基于侧围后三角窗尖角变形的对策过程谈谈解决冲压变形问题的思路

文 | 叶梦彬、毛定山、董红尚、吴志兵、赵维、冯海群、陈勇 · 广州汽车集团乘用车有限公司、广汽研究院

汽车侧围外板后三角窗变型是侧围冲压的一个难题。无论奔驰、宝马、保时捷等所谓豪车还是本田丰田长城等一般代步车，只要侧围后窗尾端设计成尖角形，尖端后部外板部分或大或小的都存在变形，如图 1。这类变形往往比较大，采取对策后也不能完全消除。

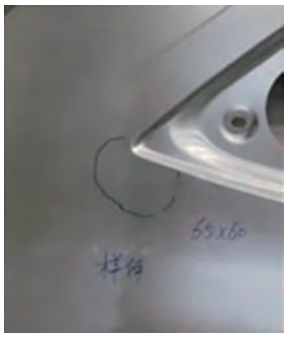


图 1. 侧围后三角窗尖角变形

侧围后三角窗的成型一般采用拉延、整形、冲孔的工艺，拉延工序用过拉延放大三角窗周边的圆角 R 拉延出基本形状，后序再整形将三角窗周边的圆角 R 整成产品要求状态，并把三角窗内造型整出来。三角窗变形一般在拉延的时候就出现，整形的时候可能进一步加剧，也可能一定程度上获得改善。控制侧围后三角窗变形的对策一般都是局部采用强压、在三角窗内开孔（如图 1）、在尖角增加造型、把尖角设计尽量靠后等等办法。拉延的时候采用强压控制产生变形的作用有限，如果产品造型已定，尖角后面的外板部分不能改变造型、尖角位置处于侧围的较大的凹造型区域里面、三角窗这里不准开孔、三角窗内造型不能影响装车，要解决这个变形，将是一件非常难、非常有挑战的事情。本文介绍的就是解决这样的一个问题的思路过程。并基于这一过程，分享解决冲压变形问题的几个思路。

侧围三角窗变形的产生原因和状态

局部造型和问题状态

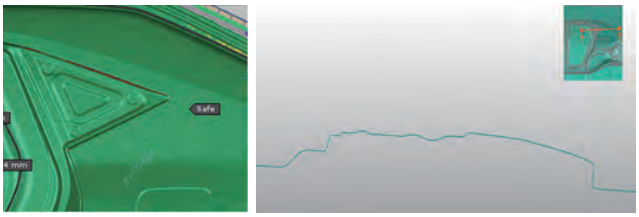


图 2. 某车型侧围三角窗造型

图 2 为某车型侧围三角窗局部造型及局部断面图。这个三角窗其实没用窗，造型上这里除了 3 个安装用卡扣孔之外是没有孔的。三角窗的上斜边上面是一条高起来的棱线，棱线 R 为 R8。三角窗下部是后翼子板的腰线，油箱口也在这个腰线上。腰线和上述棱线之间是一个巨大的反凹造型。这

个反凹造型，在拉延过程中会形成一个空腔，板料在拉延过程中容易在此积聚。如图 3，白线是成型过程中的板料，绿线是下模型面，白线和绿线之间的空间就是空腔。

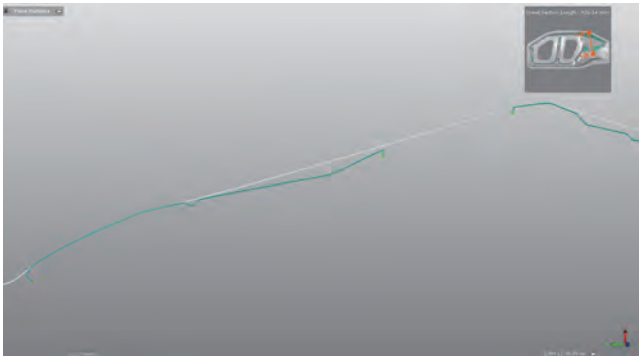


图 3. 拉延过程中反包形成的空腔

经验告诉我们，三角窗角部在拉延中一定会产生变形。这个变形区刚好处于上述成型过程中的空腔内。尖角位置靠上部棱线越近，对尖角的变形控制越有利。但是现造型三角窗的角部尖点距离棱线距离右 60 ~ 70 ㎜，这个距离偏大。甚至尖点再靠下一些，或者再靠后一点，对尖角区的变形控制都有好处。但是这个侧围的造型，三角窗尖角刚好处于最容易变形、最难控制的位置。

我们对这里的变形是有预见的。我们预见了尖角后一定有变形，CAE 也显示了这里会产生一个变形，如图 4。

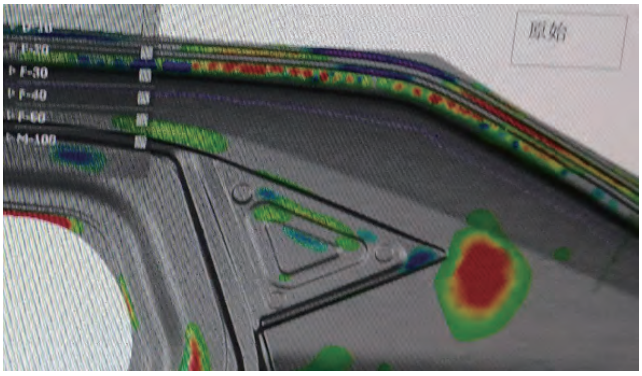


图 4.CAE 分析的三角窗角部变形

我们在工艺分析阶段针对这个变形采取了一些对策，最后我们、汽研院和模具制造商三方确认变形较小，拉延状态可以接受。为防万一变形较大，我们还在第二序预留了强压整形对策后，以备万一需要，可以进行整形来减轻局部变形。如图 5。

