

基于 Autoform Sigma 的汽车门内板生产稳定性与材料性能的关系

孙为朋, 孙明东, 陈伟华, 刘 郁, 刘继忠, 李兴国

(一汽-大众汽车有限公司 青岛分公司, 山东 青岛 266217)

摘要: 针对汽车覆盖件冲压生产过程中发生的缩颈开裂频率高、稳定性低等问题, 通过 Autoform Sigma 对 4 套批量生产的门内板拉伸工艺开展了稳定性分析, 将材料屈服强度、抗拉强度、 r 值和摩擦因数作为噪声变量, 探究了参数波动对成形结果的影响。通过对比 4 套门内板生产实践结果, 验证了有限元分析模型的有效性, 研究发现, 材料性能参数在公差内的波动对成形结果有显著影响。对 4 家钢厂的卷料进行取样分析, 统计分析了各厂家材料的屈服强度、抗拉强度、 $r_{90/20}$ 值、 $r_{m/20}$ 值和 n_{10-20} 值的稳定性。结果表明: 仅控制材料性能规格上、下限不能反映材料的稳定性水平, 虽然所有样本均处于公差之内, 但是部分指标的过程性能指数 P_{pk} 小于 1, 过程能力较差, 需要采取改善措施。基于此, 提出了一种材料性能稳定性的管控方法, 适用于主机厂管理, 有助于提升冲压生产过程稳定性。

关键词: 汽车门内板; 冲压工艺; 缩颈开裂; 生产稳定性; 材料性能; 过程性能指数 P_{pk}

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.02.011

中图分类号: TG386 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 02-0085-09

Relationship between production stability and material properties on automobile door inner panel based on Autoform Sigma

Sun Weipeng, Sun Mingdong, Chen Weihua, Liu Yu, Liu Jizhong, Li Xingguo
(Qingdao Branch, FAW-Volkswagen Automobile Co., Ltd., Qingdao 266217, China)

Abstract: For the problems of high frequency for necking and cracking and low stability in the stamping production process of automobile panels, the stability analysis on the drawing process of four sets of mass-produced door inner panels was conducted by Autoform Sigma, and taking material yield strength, tensile strengths, r value and friction coefficient as noise variables, the influences of parameters fluctuation on the forming results were researched. Then, the effectiveness of the finite element analysis model was verified by comparing the production practice results for four sets of door inner panels, and it was found that the fluctuations of material property parameters within the tolerance had a significant effect on the forming results. Furthermore, the stabilities of yield strength, tensile strength, $r_{90/20}$ value, $r_{m/20}$ value and n_{10-20} value for material of each manufacturer were statistically analyzed by sampling and analyzing coils from four steel suppliers. The results show that the method of only control of upper and lower limits of material performance specification cannot reflect the stability level of material. Although all samples are within the tolerance, the process performance index P_{pk} of some indicators is less than 1, the process capability is poor, and the improvement measures are needed to carry out. Thus, based on this, a control method for the stability of material performance is proposed, which is suitable for the management of main factories and helps to improve the stability of stamping production process.

Key words: automobile door inner panel; stamping process; necking and cracking; production stability; material properties; process performance index P_{pk}

如何提高汽车覆盖件批量生产的稳定性, 是冲压生产部门非常关注的问题。尤其是在新车型模具投产的产量爬坡阶段和批量生产生命周期的初期阶段, 缩颈开裂的问题经常发生, 需要对模具进行长

时间的调整和优化才能改善该问题。即使在量产阶段, 缩颈开裂问题还会时常发生, 并且这种缩颈开裂缺陷的发生具有非常高的随机性。目前, 主机厂冲压生产线的生产节拍一般能达到 $15 \sim 17 \text{ 次} \cdot \text{min}^{-1}$, 一旦出现缩颈开裂缺陷, 如果不能及时发现则会造成大量的零件报废; 如果缺陷较为隐蔽, 未被及时发现而被安装在车身上, 则会造成车辆总成或车身的报废。此外, 如果在生产过程中调整解决该问题需

收稿日期: 2022-04-21; 修订日期: 2022-07-20

作者简介: 孙为朋 (1990-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: sunweipeng1949@163.com

要花费很长时间,则会造成生产线的停机。上述情况均会造成大量的成本浪费,因此,研究提高汽车覆盖件批量生产的稳定性的技术方案至关重要。

在主机厂生产的汽车覆盖件冲压件中,门内板和侧围的缩颈开裂问题最为常见。因为此类零件不但造型复杂、拉延深度大,而且表面质量和尺寸精度要求高,所以,要求零件在拉延成形时充分变形,这就容易造成局部区域变形量过大,接近成形极限。在实际生产环境中,板料性能、润滑条件、设备压力、模具光洁度甚至温度等均对拉延成形结果有一定的影响。这些因素在一定范围内处于波动状态,波动的累加或组合可能会造成零件局部区域变形超过成形极限,造成缩颈开裂缺陷。从成形工艺的角度分析,应当增大冲压模具的成形窗口,使之能够适应过程因素的波动;从过程管控的角度分析,应当对影响成形的过程因素进行识别和监控,并采取相应的措施以减小波动。

增大模具的成形窗口是一个系统性的工程,需要产品设计、模具设计、模具调试优化和批量生产过程控制的协调配合。尤其是在产品设计和模具设计阶段,如果一些产品特征或模具工艺(如产品圆角、工艺补充、压边圈形状、板料形状等)设计不合理,则会造成冲压成形窗口过小,无法适应批量生产条件的波动,导致缩颈开裂的情况频发。在现代化冲压生产设计环节,数值模拟通常被用来提前验证产品成形工艺、模具设计的可行性和预测产品可能发生不良缺陷的位置及其起因,为设计和生产环节提供理论指导和数据参考。但是,对于大变形比、复杂形状冲压件的批量生产工艺来说,即使单次数值模拟结果显示成形性良好、无开裂风险,但是在实际调试中发生开裂的案例依然屡见不鲜。然而这一问题在过去往往只被简单的归因于模拟状态与实际状态的差异。

