

DP600 双相钢单向拉伸的交叉颈缩现象与有限元分析

王川乔¹, 高志纯², 鄂大辛¹

(1.北京理工大学 材料学院, 北京 100081; 2.中国一汽大众 规划部, 长春 130011)

摘要: **目的** 探究 DP600 双相钢单向拉伸时交叉颈缩现象的产生原因。**方法** 在单轴拉伸实验的基础上, 利用 ABAQUS 有限元软件对拉伸过程进行模拟, 对交叉颈缩区域进行应力、应变分析。**结果** 即将发生断裂时刻, 试样标距内中心位置应力达到最大值, 临近中心位置两侧由于“局部卸载”而出现应力大幅减小的情况。**结论** 试样标距内两侧距离中心越远的位置, 越接近于单轴应力状态。DP600 板材裂纹萌生时, 与断裂发生部位越接近, 其应力状态与平面应变状态越相似, 沿着颈缩线方向基本没有应变产生, 材料主要由颈缩线区域的板材厚向减薄颈缩线加宽补偿垂直于颈缩线方向上的拉伸。

关键词: 单向拉伸; 交叉颈缩; 有限元模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.03.015

中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)03-0079-04

Cross-necking Phenomenon in Uniaxial Tensile Tests and Finite Element Analysis of DP600 Dual Phase Steel

WANG Chuan-qiao¹, GAO Zhi-chun², E Da-xin¹

(1.School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2.Planning Department of China FAW-Volkswagen, Changchun 130011, China)

ABSTRACT: The paper aims to study cross-necking phenomenon in uniaxial tensile tests and its causes. Based on uniaxial tensile tests, stress and strain of the cross-necking region were analyzed by simulating stretching process with finite element analysis software ABAQUS. Stress at the center of specimen was the maximum just before fracture occurred, and stress near two sides of the center decreased greatly due to “partial unloading”. The stress is close to uniaxial stress as it is far away from both sides in gauge distance. It is closer to the fracture site when cracks are initiated on DP600 panels, and the stress state is more similar to plane strain state. There is little strain along the necking line. The material in panel thickness and along the necking line flows to the direction perpendicular to the necking line.

KEY WORDS: uniaxial tension; cross-necking; finite element simulation

双相钢(Dual Phase, DP 钢)应变强化效果显著、成形性能较高,在工业生产上、特别是汽车制造上拥有较大的使用量^[1]。双相钢主要由马氏体和铁素体 2

种相组成,马氏体弥散分布在铁素体基体上,马氏体含量越多则强度越高^[2]。对双相钢的力学性能及微观组织结构的研究有很多,LIU W 等^[3]发现 DP600 单轴

收稿日期: 2017-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(51175044)

作者简介: 王川乔(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为金属板、管塑性成形、热成形及有限元分析。

通讯作者: 鄂大辛(1957—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为塑性理论、成形工艺及模具设计。

拉伸时的初始屈服应力与加工硬化率均与应变率有关; LIAN J 等^[4]研究发现 DP600 对比于其他钢种, 在断裂时刻变形和破坏更加均匀, 拥有更加良好的断裂抗性; 付泽等^[5]研究了 DP600 钢的滞后回弹现象及其部分影响因素; 吴信涛等^[6]研究了 DP800 折弯成形及回弹的影响因素。

Hill 在 1952 年提出板料拉伸集中性失稳 (Localized necking), 把材料处于最大拉伸载荷作为分散性失稳的开始点, 之后出现集中性失稳, 紧接着发生断裂。在板材的拉伸颈缩研究方面, 张稳等认为单向拉伸时会出现“交叉颈缩”^[7]的现象。ROTH C 和 MOHR D^[8]研究了不同应变率对 DP590 钢颈缩的影响, 并提出了一种新的理论模型。DING Lei 等^[9]用数字图像相关法 (Digital image correlation, DIC) 探究了 QP980 钢的单向拉伸颈缩时应变率对断裂应变的影响方式。ÇAVUŞOĞLU O^[10]从微观角度, 发现裂纹在颈缩时扩展速度更快。诸多研究成果对于逐步认识和掌握 DP600 板材成形性具有相应的促进作用^[11-15]。

