

超深冲 IF 钢的各向异性对前门内板冲压成形的影响

黄兴鸿, 刘崇林, 陈拥军, 李西德, 吴俊源, 刘富鑫

(广西柳州钢铁集团有限公司, 广西 柳州 545002)

摘要: 利用有限元仿真模拟软件 Autoform, 以汽车前门内板为研究对象, 以最大减薄率和最大失效值为评判指标, 通过改变材料参数条件进行模拟分析, 探讨了 DC05 超深冲钢的塑性应变比加权平均值 \bar{r} 、塑性应变比各向异性度 Δr 和落料角度 θ 对冲压成形性能的影响, 并将实物试验结果与数值计算结果相比较, 验证了方法的可靠性。结果表明: 与 Δr 相比, \bar{r} 是决定超深冲钢成形性能的主要因素; 当 \bar{r} 保持恒定时, Δr 对材料的冲压成形性能产生显著的影响, 成形性能随着 Δr 的增加先下降后升高, 当 $\Delta r=0.3\sim 0.8$ 时材料的成形性能不佳, 且 $\Delta r=0.5$ 时材料成形性能最差, 因此, 应尽量控制材料的 Δr 在 0.3 以下; Δr 越大, θ 对成形性能的影响越显著, 且成形性能与其对应方向的塑性应变比 r_θ 呈正比关系, 在 r_θ 最小的方向上成形性能最差。

关键词: 各向异性; IF 钢; 冲压成形; 塑性应变比; 落料角度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.06.009

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 06-0069-09

Influence of anisotropy for ultra-deep drawing IF steel on stamping of front door inner panel

Huang Xinghong, Liu Chonglin, Chen Yongjun, Li Xide, Wu Junyuan, Liu Fuxin

(Guangxi Liuzhou Iron and Steel Group Co., Ltd., Liuzhou 545002, China)

Abstract: For the automobile front door inner panel, taking the maximum thinning rate and the maximum failure value as the evaluation indicators, the simulation analysis was conducted by using finite element simulation software Autoform and changing the material parameter conditions to explore the influences of weighted average value of plastic strain ratio \bar{r} , anisotropy of plastic strain ratio Δr and blanking angle θ of ultra-deep drawing steel DC05 on the stamping performance. Then, the physical object test results were compared with the numerical calculation results to verify the reliability of the method. The results show that compared with Δr , \bar{r} is the main factor determining the formability of ultra-deep drawing steel. When \bar{r} remains constant, Δr has a significant effect on the stamping formability of materials, and the formability first decreases and then increases with the increasing of Δr . When Δr is 0.3–0.8, the formability of the material is not good, and the formability of the material is the worst when $\Delta r=0.5$. Therefore, Δr of the material should be controlled below 0.3 as much as possible, the larger the Δr , the more significant the influence of stamping angle θ on the formability, and the formability is proportional to plastic strain ratio r_θ in the corresponding direction, and the formability is the worst in the direction with smallest r_θ .

Key words: anisotropy; IF steel; stamping; plastic strain ratio; blank angle

无间隙原子钢, 又称 IF 钢 (Interstitial-Free Steel), 在汽车产业中有着广泛的应用, 特别是在汽车零部件的深冲工艺中。影响汽车用冷轧板材冲压件深冲性能的多个因素包括屈服强度、抗拉强度、断后伸长率、拉伸应变硬化指数、塑性应变比、塑性应变比加权平均值以及塑性应变比各向异性度等^[1], 这些

参数直接决定了板料的力学性能及成形性能, 其中塑性应变比 r 是衡量板料在厚度方向上抵抗变形能力, 塑性应变比加权平均值 \bar{r} 反映了板料平面内受力时抵抗变厚或者变薄的能力, 特别是对于汽车门板等需要复杂成形和深冲的零件影响尤为显著, 因此, 在选择材料时, 人们更倾向于追求较高的 \bar{r} 值, 而关于 \bar{r} 值对冲压性能的影响, 也有大量的研究报道^[2-4]。金属薄板在制造过程中, 需要进行数道次的轧制, 在此过程中材料内部会产生明显的形变组织, 使得材料在力学性能上表现出明显的各向异性^[5-6], 塑性应变比各向异性度 Δr 被认为是描述平面塑性应变比的各向异性的关键参数。传统的理论认为, Δr 作为描述平面

收稿日期: 2024-05-27; 修订日期: 2024-08-23

基金项目: 广西科技重大专项 (桂科 AA22068079)

作者简介: 黄兴鸿 (1995-), 男, 硕士, 助理工程师

E-mail: hongzi7350@163.com

通信作者: 刘崇林 (1983-), 男, 博士, 高级工程师

E-mail: liuchonglin2003@163.com

内特性的参数,与深冲制耳密切相关,并不会对材料的深冲成形性能产生影响。然而,在大规模生产活动中,具有相同 \bar{r} 和不同 Δr 的材料在深冲性能上表现出显著的差异,有些情况下低 Δr 值的材料在冲压性能上甚至优于高 Δr 值的材料。这种差异在处理具有复杂成形结构的零件时尤为明显,并可能导致一系列缺陷,如减薄、制耳或开裂等。可见仅依赖 Δr 值不足以全面评估深冲钢的性能,也不能为生产过程的工艺选择提供有力的参考依据,因此,有必要对材料内部各向异性是如何影响零件成形性能的进行探讨。本文采用有限元分析方法,以超深冲用钢 DC05 作为模拟材料,利用 Autoform R8 软件进行数值模拟仿真,以车身中形状较为复杂的前门内板作为研究对象,重点研究了塑性应变比加权平均值 \bar{r} 、塑性应变比各向异性度 Δr 和落料角度 θ 等因素对于前门内板成形性能的影响。

