

切边工艺对高强钢成形性能与断裂模式影响的实验研究

李亚^{1,2}, 牛超^{1,2}, 连昌伟^{1,2}

(1. 宝山钢铁股份有限公司中央研究院, 上海 201900; 2. 汽车用钢开发与应用技术国家重点实验室(宝钢), 上海 201900)

摘要: 选用 DP980 钢与 QP980 钢材料, 采用铣削、水洗、线切割和冲裁的方式加工试样, 并利用基于 DIC 方法的剪切边拉伸实验比较不同的切边工艺对试样的断裂伸长率和断裂应变的影响, 对不同切边工艺下试样的拉伸断裂过程进行追踪, 分析不同钢种的颈缩变形与断口形貌, 阐述了基于颈缩原理建立的传统成形极限图不再适用于预测高强钢边部开裂的原因, 因此, 断裂失效模型必须考虑切边工艺对边部影响。实验结果表明, 剪切边拉伸实验会产生两种断裂模式: 颈缩断裂和剪切边断裂。QP980 钢比 DP980 钢对切边工艺更敏感, 局部成形性能更好, 对于 QP980 钢来说, 采用边部去除材料的冷加工方法(水洗、铣削)得到的材料性能优于热加工方法(线切割), 且优于冲裁边缘。对于两种钢来说, 打磨冲裁边缘可以有效提高材料性能。

关键词: 切边工艺; DP980 钢; QP980 钢; 剪切边拉伸实验; 边部开裂; 断裂应变; 断裂伸长率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.06.013

中图分类号: TB302.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940(2024)06-0110-06

Experimental study on influence of cutting process on formability and fracture mode for high strength steel

Li Ya^{1,2}, Niu Chao^{1,2}, Lian Changwei^{1,2}

(1. Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China;

2. State Key Laboratory of Automotive Steel Development and Application Technology (Baosteel), Shanghai 201900, China)

Abstract: For DP980 steel and QP980 steel materials, the specimens were machined by milling, water jet cutting, wire electrical discharge machining and blanking, and the influences of different cutting processes on fracture elongation and fracture strain were compared by the shear edge tensile experiments based on DIC method. Then, the tensile fracture process of specimens under different cutting processes was tracked, and the necking deformation and fracture morphology of different steels were analyzed. Furthermore, the reason why the traditional forming limit diagram, which was established based on necking principle, could not accurately predict the edge cracking of high strength steel was explained. And so the influence of the cutting process on the edge must be considered in the fracture failure model. The experiment results show that necking fracture and shear edge fracture are two typical fracture modes in the shear edge tensile experiment, and QP980 steel is more sensitive to the cutting process and has better local formability than DP980 steel. For QP980 steel, the properties of material obtained by cold working methods (water jet cutting and milling) which removes material from the edges is better than that of hot working methods (wire electrical discharge machining), and it is superior to blanking edge. Thus, for two kinds of steel, grinding the blanked edges can effectively improve the material properties.

Key words: cutting process; DP980 steel; QP980 steel; shear edge tensile experiment; edge cracking; fracture strain; fracture elongation

日益严格的汽车碰撞安全法规与汽车轻量化需求推动了高强钢使用比例的持续增长, 高强钢可同时满足安全、减重与低成本要求, 但高强钢制造汽车零件变得越来越困难^[1-2]。高强钢在冲压过程中, 即使在低于成形极限应变的情况下, 也极易出现边部破裂失效的问题, 因此, 材料边部拉伸性能对冲压成形性能有较大的影响^[3-4]。

目前, 可以用来描述高强钢边部成形性能的实验方法有扩孔实验和剪切边拉伸实验, 均可用来研究多种切边工艺的影响, 剪切边拉伸实验方法相较于传统的扩孔实验, 操作简单^[5-6], 在获得材料边部成形性能的同时还可获得材料的力学性能, 可以与成形极限曲线 (Forming Limit Curve, FLC) 相结合来描述材料的整体成形性能。