Autoform Sigma 为集成在 Autoform 软件中的一个分析模块,该模块通过将不可控的生产过程变量作为噪声变量,将可控的生产过程变量作为设计变量,采用拉丁超立方自动设计试验并分析,得到各因素对成形结果的影响,从而进行成形稳健性分析和优化。相比于传统的有限元模拟的优化方法(设计试验建立响应面模型,再进行目标优化的方法^[1]),Autoform Sigma 模块的设置更为便捷易用,更适于工程使用。

已有学者使用 Autoform Sigma 模块解决实际工程问题。在产品阶段,武方方等^[2]和 Tapipala S

等^[3]利用 Autoform Sigma 模块对产品进行可制造性分析,将摩擦因数和材料各项性能设置为噪音变量,根据最大减薄率、最大失效和起皱分析结果,通过修改产品造型,增大了成形窗口。除了更改产品造型,还可以考虑提高材料牌号以增大成形窗口^[3-4],虽然提高材料牌号会增加材料成本,但这一措施可减少报废、减少冲压线停机时间,所以,最终优化方案需要根据整体经济性核算结果进行决策。在模具设计阶段,田永生等^[5]使用 Autoform Sigma 模块,以拉延筋系数和压边力为设计变量、以主应变最小为目标函数,解决了汽车后顶横梁初次模拟过程中出现的开裂和起皱问题。在模具调试阶段,张博凡等^[6]和杜武昌^[7]运用 Autoform Sigma 模块将可控变量作为设计变量,可快速识别具体缺陷的主要影响因素,从而确定调试方案,减少试错次数,缩短调试时间。Palmieri M E 等^[8]利用 Autoform Sigma 模块将压边力作为设计变量,将摩擦因数和屈服强度作为噪声变量进行模拟分析,根据结果建立响应面模型,以成形性为优化目标,建立了压边力和屈服强度的关系曲线。

根据上述文献分析,前人的研究多集中于利用 Autoform Sigma 解决在模具设计和前期调试中遇到的短期问题,未涉及关于如何在设计阶段提高模具批量生产的长期稳定性。在批量生产阶段,Brix P 等^[9]利用 Autoform Sigma 研究了材料性能波动对批量阶段的尺寸波动的影响,并通过模拟数据与批量数据的对比验证了有限元模型的有效性。但关于利用 Autoform Sigma 分析开裂缩颈成形窗口,以及稳健性分析结果与批量生产实际稳定性的对比分析研究鲜见于文献。因此,本文利用 Autoform Sigma 分析研究已投入批量生产的 4 套门内板的工艺稳定性,将所得分析结果与批量生产实际状态进行对比分析,验证 Autoform Sigma 的分析结果,并发现材料性能在公差范围内的波动对成形结果有显著影响。

多项研究结果表明,摩擦因数对零件的缩颈开裂问题有显著影响,可通过抛光模具或增加涂油量优化缺陷^[6-7,10-11]。也有研究发现,材料厚向异性系数 r 对缩颈开裂有显著影响,可通过材料供应商优化材料 r 值解决开裂问题^[10]。本文研究结果表明,对材料性能的波动进行分析和控制,对提高生产的稳定性是非常有必要的。一般来说,主机厂关注的材料性能包括屈服强度、抗拉强度、伸长率、厚向异性系数 r 、应变硬化指数 n 、粗糙度。但是,通常主机厂对材料性能的管控仅限于识别材料的性能指

标是否存在超出公差异常情况。而在当下质量和生产效率要求持续提高的背景下，仅依据公差对材料性能进行控制的方法过于单一和无效。所以，本文通过对真实的批量供货的材料性能的波动情况进行统计分析，展现现阶段主流钢厂的材料性能稳定性的真实情况，为主机厂生产过程稳定性提升明确方法，为钢厂材料质量控制提升明确方向。

1 Autoform 模型设置

1.1 产品介绍

本文选择批量生产车型的 4 种门内板进行模拟分析，4 种门内板的三维模型如图 1 所示，1#~4#门内板由材料供应商 1~材料供应商 4 分别提供，产品主要尺寸特征见表 1。

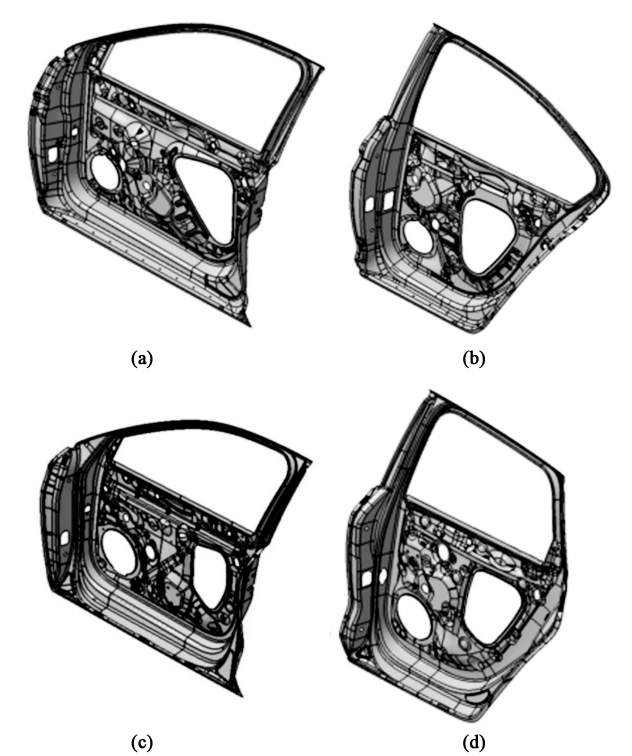


图 1 门内板产品图
(a) 1# (b) 2# (c) 3# (d) 4#

Fig. 1 Product diagrams of door inner panels

表 1 门内板产品主要尺寸特征 (mm)