1 超深冲 IF 钢屈服行为的各向异性

根据 GB/T 228.1—2021^[7]可知,塑性应变比 r 的计算公式为:

$$r = \varepsilon_b / \varepsilon_a \quad (1)$$

式中: ε_b 为宽度方向真实塑性应变; ε_a 为厚度方向真实塑性应变。

塑性应变比加权平均值 \bar{r} 通常使用单向拉伸试样在 3 个方向上的 r 值的加权平均值来表示:

$$\bar{r} = (r_0 + 2r_{45} + r_{90})/4 \quad (2)$$

式中: r_0 、 r_{45} 和 r_{90} 分别为轧制方向、与轧制方向呈 45° 和 90° 方向的塑性应变比。

Δr 表示平面塑性应变比的各向异性,计算公式为:

$$\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90})/2 \quad (3)$$

Δr 反映了板面上各个方向塑性应变比波动的程

度,较小的 Δr 值有利于板材在成形过程中各个方向上的稳定流动和相互协调,不受临近硬化区阻碍,有助于实现壁厚的均匀减薄,同时也避免了制耳的问题^[8]。

众所周知,在 IF 钢的冶炼过程中,添加的 Nb、Ti 等微合金元素会形成相对较粗的碳氮化合物,这有助于固定钢中的游离 C、N 原子,从而形成单一的铁素体相, Ti 与间隙原子 C、N 会形成 TiN 和 TiC,而 Nb 与 C 原子则会形成 NbC。现阶段,各大钢厂生产的 IF 钢成分体系主要包括 Ti-IF 钢和 Ti-Nb-IF 钢,这两种体系钢的 \bar{r} 值可以达到相同的水平,但其 Δr 却通常存在一定的差异。影响 IF 钢深冲性能的主要织构为 $\{111\} \langle 110 \rangle$ 和 $\{111\} \langle 112 \rangle$,研究表明,与单一微合金化相比, Ti-Nb 复合的 IF 钢能够具有更高的 \bar{r} 值和更低的 Δr ,这归因于复合微合金化具有更小的析出物容积度,从而减少了钢中的 C、N 含量,因此 Ti-Nb-IF 钢在固定 C、N 方面的作用更加显著^[9]。具有较少的间隙原子的 IF 钢在经过轧制和退火处理后更容易形成 $\{111\}$ 织构^[10],有助于获得高 \bar{r} 和低 Δr 的理想钢材。还有研究认为,在加入 Nb 之后,钢中的 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 织构有所减少,而 $\{110\} \langle 001 \rangle$ 织构对于与轧制方向呈 45° 方向的 r 值有较大的影响,因此, $\{110\}$ 织构会导致深冲钢板的 Δr 值明显偏大,而且它对深冲钢的塑性应变比的影响力度远大于其他织构类型^[11]。

2 各向异性屈服行为的表征和标定

常用的描述材料屈服行为的屈服模型包括 Hill48、Hill90、Balart 等,其中, Hill48 因其所需的计算参数较少和适用范围广泛,成为有限元模拟中常用的屈服准则^[12]。Hill48 的本构模型和参数通过特定的屈服函数来构建和标定,其屈服模型表达式为:

$$f(\sigma) = \bar{\sigma} = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2} \quad (4)$$

式中: $f(\sigma)$ 为塑性势函数; σ 为屈服应力分量; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; σ_{ij} 为应力张量中非零项时的屈服应力, $i, j=1, 2, 3$, 其中, 1、2 和 3 分别表示轧制方向、垂直轧制方向和板厚方向; F 、 G 、 H 、 L 、 M 、 N 均为与材料屈服相关的各向异性系数,材料的各向异性通过这 6 个系数标定。

冷轧薄板的各向异性属于平面应力问题,在求解过程中只需关注 F 、 G 、 H 、 N 这 4 个系数,并使用 Lankford 参数 r 值法进行标定^[13]。

分别假设材料在 1、2、3 方向即轧制方向、垂直轧制方向和板厚方向为单轴拉伸变形,以及材料

在发生纯剪切变形时可以得到式 (5):

$$\begin{cases} F = \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\sigma}^2}{\sigma_{22}^2} + \frac{\bar{\sigma}^2}{\sigma_{33}^2} - \frac{\bar{\sigma}^2}{\sigma_{11}^2} \right) \\ G = \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\sigma}^2}{\sigma_{33}^2} + \frac{\bar{\sigma}^2}{\sigma_{11}^2} - \frac{\bar{\sigma}^2}{\sigma_{22}^2} \right) \\ H = \frac{1}{2} \left(\frac{\bar{\sigma}^2}{\sigma_{11}^2} + \frac{\bar{\sigma}^2}{\sigma_{22}^2} - \frac{\bar{\sigma}^2}{\sigma_{33}^2} \right) \\ N = \frac{3\bar{\tau}^2}{2\sigma_{12}^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\bar{\tau}$ 为等效剪切应力，且 $\bar{\tau} = \bar{\sigma}/3$ 。

假设样件沿与 x 轴夹角为 α 的方向拉伸，以各向异性材料主轴为参考坐标系，新旧坐标的应力转换如下：

$$\begin{cases} \sigma_{11} = \tilde{\sigma} \cos^2 \alpha \\ \sigma_{22} = \tilde{\sigma} \sin^2 \alpha \\ \sigma_{12} = \tilde{\sigma} \sin \alpha \cos \alpha \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\tilde{\sigma}$ 为 $\bar{\sigma}$ 在与 x 轴夹角为 α 的方向上的等效应力。

根据 Drucker 塑性流动法，有：

$$d\varepsilon = d\lambda \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma} = \frac{d\lambda}{f(\sigma)} \begin{bmatrix} -G(\sigma_{33} - \sigma_{11}) + H(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \\ F(\sigma_{22} - \sigma_{33}) - H(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \\ -F(\sigma_{22} - \sigma_{33}) + G(\sigma_{33} - \sigma_{11}) \\ N\sigma_{12} \\ M\sigma_{31} \\ L\sigma_{23} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： $d\varepsilon$ 为塑性应变增量； $d\lambda$ 为非负的比例因子。