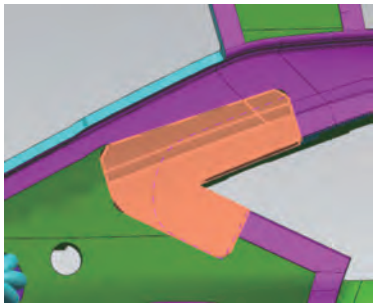


图 5. 后序压料板预留了强压整形

模具进入调试阶段后，我们发现在三角窗尖角后部出现了一条明显的凸条。如图 6。

图 6. 凸条状变形状态

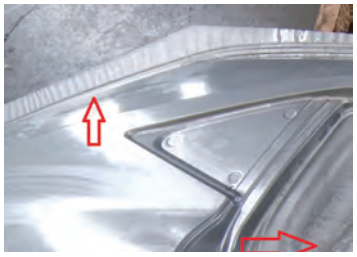


图 7. 软模件状态

在工艺分析中，我们、汽研院和模具制造商三方多次 CAE 均未出现这一变形。软模件也没有发现这一变形(图 7)，我们没有料到会产生这样的变形，三家公司的 CAE 也都出现了失真。我更没有料到这个问题会成为我职业生涯中最棘手的问题。

问题的发现过程及原因调查

由于在 CAE 阶段三家公司都没有发现有这一道变形，三家公司所有经手人都没有分析出这个缺陷，我们没有及时认识到这是一次 CAE 失真留下的隐患，也没有认识到问题

的严重性。调试初期发现有这道变形之后，大家都认为是研配问题。直到调试 2 ~ 3 个月后，模具经多次研配，这道变形始终无法消除，甚至有越来越严重的迹象，似乎研配越研问题越大。这个时候大家才认识到这不是研配的问题。反复的检查、验证 CAE 后，终于确认这是一起 CAE 失真的问题。这个时候模具局部因为这道变形，因为以变形件凸蓝丹反复研配模具导致模具局部有点空了。模具厂家经分析后认为靠他们的力量他们解决不了，需要我方技术支持。

分析和对策过程

在模具调试过程中，我们曾派出专家进行指导和确认，这一问题认为是模具的研配问题，直到发现研配无法消除。

在现状基础上通过现场调试消除变形

在开始接到反馈时，笔者因为还没见过模具和拉延件，没有意识到问题的困难和复杂性，以为是调试问题。按照三现主意的原则，决定亲自出手，在维持模具现状基础上根据自己多年指导维修和调试模具的经验，通过最简单的现场调试消除变形。经过检查模具、分析拉延件状态、分析工序件和完成件，重新研究工艺后，决定重调拉延。经过现场确认和分析参数、调整模具、调整参数、调整材料定位、重调平衡、板件垫膜涂油垫纸等等一系列调整和测试手段，发现仅仅进行拉延模调试是不能解决的，多次观察分析和对策后，问题依然存在，这道变形只能减轻不能消除。图 8。

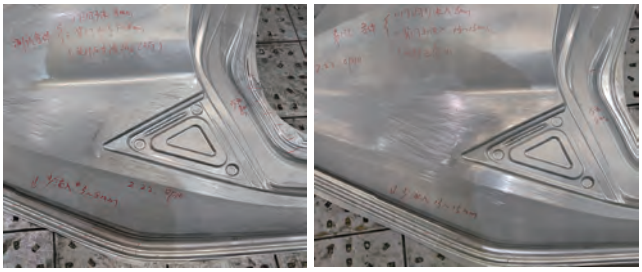


图 8. 现场调试状态

在现状基础上通过整形消除变形

在通过拉延调试解决问题的思路失败了，变形只能减轻不能消除。在解决问题的开始阶段，我们肯定是考虑采用最简单、风险最小、不涉及模具修改的对策。根据以往工作经验，一些变形时可以通过后序整形压平的。因此考虑通过拉延将变形减轻，再通过后序整形消除变形的对策。经现场测试试验，发现变形区域处于弹性状态。当整形的时候，变形区域局部板料通过弹性形变跟模具符形，当模具分开，整形压力消失，弹性形变恢复，变形区域恢复整形前状态，变形没有任何改变。这说明当变形区材料处于弹性形变状态时，通过整形强压不能消除变形。整形时板件在模具合模产生的强压下发生弹性形变，良好贴合模具型面，模具打开后板件形状弹性恢复，变形依旧。图 9 为整形后状态。对策再次失败。

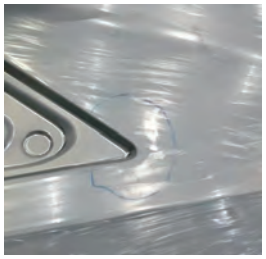


图 9. 整形后变形未能改善

修改拉延局部造型消除变形

前面的两对策都是属于钳工、调试的范畴，这两对策思路都失败了，说明仅仅依靠钳工手段无法达成目标，所以决定要从拉延局部工艺细节解决。通过对造型的分析和 CAE 模拟，认为是三角窗尖角拉延深度太深和尖角台阶处变形太剧烈造成了局部应力较大，拉延变形较大。制定以下对策：降低尖角的拉延深度，加强尖角位局部台阶使平缓过渡。经 CAE 分析了多个细节不同的详细方案，效果都不理想，如图 10。