Table 1 Main dimension characters of door inner panel products (mm)

门内板	1#	2#	3#	4#
高度	1094	1076	1068	1044
宽度	1213	1145	1188	324
厚度	321	320	322	993
板料厚度	0.7	0.7	0.7	0.7

1.2 材料模型

所选门内板使用的材料为深冲冷轧钢，牌号均为 CR4，其性能参数如表 2 所示，其中， $r_{90/20}$ 和 $r_{m/20}$ 分别为塑性变形为 20%时的垂直方向厚向异性系数和各方向的平均厚向异性系数， $n_{10\sim 20}$ 为在 10%~20%塑性变形范围内的应变硬化指数。

表 2 CR4 钢的性能参数

Table 2 Property parameters of CR4 steel

参数	屈服强度	抗拉强度	伸长率	厚向异性系数		应变硬化指数 $n_{10\sim 20}$
	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	$A/\%$	$r_{90/20}$	$r_{m/20}$	
数值	140~180	270~330	≥ 39	≥ 1.90	≥ 1.60	≥ 0.20

1.3 条件设置

模拟采用 Autoform 软件，产品模型均为通过正式验收的模型，工艺补充、压边力和拉延筋强度均为经过多次优化之后的最终方案。拉延筋设置采用具有整平功能的 3D 实体筋和虚拟筋结合的方式。其中，在压边圈闭合过程中使用实体筋，压边圈闭合后使用虚拟筋。这样处理既可以获得比较准确的收料线模拟结果，又能节省模拟计算时间。摩擦因数设置为 0.15^[12]。

在 Sigma 模块中，将材料模型中的屈服强度 R_{eL} 、抗拉强度 R_m 、 $r_{m/20}$ 值、摩擦因数设定为噪声变量，如表 3 所示。其中，摩擦因数相关参数根据经验设置，屈服强度和抗拉强度值的上限和下限以及 $r_{m/20}$ 值的下限根据表 2 要求设置， $r_{m/20}$ 值的上限根据统计的 $r_{90/20}$ 值的最大值按比例换算而来，屈服强度、抗拉强度和 $r_{m/20}$ 值的标准差为 1#门内板的实际统计数据。1#~4#门内板材料标准差统计结果如表 4 所示。

表 3 噪声变量设定

Table 3 Settings of noise variables

参数	摩擦因数	抗拉强度/MPa	$r_{m/20}$	屈服强度/MPa
最小值	0.1275	270	1.60	140
最大值	0.1725	350	2.73	180
标准差	0.0075	6.11	0.24	6.93

表 4 材料性能标准差统计结果

Table 4 Statistical results of standard deviation for material properties

门内板	1#	2#	3#	4#
$r_{m/20}$	0.24	0.21	0.16	0.08
抗拉强度	6.11	4.74	5.24	2.40
屈服强度	6.93	5.50	4.91	2.41

2 模拟结果分析

下面以 1# 门内板为例展开分析。

2.1 成形极限图

如图 2 所示, Sigma 模式的分析结果是在名义模式 (Nominal 模式) 的基础上叠加“Sigma 结果”, 这部分代表噪声变量在设定范围内发生波动时的成形结果。在名义模式下, 仅窗框内工艺孔处于破裂风险区以内, 其他区域均处于安全范围以内, 成形裕度大于 20%。从图 2 中可以看出, “Sigma 结果” 显示部分区域超出了成形极限, 意味着在特定条件下, 零件将会发生破裂, 这与生产实践是一致的。

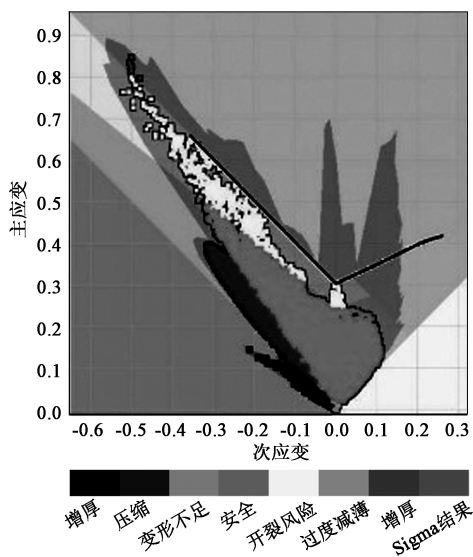


图 2 1# 门内板的成形极限图

Fig. 2 Forming limit diagram of 1# door inner panel

2.2 最大失效值

按照最大失效值为 0.9 的指标评价, 超过 0.9 认为实际生产中会发生开裂。如图 3 所示, 在名义模式设置下, 未发现开裂区域。但在 Sigma 模式下, 发现存在除工艺孔以外的 6 个点 (1~6) 的最大失效值超过 0.9, 如图 4 所示。1~6 点分别为顶部 B 柱窗框、B 柱侧面窗框和门锁、窗框内 A 柱下角、A 柱侧面窗框和铰链。在生产实践中, 这些点处也曾发生缩颈开裂问题。其中, 1、4、5 点可通过优化拉延筋、增加进料量优化解决; 2、3、6 点由于临近区域同时存在起皱问题, 制约缩颈开裂的优化效果, 当生产条件发生变化时, 缩颈开裂仍偶有发生, 如图 5 所示。