将式 (6) 带入式 (7) 得：

$$\begin{cases} d\varepsilon_{11} = [(G + H) \cos^2 \alpha - H \sin^2 \alpha] \frac{\tilde{\sigma}}{f(\sigma)} d\lambda \\ d\varepsilon_{22} = [(F + H) \sin^2 \alpha - H \cos^2 \alpha] \frac{\tilde{\sigma}}{f(\sigma)} d\lambda \\ d\varepsilon_{33} = -[F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha] \frac{\tilde{\sigma}}{f(\sigma)} d\lambda \\ d\varepsilon_{12} = [N \sin \alpha \cos \alpha] \frac{\tilde{\sigma}}{f(\sigma)} d\lambda \end{cases} \quad (8)$$

式中： $d\varepsilon_{11}$ 、 $d\varepsilon_{22}$ 和 $d\varepsilon_{33}$ 分别为轧制方向、垂直轧制方向和板厚方向的应变增量分量； $d\varepsilon_{12}$ 为切应变增量。

为了计算与 x 轴夹角为 α 的方向上拉伸的 r 值，将式 (8) 转化至新坐标系：

$$\begin{cases} d\tilde{\varepsilon}_{22} = d\varepsilon_{11} \sin^2 \alpha + d\varepsilon_{22} \cos^2 \alpha - 2d\varepsilon_{12} \sin \alpha \cos \alpha \\ d\tilde{\varepsilon}_{33} = d\varepsilon_{33} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $d\tilde{\varepsilon}_{22}$ 和 $d\tilde{\varepsilon}_{33}$ 分别为与 x 轴夹角为 α 方向上的垂直轧制方向、板厚方向的应变增量分量。

由式 (8) 和式 (9) 得到与 x 轴夹角为 α 的方向上的塑性应变比 r_α 为：

$$r_\alpha = \frac{d\tilde{\varepsilon}_{22}}{d\tilde{\varepsilon}_{33}} = \frac{H + (2N - F - G - 4H) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha} \quad (10)$$

沿与轧制方向呈 0° 、 45° 和 90° 方向拉伸的 r 值可以视为式 (10) 的特例，通常假设 $\bar{\sigma}$ 与轧制方向单轴拉伸的屈服应力一致，即 $\sigma_{11}/\bar{\sigma} = 1$ ，将式 (10) 带入式 (5) 可得：

$$\begin{cases} G = \frac{1}{r_0 + 1} \\ H = \frac{r_0}{r_0 + 1} \\ F = \frac{r_0}{r_{90}(r_0 + 1)} \\ N = \frac{(2r_{45} + 1)(r_0 + r_{90})}{2r_{90}(r_0 + 1)} \end{cases} \quad (11)$$

3 有限元数字模型的构建

某厂汽车前门内板的三维零件图如图 1a 所示，其属于平板类零件，零件尺寸为 1780 mm × 1210 mm，形状较为复杂，型面内存在多个高凸台，在冲压成形的过程中容易出现开裂和起皱等缺陷。在考虑了零件的形状特点后，采用 4 工序进行冲压成形：OP10 拉延、OP20 修边、OP30 翻边和整形、OP40 冲孔和侧冲孔，其中 OP10 拉延工序在本工艺方案中是决定材料成形性能的关键工序，因此，本文针对拉延工序进行系统的分析。本文所采用的板材坯料为梯形料，毛坯尺寸为 1662.5 mm × 1290 mm × 1390 mm，冲压成形模拟过程采用单动拉延方式，采用实际测量的数据来拟合材料的硬化模型，屈服准则采用 Hill48 准则，成形极限图采用对于 IF 钢的屈服行为预测较准确的 Keeler 模型理论计算获得^[14]。

试验所使用的材料为广西柳州钢铁集团有限公司生产的用于超深冲的 DC05 冷轧钢薄板，采用德国 Zwick 公司的全自动万能试验机 Z050RTL 在常温条件下进行拉伸试验，选取该钢种近 3 个月的试验数据的平均值作为仿真材料的基础力学性能进行模拟，如表 1 所示，其中， $R_{p0.2}$ 为规定非比例延伸强度， R_m 为抗拉强度， n 为拉伸应变硬化指数。根据该零件的成形工艺建立了有限元模型，如图 1b 所示。设定的其他参数包括：初始板料网格尺寸为 40 mm，最大自适应等级为 7，网格类型为 EPS-5 弹塑性壳单元，压边力为 1300 kN，压边圈行程为 160 mm，摩擦因数为 0.15，圆角穿透半径为 0.22 mm。

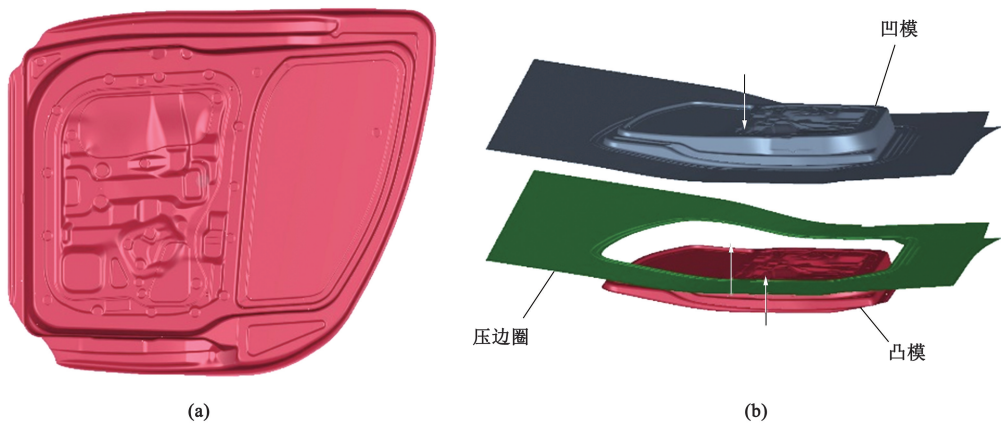


图 1 前门内板三维模型 (a) 及其拉伸有限元分析模型 (b)

Fig. 1 3D model of front door inner panel (a) and its finite element analysis model for drawing (b)

表 1 DC05 钢的性能参数

Table 1 Property parameters of DC05 steel

参数	$R_{p0.2}/$ MPa	$R_m/$ MPa	r_0	r_{45}	r_{90}	\bar{r}	Δr	n
数值	157	313	2.30	2.25	2.95	2.44	0.38	0.24