1 单向拉伸实验

采用 0.9 mm 厚的 DP600 高强钢作为实验材料, 由一汽模具制造公司提供, 含有质量分数为 0.09% 的 C, 0.36% 的 Si, 1.84% 的 Mn, 0.005% 的 S, 0.05% 的 Al。

实验拉伸试样制备依据 GB/T 228—2002, 总长度为 180 mm, 其中标距长度为 70 mm, 标距段宽为 15 mm。试样在 WDW-E100D 微机控制电子式实验机上进行准静态拉伸实验, 以横梁下行速度控制拉伸速率, 实验的下行速率均为 5 mm/min。为减少不必要的影

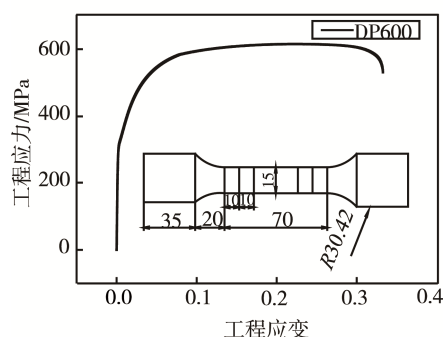


图1 实验装置、实验材料及拉伸曲线

Fig.1 Picture of experimental equipment, materials and tension curve

2 有限元模拟及分析

有限元模拟软件采用 ABAQUS 6.12-3, 有限元试

样模型采用参数与实验试样保持完全一致, 采用 SI(mm)量纲系统。材料属性参数完全采用实验结果。

2.1 有限元建模

引伸计测量标距段为 50 mm, 为了减少有限元计算量, 提高计算效率, 将有限元模型的标距段进行网格细化, 细化部分网格大小为 0.3 mm×0.3 mm×0.3 mm 的正方体。此次模拟采用八节点的线性减缩积分单元, 即 C3D8R, 适合于接触分析, 位移结果较为精确, 计算时间少, 不容易发生剪切自锁。真实应力应变曲线由图 1 中工程应力应变关系转换后获得。选取延性断裂模型, 并将工程应力最大时所对应的应变定为 0.19, 单向拉伸应力三轴度 η 为 0.33, 等效塑性应变率 $\dot{\epsilon}^p$ 为 0.01。塑性各向异性参数由 r_0, r_{45}, r_{90} 转换得出。

采用动态显示分析步方式, 在载荷施加方面, 为与实验保持一致, 将其施加到两端夹持端处, 并以位移大小控制拉伸长度。为使断裂与实验更为吻合, 在有限元模拟过程中, 当标距长度伸长率达到实验断裂值的轴向伸长率 ($\delta \approx 0.254$) 时, 认为微裂纹萌生, 并迅速扩展演化为断裂。

2.2 拉伸失稳应力分析

以试样标距中心为原点, 设拉伸方向为 x 轴, 与其垂直的试样横向为 y 轴, 板厚方向为 z 轴, 临近拉伸断裂时刻 ($\delta \approx 0.254$) 板厚中心层上沿拉伸轴分布的三向主应力分布见 2。可以看出, 2 条较为明显的交叉颈缩线在试样标距中心处相交, 轴向主应力 $\sigma_x = \sigma_1$ 远大于另外 2 方向的主应力 $\sigma_y = \sigma_2$ 和 $\sigma_z = \sigma_3$, 沿拉伸轴分布的三向主应力均在 2 条颈缩线交点处达到最大值, 其中, $\sigma_{x\max} \approx 994.5$ MPa, 随着离开中心向两侧 σ_x 急剧下降, 这是由于中心点处材料受 $\sigma_{x\max}$ 集中作用产生较大轴向拉应变 ϵ_x 缓解了两侧轴向受力, 从而导致两侧 σ_x 产生局部卸载, 距试样标距中心较远处又恢复了均匀拉应力状态。沿拉伸轴分布的另外两向主应力 σ_y 和 σ_z 的分布趋势与 σ_x 相似, 较大应力值波动主要产生在标距中心两侧约 ± 8 mm 的范围内。在标距中心附近很小区域内, 横向主应力 σ_y 略大于厚向主应力 σ_z , 其中, $\sigma_{y\max} \approx 360$ MPa, $\sigma_{z\max} \approx 200$ MPa。离开中心迅速变为 $\sigma_y < \sigma_z < 0$, 随着远离中心逐渐变化为 $\sigma_y = \sigma_z = 0$ 。这说明, 试样标距内两侧距离中心越远的拉伸轴线上, 越接近于单轴应力状态。