2.3 起皱分析

当起皱数值超过 0.02 时则认为有起皱风险, 超

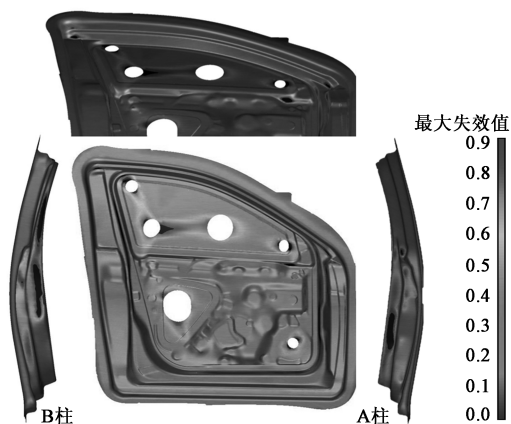


图 3 1# 门内板名义模式下的最大失效值分布

Fig. 3 Maximum failure value distribution of 1# door inner panel in Nominal mode

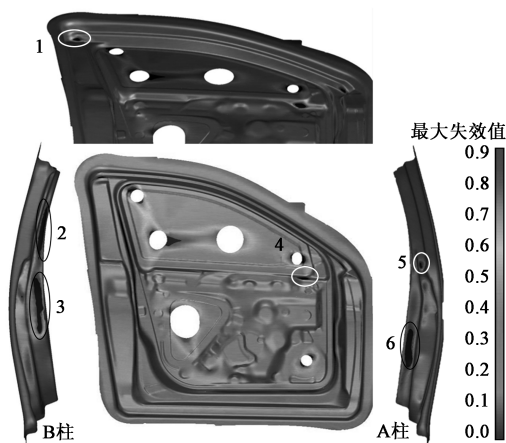


图 4 1# 门内板 Sigma 模式下的最大失效值分布

Fig. 4 Maximum failure value distribution of 1# door inner panel in Sigma mode

过 0.03 时则认为发生起皱。如图 6 所示, 在名义模式下, 有两处起皱点 (图 6 中圈示部分) 位于工艺补充的废料区域, 经修边工序后切除。但在 Sigma 模式下, 新增 3 处起皱点 (图 7 中框示部分) 位于产品上, 修边后无法切除, 如图 7 所示。此外, 原有的 2 处起皱点区域变大, 延伸到产品上。起皱缺陷的产生, 不仅影响产品质量, 还限制了开裂点的调整范围。为解决开裂问题, 必须减小压边圈进料阻力, 这势必会加重起皱缺陷, 进而造成调试和批量生产阶段成形窗口过小的问题。

2.4 过程能力指数 C_{pk}

过程能力指数是指过程实际表现满足产品质量标准要求 (规格范围等) 的程度。Sigma 模式的 C_{pk} 分析结果如图 8 和图 9 所示。在图 8 中, 当 $C_{pk} \geq 1.33$, 过程可靠, 对应的废品率不超过 0.004%; 当 $1.00 \leq C_{pk} < 1.33$, 过程需要控制, 废品率为 0.004%~0.140%; 当 $0.67 \leq C_{pk} < 1.00$, 过程不可

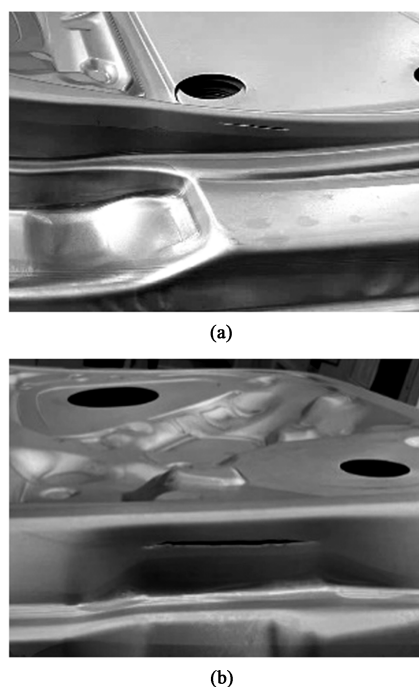


图5 1#门内板生产过程的开裂现象

(a) 2点 (b) 6点

Fig. 5 Cracking of 1# door inner panel during production process

(a) Point 2 (b) Point 6

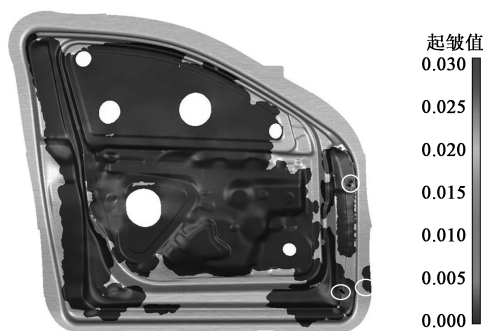


图6 1#门内板名义模式下的起皱值分布

Fig. 6 Wrinkle value distribution of 1# door inner panel in Nominal mode

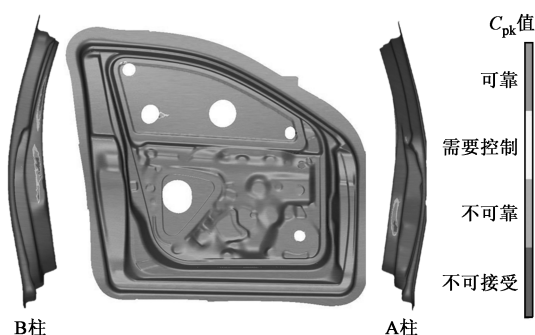


图7 1#门内板 Sigma 模式下的起皱值分布

Fig. 7 Wrinkle value distribution of 1# door inner panel in Sigma mode

靠, 废品率达到 0.14%~2.25%; 当 $C_{pk} < 0.67$, 过程不可接受, 废品率将超过 2.25%。由图 8 可知,

图 4 中的 6 个点的开裂区域的 C_{pk} 值均小于 0.67, 会产生大量废品。根据图 9 可知, 1 点处 C_{pk} 为 0.539, 废品率 5.3%; 2 点处 C_{pk} 为 0.480, 废品率为 8.46%; 3 点处 C_{pk} 为 0.464, 废品率为 8.21%。

