

## 精冲剪切面质量评价及对边部成形性的影响

王雪昕<sup>1</sup>, 韩 非<sup>1</sup>, 庄新村<sup>2</sup>

(1. 宝山钢铁股份有限公司中央研究院, 上海 201900;

2. 上海交通大学 材料科学与工程学院 塑性成形技术与装备研究院, 上海 200030)

**摘要:** 为研究精冲剪切面质量对边部成形性的影响, 研究了不同冲裁间隙下 16MnCr5 钢、C20E 钢和 C35R 钢 3 种材料的精冲剪切面质量及扩孔性能。结果显示, 随精冲间隙的增加, 3 种材料的精冲剪切面光亮带比例逐渐降低, 对应的扩孔试样的极限扩孔率也逐渐降低。对比精冲、普冲、铣削工艺的扩孔试样发现: 普冲剪切面的光亮带比例远低于精冲, 但其极限扩孔率与 0.1 mm 冲裁间隙下的精冲扩孔试样的结果接近; 在光亮带比例均为 100% 的情况下, 铣削工艺获得的极限扩孔率为精冲工艺的 2.3~8.8 倍, 说明剪切面光亮带比例与材料扩孔性能无线性关系, 冲裁过程中材料分离引起的材料损伤是影响材料边部成形性能的关键因素。实验测试了毛刺朝向改变和反顶力增加后精冲扩孔试样的极限扩孔率变化, 结果显示, 相比静水压应力增加带来的损伤值降低, 毛刺朝向改变对极限扩孔率的提升更为显著。研究表明, 减小冲裁间隙或增加剪切区域静水压力可有效提高剪切面光亮带比例, 但光亮带比例增加对材料边部成形能力提升有限, 减少冲压过程中边部累积的损伤是减轻边部开裂风险的有效手段。

**关键词:** 精冲; 光亮带比例; 扩孔; 边部成形性; 损伤

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.05.014

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 05-0113-07

## Quality evaluation of fine blanking shear surface and influence on edge formability

Wang Xueting<sup>1</sup>, Han Fei<sup>1</sup>, Zhuang Xincun<sup>2</sup>

(1. Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China; 2. Institute of Forming Technology & Equipment, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of fine blanking shear surface quality on edge formability, the fine blanking shear surface quality and hole expansion performance of three materials, namely 16MnCr5 steel, C20E steel and C35R steel, under different blanking clearances were investigated. The results show that as the fine blanking clearance increases, the proportion of bright band on the fine blanking shear surface of the three materials gradually decreases, and the corresponding limit hole expansion rate of the hole expansion specimens also gradually decreases. Compared with the hole expansion specimens processed by fine blanking, ordinary blanking and milling processes, it is found that the proportion of bright band on the shear surface of ordinary blanking is much lower than that of fine blanking, but its limit hole expansion ratio is close to that of the hole expansion specimens by fine blanking with a blanking clearance of 0.1 mm. When the proportion of bright band is 100%, the limit hole expansion rate obtained by milling process is 2.3~8.8 times that of the fine blanking process. This indicates that there is no linear relationship between the proportion of bright band on the shear surface and the hole expansion performance of the material, and the material damage caused by material separation during the blanking process is the key factor affecting the edge formability of the material. The changes in the limit hole expansion ratio of the hole expansion specimens by fine blanking after the burr direction is changed and the counter force is increased are experimentally tested. The results show that compared with the reduction in damage value caused by the increase in hydrostatic stress, the change in burr direction has a more significant effect on the improvement of the limit hole expansion rate. The research indicates that reducing the blanking clearance or increasing the hydrostatic stress in the shear zone can effectively enhance the proportion of bright band on the shear surface, but the increase in the proportion of bright band has limited improvement to the edge formability of the material, and reducing the cumulative edge damage during the stamping process is an effective measure to mitigate the risk of edge cracking.

**Key words:** fine blanking; ratio of bright band; hole expansion; edge formability; damage

精冲作为一种精密冲裁工艺, 通过对剪切变形

区施加三向压应力, 提升其塑性变形能力, 剪切面可获得 90% 以上的光亮带, 相比普通冲裁光亮带的比例有显著提升<sup>[1-3]</sup>。通过精冲工艺, 可获得高光洁度和高尺寸精度的零件。目前, 精冲工艺与翻孔、墩挤和拉深等工艺相复合, 广泛应用于汽车等领域,

收稿日期: 2024-07-19; 修订日期: 2024-10-25

作者简介: 王雪昕 (1988-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: wangxueting@baosteel.com

其中代表性的零件有座椅调角器,该零件具有半冲、精冲齿形和中心法兰等复杂特征,是精冲工艺中相对复杂的一类零件。中心法兰通常采用拉深聚料、翻孔和墩挤来成形,在翻孔过程中,其边缘极易发生开裂<sup>[4]</sup>,进而影响到零件最终的成形质量。