常用的试样切边工艺有铣削、水洗、线切割和冲裁等。不同的切边工艺在切边操作过程中对材料边部造成的影响不同, 有的切边工艺甚至会造成边部损伤, 从而影响材料的边部拉伸性能^[7-9]。双相

收稿日期: 2024-04-23; 修订日期: 2024-06-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFB0304403)

作者简介: 李亚 (1989-), 女, 硕士, 中级工程师

E-mail: liya@baosteel.com

钢 (DP 钢) 与淬火延性钢 (QP 钢) 作为两种典型的先进高强钢, 具有良好的成形性能和较高的强度, 常被应用于各类车身结构件^[10-11]。因此, 文中以 DP 钢和 QP 钢为例, 对铣削、水洗、线切割、冲裁这几种代表性切边工艺切边的后续拉伸成形性能与断裂特性进行研究, 采用数字图像相关技术 (Digital Image Correlation, DIC), 跟踪两个钢种拉伸试样在剪切边拉伸实验过程中的裂纹扩展过程, 分析不同切边工艺对拉伸性能和断裂失效模式的影响, 为高强钢切边工艺的选择和预防边部开裂提供参考。

1 实验材料和方法

以高强钢 DP980 和 QP980 两种材料为实验用材, 采用铣削方式加工试样, 测试两种高强钢轧制方向的力学性能, 结果见表 1。

表 1 两种高强钢材料的力学性能

Table 1 Mechanical properties of two kinds of high strength steel materials

材料	厚度/ mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	均匀伸长 率/%	断裂伸长 率/%
DP980 钢	1.6	819	1063	6.8	13.5
QP980 钢	1.4	744	1049	14.9	22.6

在 Zwick 万能实验机上采用 GOM 三维光学变形和应变测量分析系统, 根据 GB/T 228.1—2021^[12] 和 ASTM E111-97^[13] 进行剪切边拉伸实验。选取相对材料厚度 10% 间隙的模具来冲裁试样, 对冲裁、铣削加工、线切割、水洗不同加工方式下的 QP980 钢和 DP980 钢标准单拉试样开展剪切边拉伸实验。线切割分为慢走丝和快走丝两种工艺, 冲裁后用砂纸打磨一

组试样作为对比组。

2 结果及分析

2.1 不同切边工艺对断裂伸长率与断裂应变的影响

不同的切边工艺对屈服强度、抗拉强度及均匀伸长率无明显影响, 因此, 仅比较 QP980 和 DP980 两种高强钢拉伸试样的断裂伸长率和断裂应变, 如表 2 所示。

表 2 不同切边工艺下两种高强钢材料的断裂伸长率和断裂应变

Table 2 Fracture elongation and fracture strain for two kinds of high strength steel materials under different cutting processes

材料	切边工艺	断裂伸长率/%	断裂应变
DP980 钢	冲裁	9.9	0.36
	冲裁+打磨	12.4	0.41
	铣削	13.5	0.36
	慢走丝线切割	13.6	0.40
	快走丝线切割	13.3	0.37
	水洗	12.3	0.39
QP980 钢	冲裁	21.0	0.26
	冲裁+打磨	21.4	0.44
	铣削	22.6	0.58
	慢走丝线切割	22.0	0.49
	快走丝线切割	22.0	0.41
	水洗	24.3	0.55

不同切边工艺下, DP980 钢试样拉伸后的断裂伸长率和断裂前一帧的断裂应变如图 1 所示, 冲裁+打磨试样、慢走丝线切割试样、水洗试样的断裂应变最大, 边部成形性略好。