将表 1 中性能参数代入式 (11), 计算得到模拟材料的各向异性系数, 即 $F=0.236$ 、 $G=0.303$ 、 $H=$

0.697 和 $N=1.483$, 由此绘制出的 Hill48 准则的屈服轨迹如图 2a 所示。在有限元分析中, 材料的硬化曲线对于准确预测材料的冲压和回弹行为非常重要, 但是, 采用传统模型获得的最大减薄率与实际测试结果相差较大^[15], 实际测量得到的硬化曲线更加符合真实的硬化过程, 图 2b 为实际测量数据拟合得到的硬化模型曲线, 其中 $R_{p0.2}=157$ MPa, $R_m=313$ MPa。

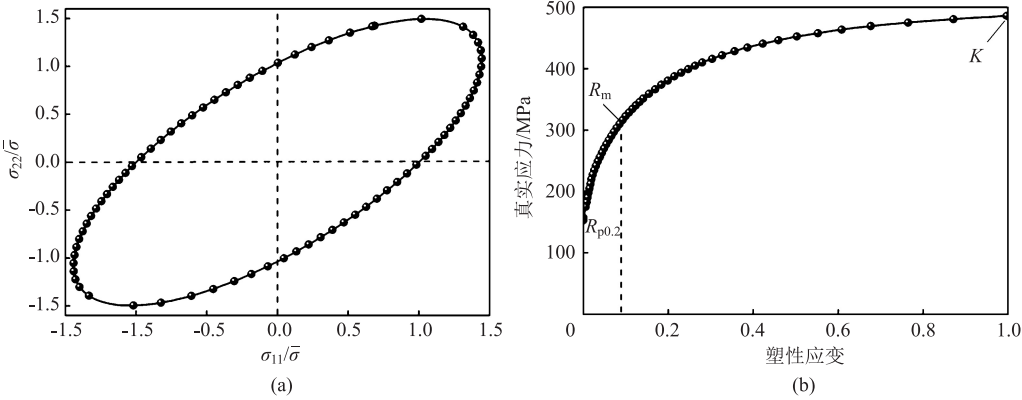


图 2 Hill48 准则的屈服轨迹 (a) 及真实应力-塑性应变曲线 (b)

Fig. 2 Yield trajectory (a) and true stress-plastic strain curve (b) of Hill48 criterion

4 模拟分析结果与讨论

最大减薄率和最大失效值是评价成形性能常用的两个指标, 其中, 最大减薄率描述的是在拉伸加工过程中材料的厚度随着拉伸力的作用减至最薄的程度, 而最大失效是成形零件的最大主应变与同一应变路径上对应的成形极限曲线 (Forming Limit Curve, FLC) 上的临界应变的比值。对于 IF 钢, 通常规定产品面的最大减薄率不超过 25%, 最大失效不应超过

80%^[16], 因此, 在本文中, 以最大减薄率和最大失效值为共同判定依据, 对材料的成形性能进行评判。

图 3 为前门内板拉伸工序的模拟结果, 从图 3a 可以看到, 成形后的零件整体落在成形极限图的安全范围内, 冲压成形过程中未出现开裂, 并且产品区未出现明显起皱。在整个零件的产品面中, 最大变形的区域为零件底部筒壁的极限拉伸面, 见图 3b 中圈示部分, 其中箭头为材料在拉伸时的流动方向, 该位置的减薄率达到最大, 为 23.8%, 最大失效为 73.8%, 出现开裂的风险最大。因此, 后续的模拟

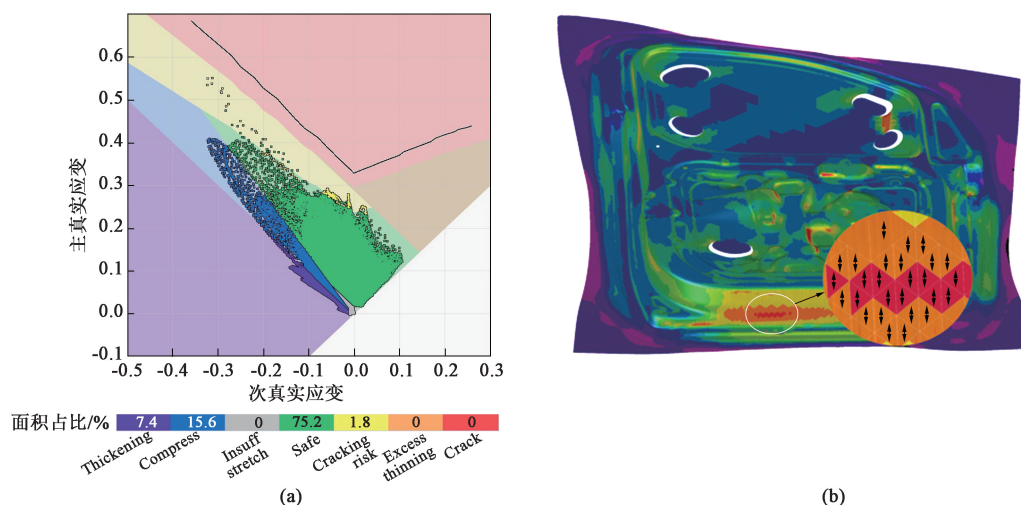


图3 前门内板成形极限图 (a) 及局部变形严重区域示意图 (b)

Fig. 3 FLD of front door inner panel (a) and schematic diagram of areas with severe local deformation (b)

分析过程中, 将此区域作为重点观察区域, 判断该零件在不同状态下的成形性能。

4.1 塑性应变比加权平均值 \bar{r} 对成形性能的影响

基于表1列出的力学性能 ($R_{p0.2} = 157$ MPa、 $R_m = 313$ MPa、 $n = 0.24$ 和 $\Delta r = 0.38$), 并调整 ($r_0 + r_{90}$) 及 r_{45} 的大小, 使 \bar{r} 值由 2.2~3.0 依次增大, 进行模拟计算, 仿真成形后零件的最大减薄率及最大失效变化曲线如图4所示。观察可知, 材料的最大减薄率和最大失效均随着 \bar{r} 的增加而下降, 当 $\bar{r} > 2.4$ 时, 材料的最大减薄率和最大失效均处于安全范围, 这表明 Δr 不变的情况下, \bar{r} 的增加显著提高了材料的冲压成形性能。