边部成形性及开裂问题一直是国内外学者的研究重点,但目前的研究工作主要集中于高强钢领域。李涛等<sup>[5]</sup>研究了高强钢边部开裂影响因素,指出边部加工状态、冲裁间隙及材料化学成分和组织是影响边部开裂的重要因素。郑欢等<sup>[6]</sup>研究了冲裁和线切割两种加工方式对双相钢拉伸性能的影响,发现冲裁拉伸试样的断裂总伸长率低于线切割试样,且会随着冲裁间隙的增大而减小。李永好<sup>[7]</sup>针对多种超高强钢研究了不同冲裁工艺参数对冲裁边部质量的影响,并分析了剪切边质量对边部成形性能的影响。研究发现,在相同的冲裁工艺参数下,QP1180 钢相比 DP980 钢和 MS1180 钢更易发生边部开裂,且断裂应变较小;轻度打磨冲裁边部可提高边部拉伸性能,并且有可能优于线切割边部的拉伸性能;当扩孔试样毛刺方向与锥形凸模运动方向相反时,扩孔率有明显提高。周明<sup>[8]</sup>指出随着冲裁间隙增大,TRIP780 钢和 QP980 钢冲裁剪切面的质量和拉伸性能均逐渐下降。Dykeman J 等<sup>[9]</sup>对比了水刀切割、激光切割和冲裁工艺下的边部断裂应变,结果显示,冲裁工艺下的边部断裂应变一般小于水刀切割工艺。王雪听等<sup>[10]</sup>研究对比了冲裁边与铣削边的成形性能,认为铣削工艺大幅度提升了边部的成形能力,且不同材料对于边部质量的敏感程度不同。由此可见,边部质量对材料的成形性能具有显著影响。

有许多学者对边部开裂的原因及机理进行了研究。Chang Y 等<sup>[11]</sup>针对第 3 代汽车高强钢的中锰钢进行了研究,讨论了冲裁、激光切割和线切割 3 种加工工艺对显微组织、显微硬度和拉伸性能的影响,并分析了切削过程对切削损伤的影响,发现不同切削工艺处理的中锰钢样品呈现出不同的微观结构和性能。Levy B S 等<sup>[12]</sup>针对双相钢边部剪切失效开展研究,发现冲裁过程中撕裂带附近会带入大量损伤,组织中由于硬质相和铁素体变形能力的差异,在硬质相附近会出现大量的微孔洞,其在毛刺位置分布最多,其次为撕裂带,在光亮带最少,说明剪切变形过程中孔洞及其损伤的存在降低了边部性能。Cho W 等<sup>[13]</sup>提出在材料冲孔时,尽量减少冲压过程中边部累积的损伤是提升扩孔性能的有效手段。龚宇等<sup>[14]</sup>从成分及加工工艺方面对提高双相钢冲裁边

部成形性能提出了建议。Hofmann H 等和 Lesch C 等<sup>[15-16]</sup>针对高强钢所需的整体成形性和局部成形性要求,从组织材料方面提出相应的改进方法。因此,对于提升边部成形能力,除了研究边部加工工艺,还需要从组织方面研发抗裂纹扩展的材料,以解决高强钢应用过程中的边部开裂问题。

为了研究精冲剪切面质量对边部成形性的影响,本文以 16MnCr5 钢、C20E 钢和 C35R 钢 3 种材料为研究对象,测试评估了 3 种材料在不同冲裁间隙、反顶力及压边力条件下的剪切面质量及扩孔性能。同时,与普通冲裁及铣削加工工艺对比,测试比较了不同剪切面质量下的扩孔性能,并通过仿真分析了损伤引入对扩孔性能的影响,以明确剪切面质量与边部成形性能的关系,为高强钢边部开裂问题的解决及精冲材料应用的升级提供借鉴和参考。

## 1 实验材料和方法

实验选择 3 种典型精冲材料 16MnCr5 钢、C20E 钢和 C35R 钢板料,其厚度分别为 4.5、3.8 和 5.0 mm,3 种材料均经过球化退火,具有良好的球化率。考虑到静水压力会影响剪切区域的塑性表现,从而对剪切面质量造成影响,精冲实验设置了不同的反顶力及压边力,同时评估了 4 种不同冲裁间隙下的剪切面质量。表 1 为精冲实验具体参数设置。

表 1 精冲实验参数

Table 1 Experimental parameters for fine blanking

参数	数值
材料	16MnCr5 钢、C20E 钢、C35R 钢
冲裁间隙/mm	0.02、0.04、0.06、0.10
压边力/kN	30
反顶力/kN	15、25