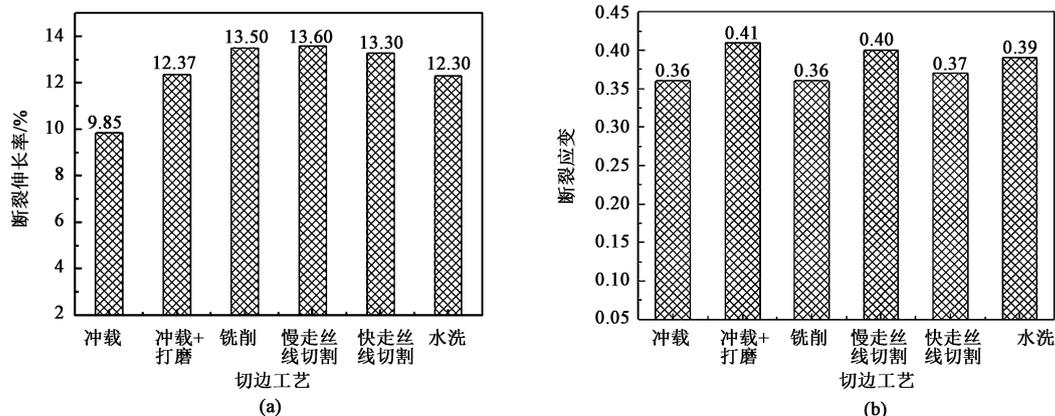


图 1 切边工艺对 DP980 钢断裂伸长率 (a) 与断裂应变 (b) 的影响

Fig. 1 Influences of cutting process on fracture elongation (a) and fracture strain (b) for DP980 steel

而 QP980 钢在不同切边工艺下试样拉伸后的断裂伸长率和断裂前一帧的断裂应变如图 2 所示, 由图 2 可以看出, 铣削和水洗试样的断裂伸长率和断裂应变最大, 而冲裁试样的断裂伸长率和断裂应变最小, 表明材料的后续拉伸性能最差。改变加工方式将严重影响该钢种的局部成形性, 说明该钢种对切边工艺尤其敏感。水洗和铣削切边

试样是在常温下切割, 无热变形, 避免了材料的物理化学变化, 不损伤材料表面; 而快走丝线切割边部有线切割痕和热影响区; 冲裁试样边部的毛刺导致边部成形性偏差; 当采用慢速走丝的线切割工艺时, 电极丝移动速度低、损耗大, 加工表面精度高, 可以获得较好的切边效果, 提高材料的局部成形性。

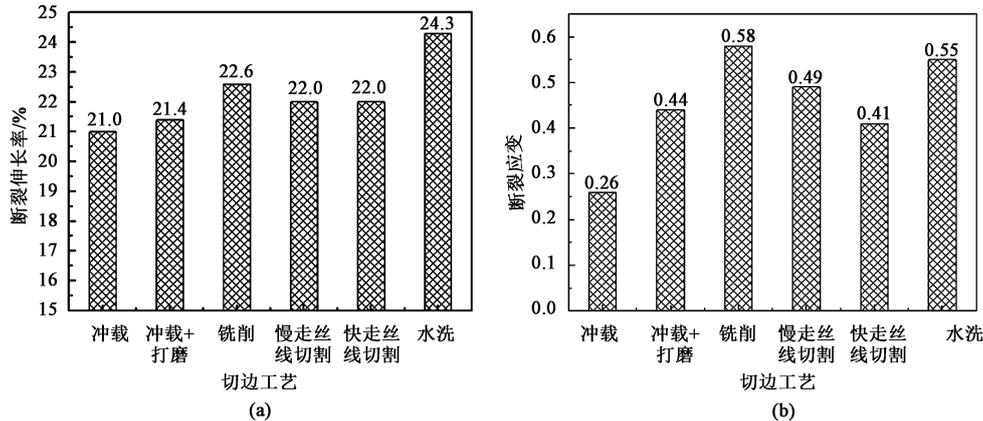


图 2 切边工艺对 QP980 钢断裂伸长率 (a) 与断裂应变 (b) 的影响

Fig. 2 Influences of cutting process on fracture elongation (a) and fracture strain (b) for QP980 steel

对于两个钢种来说, 冲裁工艺得到的试样的拉伸性能最差, 最容易导致边部开裂, 打磨边部可以有效提高拉伸性能, 边部成形性能甚至优于快走丝线切割工艺, 而慢走丝线切割工艺的边部性能优于快走丝线切割工艺。尽管慢走丝线切割、铣削、水洗对边部损伤小且后续拉伸性能较好, 但是铣削和线切割效率低、速度慢, 线切割通常需要利用其他方法穿孔、穿丝才能进行后续切割, 而水洗方法成本高, 仅适合小批量试模, 实际生产中大批量金属板料通常采用冲裁落料的方式, 效率高、速度快, 但冲裁后需打磨, 打磨边部可提升材料的拉伸性能。