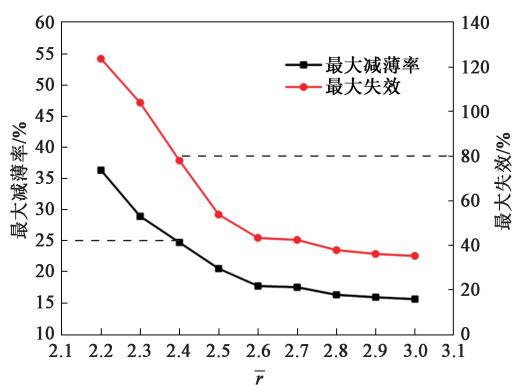


图4 \bar{r} 值与最大减薄率和最大失效的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves of \bar{r} with maximum thinning rate and maximum failure

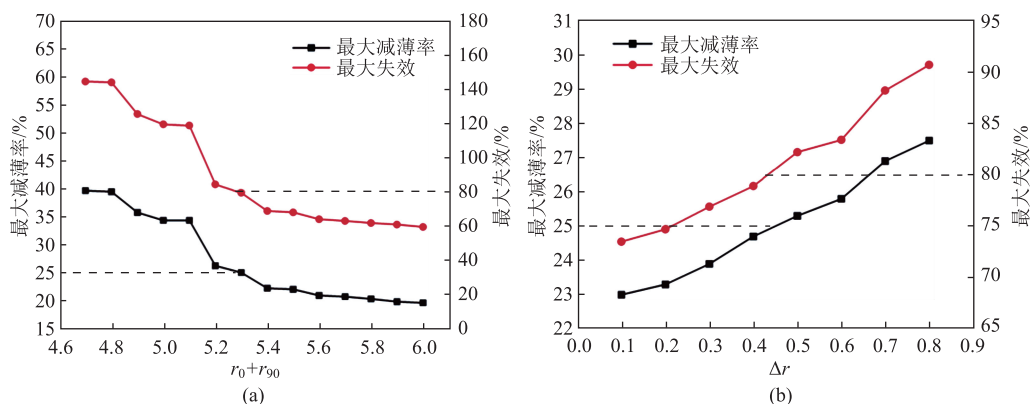
4.2 r_{45} 和 ($r_0 + r_{90}$) 对成形性能的影响

对比塑性应变比加权平均值 \bar{r} 和塑性应变比各向异性度 Δr 的计算公式 (式 (2) 和式 (3)),

这两对相互矛盾的参数可以视为 ($r_0 + r_{90}$) 和 r_{45} 共同影响的结果, r_{45} 的减小会导致 Δr 升高和 \bar{r} 值下降, ($r_0 + r_{90}$) 的增加虽然能够提高 \bar{r} 值, 但也会导致 Δr 升高。为了深入探讨 ($r_0 + r_{90}$) 和 r_{45} 对材料成形性能的贡献, 在表1列出的材料力学性能的基础上, 分别保持 ($r_0 + r_{90}$) 和 r_{45} 不变, 取 r_{45} 依次递减和 ($r_0 + r_{90}$) 依次递增, 进行模拟计算, 成形后零件的最大减薄率及最大失效变化曲线见图5。如图5a所示, 当 r_{45} 恒定为 2.25、($r_0 + r_{90}$) 的数值由 4.7~6.0 逐渐增加时, 可以观察到模拟结果中最大减薄率和最大失效均在持续下降, 当 ($r_0 + r_{90}$) = 5.4 时, 最大减薄率和最大失效均达到安全范围。可见 ($r_0 + r_{90}$) 的增加可以提高 Δr 值, 但是同时也会导致 \bar{r} 升高, 两者作用互相抵消后综合表现为成形性能的提升, 表明 ($r_0 + r_{90}$) 的增加对于提升成形性能有正向贡献, 并且与 Δr 相比, \bar{r} 值是成形性能的主要作用因素。如图5b所示, 以 Δr 为横坐标、材料的最大减薄率和最大失效为纵坐标来制图进行 r_{45} 对成形性能影响的探讨, 当 ($r_0 + r_{90}$) 恒定为 5.3、 r_{45} 的值由 2.5~1.8 逐渐减少时, 根据 $\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90})/2$ 计算结果, Δr 由 0.1~0.8 依次递增。可见 r_{45} 的减少会导致 \bar{r} 值下降、 Δr 值升高, 最大减薄率和最大失效呈现出明显的上升趋势, 成形性能变差, 这与模拟前的预测一致, 即 r_{45} 的下降会导致各向异性的增加, 深冲性能降低。

4.3 塑性应变比各向异性度 Δr 对成形性能的影响

为了进一步研究 Δr 与成形性能的关系, 保持材料的其他参数性能不变 ($R_{p0.2} = 157$ MPa、 $R_m =$

图 5 r_0+r_{90} (a) 和 r_{45} (b) 与最大减薄率和最大失效的关系曲线Fig. 5 Relationship curves of r_0+r_{90} (a) and r_{45} (b) with maximum thinning rate and maximum failure

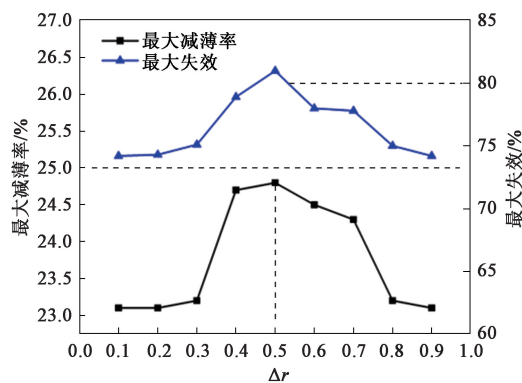
313 MPa 和 $n=0.24$), 取 \bar{r} 恒定为 2.43, 调整 (r_0+r_{90}) 及 r_{45} 的大小, 使 Δr 从 0.1~0.9 范围内按照 0.1 的间隔单调递增, 并进行模拟计算, 具体参数见表 2。成形后零件的最大减薄率及最大失效变化如图 6 所示, 可以发现, 随着 Δr 的增加, 最大减薄率和最大失效呈现先上升后下降的趋势, 并在 $\Delta r=0.5$ 时最大减薄率达到最大值 24.8%, 最大失效达到 82.3%, 超出安全的极限, 存在很大的拉裂风险。 Δr 在 0.1~0.3 的范围时, 最大减薄率和最大失效曲线逐渐上升, 大于 0.3 时曲线开始急剧升高, 0.3~0.8 时保持在高位, 大于 0.8 时呈现线性下降的趋势。