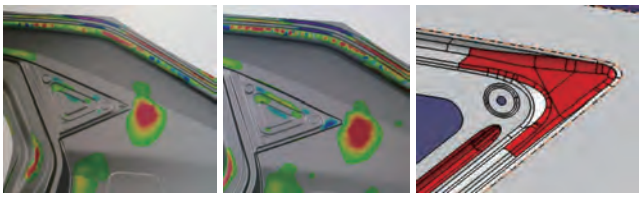


图 10. 抬高尖角位高度的对策 CAE 分析

前期的 CAE 失真影响了对 CAE 的信任，所以决定依然对上述分析中 CAE 效果最好的对策进行测试。经测试，问题依旧，不能改善。如图 11。

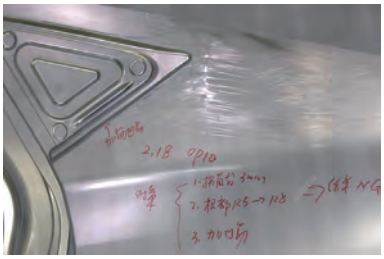


图 11. 抬高尖角高度平缓过渡的对策结果

通过将变形区转移到其他没影响部位消除 A 面变形

能做对策的空间只有三角窗这一点点空间，在改善尖角过渡和抬高尖角高度等相对简单、容易施工、风险小的对策都失败了。经过分析，认为在当前拉延工艺下，凸条变形必然会存在，因此考虑对策方向修改为不追求消除拉延变形，将变形区区域通过某些方法转移到三角窗范围之内来消除三角窗尖角后部外板变形。换个说法就是将尖角部位抬高至略高于尖角外外板部分型面，使变形区域前移，转移至抬高位置范围，达到基本消除外板部分变形的目的。三角窗尖角位置通过后序整形整回产品造型。这一对策也不断的修改细节，按不同的细节做了很多种详细方案并进行 CAE 计算。经 CAE 分析，效果都不太理想。部分对策如图 12。

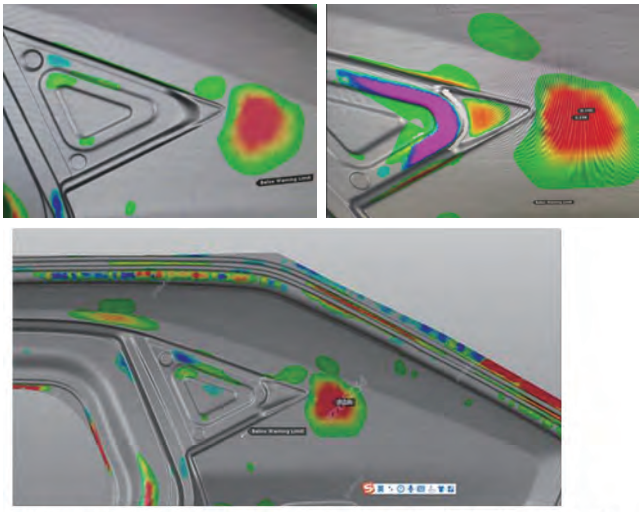


图 12. 通过修改局部造型转移变形区的对策效果

拉紧材料改变应力状态消除变形

转移变形区的对策失败促使我开始思考为什么这个区域的材料如此之多如此容易形成变形。通过对比不同的测试件，发现板料在三角窗尖角附近小范围内发生了应力的急剧变化，一个方向拉应力一个方向压应力。按照拉延工艺，三角窗尖角区板料应该都是拉应力才对。进行网格确认，如图 13。

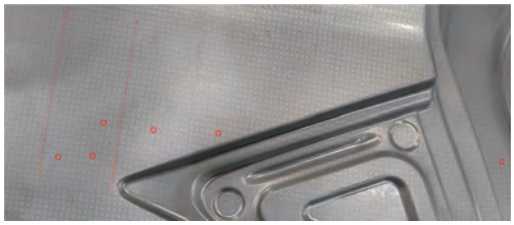


图 13. 拉延应力状态确认

至此发现三角窗门洞处压料不紧是影响变形大的一个重要原因。分析模具结构，发现门洞三角窗位置压料板压料面下刚好设计了导向，没有气垫顶杆，导致压不紧料。加拉延筋，状态有改善。CAE 如图 14。

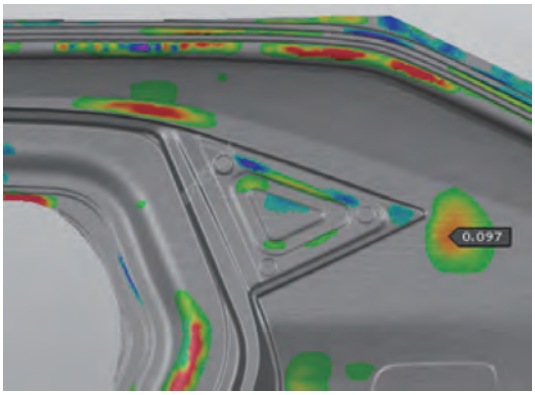


图 14. 门洞加强压料后变形改善

但是没有气垫顶杆的状态下如果想有明显改善，拉延筋必须很强。拉延筋太强，对周边的影响很大，容易造成其他局部开裂。经反复多次测试，确认当前的模具状态下很难做到不开裂又改善变形状态。如果是新作模具，通过修改模具设计，这一对策应该能有一定改善效果。