精冲坯料是直径为  $\Phi 100$  mm 的圆片。精冲时,在料片中心冲孔出直径为  $\Phi 10$  mm 的圆孔,冲孔完成后对精冲剪切面质量进行测量和评估,并利用该零件开展扩孔实验,评估精冲剪切面对扩孔性能的影响。图 1 为冲孔零件及剪切面质量测试方法示意图。评估精冲剪切面时,按照 A-A 分界线切割,采用体视显微镜对剪切面进行观察和测量,并按照式(1)计算光亮带占整体板厚的比率,以此评估精冲剪切面质量。

$$B = \left(1 - \frac{T_1}{T_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

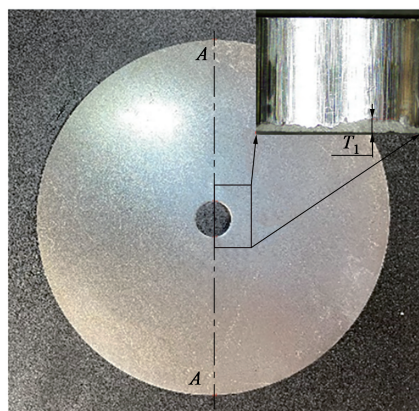


图1 冲孔零件及精冲剪切面质量测试方法

Fig. 1 Punched part and test method for shear surface quality of fine blanking

式中:  $T_1$  为断裂带最大高度;  $T_0$  为板料厚度;  $B$  为光亮带比例。

扩孔试验按照 GB/T 24524—2021<sup>[17]</sup> 开展并计算极限扩孔率。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 冲裁间隙对精冲剪切面质量的影响

图2为反顶力为15 kN、压边力为30 kN时,精冲剪切面光亮带比例随冲裁间隙的变化。可以看到,当冲裁间隙为0.02 mm时,3种材料的精冲剪切面的光亮带比例均接近100%,表明该工艺条件下可实现材料的100%光亮带冲裁,精冲零件可以获得最佳的剪切面质量和尺寸精度。随着冲裁间隙的逐渐增大,3种材料精冲剪切面的光亮带比例均呈现下降趋势,当冲裁间隙增加至0.10 mm时,光亮带比例依次降为90% (C20E钢)、89% (16MnCr5钢) 和86% (C35R钢),由于材料成分、组织及性能的差异,C35R钢的精冲剪切面光亮带比例明显低于16MnCr5钢及C20E钢,但均在80%以上。

### 2.2 冲裁间隙对扩孔性能的影响

基于上述不同工艺参数下获得的冲孔试样,按照 GB/T 24524—2021<sup>[17]</sup> 开展扩孔试验。图3为3种精冲材料在不同冲裁间隙下的极限扩孔率测试结果,其中,冲裁间隙为0.60 mm的扩孔试样采用普冲工艺制孔,其剪切面光亮带比例均在50%左右,其余4种冲裁间隙均为精冲工艺制孔,反顶力和压边力分别设置为15和30 kN。

可以看到,随着冲裁间隙逐渐增大,精冲冲孔的16MnCr5钢的极限扩孔率由132%逐渐下降至

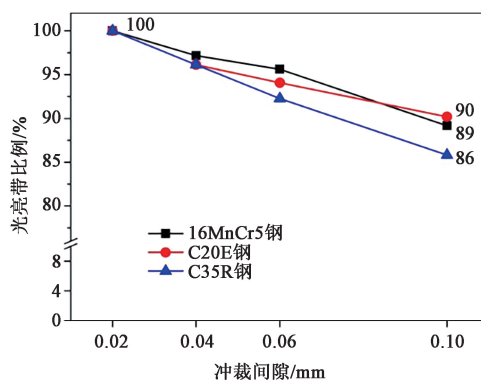


图2 冲裁间隙对3种材料精冲剪切面质量的影响

Fig. 2 Effect of blanking clearance on shear surface quality of fine blanking for three materials

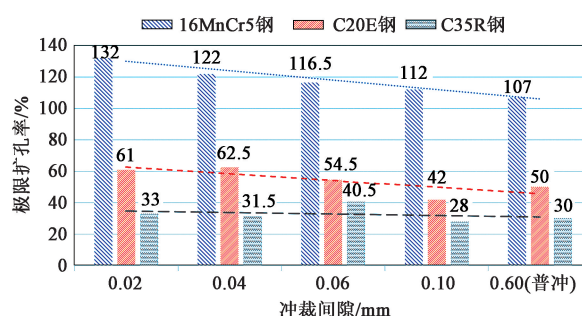


图3 不同冲裁间隙下3种材料精冲后的极限扩孔率对比

Fig. 3 Comparison of limit hole expansion ratio after fine blanking for three materials under different blanking clearances