表 2 模拟材料的性能参数

Table 2 Property parameters of simulated materials

序号	(r_0+r_{90})	r_0	r_{45}	r_{90}	Δr	\bar{r}
1	4.96	2.10	2.38	2.86	0.10	2.43
2	5.06	2.14	2.33	2.92	0.20	
3	5.16	2.18	2.28	2.98	0.30	
4	5.26	2.23	2.23	3.03	0.40	
5	5.36	2.27	2.18	3.09	0.50	
6	5.46	2.31	2.13	3.15	0.60	
7	5.56	2.35	2.08	3.21	0.70	
8	5.66	2.39	2.03	3.27	0.80	
9	5.76	2.44	1.98	3.32	0.90	

由表 2 可知, 为了保持 \bar{r} 值恒定而 Δr 递增, r_{45} 的数值单调递减, (r_0+r_{90}) 的数值单调递增。根据 4.1 节中的分析, Δr 与成形性能的关系可能是由于材料的成形性能受到 (r_0+r_{90}) 和 r_{45} 的共同作用, r_{45} 减小材料的成形性能会下降, 而 (r_0+r_{90}) 增加

图 6 Δr 与最大减薄率和最大失效的关系曲线Fig. 6 Relationship curves of Δr with maximum thinning rate and maximum failure

又可以提升成形性能, 因此, r_{45} 和 (r_0+r_{90}) 的叠加作用会影响到最大减薄率和最大失效的曲线走势。在到达最大减薄率的最高点之前, r_{45} 的减小起到的性能弱化效果起主导作用, 导致最大减薄率和最大失效上升。当到达最大减薄率最高点后, (r_0+r_{90}) 对成形性能的强化效果反过来成为主导作用, 最大减薄率和最大失效均会随着 Δr 的增加而降低。结果说明在 \bar{r} 值不变时, Δr 在 0.3~0.8 的范围内时成形性能明显下降, $\Delta r=0.5$ 时, 材料的成形性能表现最差。因此, 选择材料时, 应当避开该区间, 但是由于高 Δr 可能会导致严重的制耳问题, 对于材料利用率和冲压件表面的质量均会产生不利影响^[17], 因此, 在生产类似前门内板的复杂零件时, 应尽量控制材料的 Δr 在 0.3 以下。

4.4 落料角度 θ 对成形性能的影响

在不改变模具参数、压机参数和材料性能的条件下, 规定变形严重区域的主应变方向和轧制方向的角度为落料角度 θ , θ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内变化,

取 \bar{r} 恒定为 2.43, Δr 分别为 0.20、0.50 和 0.90 的 3 组材料进行仿真计算。图 7a 为落料角度 θ 与最大减薄率之间的关系曲线, 通过比较 3 个最大减薄率曲线, 可以发现, $\Delta r=0.90$ 和 $\Delta r=0.50$ 的最大减薄率曲线呈现出先增加后减小的趋势, $\Delta r=0.90$ 时最大减薄率曲线波动最大, 其次为 $\Delta r=0.50$ 时, 而 $\Delta r=0.20$ 时曲线呈缓慢下降的趋势。图 7b 为根据

式 (11) 计算得出的落料角度 θ 与对应角度的塑性应变比 r_θ 的关系, 当 $\Delta r=0.90$ 和 $\Delta r=0.50$ 时, r_θ 的极小值分别出现在 $\theta=37.5^\circ$ 和 $\theta=30.0^\circ$ 的位置, 与图 7a 中最大减薄率曲线的极大值位置一致, 但两者的趋势相反。结果说明 Δr 越大, 落料角度对成形性能的影响就越大, 最大减薄率曲线与 r_θ 的趋势相反, 当 r_θ 取极小值时, 该方向的成形性能最差。

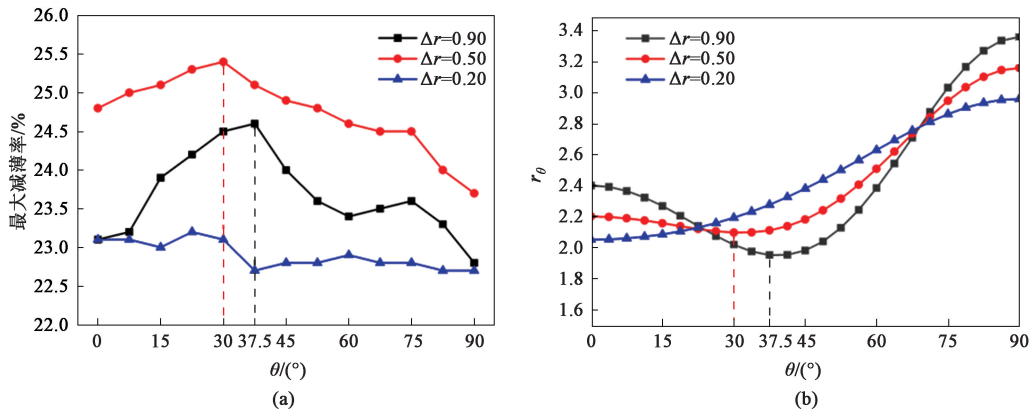


图 7 落料角度 θ 与最大减薄率 (a) 及 r_θ (b) 的关系曲线
Fig. 7 Relationship curves of blanking angle θ with maximum thinning rate (a) and r_θ (b)