在调试过程中笔者一度怀疑尾门段拉延筋（包含压料面的作用）没拉紧也对变形产生了影响，并进行了多次测试。测试结果证实当尾门段压料放松一些的时候变形能有所改

善，但是放松到一定程度后改善效果就不明显了。分析原因，三角窗尖点区域在上述的应力状态下，放松尾门段拉延筋就是降低了图 13 板料椭圆长轴方向的拉应力，由于短轴方向的压应力不变，从而改变了局部单元的应变，所以变形改善。当这段拉延筋放松到一定程度后，再进一步放松，长轴向的拉应力变化已不大，或者说拉应力已接近 0 了没法变了，局部单元的应变已不再发生明显变化，这个时候就表现为再放拉延筋改善变形的效果已不大。

在三角窗内开孔改变工艺状态消除变形

前面的工艺属于基本不涉及产品局部成型工艺的改变的对策，这些对策都失败了，促使笔者开始朝改变局部工艺的方向思考。改变工艺的方案有在三角窗内开孔拉延、三角窗采用二次成型、三角窗采用反包拉延后整形 3 个方向。

首先分析三角窗区域开孔拉延方案。如果三角窗区域可以开孔，坯料也相应开孔，在有孔的情况下拉延成型，就彻底改变了三角窗区域成型时的材料流动状态，尖角局部工艺由拉延变为接近折弯的成型工艺，成型应力状态大大改善，材料流入路线也因坯料孔而截断，可以有效减少材料流入，消除变形。分析了多种开孔的详细方案，其中两种如图 15。

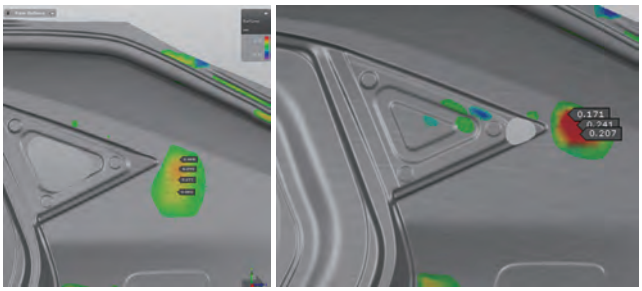


图 15. 三角窗内开孔拉延的分析

从 CAE 结果来开，坯料开三角孔的方案，拉延后变形明显改善，所以进行了现场试验。试验结果，那道凸痕变形明显减轻，面品效果有很大改善，达到勉强可以接受的质量水平（图 16）。

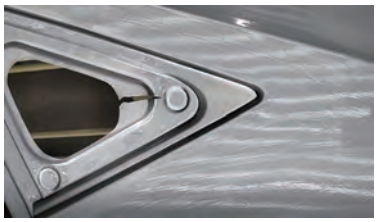


图 16. 开孔拉延的测试结果

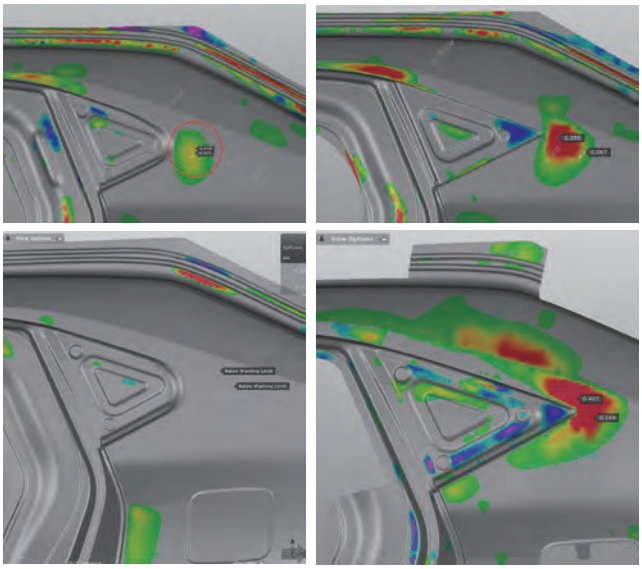
由于侧围产品造型这里是没有孔的，如果要开孔，必须修改产品设计。经与汽研院协商，汽研院不同意修改产品造型。为此，开孔的技术方案放弃。

采用二次成型消除变形

接下来考虑二次成型的技术方案。二次成型就是指分成两次成型，一次先拉延到一个 A 面变形程度较小的状态，二次通过整形整成最终产品的造型。由于整形时后序模具可以实现压料板强压，整形变形相对可控，有望通过二次拉延获得满意结果。