为了考查沿试样宽度 y 方向的应力分布状态, 沿横轴 y 上的三向应力分布的有限元计算结果见图 3。在离开标距中心沿板宽方向约 ± 5 mm 范围内, 应力分布趋势与沿 x 轴方向的应力分布趋势大体相似, 由于拉伸轴向、横向及厚向的最大主应力均集中产生在中心点处, 由此引起的较大拉应变必然使得某一范围内

产生局部应力卸载,甚至转变为压应力 $\sigma_y < \sigma_z < 0$ 。另外,由该应力突变区域向试样宽度两侧,轴向主应力 σ_x 逐渐趋于稳定 (≥ 700 MPa),而横向和厚向主应力逐渐转变为 $\sigma_y \approx \sigma_z \approx 0$ 。这种应力分布表明,在标距段横向靠近试样边缘同样趋近于单轴应力状态。

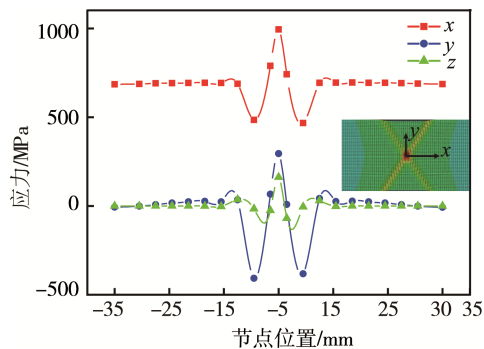


图2 沿拉伸方向单元的位置-应力

Fig.2 Picture of location-stress along tensile direction

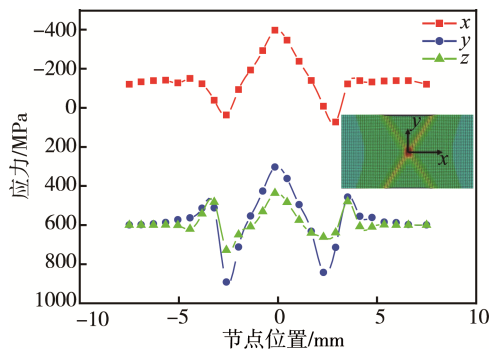


图3 沿板宽方向单元的位置-应力

Fig.3 Picture of location-stress along width direction

2.3 拉断颈缩线的应力应变分析

实际实验和有限元模拟的拉伸后期,试样标距中部均产生了2条与拉伸轴成某一角度的交叉颈缩线,最终沿其中一条颈缩线发生断裂,这与 Hill 在根据特征线理论研究板拉伸集中性失稳时所指出的结论基本吻合。为了考察沿拉断颈缩线及与其垂直方向的应力分布状态,设与 x 轴成 α 角的拉断颈缩线方向为 α ,与其垂直方向为 $\alpha^\perp$ 方向,在板厚中层分别沿 α 及 $\alpha^\perp$ 方向取出各单元节点三向应力,有限元计算结果见图4。在 $\alpha\alpha^\perp z$ 局域坐标系中,垂直于 α 零伸长颈缩线方向的应力 $\sigma_{\alpha^\perp}$ 明显大于沿着该线其他2个方向的应力,即有 $\sigma_{\alpha^\perp} > \sigma_\alpha > \sigma_z > 0$,并且无论哪个方向的应力,在两条颈缩线交点(即试样中心)处均取得该方向的应力最大值。

由图4可以看出, $\sigma_m = (\sigma_{\alpha^\perp} + \sigma_z)/2 \approx \sigma_\alpha$,即颈缩线狭长条带内,沿颈缩线方向的应力 σ_α 接近于平均应力 σ_m 。这表明进入集中性失稳阶段,沿着颈缩线 α 方向的长度停止了伸缩变形,颈缩线区开始进入平面变形状态,继续拉伸的轴向伸长主要靠颈缩线加宽和板厚减薄来弥

