液压成形同步冲孔工艺仿真分析及试验

苏海波¹,刘钢²,陈新平³

(1.上海宝钢国际经济贸易有限公司,上海 200122; 2.哈尔滨工业大学,哈尔滨 150001; 3.宝山 钢铁股份有限公司中央研究院,上海 201900)

摘要:对液压冲孔过程进行分析,介绍了液压成形同步冲孔的工艺原理,分析了不同类型液压冲孔的特点和应用范围。采用有限元分析方法,建立了液压冲孔仿真有限元模型,并对冲孔过程中应力分布和应变变化情况进行分析。在此基础上,进行液压冲孔工艺试验,把工艺试验结果与有限元分析结果进行比较。结果显示,液压冲孔仿真分析与工艺试验呈现相同的变化规律,仿真分析能够较好预测实际冲孔过程。 关键词:液压成形;液压冲孔;仿真分析;工艺试验;应力;应变 DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.015

中图分类号: TG394 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457(2017)06-0073-06

Simulation Analysis and Experimental Research on Hydro-piercing

SU Hai-bo¹, LIU Gang², CHEN Xin-ping³

(1.Baosteel International Economic & Trading Co., Ltd., Shanghai 200122, China; 2.Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3.Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

ABSTRACT: This paper introduced the hydro-piercing principle, and analyzed characteristics and application range of different hydro-piercing types. The finite element model on hydro-piercing simulation was established, and stress distribution and strain variation were analyzed. On this base, the hydro-piercing experiment was carried out. Result of experiment and FEA were compared. The results show that the simulation analysis and the experiment have the same change tendency, and the simulation analysis can predict the actual hydro-piercing process exactly.

KEY WORDS: hydroforming; hydro-piercing; simulation analysis; process experiment; stress; strain

液压成形工艺由于能够降低零件重量,提升零件 强度,降低模具费用等优点,自技术工业化应用以来, 受到全球所有主机厂的青睐,在全球汽车制造领域中 得到了成功应用和普遍推广,每年数以千万计的液压 成形零件被应用于汽车上的不同部位,为汽车轻量化 的发展提供了有力的技术支撑。随着液压成形零件应 用量的稳步增加,液压成形过程中的一些同步工艺也 逐步引起国内外专家学者的关注,液压成形同步冲孔 工艺就是其中之一^[1-2]。液压成形同步冲孔可以大大 提升孔加工效率,减少后续激光切割,大幅降低零件 切割成本。 液压成形同步冲孔工艺自发明以来,国内外的专家学者已经进行了系列研究,取得了丰硕成果。液压成形技术最先在德国实现工业化应用,德国的Paderborn大学的学者最早进行液压冲孔技术系统研究,获得了不少研究成果,提出的柔性模具系统对液压成形冲孔技术的工业化应用提供了很好的技术支撑。在美国,由于汽车工业处于全球领先地位,液压成形汽车的应用和研究也走在全球前列。在液压冲孔理论方面,国外也有众多学者进行过深入研究。M.Koc,T.Altan基于塑性理论、薄壳理论和厚壳理论,分析了液压冲孔极限,并对冲孔过程参数进行了预

测。对液压冲孔的屈曲、起皱和破裂进行了分析。在 此基础上,通过分析,获得了液压冲孔的理论临界公 式^[3-5]。K. Manabe 和 M. Amino 分析了工艺参数对液 压冲孔的影响,指出在冲孔过程中应力比越大,越容 易起皱。材料 r 值越大,材料越易流动,减薄越小; 材料 n 值越大,冲孔极限越高^[6]。K. Manabe, M. Amino 和 S. Nakamura 分析了管料液压冲孔起皱和破裂的机 制及其影响因素,分析了应力比、摩擦因数、应力硬 化指数、等效应变比的影响^[7]。

在国内,哈尔滨工业大学是较早开展液压成形技术研究的院校,对液压冲孔技术进行过系统研究,分析了多个工艺参数对液压冲孔的影响^[8-15]。上海宝钢是国内最先实现液压成形产业化的企业,成功实现多个底盘和车身液压成形零件稳定量产,在此过程中,

也对液压冲孔工艺进行过分析。

文中采用有限元仿真分析方法,对液压成形同步 冲孔过程进行模拟,分析了冲孔过程中变形区域材料 变形情况,研究了变形过程中应力应变变化规律,并 在此基础上进行液压冲孔工艺试验。

1 液压冲孔原理及工艺特点

液压冲孔是指在液压成形过程中,利用管内高压 液体的支撑,在模具冲头的作用下对管件进行冲孔的 一种加工方法。液压冲孔材料分离过程中,管壁材料 先后经历弹性变形、塑性变形、断裂分离3个阶段。 与传统冲裁相比,在整个分离过程中,不需要使用凹 模装置,其过程见图1,管内液体压力为p。