图8 1#门内板 Sigma 模式的 C_{pk} 分析结果 (离散)Fig. 8 C_{pk} analysis results of 1# door inner panel in Sigma mode (Discrete)图9 1# 门内板 Sigma 模式的 C_{pk} 分析结果 (连续)Fig. 9 C_{pk} analysis results of 1# door inner panel in Sigma mode (Continuous)

2.5 影响因素分析

进一步分析影响图 9 中 1、2、3 点处的稳定性的因素, 如图 10 所示, 抗拉强度和 $r_{m/20}$ 值对成形结果有明显影响, 尤其为 2 点和 3 点处, 抗拉强度对最大失效的影响程度分别为 40% 和 33%, $r_{m/20}$ 值对最大失效的影响程度分别为 17% 和 20%。结合技术经验, 在实际生产过程中, 根据 $r_{m/20}$ 值和抗拉强度的不同, 设定了材料的分类标准, 要求材料供应商对同一分组的材料进行集中供货, 可以减少生产过程中的波动。

图 11 为拉延进料量的影响因素及 1#门内板四周各处的拉延进料量的变化情况。可见, B 柱的收料线波动情况最大, 变化量达到 33.21 mm, 影响收料线的主要因素为抗拉强度和 $r_{m/20}$ 值。从上述分析可以看出, 材料性能的变化对成形结果的影响很大, 因此, 识别并分析批量生产过程中材料性能的稳定性是非常有必要的。