补,而远离颈缩线区域的质点甚至会停止变形。

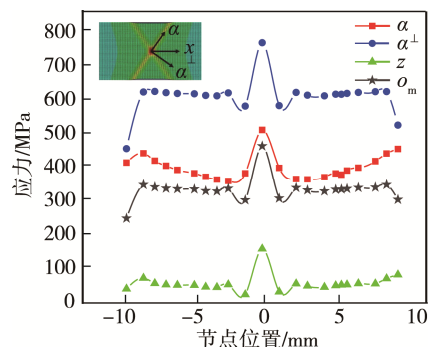


图4 局部坐标系下沿颈缩带单元位置-应力

Fig.4 Picture of location-stress along necking line in local coordinate system

为了考查断裂发生时刻的应变演化关系,在 $\alpha\alpha^\perp z$ 局域坐标系下,设断裂即将发生时刻为 III, 取其前2帧分别记为 I, II, 颈缩线区域内 I, II, III 时刻各节点三向应变的有限元计算结果见图5。临近拉伸断裂时刻,沿着颈缩线方向的应变 $\epsilon_\alpha \approx 0$,即该颈缩线区域内处于 $\epsilon_{\alpha^\perp} = -\epsilon_z$ 的平面应变状态。尽管试样细颈中心点 ($x=0, y=0$) 属于应力应变歧点,但仍然基本符合平面应变规律。有限元计算断裂时刻 III 试样中心垂直于 α 方向点的应变 $\epsilon_{\alpha^\perp} \approx 0.35$,但实际拉伸断裂时刻试样整体的轴向伸长率仅为 $\delta_{\max} \approx 0.254$,这可间接表明,在发生整体断裂之前,试样中心点已经发生开裂。另外,由该点产生应变极值 $\epsilon_{\alpha^\perp \max} \approx |\epsilon_{z \max}|$,可间接推断,初始裂纹很可能产生在试样中心附近的某一位置。

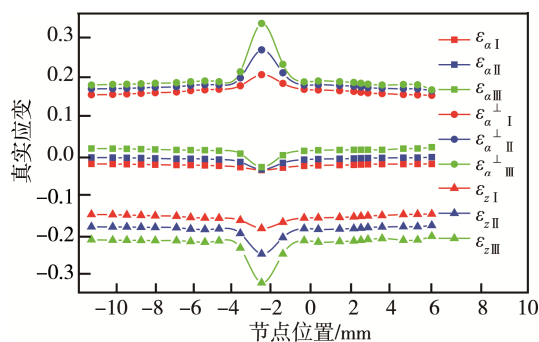


图5 局部坐标系下不同时刻沿 α 方向单元位置-真实应变

Fig.5 Picture of location-true strain along α direction in local coordinate system at different time

由拉断试样和有限元模拟结果(见图5)可以看出,DP600板拉断前均形成了双颈缩交叉于试样中心的现象,最终沿某一条颈缩线拉断,并且有限元模拟的拉断线角度与实际拉伸基本一致。试样中心即2条颈缩线交点处的应力和应变都取得极大值,初始裂纹应首先在该点生成。有时试样表面、内部组织缺陷或相界处也会产生应力集中,即还不能断定初始裂纹的产生点究竟是内部或其他界面,因此,采用有限元模拟理想板试样拉伸,并割取临近拉断之前颈缩交点部

分发现,试样并没有因板厚过度变薄而导致断裂,因而可以推断,初始裂纹很可能产生在双颈缩交叉点处的应力应变值最大的板厚中层。关于初始裂纹的形成方式,将作为今后研究工作的重要内容之一。

3 结论

即将发生断裂时刻,试样标距内中心位置应力达到最大值,临近中心位置两侧由于“局部卸载”而出现应力大幅减小的情况,试样标距内两侧距离中心越远的位置,越接近于单轴应力状态。DP600 板材裂纹萌生时,与断裂发生部位越接近,其应力状态与平面应变状态越相似,沿着颈缩线方向基本没有应变产生,材料主要由颈缩线区域的板材厚向减薄和颈缩线加宽补偿垂直于颈缩线方向上的拉伸。