图 1 液压冲孔过程 Fig1. Process of hydro-piercing

液压冲孔可以分为由内向外冲孔和由外向内冲 孔两种不同类型,由内向外冲孔是利用管内高压液体 作为凸模进行冲孔,由外向内冲孔是利用刚性冲头进 行冲孔。两种方法各有特点,由内向外冲孔所得孔的 尺寸精度高、塌角小,但由于冲孔力是由管内液体提 供,因此受材料强度影响较大,一般用于铜、铝等较 软材料液压冲孔。由外向内冲孔,冲孔力是由安装在 模具上的液压缸提供,因此在模具内需要较大安装空 间,这对模具强度提出更高的要求。由于该方法下管 内液体压力只起支撑作用,因而只要液压缸提供的冲 孔力足够大,可以利用该方法对强度较高材料进行冲 孔,这是目前应用较多的液压冲孔方法。

液压冲孔过程是一个复杂的非线性问题,具体体 现在以下 3 个方面:① 材料的非线性,断裂前后涉 及金属的弹性变形、弹塑性变形和断裂变形;② 几 何非线性,液压冲孔变形过程是一种大位移变形以及 有限应变的塑性问题,位移和应变之间的关系为非线 性;③ 边界条件非线性,在液压冲孔的仿真分析中, 材料的所有边界条件不是在计算开始前就可以给出 的,材料与模具的接触是通过计算得到的,并且是动 态变化的。

由于液压冲孔变形过程的复杂性,通过工艺试验 很难直接再现变形过程,而通过有限元仿真软件可以 方便实现,从而研究各参数对冲孔的影响。文中采用 ABAQUS 非线性有限元分析软件,建立了液压冲孔 仿真分析模型,对液压冲孔变形过程进行分析,并在 此基础上开展工艺试验研究。

2 材料性能及化学成分

试验采用 20[#]热轧钢管,去应力退火态。管材外 径尺寸为 76 mm,壁厚为 2.5 mm。根据 GB 6397—86 标准加工拉伸试样,按照 GB/T 228—1987 方法进行 拉伸试验,得知 20[#]的屈服强度为 425 MPa,抗拉强 度为 568 MPa,材料硬化指数为 0.2,伸长率为 22%, 且其含有质量分数为 0.160%的 C, 0.221%的 Si, 0.495%的 Mn, 0.015%的 S, 0.014%的 P。

3 有限元仿真分析及试验研究

3.1 有限元模型

液压冲孔过程复杂,在仿真分析过程中,需要对 仿真模型进行简化,简化后的模型由冲头、模具、板 料组成,仿真分析模型见图 2。其中,冲头、管材简 化为轴对称模型,管内液体压力 p 根据实际需要进行 调节。仿真分析所用材料与工艺试验所用材料相同, 按照材料实际拉伸曲线导入 ABAQUS 中,仿真分析 中,冲头直径为 10 mm。为了提升仿真精度,节省仿 真计算时间,变形区域网格采用尺寸较小网格,最小 网格尺寸为 0.01 mm,非变形区域网格采用较大网格, 网格尺寸为 0.1~0.2 mm, 网格类型为结构化网格 (structured)和自由网格(free)。冲头和模具与管材的接 触采用面-面接触(face to face contact),摩擦类型为罚 函数 (Penalty contact method),接触切向摩擦因数取 0.1, 法向为刚性接触。



图 2 液压冲孔仿真分析模型 Fig.2 Simulation analysis model of hydro-piercing

3.2 有限元仿真分析

基于图 2 所示仿真分析模型,模具固定,在材料 上施加液体压力 p,冲头按 30 mm/s 的速度进行冲孔。 冲孔过程中裂纹产生、扩展及断裂分离过程分别见图 3—6。冲孔前进距离 0.03 mm 时等效应力(Mises 应 力)分布情况见图 3,可以看出,首先在冲头与材料 接触的端部区域,存在着明显的应力集中,离冲头刃 口区域越远,应力越小,因此,材料将在冲头刃口处 首先破坏产生裂纹。



图 3 应力分布(MPa) Fig.3 Stress distribution

随着冲头前进,应力集中继续增加,当冲头前进 0.20 mm时,如图 4 所示,产生明显裂纹,裂纹尖端 应力最大。裂纹扩展和断裂分离过程分别见图 5 和图 6,在图 4 基础上,裂纹继续扩展,并贯穿整个板厚, 直至最后材料断裂分离。从图 6 中还可以看出,在冲 孔过程中,在孔的边沿,材料局部存在一定弯曲塌陷, 这种现象在实际冲孔零件中也存在。