112%, 呈现出较为明显的线性下降趋势,而普冲孔的极限扩孔率为107%,低于精冲冲孔。当冲裁间隙从0.02 mm增加至0.10 mm时,C20E钢的极限扩孔率由61%逐渐下降至42%,而普冲孔的极限扩孔率达到50%,略高于冲裁间隙为0.1 mm时对应的精冲冲孔的极限扩孔率。对于C35R钢,极限扩孔率随着冲裁间隙的增加有一定程度下降,但基本维持在30%上下波动,精冲工艺与普冲工艺获得的C35R钢扩孔试样未表现出明显的扩孔性能差异。整体上看,随精冲冲裁间隙的增大,16MnCr5钢与C20E钢呈现出明显的下降趋势,与精冲剪切面光亮带比例的变化规律相一致。对比3种材料在冲裁间隙为0.10和0.60 mm时的剪切面光亮带比例和极限扩孔率发现,普冲剪切面光亮带比例明显低于精冲剪切面,但两种工艺对应的扩孔性能并未表现出明显的差异,C20E钢及C35R钢在普冲工艺下的极限扩孔率甚至略高于精冲工艺。

研究表明<sup>[8,18]</sup>,铣削可显著提升材料边部的成形性能,本文采用铣削方式获得中心孔直径为 $\Phi 10$  mm的扩孔试样,并与普冲和精冲制孔试样开展



对比实验。图 4 为不同制孔工艺下试样的扩孔性能测试结果,结果显示:C20E 钢及 C35R 钢铣削后的极限扩孔率分别达到 300%和 290%,扩孔性能分别提升至精冲工艺的 4.9 倍和 8.8 倍;而 16MnCr5 钢由于扩孔性能较好,在极限扩孔率达到 300%时,仍未发生开裂,此时极限扩孔率达到精冲工艺的 2.3 倍。

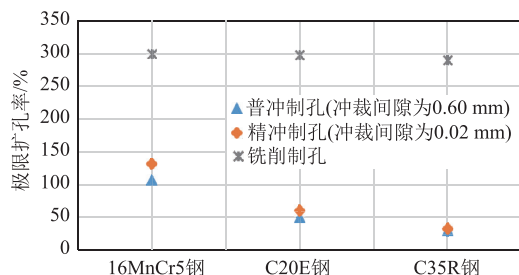


图 4 普冲、精冲与铣削制孔的极限扩孔率对比

Fig. 4 Comparison of limit hole expansion ratio for ordinary blanking, fine blanking and hole milling

以上结果显示,剪切面光亮带比例与材料的扩孔性能并不呈线性关系。精冲剪切面的光亮带比例相比普冲剪切面的光亮带比例大幅度提升,但极限扩孔率并无明显提升;铣削工艺与 0.02 mm 冲裁间隙下精冲工艺获得的剪切面光亮带比例均可以达到 100%,但铣削工艺极限扩孔率却可达到精冲工艺极限扩孔率的 8 倍之多,铣削工艺下的扩孔性能显著提升。

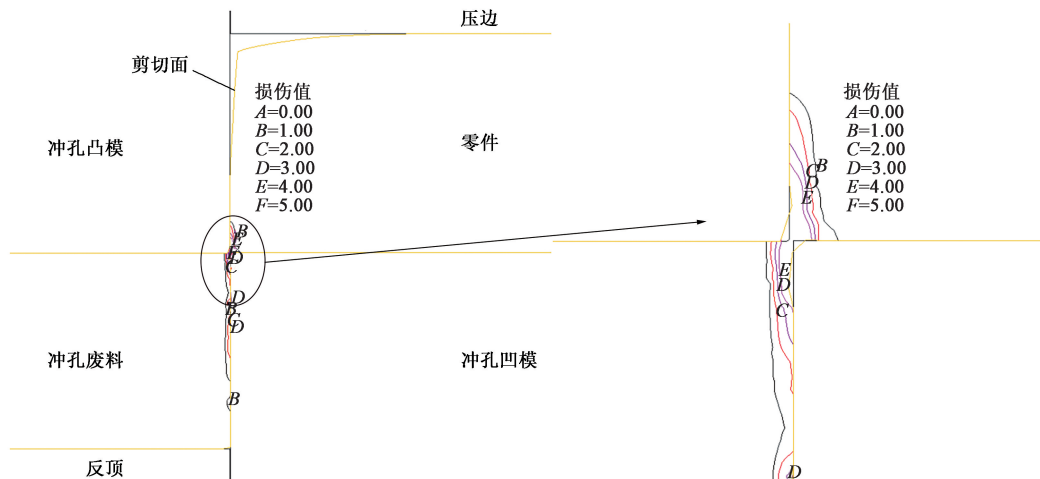


图 5 冲裁间隙为 0.02 mm 时精冲剪切面的损伤分布情况

Fig. 5 Damage distribution of fine blanking shear surface with blanking clearance of 0.02 mm