2.6 Sigma 分析结果与实际生产结果对比

图 12~图 14 分别为 2#、3#和 4#门内板的名义

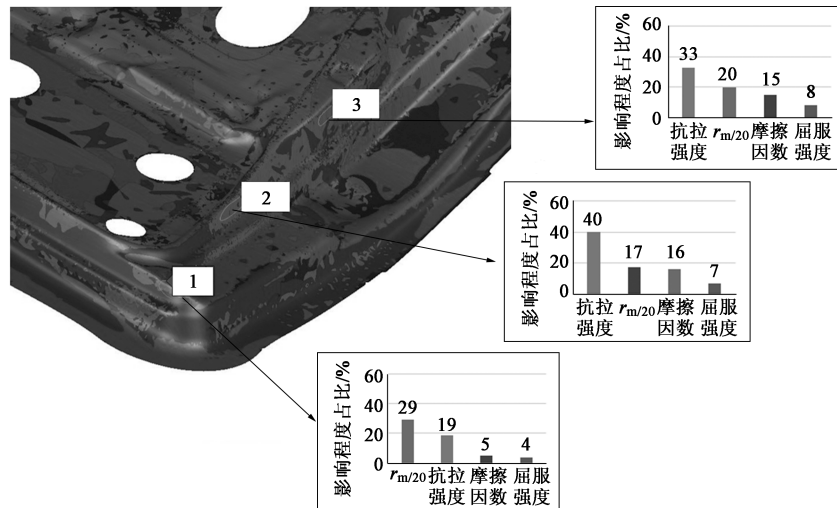


图 10 最大失效值的影响因素

Fig. 10 Influence factors of maximum failure value

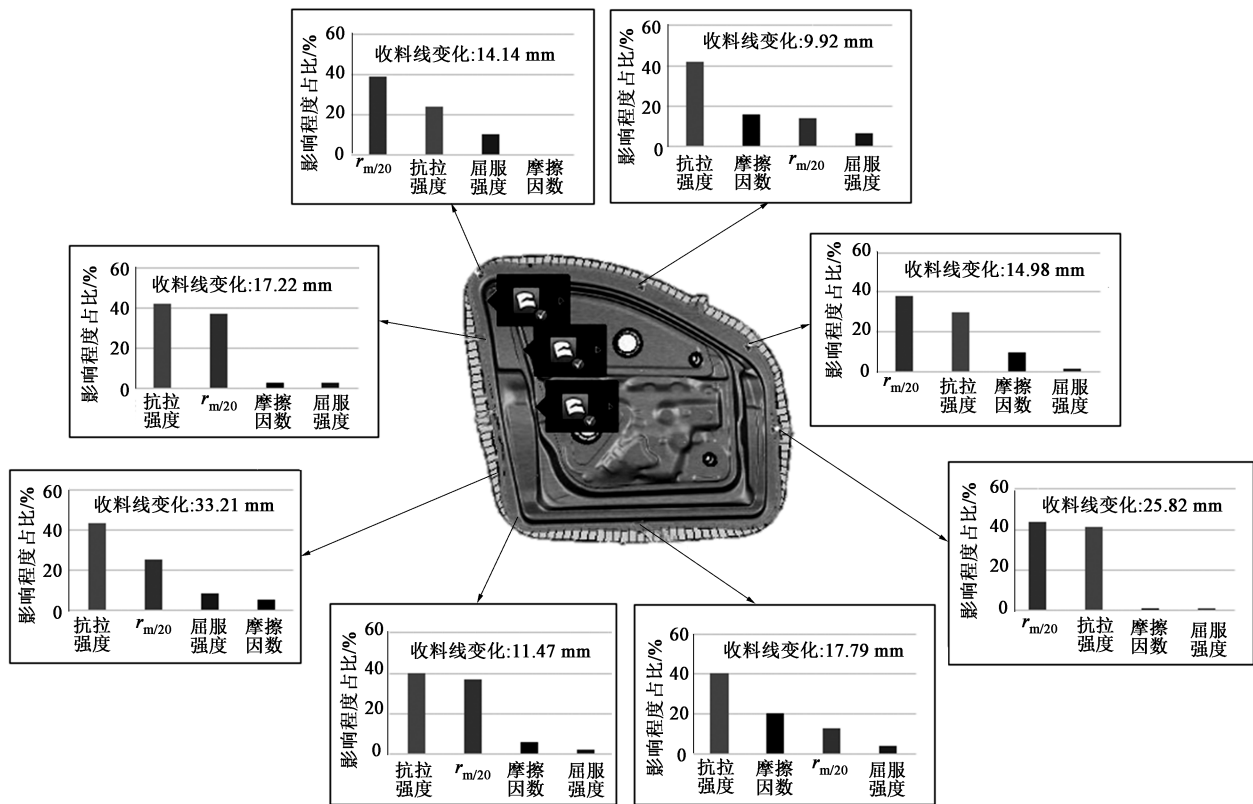


图 11 收料线的影响因素

Fig. 11 Influence factors of draw-in line

模式分析结果与 Sigma 模式分析结果对比图。由图 12~图 14 可以看出,即使在名义模式下未见开裂点,在 Sigma 模式下也可能发现开裂点。表 5 汇总并对比了 Sigma 模式下的分析结果与实际产品状态,由表 5 可以看出, Sigma 模式下的分析结果与实际生产结果有较好的对应性。在所有开裂点

中,有一部分通过减小压料面进料阻力或增加凸凹模圆角半径等措施可以得到优化,如 1#门内板的 1、3 和 5 点,2#门内板的 1'、2' 和 3' 点,3#门内板的 2''、3'' 和 6'' 点。另一部分开裂点,如 1#门内板的 2、4 和 6 点,2#门内板的 4' 点,3#门内板的 1''、4'' 和 5'' 点,4#门内板的 1'''、2''' 和 3'''



图 12 2#门内板最大失效对比
(a) Nominal 模式下失效区域 (b) Sigma 模式下失效区域
Fig. 12 Comparison of maximum failure for 2# door inner panel
(a) Failure area in Nominal mode (b) Failure area in Sigma mode

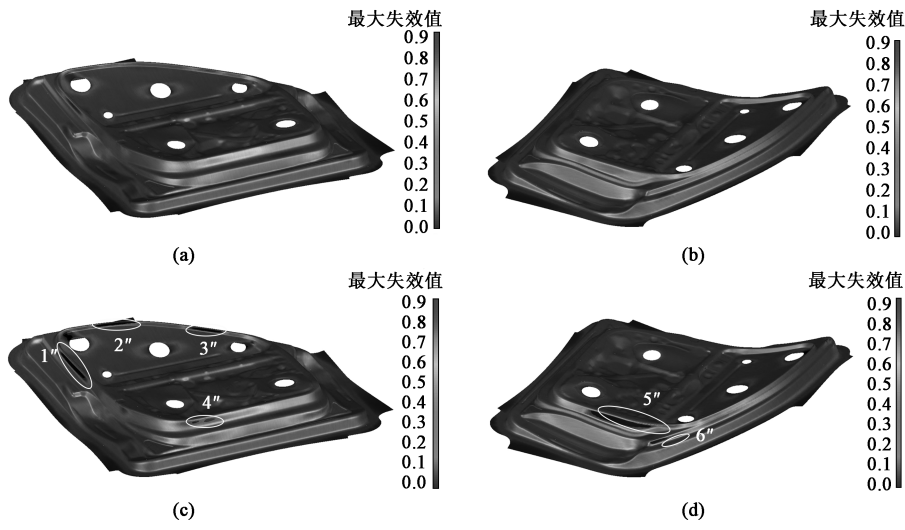


图 13 3#门内板最大失效对比
(a) Nominal 模式下 B 柱侧失效区域 (b) Nominal 模式下 A 柱侧失效区域
(c) Sigma 模式下 B 柱侧失效区域 (d) Sigma 模式下 A 柱侧失效区域
Fig. 13 Comparison of maximum failure for 3# door inner panel
(a) Failure area of B pillar side in Nominal mode (b) Failure area of A pillar side in Nominal mode
(c) Failure area of B pillar side in Sigma mode (d) Failure area of A pillar side in Sigma mode

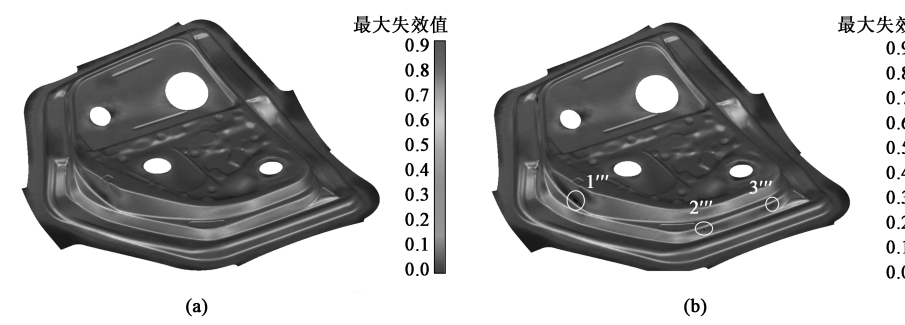


图 14 4#门内板最大失效对比
(a) Nominal 模式下失效区域 (b) Sigma 模式下失效区域
Fig. 14 Comparison of maximum failure for 4# door inner panel
(a) Failure area in Nominal mode (b) Failure area in Sigma mode