2.2 高强钢的拉伸断裂失效模式

不同切边工艺下 QP980 钢试样断裂区域的应变场和断口形貌如图 3 所示。由图 3 可以看出, 冲裁试样的裂纹起源于剪切边部, 应变分布相对均匀, 断裂前的最大等效应变点位于试样边部, 试样在均匀变形阶段即从剪切边部开始开裂, 裂纹从边部快速横向扩展, 接着沿一定的倾角扩展直至试样完全断裂, 断口由一段横裂纹和一段斜裂纹组成, 其断裂形式表现为边部断裂, 断裂模式为剪切边部断裂。而其他试样的中心位置出现等效应变最大点, 断裂前试样出现应变集中区, 表明试样已经处于非均匀变形阶段, 水洗、铣削与慢走丝线切割试样的裂纹从试样中心产生, 横向扩展至两侧, 随后两侧均形

成一段斜裂纹。慢走丝线切割试样裂纹从试样中心位置起源, 横向扩展至两侧直至断裂。由图 3a 和图 3b 可知, 断裂前均发生了明显的颈缩, 其断裂模式为颈缩断裂。QP980 钢材料对边部质量比较敏感, 未产生局部变薄与颈缩时就容易从边部发生破坏, 呈现明显的脆性化趋势, 断裂方式随机且对初始缺陷敏感。

颈缩断裂是最常见的拉伸断裂, 属于典型的韧性断裂, 而剪切边断裂较多出现在高强钢成形过程中。发生颈缩断裂时, 裂纹从中心产生, 随后扩展至两侧, 在较大的应变下断裂破坏; 而剪切边断裂容易出现在冲裁边部, 裂纹从边部萌生, 边部还未产生明显的颈缩, 就开始发生破坏, 裂纹从边部迅速扩展直至断裂。如图 4 所示, 材料一边发生边部裂纹萌生, 另一边同时发生颈缩变形, 但边部区域的应力、应变快速提高, 比颈缩区域更快发生破裂, 裂纹急速扩展至另一边形成宏观断裂, 表明剪切边断裂比颈缩断裂提前发生, 导致材料的边部拉伸性能变差。

DP980 钢试样的两种断裂方式如图 5 所示, 可以看出, 无论裂纹从试样中间还是边部扩展, DP980 钢的断口均为斜裂纹。当切边工艺对边部加工质量影响较小时, 裂纹从试样中心位置起源, 断口特写如图 5c 所示, 可以看出, 材料拉伸失效前发生了明显可见的颈缩。但当切边工艺影响边部加工质量时, 如冲裁边部粗糙的断面, 此时断裂前的最大