为对比精冲及铣削两种制孔工艺下扩孔后的损伤情况,假定铣削加工不引入损伤,将精冲损伤带入扩孔过程并开展仿真分析。图 6 为精冲工艺(冲裁间隙为 0.02 mm)与铣削工艺扩孔后损伤分布图。可以看到,扩孔凸模行程相同时,采用精冲工艺制

## 2.3 剪切面损伤对扩孔性能的影响及验证

3 种材料在普冲、精冲及铣削加工工艺下表现出明显的扩孔性能差异,并且与剪切面光亮带比例无直接关系。考虑到精冲与普冲均为冲裁工艺,不可避免地会对材料剪切面引入损伤,为分析损伤引入对扩孔性能差异的影响,以 16MnCr5 钢为例,选取冲裁间隙为 0.02 mm 的精冲工艺和铣削工艺开展仿真对比分析。两种工艺均可获得 100% 全光亮带,差异主要在于精冲工艺对材料的剪切面引入了损伤,而铣削加工引入的损伤则较小。仿真过程中,对剪切面附近网格细化,以提升仿真精度。损伤模型采用 Oyane 损伤模型<sup>[19]</sup>,该模型考虑了静水压应力对金属材料内部韧性断裂的影响,模型表达式为:

$$C = \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \left[ 1 + \frac{1}{a_0} \cdot \frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}} \right] d\bar{\varepsilon} \quad (2)$$

式中:  $C$  为损伤值;  $\bar{\sigma}$  为等效应力;  $\bar{\varepsilon}$  为等效应变;  $\bar{\varepsilon}_f$  为等效断裂应变;  $\sigma_H$  为静水压力;  $a_0$  为应力状态常数,此处取值为 0.31。

图 5 为冲裁间隙为 0.02 mm、反顶力为 15 kN 时精冲剪切面的损伤分布情况。可以看到,零件剪切面圆角带到光亮带基本无损伤,而毛刺端的材料越靠近材料表层,损伤值越高,最外侧区域 E 的损伤值达到 4.0 以上。随后,当零件成品和废料分离时,剪切面末端形成毛刺。

孔的扩孔试样靠近毛刺侧边缘处的仿真损伤值达到 4.5 以上,远高于铣削工艺的边部损伤值 2.3。扩孔前的冲裁过程已对材料剪切面造成一定的损伤,在随后的扩孔过程中,毛刺侧损伤值进一步增加,导致开裂提前发生。

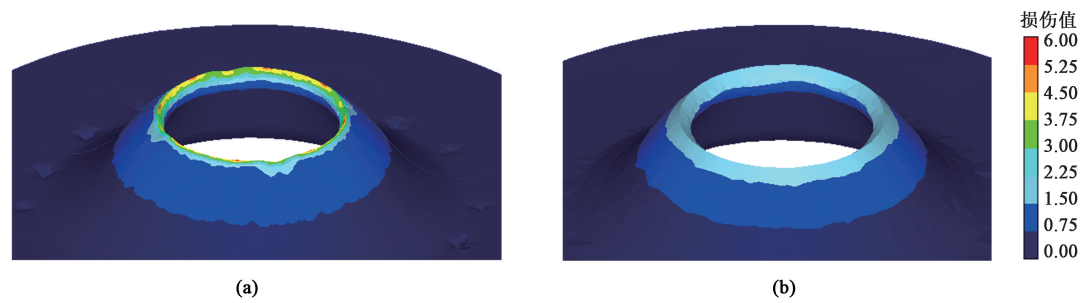


图 6 精冲 (a) 与铣削 (b) 扩孔后的损伤分布对比图

Fig. 6 Damage distribution comparison after hole expansion between fine blanking (a) and milling (b)

基于以上分析,考虑到减少剪切面材料损伤或可提升扩孔性能,开展两项实验进行验证。实验一,同一精冲工艺扩孔试样,测试毛刺朝向改变后板料的极限扩孔率变化;实验二,验证增加剪切变形区静水压应力后的极限扩孔率变化情况。

表 2 为精冲冲裁间隙为 0.02 mm 时毛刺朝向改变后极限扩孔率变化情况,毛刺朝上表示初始扩孔时毛刺侧处于扩孔过程中的拉应力区域,毛刺朝下则表示初始扩孔时塌角面位于扩孔过程中的拉应力区。可以看到,毛刺朝向改变后,3 种材料的极限扩孔率分别增加了 51%、69%和 127%,扩孔性能显著提升。这是由于精冲剪切面塌角侧的损伤值远低