参考文献:

- [1] GHADBEIGI H, PINNA C, CELOTTO S. Failure Mechanisms in DP600 Steel: Initiation, Evolution and Fracture[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 588: 420—431.
- [2] 张燕瑰, 邓劲松, 魏宪波, 等. 高强度钢性能及其在车身中的应用[J]. *精密成形工程*, 2013, 5(4): 64—68.
ZHANG Yan-gui, DENG Jin-song, WEI Xian-bo, et al. A Study on Performance of High Strength Steel and Application in Bodywork[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2013, 5(4): 64—68.
- [3] LIU W, GUINES D, LEOTOING L, et al. Identification of Strain Rate-dependent Mechanical Behavior of DP600 Under In-plane Biaxial Loadings[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 676: 366—376.
- [4] LIAN J, MÜNSTERMANN S, BLECK W. Damage and Fracture Loci for a Dual-phase Steel and a High-strength Low-alloyed Steel: Revealing the Different Plastic Localization-damage-ductile Fracture Pattern[C]// *ESAFORM 2016: Proceedings of the 19th International ESAFORM Conference on Material Forming*. AIP Publishing, 2016, 1769(1): 200020.
- [5] 付泽, 鄂大辛. DP600 弯曲变形滞后回弹试验及有限元探究[J]. *精密成形工程*, 2016, 8(1): 59—62.
FU Ze, E Da-xin. Time-dependent Springback Tests and the Finite Element Exploration of DP600 after Bending[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2016, 8(1): 59—62.
- [6] 吴信涛, 丁方强, 刘国凯, 等. DP800 双相高强钢折弯及回弹研究[J]. *精密成形工程*, 2016, 8(4): 38—42.
WU Xin-tao, DING Fang-qiang, LIU Guo-kai, et al. Bending and Springback of High-strength Dual Phase Steel DP800[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2016, 8(4): 38—42.
- [7] 张稳, 鄂大辛, 李悦, 等. 汽车覆盖件用 5B003A 板拉伸实验及成形性的有限元分析[J]. *精密成形工程*, 2014, 6(4): 6—11.
ZHANG Wen, E Da-xin, LI Yue, et al. Tensile Tests and Finite Element Analysis of Formability of Automobile Covering Sheet Steel 5B003A[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2014, 6(4): 6—11.
- [8] ROTH C C, MOHR D. Effect of Strain Rate on Ductile Fracture Initiation in Advanced High Strength Steel Sheets: Experiments and Modeling[J]. *International Journal of Plasticity*, 2014, 56: 19—44.
- [9] DING Lei, LIN Jian-ping, MIN Jun-ying, et al. Necking of Q&P Steel during Uniaxial Tensile Test with the Aid of DIC Technique[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 26(3): 448—453.
- [10] ÇAVUŞOĞLU O, GÜRAL A, GÜRÜN H. Influence of Strain Rate on Tensile Properties and Fracture Behavior of DP600 and DP780 Dual-phase Steels[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2016: 1—9.
- [11] AVRAMOVIC G, OSOSKOV Y, JAIN M K, et al. Effect of Martensite Distribution on Damage Behavior in DP600 Dual Phase Steels[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 516(1): 7—16.
- [12] OZTURK F, TOROS S, KILIC S. Effects of Anisotropic Yield Functions on Prediction of Forming Limit Diagrams of DP600 Advanced High Strength Steel[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 81: 760—765.
- [13] OZTURK F, TOROS S, KILIC S. Tensile and Spring-back Behavior of DP600 Advanced High Strength Steel at Warm Temperatures[J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2009, 16(6): 41—46.
- [14] YU H, WANG Y. Fracture Performance of High Strength Steels, Aluminum and Magnesium Alloys during Plastic Deformation[C]// *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 2015.
- [15] 张慧萍, 张校雷, 张洪霞, 等. 300M 超高强钢车削加工表面质量[J]. *表面技术*, 2016, 45(2): 181—187.
ZHANG Hui-ping, ZHANG Xiao-lei, ZHANG Hong-xia, et al. Surface Quality of High-speed Turning 300M Ultra-high Strength Steel[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(11): 153—158.