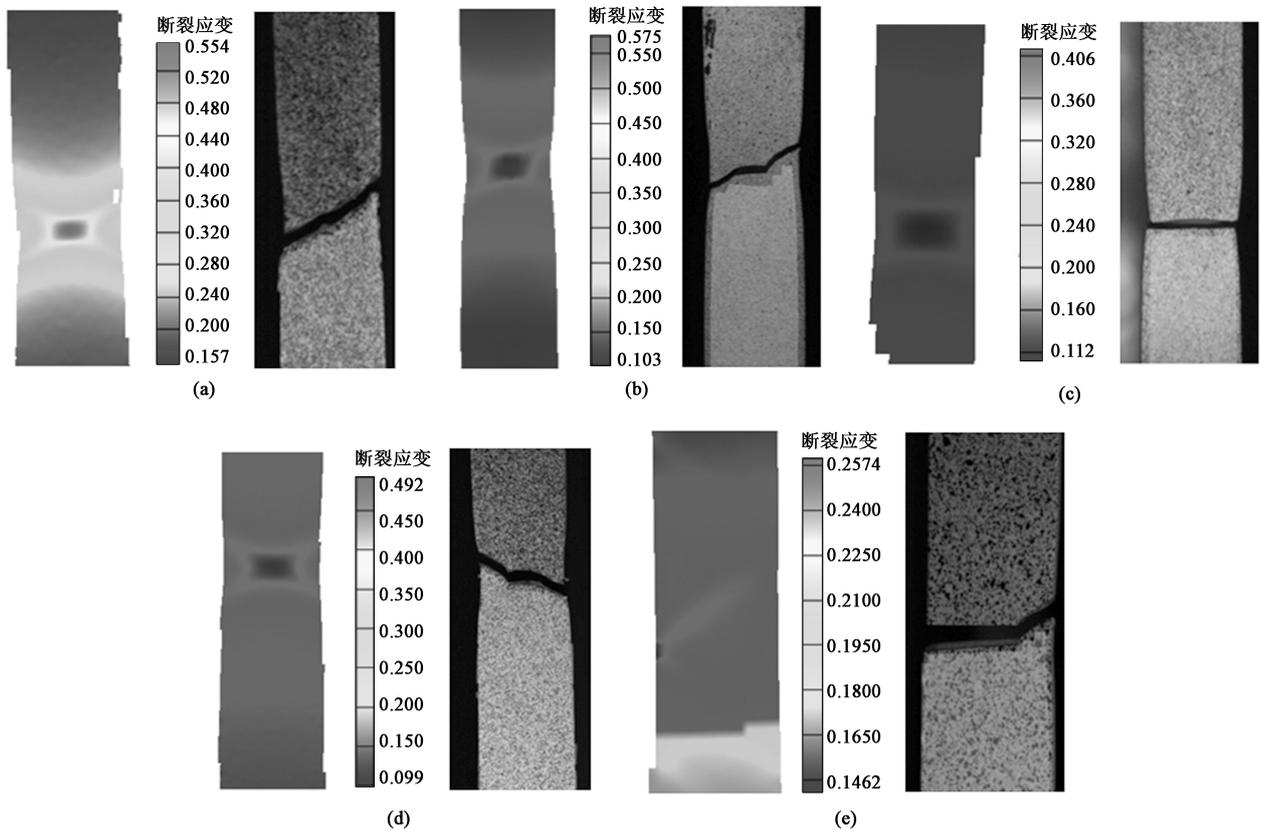


图 3 不同切边工艺下 QP980 钢的断裂应变和断口形貌

(a) 水洗 (b) 铣削 (c) 快走丝线切割 (d) 慢走丝线切割 (e) 冲裁

Fig. 3 Fracture strains and fracture morphologies of QP980 steel under different cutting processes

(a) Water jet cutting (b) Milling (c) High speed wire electrical discharge machining

(d) Low speed wire electrical discharge machining (e) Blanking

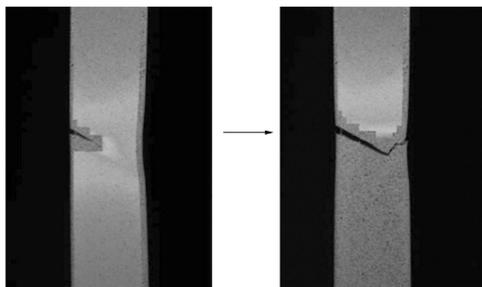


图 4 边部裂纹扩展过程

Fig. 4 Propagation process of edge crack

等效应变点有可能出现在试样边部，导致裂纹从边部起源，还未产生明显的颈缩，边部就开始发生破坏，使断裂应变和断裂伸长率减小，降低材料的边部成形性，断口特写见图 5f，可以看出，材料拉伸失效前颈缩不明显。对于发生边部开裂的情况，由于材料局部成形性失效前不会发生明显的变薄与颈缩，在失效之前不存在可检测颈缩开始点。因此，当使用基于颈缩失稳理论建立的 FLD 作为失效标准时，无法通过成形模拟来精确地预测边部开裂的失