于毛刺侧的损伤值,在相同扩孔工艺条件下,损伤值较低的一侧开裂时刻更晚,故极限扩孔率获得了显著的提升。

表 3 为精冲冲裁间隙为 0.10 mm 时反顶力增加后扩孔性能的变化情况。可以看到,反顶力由 15 kN 增加至 25 kN 后,3 种材料的极限扩孔率分别增加了 33%、19%和 30%,这主要是由于反顶力的增加改善了精冲剪切面的静水压应力情况。图 7 显示当反顶力由 15 kN 增加至 25 kN 后,剪切区域的静水应力降低了 30 MPa 左右,有利于降低剪切面的损伤值,一定程度上提高了材料的扩孔性能。但由于损伤并没有根本性的改善,反顶力对扩孔性能的改善相比毛刺朝向对扩孔性能的改善并不显著。

表 2 毛刺朝向对扩孔性能的影响

Table 2 Effect of burr direction on hole expansion performance			
材料	极限扩孔率/%		毛刺朝向改变后极限扩孔率增加量/%
	毛刺朝上	毛刺朝下	
16MnCr5 钢	113	171	51
C20E 钢	61	103	69
C35R 钢	33	75	127

表 3 反顶力对扩孔性能的影响

Table 3 Effect of counter force on hole expansion performance			
材料	极限扩孔率/%		反顶力增加后极限扩孔率增加量/%
	反顶力为 15 kN	反顶力为 25 kN	
16MnCr5 钢	112	149	33
C20E 钢	42	50	19
C35R 钢	28	36.5	30

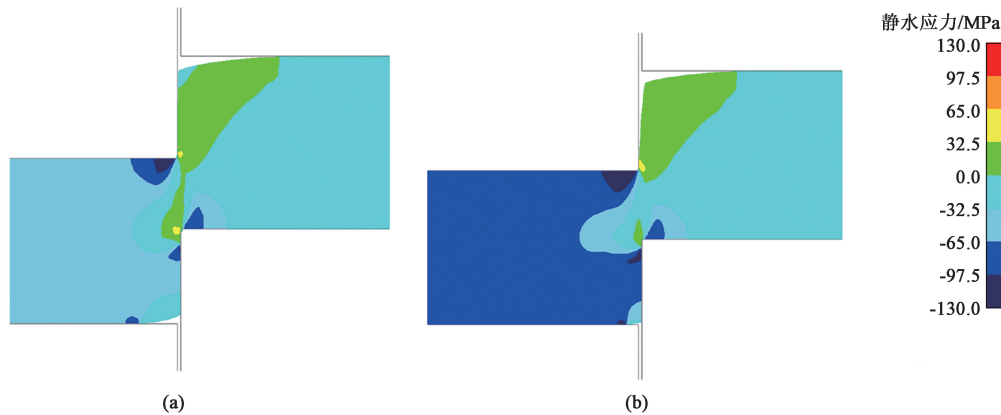


图 7 反顶力增加后剪切区域静水应力变化

(a) 15 kN (b) 25 kN

Fig. 7 Changes of hydrostatic stress in shear area with increasing of counter force

因此, 冲裁对材料造成的损伤是影响材料扩孔性能的主要因素, 精冲和普冲均无法完全消除材料分离时引起的材料损伤, 而铣削工艺主要基于高速旋转刀具切割<sup>[20]</sup>, 在实现 100% 光亮带比例的基础上, 可以大大减少剪切面的材料损伤, 使得材料边部成形能力得到提升。

### 3 结论

(1) 精冲工艺在小冲裁间隙的基础上叠加三向压应力, 可以使零件获得高光亮带比例的剪切面及良好的尺寸精度。当精冲冲裁间隙从 0.02 mm 增加至 0.10 mm 时, 3 种材料 (16MnCr5 钢、C20E 钢和 C35R 钢) 的精冲剪切面光亮带比例由 100% 分别降至 89%、90% 和 86%, 其扩孔试样的极限扩孔率也逐渐降低。对比普通冲裁 (冲裁间隙为 0.60 mm) 工艺, 其剪切面光亮带比例远低于精冲工艺, 但其极限扩孔率与 0.10 mm 冲裁间隙下精冲扩孔试样的结果接近, C20E 钢及 C35R 钢在普冲工艺下的极限扩孔率甚至略高于精冲工艺。与铣削工艺相比, 在光亮带比例均为 100% 的情况下, 铣削扩孔试样的极限扩孔率为精冲工艺的 2~8 倍。

(2) 剪切面光亮带比例与材料扩孔性能不呈线性关系, 冲裁过程中材料分离引起的材料损伤是影响材料边部成形性能的关键因素。仿真结果显示: 精冲工艺下剪切面圆角带到光亮带基本无损伤, 而毛刺端越靠近材料表层, 损伤值越高, 后续扩孔过程中损伤值也会进一步增加; 扩孔凸模行程相同时, 采用冲裁方式加工的扩孔试样的损伤值高于铣削加工试样。

