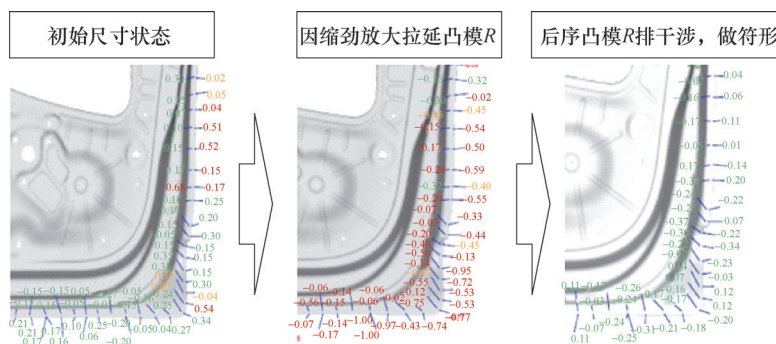


图8 某前门内板零件缩颈开裂优化过程中的尺寸变化

结语

本文结合汽车覆盖件拉延缩颈开裂调试和优化的实际经验，以及在新项目模具调试过程中走过的一些弯路，从模具基础状态、板料、模具与压机的合理匹配、成形过程中的润滑、拉延模拟和网格试验结果的运用、尺寸优化前提及拉延R放大后的零件外形等方面总结了实际工作中易被忽略的误区供一线模具同行参考。实际工作中规避这些误区，可以有效提升缩颈开裂优化的效率，减少质量损失和重复工作。

参考文献：

[1] 宁海涛，汪建余，密思斌，等.冲压量产阶段预防性

质量控制的数字化探索实践[J].锻造与冲压，2023，16（8）：43-46.

[2] 李统，侯志栋.拉伸垫形式及选型注意事项[J].汽车制造业，2018（10）：74-76.

[3] 王晓宁，张耀圆.冲压拉延油在车身制造中的应用[J].汽车制造业，2013（2）：38~39.

[4] 高沙沙，薄青红 水志祥.基于Autoform的汽车覆盖件拉延过程模拟[J].山东工业技术，2015（14）：20-22.

[5] 刘细芬.汽车覆盖件拉延成形数值模拟分析及参数优化[J].机械与电子，2013（7）：68-71. **AUTO1950**