5 实际冲压验证

试验材料采用广西柳州钢铁集团有限公司生产的两种不同组分体系 (Ti-IF 和 Ti-Nb-IF) 的超深冲钢 DC05, 规格为 0.7 mm×1000 mm×500 mm, 采用氧氮分析仪 ON736 和直读光谱仪 SPECTRO 进行化学成分分析, 主要成分见表 3。除了成分上的差异, 这两种组分在生产过程中均采用了相同的轧制工艺和退火参数。经过退火处理的薄板参考 GB/T

228.1—2021^[7] 被加工为标准拉伸试样, 并在全自动万能试验机 Z050RTL 上进行力学性能测试, 具体数据见表 4, 其中 A 为断后伸长率。参考第 4 章的有限元数值模拟数据, 在压机上进行试验, 试验结果如图 8 所示。图 8a 中, Ti 单一组分材料的冲压实物在上述模拟计算所显示的变形严重区域 (筒壁边缘) 产生了延伸开裂, 且开裂范围大, 无法满足量产要求。图 8b 中的 Ti-Nb 复合组分材料的冲压实物, 未出现起皱、开裂的情况, 而且关键部位成形质量符合检具的要求。

表 3 实际冲压用 DC05 钢的化学成分 (%, 质量分数)
Table 3 Chemical compositions of DC05 steel for actual stamping (%, mass fraction)

成分体系	C	N	Mn	P	Al	Ti	Nb	Ni	Fe
Ti-Nb	0.0026	0.0014	0.1284	0.0150	0.032	0.0228	0.0139	0.0117	余量
Ti	0.0025	0.0021	0.0478	0.0111	0.0428	0.0625	0.0018	0.0078	余量

表 4 实际冲压用 DC05 钢的性能参数
Table 4 Property parameters of DC05 steel for actual stamping

成分体系	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	r_0	r_{45}	r_{90}	\bar{r}	Δr	n
Ti-Nb	137	303	43.15	2.199	2.33	2.996	2.463	0.267	0.246
Ti	138	298	43.77	2.355	2.197	3.012	2.440	0.487	0.245

通过比较表 4 的性能数据可以发现, 两种组分 钢材料的 $R_{p0.2}$ 、 R_m 、 \bar{r} 、 n 和 A 等关键参数几乎是一

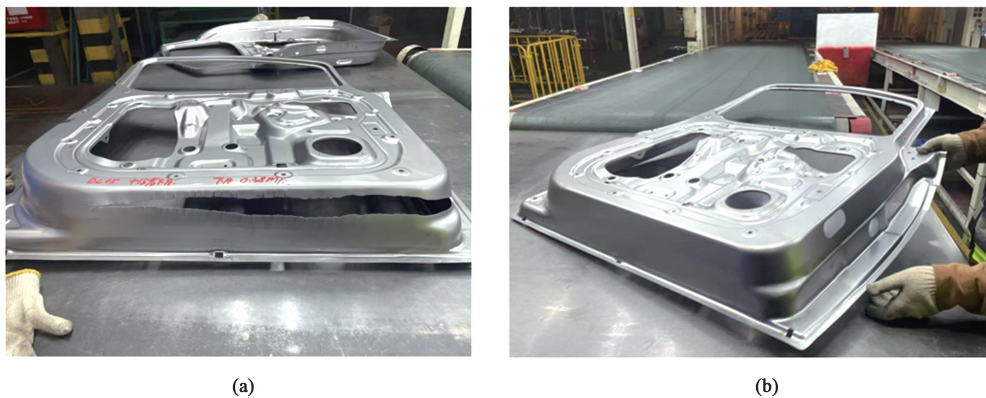


图 8 Ti-IF 钢 (a) 和 Ti-Nb-IF 钢 (b) 的实际冲压情况

Fig. 8 Actual stamping situation of Ti-IF steel (a) and Ti-Nb-IF steel (b)

致的,但板料的 Δr 却存在很大差异。Ti-Nb 复合钢面内表现出更低的各向异性差异, Δr 低于 0.3, 经过实际测试,该材料的冲压效果良好。单 Ti 组分钢的 Δr 相对较高,接近 0.5,在上述模拟中的变形区严重位置出现了大范围的开裂。实物冲压的验证的结果与 4.3 节中的模拟预测相吻合,即在 \bar{r} 值保持不变的前提下, Δr 的波动会对冲压成形性能产生显著的影响。

6 结论

(1) 与塑性应变比各向异性度 Δr 相比,塑性应变比加权平均值 \bar{r} 是影响超深冲钢成形性能的主要因素, \bar{r} 值越大,冲压成形性能越好;在保持 r_{45} 不变的前提下, (r_0+r_{90}) 的增大对于材料整体成形性能的提升起到正向作用;保持 (r_0+r_{90}) 不变时, r_{45} 的减少会导致材料的成形性能降低。

(2) 在材料的 \bar{r} 值保持不变时,材料的成形性能受到 (r_0+r_{90}) 和 r_{45} 的共同作用,随着 Δr 的增加,成形性能先下降后升高, Δr 在 0.3~0.8 的区间范围的成形性能明显下降,当 $\Delta r=0.5$ 时,材料的成形性能表现最差。由于高 Δr 值可能会导致严重的制耳问题,在实际生产中制造类似于前门内板的复杂零件时,应尽量控制材料的 Δr 在 0.3 以下。

(3) 材料的塑性应变比各向异性度 Δr 越大,落料角度 θ 对其成形性能的影响越大,成形性能与对应落料角度的塑性应变比 r_θ 呈正比关系,在 r_θ 值最小的方向上成形性能最差。

参考文献:

[1] 周建明,付延宜. 冷轧板汽车冲压件开裂和裂纹缺陷的原因

及预防 [J]. 南方金属, 2019 (6): 39-41.

Zhou J M, Fu Y Y. Causes and prevention of cracking and crack defects in cold rolled automobile stamping parts [J]. Southern Metals, 2019 (6): 39-41.

[2] 杨弟,王绪,毛为民,等. 深冲 SPCE 与超深冲 IF 钢 r 值差异的 ODF 分析 [J]. 材料热处理学报, 1994, 15 (3): 50-54.