(3) 在相同扩孔工艺条件下, 剪切面塌角侧的损伤值远低于毛刺侧的损伤值; 相比静水压应力增加带来的损伤值降低, 毛刺朝向改变后对扩孔性能的提升更为显著。

(4) 可通过减小冲裁间隙或增加剪切区域静水压力来提高剪切面光亮带比例, 但剪切面光亮带比例提高可能对提升材料边部成形能力无明显效果。为了减少边部开裂风险, 尽量减少冲压过程中边部累积的损伤是提升材料边部成形性能的有效手段。

#### 参考文献:

- [1] 黄毅宏, 黎厚芳, 简智彪. 精冲工艺及其机理探讨 [J]. 中国机械工程, 1994, 5 (5): 57-59.  
Huang Y H, Li H F, Jian Z B. A study on the fine blanking process and its mechanism [J]. China Mechanical Engineering, 1994, 5 (5): 57-59.
- [2] 黄涛. 精冲分离过程的数值模拟与质量控制 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.  
Huang T. Numerical Simulation and Quality Control to Fine Blanking Processes [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- [3] 关欣, 沈伟财, 向华, 等. 精冲钢半冲特征连接强度实验研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (8): 66-71, 124.  
Guan X, Shen W C, Xiang H, et al. Experimental investigation on connection strength of half-blanking feature for fine-blanking steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (8): 66-71, 124.
- [4] Yoon J I, Jung J, Joo S H, et al. Correlation between fracture toughness and stretch-flangeability of advanced high strength steels [J]. Materials Letters, 2016, 180: 322-326.
- [5] 李涛, 韩龙帅, 郑学斌, 等. 高强度钢边部开裂影响因素研究 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (4): 173-177.  
Li T, Han L S, Zheng X B, et al. Influence of factors on edge crack of high strength steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (4): 173-177.
- [6] 郑欢, 吴彦骏, 刁可山, 等. 边部冲裁对双相钢拉伸性能影响的实验研究 [J]. 上海交通大学学报, 2014, 48 (3): 405-411.  
Zheng H, Wu Y J, Diao K S, et al. Experimental investigation of the influence of sheared edge on tensile properties of dual phase steel [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48 (3): 405-411.
- [7] 李永好. 多种超高强度钢板冲裁质量评估及边缘成形性能的比较研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019.  
Li Y H. Research on the Evaluation of Shearing Edge Quality and Edge Formability for Various Ultra High Strength Steels [D]. Shanghai: Journal of Shanghai Jiaotong University, 2019.
- [8] 周明. 剪切边质量对高强度钢拉伸性能与断裂模式影响的实验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.  
Zhou M. Experimental Investigation on the Influence of Edge Quality on Tensile Property and Fracture Modes of High Strength Steel [D]. Shanghai: Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018.
- [9] Dykeman J, Malcolm S, Yan B, et al. Characterization of Edge fracture in various types of advanced high strength steel [R]. SAE Technical Paper, 2011.
- [10] 王雪听, 牛超. 基于半球凸模试验的高强度钢边部成形性敏感度分析 [J]. 模具工业, 2021, 47 (3): 61-65.  
Wang X T, Niu C. Analysis on high-strength steel edge forming sensitivity based on hemispherical punch test [J]. Die & Mould Industry, 2021, 47 (3): 61-65.
- [11] Chang Y, Han S, Li X D, et al. Effects of different cutting processes on characteristics of cut damage for the third-generation automobile medium-Mn steel [J]. Steel Research International, 2018, 89 (9): 1700375.
- [12] Levy B S, Gibbs M, Van Tyne C J. Failure during sheared edge stretching of dual-phase steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44: 3635-3648.