效现象。将边部失效点应变路径绘制于 FLD 上，如图 6 所示，可以看出，材料边部断裂失效点落在 FLD 的安全区域，失效时的主、次应变远低于传统 FLD 的预测值，因此，传统评价整体成形性的 FLD 不再适合预测先进高强钢与落料和修边工艺相关的边部损伤造成的边部失效。

模拟标准材料拉伸试样拉断过程，绘制试样的应力-应变曲线，见图 7，并分析材料单向拉伸时的应力变化路径，将其绘制在断裂失效图上，见图 8。单向拉伸状态的应力三轴度为 1/3，理想情况下在实验过程中施加的为线性载荷，但实际的单向拉伸实验中应力路径如图 8 中虚线所示。材料在颈缩前一直处于简单的单向拉伸应变状态，颈缩点后材料发生分散性失稳，应变状态可以近似等于简单拉伸状态，但材料发生集中性失稳后，应变状态急剧向平面应变转变，此时获得的断裂应变不再是简单的单向拉伸失效应变，因此，从实验中获得的断裂应变只是近似值，通常小于理论值。切边工艺导致的

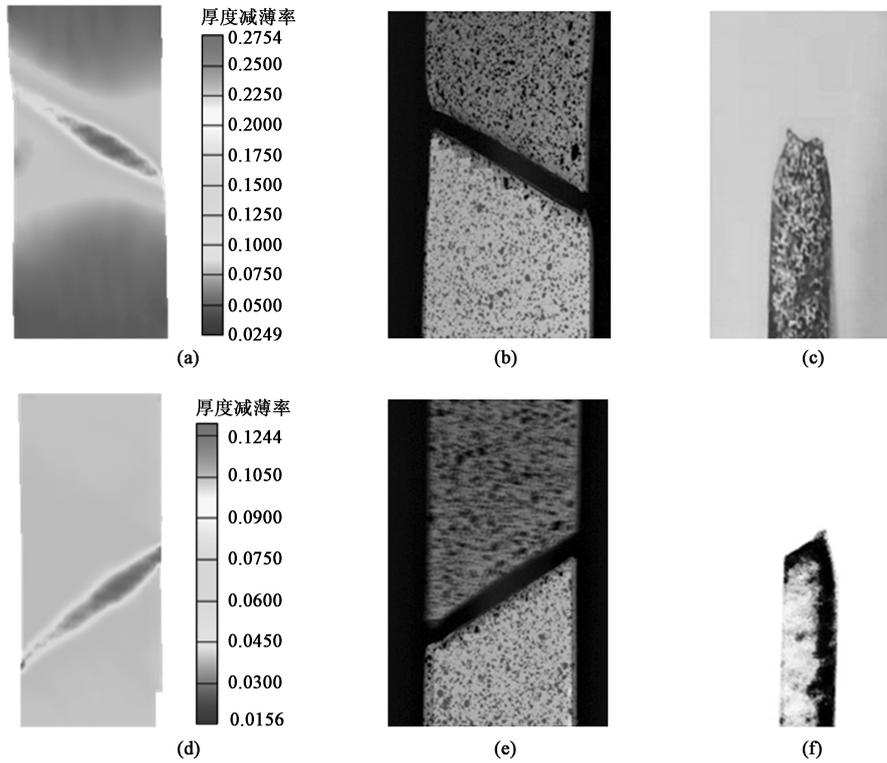


图 5 不同断裂方式下 DP980 钢试样断裂前的厚度减薄率、断口形貌和断口特写

(a) 颈缩断裂, 厚度减薄率 (b) 颈缩断裂, 断口形貌 (c) 颈缩断裂, 断口特写 (d) 剪切边断裂, 厚度减薄率 (e) 剪切边断裂, 断口形貌 (f) 剪切边断裂, 断口特写

Fig. 5 Thickness thinning rate before failure, fracture morphologies and fracture close-up of DP980 steel samples under different fracture modes