二次成型有两种方案：1、一次成型不包括尖角部分，二次成型整形出尖角；2、一次成型拉延深度只拉约一半，二次成型通过整形拉到底。

先分析第一个方案。第一个方案进行了无数个不同细节方案的分析，其中之二如图 17。



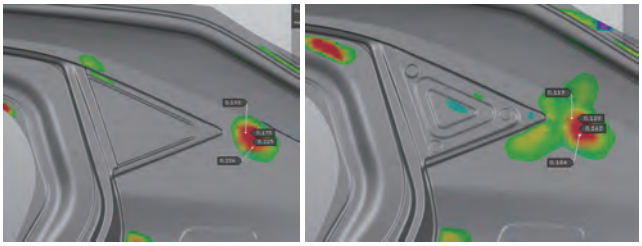
拉延 状态　　整形状态

图 17. 二次拉延的方案之一

一次成型即拉延工序不成型三角窗尖角部分，二次成型（整形）出尖角，完成三角窗整体造型。这一方案拉延变形非常小，而且处于尖角区域，CAE 结果整体比较理想，判

断之前那道凸痕变形应该可以消除，但是二序整形的变形较大。效果不理想。

第二个方案我们也做了很多种不同细节的详细方案分析，其中之一如图 18。



拉延 状态　　整形状态

图 18. 二次拉延的方案之二

由于三角窗区域最大深度大约是 27 ㎜，经过多次分析和 CAE 对比，决定拉延先拉 13 毫米深度，同时为了减轻整形变形和增加整形线长，在三角窗上下两侧分别加了一道筋（图 18 左）。CAE 结果拉延变形有改善，但变形区域处于原始方案变形区域位置，因此判断那道凸痕状变形还是会出现，变形大小预计会有所改善，但是整形工序的变形仍然较大（图 18 右）。效果不理想。

通过对以上两种方案多种不同细节详细方案的反复分析评估，认为二次成型的方案基本不可行。

反包拉延后整形消除变形

多次对策的失败，笔者开始怀疑这里的造型即使没有三角窗，估计也会有变形。为此进行了 CAE 验证。如图 19。经 CAE，似乎没有什么变形，但是从断面看，这里还是有鼓起来，分析失真的风险很大，预计这里十有八九还是有变形，可能是一条大的凸痕。

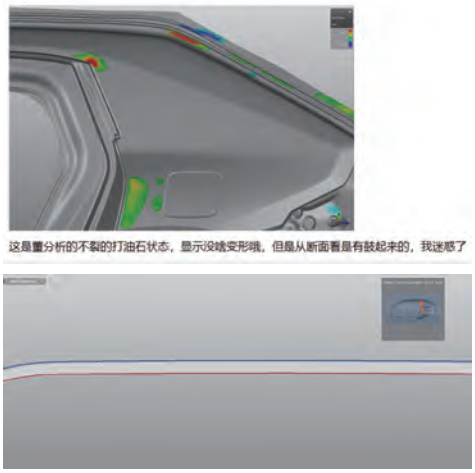


图 19. 在侧围抹平三角窗的分析

重新整理之前的各种对策思路。之前的加强门洞侧和尾盖侧压边后三角窗有明显改善，考虑可否压紧门洞侧控制进料及什么办法来改善加强进料控制后对周边的影响（图 20）。

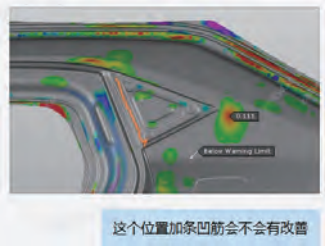


图 20. 压紧门洞侧控制进料的分析

二次成形的对策之一的分析结果，提示了在变形区做一个凸包，通过凸包来吸纳多余的材料，消除拉延尖角变形，通过后序整形把凸包反整成三角窗尖角的思路。如图 21。凸包整形后线长基本不变，同时通过后序整形造型的修改吸收掉多余的材料。

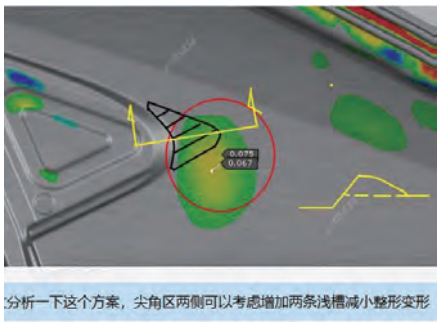


图 21. 尖角反包对策思路的来源

经过 CAE，初始的分析结果不理想。拉延还是有变形，整形后变形更大，上部棱线出现不光顺。如图 22。调整方案细节，如图 23。

经过多次反复分析，拉延在采用反包的方案后，拉延变形能有效改善。反包的使用，极大的吸收了尖角区域的材料，

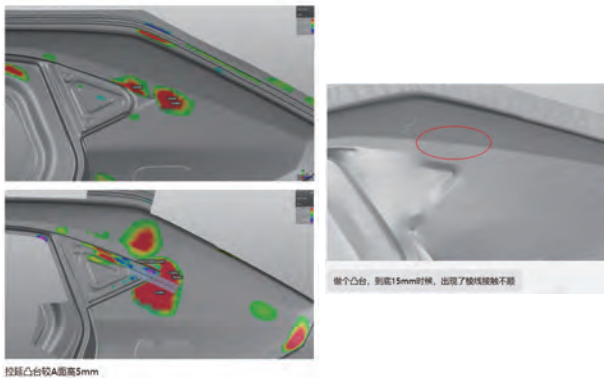


图 22. 反包方案的分析

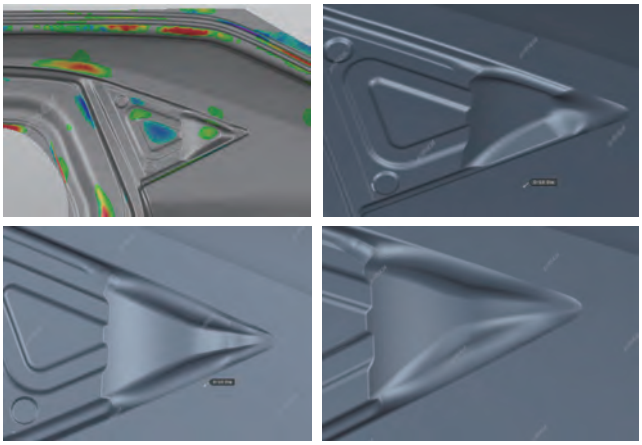


图 23. 各种不同细节的反包方案分析

在一定程度上改变了拉延触料，因此判断可以确保有效消除凸痕变形。这个思路是正确的。

按照反包拉延的工艺思路，发现整形后局部多料、起皱严重，出现叠料（图 24）。需要对策对多余的料进行吸收。目前相关匹配件都已定型，整形造型的涉及还不能影响当前的装车要求。