Yang D, Wang X, Mao W M, et al. Study on difference of r value between deep-drawing SPCE and extra-deep drawing steel sheet by ODF analysis [J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 1994, 15 (3): 50-54.

[3] 梁笑,李春林,林利,等. 车门外板用钢冲压开裂分析与仿真工艺优化 [J]. 鞍钢技术, 2023 (1): 28-34.

Liang X, Li C L, Lin L, et al. Analysis on cracking results in stamping steels for making outside panels of vehicle doors and optimization of simulation process [J]. Angang Technology, 2023 (1): 28-34.

[4] 周博文,樊雷,邓深,等. 材料性能参数对汽车 B 柱冲压成形的影响 [J]. 金属热处理, 2019, 44 (5): 215-218.

Zhou B W, Fan L, Deng S, et al. Effect of material property parameters on stamping forming of automobile B-pillar [J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44 (5): 215-218.

[5] Agnew S R, Duygulu O. Plastic anisotropy and the role of non-basal slip in magnesium alloy AZ31B [J]. International Journal of Plasticity, 2005, 21 (6): 1161-1193.

[6] Song B, Xin R L, Guo N, et al. Dependence of tensile and compressive deformation behavior on aging precipitation in rolled ZK60 alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 639: 724-731.

[7] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 [S].

GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].

[8] 王德宝,张峰,杨丽珠,等. 深冲冷轧板塑性应变比及各向异性与织构相关性分析 [J]. 安徽冶金, 2014 (4): 27-30, 56.

- Wang D B, Zhang F, Yang L Z, et al. Analysis of the correlation between plastic strain ratio, anisotropy and texture of deep drawn cold rolled sheet [J]. Anhui Metallurgy, 2014 (4): 27-30, 56.
- [9] 刘立学, 陈菲. 降低IF钢平面各向异性指数 Δr 的试验研究[J]. 河北冶金, 2019 (7): 12-15, 86.
- Liu L X, Chen F. Experimental study on reducing the anisotropy index Δr of IF steel [J]. Hebei Metallurgy, 2019 (7): 12-15, 86.
- [10] 刘明辉, 王忠东, 王凯. 碳含量对IF钢冷轧板力学性能影响分析[J]. 金属世界, 2009 (2): 37-38.
- Liu M H, Wang Z D, Wang K. The effect of carbon content on properties of IF steel [J]. Metal World, 2009 (2): 37-38.
- [11] 吕庆功, 陈光南, 周家琮, 等. 深冲钢板的主要织构对塑性应变比的影响[J]. 钢铁研究, 2000 (5): 40-43.
- Lyu Q G, Chen G N, Zhou J C, et al. Influence of main texture components on plastic strain ratio of deep drawing steel sheet [J]. Research on Iron and Steel, 2000 (5): 40-43.
- [12] 李玉强, 王勇, 董剑安, 等. 覆盖件冲压CAE分析材料模型的工程应用与发展[J]. 模具技术, 2009 (4): 49-54.
- Li Y Q, Wang Y, Dong J A, et al. The engineering application and development of material model in CAE analysis of automotive panel forming [J]. Die and Mould Technology, 2009 (4): 49-54.
- [13] Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals [J]. Proceedings of the Royal Society A, 1948, 193 (1033): 281-297.
- [14] 胡晓, 连昌伟, 牛超. IF钢成形极限曲线试验研究[J]. 模具工业, 2017, 43 (9): 10-15.
- Hu X, Lian C W, Niu C. Experimental study on forming limit curve of IF steel [J]. Die & Mould Industry, 2017, 43 (9): 10-15.
- [15] 黑中垒, 陈晓静, 李炎粉. 基于修正硬化曲线模型汽车碰撞B柱制造工艺分析[J]. 机械设计与制造, 2023, 392 (10): 177-181.
- Hei Z L, Chen X J, Li Y F. Manufacturing process analysis of automobile resistant B-pillar based on modified hardening curve model [J]. Machinery Design & Manufacture, 2023, 392 (10): 177-181.
- [16] 付三令. Autoform开裂失效命令使用小结[J]. 模具制造, 2015, 15 (4): 17-20.
- Fu S L. The summary of Autoform cracking failure command uses [J]. Die & Mould Manufacture, 2015, 15 (4): 17-20.
- [17] 栾鑫, 杜传军. 深冲两片罐制耳的仿真模拟[J]. 宝钢技术, 2022 (1): 51-54.
- Luan X, Du C J. Simulation of earing of deep drawing two piece cans [J]. Baosteel Technology, 2022 (1): 51-54.

《锻压技术》杂志2025年广告征订

2025年广告征集工作火热进行中。本刊主要承接锻造、冲压、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备及锻压辅助设备, 仪器、仪表、模具工业、工业加热设备、热处理设备、加热技术、摩擦与润滑、工艺材料和锻件、冲压件、管件及其特种成形件(旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧)等广告; 各科研院所科技成果转让、企业介绍等与本行业相关的广告。您选择《锻压技术》进行广告宣传的理由:

(1) 平台大, 宣传效果好:

- 全国中文核心期刊, 全国锻压行业会刊, 是锻压领域知名、精品期刊;
- 与中国机械工程学会塑性工程分会、全国锻压标准化技术委员会、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司密切合作;
- 报道内容全, 发行量大。

(2) 服务全, 广告费用低:

立体式全方位宣传, 杂志、网站和微信等纸媒和数字媒体宣传渠道。

请登录本刊网站, 点击“广告合作”查询具体广告价目。

为了使您的产品能够保持畅销的势头, 不断占领国内外市场, 请您抓紧时间安排贵公司在本刊刊登的广告计划。欢迎广大新老客户踊跃咨询、积极预定。需刊登广告者, 敬请与本刊联系。

愿我们真诚的服务能为您创造良好的效益。

地址: 北京市海淀区学清路18号《锻压技术》编辑部 广告部 邮编: 100083

联系人: 林玉彤 手机: 18811346037 E-mail: fst_linyutong@163.com

电话: 010-62920652-804 Http: //www.fstjournal.net



锻压技术微信公众号



锻压技术网站