(a) Necking fracture, thickness thinning rate (b) Necking fracture, fracture morphology (c) Necking fracture, fracture close-up (d) Shear edge fracture, thickness thinning rate (e) Shear edge fracture, fracture morphology (f) Shear edge fracture, fracture close-up

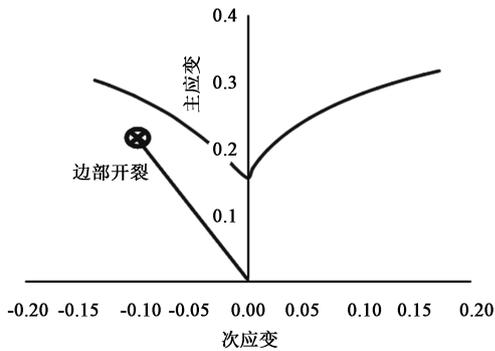


图 6 DP980 钢的 FLD 和单向拉伸边部开裂点应变路径

Fig. 6 FLD and uniaxial tensile strain path of failure points at edge for DP980 steel

边部损伤使材料边部的断裂极限降低, 严重影响材料断裂行为, 断裂极限越低, 材料发生断裂的时刻越早, 宏观上可以承受的变形更小, 拟合出的断裂应变低于原始材料。

3 结论

(1) QP980 钢比 DP980 钢对切边工艺更为敏

感, 对于 QP 钢来说, 采用边部去除材料的冷加工方法 (水洗、铣削等) 的材料性能优于热加工方法 (线切割), 且优于冲裁边缘。对于两个钢种来说, 冲裁后打磨边部可显著提高高强钢的拉伸性能。

(2) 不同切边工艺下的高强钢材料在拉伸断裂过程中有颈缩断裂和剪切边断裂两种失效模式, 剪切边断裂一定程度上会降低材料的成形性。传统成形极限图的理论基础是颈缩失稳理论, 不再适合于预测由于边部损伤而造成的高强钢材料边部开裂, 材料的断裂失效图也应考虑切边过程造成的边部损伤。

参考文献:

[1] Czerwinski F. Current trends in automotive lightweighting strategies and materials [J]. Materials, 2021, 14 (21): 6631.

[2] 范子杰, 桂良进, 苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展 [J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5 (1): 1-16. Fang Z J, Gui L J, Su R Y. Research and development of automotive lightweight technology [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014, 5 (1): 1-16.

[3] 世界钢铁协会. 先进高强度钢应用指南 [M]. 宝山钢铁股份有限公司, 译. 北京: 冶金工业出版社, 2018.