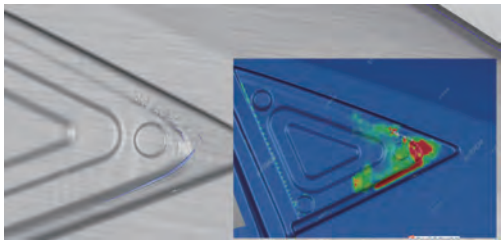


图 24. 反包对策整形后严重起皱

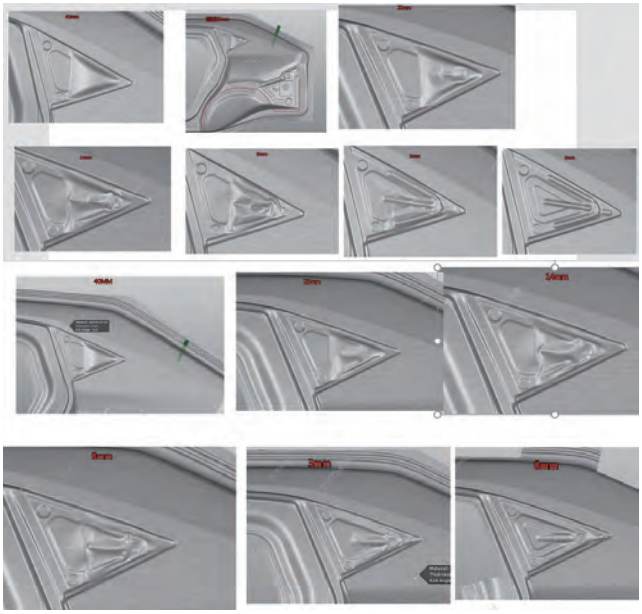


图 25. 整形造型的分析

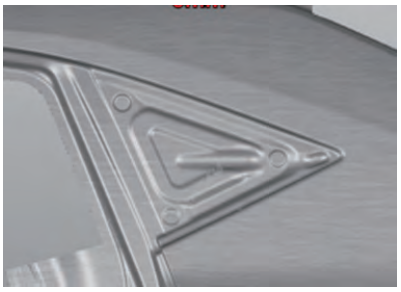


图 26. 修改后经产品设计部门确认可接受的产品造型

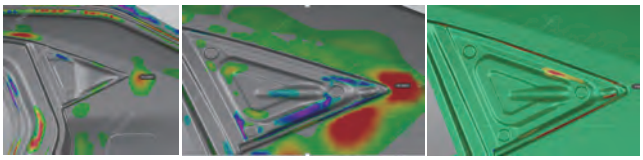


图 27. 反包的效果分析

根据起皱的状态和整形变形的 CAE 分析对整形造型进行了多次分析和优化（图 25），并经产品设计部门确认，确认产品造型可以修改为图 26。

但是，CAE 分析的结果，整形后除了开、暗裂，变形严重，从整形结果来看，只要有任何撕裂，对面品评价都是无效的。所以仍然不理想。如图 27。

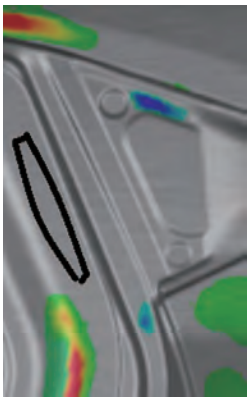


图 28. 门洞废料区增加一段凹筋

经反复分析，整形后起皱和开裂都不能取得好的效果。要获得好的结果，必须降低反包的高度来减少多料和降低整形开裂风险。降低反包又会增大拉延变形。根据前面的分析，决定在拉延门洞段增加一段凹筋来减少多料。凹筋长度和位置控制好，是可以消除对周边产生的影响的。如图 28。