点，由于受到附近区域起皱点的影响，未能彻底消除，当外部条件发生波动时仍会偶尔发生，需要经常调整生产过程中的压力等参数，以适应外部条件的变化。

表 5 模拟结果与实际结果对比

Table 5 Comparison of simulation and actual results

门内板	位置	名义模拟	Sigma 模拟	调试阶段	批量阶段
1#	1	未开裂	开裂	开裂	优化消除
	2	未开裂	开裂	开裂	偶有发生
	3	未开裂	开裂	开裂	优化消除
	4	未开裂	开裂	开裂	优化消除
	5	未开裂	开裂	开裂	偶有发生
	6	未开裂	开裂	开裂	偶有发生
2#	1'	未开裂	开裂	开裂	优化消除
	2'	未开裂	开裂	开裂	优化消除
	3'	未开裂	开裂	开裂	优化消除
	4'	未开裂	开裂	开裂	偶有发生
3#	1''	未开裂	开裂	开裂	偶有发生
	2''	未开裂	开裂	开裂	优化消除
	3''	未开裂	开裂	开裂	优化消除
	4''	未开裂	开裂	开裂	偶有发生
	5''	未开裂	开裂	开裂	偶有发生
	6''	未开裂	开裂	开裂	优化消除
4#	1'''	未开裂	开裂	开裂	偶有发生
	2'''	未开裂	开裂	开裂	偶有发生
	3'''	未开裂	开裂	开裂	偶有发生

3 材料批量性能统计分析

4 种门内板所用材料牌号均为 CR4 钢，其性能要求如表 2 所示。目前，这些材料分别来自 4 个不同的材料供应商，在生产实践中发现，各材料表现出不同的波动性。为了进一步提高批量生产的稳定性，本研究采用统计分析的方式对门内板 CR4 钢材料进行了分析，总样本数超过 1300 个，结果如表 6 所示。

表 6 CR4 钢板料性能统计分析

Table 6 Statistic analysis of CR4 steel material properties

参数		供应商 1	供应商 2	供应商 3	供应商 4
屈服强度	最大值	177	177	177	165
	最小值	141	144	155	153
	平均值	161. 8	162. 2	164. 8	158. 1
	P_{pk}	0. 876	1. 077	1. 033	2. 183
抗拉强度	最大值	313	308	318	290
	最小值	280	275	293	279
	平均值	297. 7	294. 6	301. 2	284. 6
	P_{pk}	1. 513	1. 732	1. 985	2. 026
$r_{90/20}$	最大值	3. 12	3. 40	3. 10	2. 35
	最小值	1. 90	2. 20	2. 10	1. 99
	平均值	2. 523	2. 684	2. 597	1. 990
	PPL	0. 850	1. 236	1. 422	0. 962
$n_{10\sim20}$	最大值	0. 24	0. 24	0. 24	0. 243
	最小值	0. 22	0. 22	0. 21	0. 233
	平均值	0. 231	0. 232	0. 226	0. 238
	PPL	2. 155	1. 686	1. 579	4. 494

表 6 中统计了屈服强度、抗拉强度、 $r_{90/20}$ 值、 $n_{10\sim20}$ 值的真实试验结果，分别统计了这些变量的最

大值、最小值、平均值和过程性能指数 P_{pk} 。由于 $r_{90/20}$ 值和 $n_{10\sim20}$ 值只规定了公差下限，因此，用 PPL 表示其下限过程性能指数。其中， P_{pk} 的计算公式如下：

$$P_{pk} = \frac{\min\{ (USL - \bar{X}), (\bar{X} - LSL) \}}{3S} \tag{1}$$

$$PPL = \frac{\bar{X} - LSL}{3S} \tag{2}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{X})^2}{k - 1}} \tag{3}$$

式中： USL 为公差上限； LSL 为公差下限； S 为样本标准差； \bar{X} 为样本第 i 个均值； x_i 为样本第 i 个数据； k 为样本数量。

4 统计结果分析

通常认为 P_{pk} 在 1.33 ~ 1.67 之间为理想状态，表示过程能力充分，技术管理能力良好，应继续维持； P_{pk} 在 1.00 ~ 1.33 之间，表示过程能力一般，技术管理能力较勉强，应设法提高； P_{pk} 在 0.67 ~ 1.00 之间，表示过程能力不足，技术管理能力很差，应采取措施立即改善； P_{pk} 小于 0.67，表示过程能力严重不足，表示应采取紧急措施和全数检查，必要时可停工整顿； P_{pk} 大于 1.67 表示过程能力过高（视具体情况而定）。

从 P_{pk} 的计算结果来看，供应商 1 的材料屈服强度和 $r_{90/20}$ 值的 P_{pk} 均小于 1，分别为 0.876 和 0.850，表明其过程能力较差，生产过程中可能存在部分产品超出公差要求，必须尽快提升其能力。根据计算，其超出公差的概率分别为 0.51% 和 0.54%。根据式（4），计算供应商 1 的屈服强度和 $r_{90/20}$ 值的相关性系数为 0.116，通常，相关性系数小于 0.300 时，认为无相关性。所以，在这里认为有 1.01% 的材料超出公差。

$$r(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var[X]Var[Y]}} \tag{4}$$

式中： $r(X, Y)$ 为 X 与 Y 的相关性系数； $Cov(X, Y)$ 为 X 与 Y 的协方差； $Var[X]$ 为 X 的方差； $Var[Y]$ 为 Y 的方差； X 与 Y 为研究的两个因素。

从上述结果可以看出，虽然在统计样本中未发现超出公差的现象，合格率为 100%，但其 P_{pk} 结果显示有 1.04% 的产品是超出公差的，应当进一步追溯供应商其超出公差的材料去向，以确认超出公

差的材料未进入工厂使用。供应商 4 的材料 $r_{90/20}$ 值的 P_{pk} 小于 1, 为 0.962, 其超出公差的概率为 0.2%, 也需要尽快提升其过程能力。