- [13] Cho W, Jeong B S, Jeong K, et al. New approach to hole-expansion ratio in complex phase and martensitic steels; Understanding the role of punching damage [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 837-849.
- [14] 龚宇, Hua M, Uusitalo J, 等. 改善高强双相钢冲裁边部成形性能 [J]. *钢铁钒钛*, 2016, 37 (4): 143-151.
- Gong Y, Hua M, Uusitalo J, et al. Improving the sheared-edge formability of high strength dual-phase steel [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2016, 37 (4): 143-151.
- [15] Hofmann H, Mattissen D, Schaumann T W. Advanced cold rolled steels for automotive applications [J]. *Steel Research International*, 2009, 80 (1): 22-28.
- [16] Lesch C, Kwiaton N, Klose F B. Advanced high strength steels (AHSS) for automotive applications-tailored properties by smart microstructural adjustments [J]. *Steel Research International*, 2017, 88 (10): 1700210.
- [17] GB/T 24524—2021, 金属材料 薄板和薄带 扩孔试验方法 [S].
- GB/T 24524—2021, Metallic materials—Sheet and strip—Hole expanding test [S].
- [18] 李亚, 牛超, 连昌伟. 切边工艺对高强钢成形性能与断裂模式影响的实验研究 [J]. *锻压技术*, 2024, 49 (6): 110-115.
- Li Y, Niu C, Lian C W. Experimental study on influence of cutting process on formability and fracture mode for high strength steel [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2024, 49 (6): 110-115.
- [19] Mahalle G, Kotkunde N, Gupta A K, et al. An improved M-K model coupled with different ductile criteria for fracture limit predictions of Inconel 718 alloy [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 11: 1162-1174.
- [20] Zi Y, Guo Q, Zheng Z X, et al. Study on formation of exit edge defects in the milling process by using the combined theory of the energy conservation and orthogonal cutting mechanism [J]. *Precision Engineering*, 2024, 89: 135-149.

+++++

(上接第5页)

- [3] 吴正乾, 程艳. 机械振动对动力电池用钒基储氢合金组织与性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2016, 45 (3): 90-92.
- Wu Z Q, Chen Y. Influence of mechanical vibration on microstructure and properties of V-based hydrogen storage alloy for electric vehicles power battery [J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45 (3): 90-92.
- [4] 孙成宁, 黄伟, 张军超. 基于机械振动的钒基储氢汽车电池合金制备及性能研究 [J]. *钢铁钒钛*, 2020, 41 (4): 65-69.
- Sun C N, Wang W, Zhang J C. Preparation and properties of vanadium-based hydrogen storage alloy based on mechanical vibration [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2020, 41 (4): 65-69.
- [5] 魏胜君, 刘利杰. V-Ti-Ni-Al 电池负极用钒基储氢合金的制备及性能研究 [J]. *钢铁钒钛*, 2020, 41 (1): 54-58.
- Wei S J, Liu L J. Preparation and properties of vanadium-based hydrogen storage alloy for V-Ti-Ni-Al battery negative electrode [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2020, 41 (1): 54-58.
- [6] 吴玲. 凝固方式对钒基储氢合金性能的影响 [J]. *钢铁钒钛*, 2017, 38 (3): 67-70.
- Wu L. Effects of solidification mode on electrochemical and hydrogen storage properties of vanadium-based alloy [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2017, 38 (3): 67-70.
- [7] 王明绪, 刘强强. 旋锻对粉末冶金钒基储氢合金性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2020, 49 (21): 96-98.
- Wang M X, Liu Q Q. Effect of rotary forging on properties of powder metallurgy vanadium-based hydrogen storage alloy [J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49 (21): 96-98.
- [8] 荣莉, 聂祚仁, 梁霄鹏. 热旋锻 AZ61 镁合金的显微组织与力学性能 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49 (10): 3479-3483.
- Rong L, Nie Z R, Liang X P. Microstructure and mechanical properties of AZ61 alloy processed by rotary swaging [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49 (10): 3479-3483.
- [9] 黄伟, 龚留奎, 黄实哈, 等. 旋锻对 Cu-0.51Cr-0.06Zr 合金组织性能的影响 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2022, 45 (1): 83-88.
- Huang W, Gong L K, Huang S H, et al. Effect of rotary forging on microstructure and properties of Cu-0.51Cr-0.06Zr alloy [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2022, 45 (1): 83-88.
- [10] 冶金学名词审定委员会. 冶金学名词 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2019.
- Metallurgical Terminology Review Committee. Chinese Terms in Metallurgy [M]. 2nd Edition. Beijing: Science Press, 2019.
- [11] 王金凤, 赵帆, 刘新华. 旋锻复合铜包铝线材的组织性能 [J]. *中国有色金属学报*, 2023, 33 (3): 729-740.
- Wan J F, Zhao F, Liu X H. Microstructure and properties of copper-clad beryllium copper wire fabricated by rotary swaging [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2023, 33 (3): 729-740.
- [12] 李婉婉. 旋转锻造 90W-7Ni-3Fe 高密度钨合金组织性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- Li M M. Study on the Microstructure and Properties of 90W-7Ni-3Fe High-density Tungsten Alloy by Rotary Forging [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [13] 李守奎. 石墨烯含量对钒基储氢电池耐腐蚀性和吸放氢性能的影响 [J]. *钢铁钒钛*, 2016, 37 (4): 40-43.
- Li S K. Effect of graphene content on the corrosion resistance and hydrogen adsorption-desorption properties of the vanadium-based hydrogen storage battery [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2016, 37 (4): 40-43.