经 CAE 分析，通过增加凹筋，反包高度由之前的 12mm 降低到 7 ~ 8mm。很遗憾还是有点整形开裂，整形变形也还偏大，但是已经看见希望了。图 29。

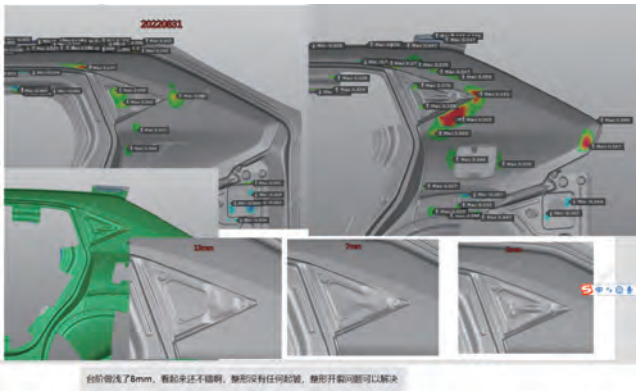


图 29. 增加凹筋后的 CAE

继续对拉延反包细节进行优化（图 30），修改细节，改善整形较大段的反包造型，终于获得了一个比较理想的结果。图 31。

经过优化，整形最大变形深度在 CAE 无法模拟强压的条件下，模拟出来的结果的变形范围不大，变形程度不深，

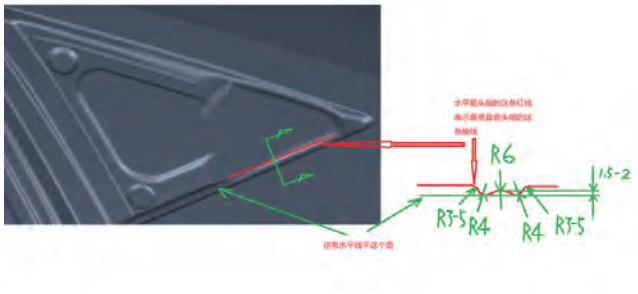


图 30. 反包优化方案

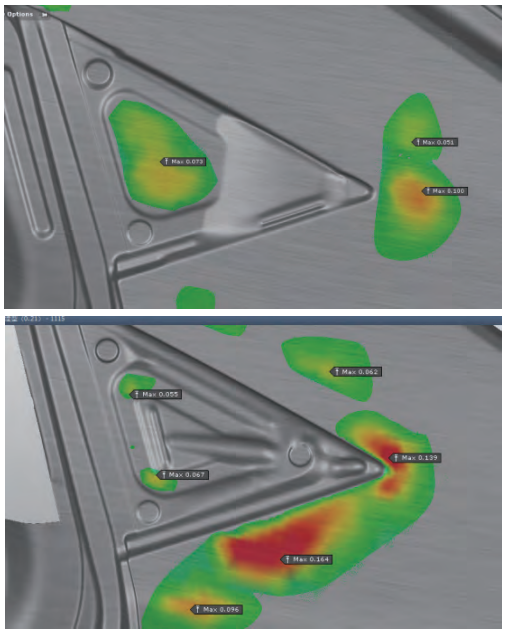


图 31. 最终优化结果

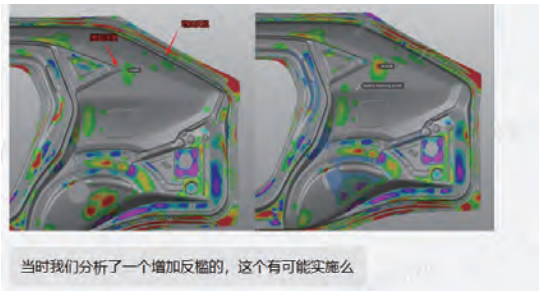


图 32. 尾门段增加一段反包的对策介绍

最大深度 0.16。按以往经验，这一变形在实际模具上有压料板强压之后变形状态将会比较理想。

特别提一下，在分析过程中我们也有过以下对策思路，即在尾门段拉延件附近增加一段反槛造型。如图 32。增加后可以增大三角窗区域的拉应力，改善变形。由于此时模具已经在调试中，模具已定型，已不可能对模具进行这么大的更改，这一对策不作为解决问题的对策思路。但是这一对策在工艺分析阶段是有一定意义的，也是解决变形的一个有意义的思路。

还有一个非常有意义的思路是，在工艺分析阶段在尾门段产品线外侧增加一个工艺补充包，这个对策在工艺分析阶段也是一个有一定意义的对策。以上两个解决变形的对策都是属于模具制造前对策，模具一旦出来了，基本没办法使用这两个对策了。

解决外板件疑难变形的思路方法总结

按对策的难易程度分类

基于侧围三角窗变形的对策方案过程，可以总结出解决问题的对策三个层次：

直接处理层次：基于钳工技术，采用钳工手段对模具进行调试，改善和消除变形的技术方法。这一方法包括侧围三角窗变形对策中的对策一和对策二，基本不涉及对模具的修改，所以说属于直接处理的层次。

对策一的目的是通过检查和分析模具和冲件状态、检查分析当前参数是否合适，确保按模具研配和调试的步骤和技术要求一步步做好做实，排出任何研配和调试失误的可能。如果工艺没问题，模具正常，变形是可以消除的。对策二的目的是在某些变形无法通过对策一的方法消除的前提下，通过后工序对变形区施加强压进行压平来改善或消除变形。通过强压整平变形的对策对很多轻微变形都是可以改善的，比如侧围 B、C 柱上的变形。对策的有效性由变形区是弹性变形还是塑性变形决定。

有限修改模具局部的层次：这一层次基于工艺分析，对模具局部进行少量修改，如加一段拉延筋、修改小范围的局部造型等，目的是在不改变工艺的前提下修正工艺设计的一些不足或失误。包括侧围三角窗变形对策中的对策三、对策四和对策五。

对策三、四、五本质上都是通过改善应力状态来改善变形。对策三的目的是通过修改相邻面的高度差和改善相邻面的过渡来改善应力状态，改善和消除变形。对策四的目的是通过抬高尖角面高度，改变区域应力状态，将变形区转移到内板区。对策五的目的是通过增加拉延筋，加强材料流入的锁止，控制材料流入，从而改变局部应力状态来改善和消除变形。增加拉延筋或加强面压料后，局部单元短轴方向的压应力减小或者变成拉应力。