供应商 2 的屈服强度和 $r_{90/20}$ 值的 P_{pk} 分别为 1.077 和 1.236, 供应商 3 的屈服强度的 P_{pk} 为 1.033, 这些指标的 P_{pk} 处于 1.00~1.33 范围, 表明其过程稳定性较好, 但仍有提升空间, 建议与供应商协商沟通, 采取相应措施进一步提升过程能力。因为 P_{pk} 越小, 意味着波动程度更大, 材料性能出现极端情况的几率也越高, 在其他外部条件相同的情况下, 生产过程中需要调整的次数和概率也就更高, 造成的废品、返修品和生产线停机时间也相应更多。从平均值的角度看, 供应商 4 的抗拉强度和 $r_{90/20}$ 值的平均值均显著低于其他 3 家供应商, 分别较其他 3 家的最小值低 9.7% 和 21.0% 以上。而抗拉强度表征材料的成形极限, $r_{90/20}$ 值表征材料厚度方向上的变形能力, $r_{90/20}$ 值越大则抵抗变薄和起皱的能力也越大。两者均为控制成形减薄和开裂的重要指标。指标低则意味着该材料在生产使用过程中容易导致开裂, 因此, 应当作为重点, 要求供应商 4 提高其材料抗拉强度和 $r_{90/20}$ 值的均值。

5 结论

(1) 在工艺设计阶段利用 Autoform Sigma 分析, 可以识别名义模式无法发现的开裂和起皱点, Sigma 模拟结果与实际结果保持较好的一致性。本研究强调了在工艺设计阶段进行稳定性分析的意义, 尤其为起皱与开裂临近的区域, 在后期无法彻底优化消除, Sigma 模式下最大失效值小于 0.90、起皱值小于 0.03、 C_{pk} 大于 1.33, 可认为工艺稳定性合格。

(2) 模拟结果和生产实践经验表明, 材料性能在公差内的波动对成形质量有显著影响, 以 1# 门内板模拟结果为例, 材料性能波动造成的开裂废品率超过 8%。因此, 应当采用必要方式对供货材料性能稳定性进行分析和管控。

(3) 过程性能指数 P_{pk} 可以评价实际供货的材料性能稳定性水平, 研究发现, 不同供应商的供货材料稳定性差别较大, 即使本文统计样本的合格率为 100%, 但 P_{pk} 计算结果标明供应商 1 的材料有 1.04% 超出公差。因此, 建议将 P_{pk} 大于 1.33 作为控制标准。

参考文献:

- [1] 魏鑫, 王雷刚, 王钊, 等. 基于响应面法的汽车后轮罩工艺参数优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 70-77.
Wei X, Wang L G, Wang Z, et al. Optimization on process parameters for automobile rear wheel cover based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 70-77.
- [2] 武方方, 沈左军, 李健平, 等. AutoForm-Sigma 模块在汽车行业工程设计阶段的应用 [J]. 模具技术, 2020, (3): 50-53.
Wu F F, Shen Z J, Li J P, et al. Application of AutoForm-Sigma module in engineering design stage of automobile industry [J]. Die and Mould Technology, 2020, (3): 50-53.
- [3] Tatipala S, Pilthammar J, Sigvant M, et al. Introductory study of sheet metal forming simulations to evaluate process robustness [A]. Proceedings of International Deep Drawing Research Group 37th Annual Conference [C]. Ontario, 2018.
- [4] Altinel S A, Zgen S, Mutlu B, et al. A design approach for robust production in automotive body engineering [J]. International Journal of Advances on Automotive and Technology, 2017, 1 (3): 119-123.
- [5] 田永生, 邓国朝, 李梦瑶, 等. 基于 Autoform-Sigma 的汽车 A 柱内板冲压工艺参数优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 101-104.
Tian Y S, Deng G C, Li M Y, et al. Optimization on stamping process parameters of automobile A-pillar inner panel based on Autoform-Sigma [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 101-104.
- [6] 张博凡, 王增强. Autoform Sigma 模块在汽车后盖内板模具调试中的应用 [J]. 模具工业, 2014, 40 (7): 40-42.
Zhang B F, Wang Z Q. Application of Autoform Sigma in the try-out of die for automotive decklid inner plate [J]. Die & Mould Industry, 2014, 40 (7): 40-42.
- [7] 杜武昌. Sigma 稳健性分析在冲压模具调试中的应用 [J]. 模具制造, 2021, 21 (5): 21-24.
Du W C. Application of Sigma robustness analysis software in stamping die tryout [J]. Die & Mould Manufacture, 2021, 21 (5): 21-24.
- [8] Palmieri M E, Lorusso V D, Tricarico L. Robust optimization and kriging metamodeling of deep-drawing process to obtain a regulation curve of blank holder force [J]. Metals, 2021, 11 (2): 319-333.
- [9] Brix P, Liewald M, Eckstein J. Predicting springback variation and process-reliable tolerance limits of outer car-body panels by stochastic sheet metal forming simulation [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1157 (1): 012092-012100.
- [10] 姜雪燕. 基于稳健性分析的汽车侧围成形过程缺陷改进 [J]. 塑性工程学报, 2021, 27 (10): 62-69.
Jiang X Y. Improvement of defects in automobile side frame forming based on robustness analysis [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 27 (10): 62-69.
- [11] 杨秀臣, 甄华翔, 吴贺, 等. 板料预涂油对冲压件成形性能的影响 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (12): 112-116.
Yang X C, Zhen H X, Wu H, et al. Influence of pre-coated oil for sheet metal on forming performance of stamping parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (12): 112-116.
- [12] Li H P, Fan J W, Wang L H, et al. Investigation on forming process of automobile trunk side panel based on numerical simulation technology [J]. Advanced Materials Research, 2013, 634-638 (1): 2855-2860.