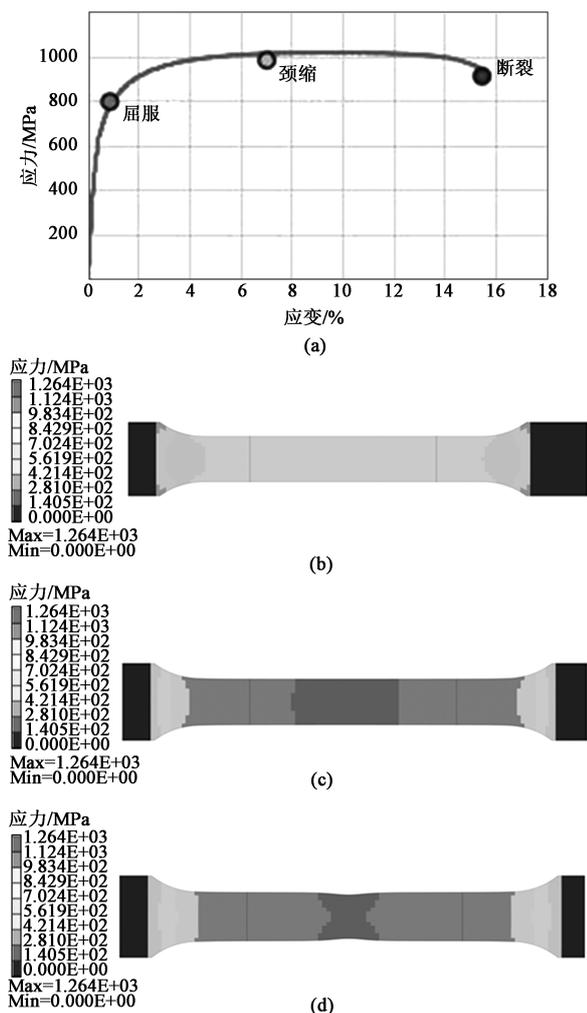


图 7 DP980 钢单向拉伸应力-应变曲线和应力场分布云图

(a) 应力-应变曲线 (b) 屈服阶段应力场分布云图

(c) 颈缩阶段应力场分布云图 (d) 断裂阶段应力场分布云图

Fig. 7 Uniaxial tensile stress-strain curve and stress field distribution nephograms of DP980 steel

(a) Stress-strain curve (b) Distribution nephogram of stress field in yield stage (c) Distribution nephogram of stress field in necking stage

(d) Distribution nephogram of stress field in fracture stage

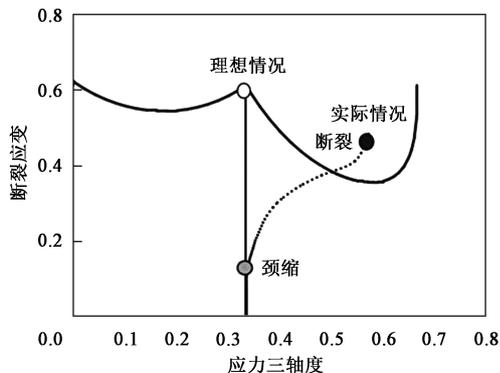


图 8 DP980 钢断裂失效曲线和单向拉伸应力路径

Fig. 8 Fracture failure curve and uniaxial tensile stress path of DP980 steel

World Iron and Steel Association. Guidelines for the Application of Advanced High Strength Steel [M]. Translated by Baoshan Iron & Steel Co., Ltd. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2018.

[4] 巢成新, 于强, 李秋. 汽车用先进高强钢本构模型与韧性断裂模型研究进展 [J]. 精密成形工程, 2024, 16 (1): 77-86.
Chao C X, Yu Q, Li Q. Research progress on constitutive model and ductile fracture model of advanced high strength steel for automotive applications [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16 (1): 77-86.

[5] 连昌伟, 牛超, 韩非. 先进高强度钢板成形性能的检测与评价方法探讨 [J]. 冶金标准化与质量, 2021, (4): 23-30.
Lian C W, Niu C, Han F. Discussion on testing and evaluation method of formability of advanced high strength steel sheet [J]. Metallurgical Standardization & Quality, 2021, (4): 23-30.

[6] Martin F, Golle R, Volk W. Determining the influence of shear cutting parameters on the edge cracking susceptibility of high-strength-steels using the edge-fracture-tensile-test [J]. Procedia CIRP, 2016, 41: 1078-1083.

[7] 李永好, 胡启, 李细锋, 等. 切割工艺对超高强度钢边部质量及成形性能影响的试验研究 [J]. 塑性工程学报, 2019, 26 (3): 41-48.
Li Y H, Hu Q, Li X F, et al. Experimental research on influence of cutting process on edge quality and formability of ultra-high strength steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26 (3): 41-48.

[8] 周明. 剪切边质量对高强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 Study on the Influence of Shear Edge Quality on the Tensile Properties and Fracture Modes of High-strength Steel [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018.

[9] 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: Shanghai Jiaotong University, 2019.

[10] Chen X P, Niu C, Lian C W, et al. The evaluation of formability of the 3rd generation advanced high strength steels QP980 based on digital image correlation method [J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 556-561.

[11] 靳阳, 胡晓, 樊华, 等. 铌元素对 DP980 钢断裂性能的影响与应用研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (10): 222-234.
Jin Y, Hu X, Fan H, et al. Research on effect and application of niobium element on fracture performance of DP980 steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (10): 222-234.

[12] 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 material—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].

[13] ASTM E111-97, Standard test method for Young's modulus, Tangent modulus, and Chord modulus [S].