改变局部工艺的层次：前面两个层次的对策都是属于保守维修的对策。尤其是第一层次的对策，基本不动模具。第二层次的对策动了模具也是在废料区或者后序可以恢复造型的小范围局部有限改动，不涉及局部成型工艺的改变。第三层次的对属于激进的、风险相对较高的对策，实在前两个层次的对策无效的前提下不得已采取的对策，已经修改了局部的成型工艺，不再是保守维修。如果用人治病来比喻，第一层次就是简单吃点药就能治好病，第二层次就是住几天院、打几天针就能治好病，第三个层次就是开刀做手术。三个层次的对策，风险一级级加大，难度一步步提升。

对策六改变了坯料形状、改变了产品造型，属于局部造型、工艺都改变的对策。对策七采用二次拉延，无论如何分解拉延过程，都是对工艺的改变。对策八由拉延的凹陷状态改为凸包状态，有应力的改变，主要的还是工艺的改变，因为局部拉延造型、触料顺序都改变了。

按对策的直观感觉分类

如果不这样进行对策分层，我们还可以把侧围三角窗的对策按直观感觉分类为校正（对策一）、矫正（对策二）、修正（对策三、五）、转移（对策四）、改产品（对策六）、分步（对策七）、反拉（对策八）等对策。

调试校正：校正就是校正研配、调试等工作失误、不足。如果是研配、调试失误或者不足造成的变形就可以消除。校正针对的包括模具型面不良、研配不良、参数设定不良、通气不良。型面不良如凸模表面有凸点、凹坑、凸痕等，模具表面有杂质、油污等。研配不良如压边研配不良造成局部有些地方材料流入偏多有些地方偏少形成局部扭曲、刚性不足变形、触料不同步造成的变形，强压面压不住等。参数设定不良如压边圈顶起高度不合适造成型面区多料、拉延过程变形、进料过多材料没拉开变形等。通气不良如排气不良引起

的变形，多发生于顶篷和发动机盖外板。

变形矫正：矫正就是通过对变形进行矫正提高面品质量。一般用于变形不大的拉延变形和后序整形产生的变形的矫正。拉延工序已很难再改善的变形，通过在后序模具压料面对变形区施加强压整平变形。整形有时候也会产生一些变形，在本工序已难以改善的情况下也可以利用后序强压矫正变形。但是这一方法对于变形性质属于弹性形变的变形效果很差。

局部工艺修正：修正就是对模具某些局部不良的地方进行修正，改善、消除变形。包括修正回弹消除变形、修正应力急变区域的应力状态消除变形，修正压边力使材料拉开消除变形，修正坯料解决料多或不足引起的变形，修正局部工艺设计的一些小失误造成的变形如触料不良引起的变形、受附近成型拉扯引起的变形等。

转移变形区：转移就是通过一些手段将变形区域进行转换，换个可以接受的地方发生。小范围的转移变形区是可以做到的。一般可以考虑将变形区转移到内板区或者废料区，避免对 A 面品质的影响。

修改产品造型：这是在工艺技术上已没有办法的情况下，对产品造型进行局部更改以达到更改局部工艺消除变形的方法。这一方法一般用在工艺分析阶段。如果车型造型已经定型，要修改覆盖件的造型就不太容易了。

分步成型：分步就是将一步成形改为两步或多步，达成拉延变形不大、后序通过压料控制变形，来获得较好面品质量的一种方法。和修改产品造型一样，这也属于对局部工艺的大改，实施难度较大，但是实施上不需要修改产品最终造型，不受制于产品设计部门是否接受。

反拉成型：这一方法和改产品造型、分步成型一样，也是属于局部工艺大改的方法。这一方法技术难度不小，需要反复 CAE 分析和修正对策细节。应该说这属于比较极端的对策，就是本来我要做成凹的，但我先把他做成凸的或者本来要做成凸的先把他做成凹的，再通过后序反向整形整回来。一般用于对造型进行正向成型困难极大的情况下。这一方法由于拉延反拉，整形需要整回来，可能存在某个部位整形线长不足难以解决、或者整形困难等。反拉也可以归结为分步范畴。

上面讨论的都是属于可用于事后维修的对策，前面也介绍了两种不适用于事后维修的对策，这两种对策可以归类于上述分类的第二层次和修正法。

结束语

上面介绍的对策思路，不管是对于工艺分析阶段还是事后维修阶段，也不管笔者在上述侧围问题的解决过程中是否达成目的，都是非常有益的。目的是抛砖引玉，为各位同行拓展解决技术问题的思路。作为工程师，技术应该体现在尽早发现和解决问题上，而不是体现在模具进入调试阶段后再解决问题上。在工艺分析阶段预见性的最大限度的发现问题，解决问题，防止问题产生是工程师应该努力的终极目标。一旦问题已出现，就算能解决，也会增加成本。

上述侧围变形问题的对策过程也提示了一个非常重要、目前还无法解决的问题：CAE 的失真。在越来越依赖电脑模拟分析的今天，CAE 的失真对汽车模具的品质、对产品的质量有重大的影响。另外 CAE 无法进行局部加强压的成形模拟，也是当前 CAE 的一个非常大的缺陷。因为这两个不足的存在，必须依靠工程师的经验和充分利用软模件，仔细观察和分析，尽可能早的预见和发现问题并指定对策。MFC

参考文献

[1] 李众 . 侧围外板角窗面品生产可靠性提升 [J]. 锻造与冲压 , 2022

[2] 王井，郭道树，刘子清 . 汽车门把手变形解决方案 [J]. 模具制造 , 2021（4）