不同压力下,从裂纹产生到材料断裂分离各阶段 应力对比情况分别见图 7—9。从图 7 可以看出,随 着管内液体压力的增大(从 80 MPa增大到 120 MPa), 产生同样的裂纹(相同应力状况),冲头需要前进的 距离减小,这表明,在裂纹产生阶段,冲头前进的距离相同,管内液体压力越大,越容易产生裂纹。在裂纹扩展(见图 8)和断裂分离阶段(见图 9),也呈现同样的变化规律。这是因为管内液体压力越大,冲孔过程中对板料的支撑力越大,冲头前进相同的距离,裂纹越容易扩展变大,也越容易发生断裂分离。从图9还可以看出,随着管内液体压力越大,材料发生破坏时,冲头所走的位移越小,同时材料发生塌陷的范围也越小。对实际零件而言,冲孔周围材料塌陷越小,零件表面质量越好,因此,提高管内液体压力,有助于减小冲孔过程零件塌陷,从而提升零件质量。

液压冲孔过程中,可以通过剪应变的变化情况来 判断裂纹的产生、扩展与断裂分离。裂纹产生阶段的 剪应变分布见图 10,裂纹扩展阶段的剪应变分布见 图 11,断裂分离阶段的剪应变分布见图 12。从图 12 可以看出,在裂纹产生阶段,最大剪应变发生在冲头



图 4 裂纹产生(MPa) Fig.4 Appearance of crack



图 5 裂纹扩展(MPa) Fig.5 Crack growth



图 6 断裂分离(MPa) Fig.6 Fracture separation





图 12 断裂分离阶段剪应变(MPa) Fig.12 Shear strain during fracture separation stage

3.3 试验研究

液压冲孔工艺试验在液压成形试验机上进行。在 进行液压冲孔前,先向管内通入高压液体,在高压液 体的支撑下,利用安装在液压缸上的冲头对管材进行 冲孔。液压冲孔过程试验结果与有限元仿真结果对比 见图 13,可以看出,仿真分析较好地预测了实际变 形情况。仿真分析中,在冲孔周边区域出现塌陷情况, 在实际工艺试验中,冲孔周边材料存在塌陷,仿真分 析能够较好地指导实际工艺试验。



a 试验结果



b 有限元仿真结果



Fig.13 Comparison of hydro-piercing between experiment and FEA

不同管内液体压力下的冲孔结果见图 14。可以 看出,与仿真分析结果相同,内压越高,冲孔后零件 表面质量越好,120 MPa内压支撑下冲孔零件塌陷小 于 80 MPa下冲孔塌陷。





图 14 不同内压下冲孔 Fig.14 Hydro-piercing during different internal pressure

4 结论

 分析了液压成形同步冲孔工艺特点,以及不 同类型冲孔方式的应用范围。

2) 建立了液压冲孔仿真分析模型,对液压成形 同步冲孔进行仿真,分析了液压冲孔过程中材料不同 变形阶段的应力和应变变化情况。在冲孔过程中,首 先在冲头与材料接触的圆角部位产生应力集中,随着 冲头前进,最大剪应变沿变形路径逐步向前扩展,直 至材料断裂分离。

3)进行液压冲孔工艺试验,不同压力下的冲孔 工艺试验结果与有限元仿真结果吻合较好,有限元仿 真分析能够较好预测实际冲孔过程中材料塌陷和裂 纹扩展。

参考文献:

- LEE G D. Hot Forming and In-situ Cooling of Metallic Articles: US, US20080289393 A1[P]. 2008-11-27.
- [2] LEE KT, BACKH J. Tube Hydroforming Process Design of Torsion Beam Type Rear Suspension Considering Durability[J]. International Journal of Modern Physics B, 2008, 22(31/32): 6199–6205.
- [3] DOHMANN F, BIELING P. Theoretical Basis and Applications of High Pressure Forming[J]. Bleche Rohre Profile, 1991, 38(50): 377–382.

- [4] DOHMANN F,HARTL C. Liquid Bulge Forming as a Flexible Production Method[J]. Journal of Material Processing Technology, 1994(45):377–382.
- [5] KOC M, ALTAN T. Prediction of Forming Limits and Parameters in the Tube Hydroforming Process[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002(42): 123–138.
- [6] MANABE K, AMINO M. Effects of Process Parameters and Material Properties on Deformation Process in Tube Hydroforming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 12(3): 285–291.
- [7] MANABE K, AMINO M, NAKAMURA S. FE Analysis on Local Thinning and Fracture Phenomenon in Hydroform of Tube Components[J]. Advanced Technology of Plasticity, 1999(1): 12–21.
- [8] LIU Gang, LIN Jun-feng, WANG Gang, et al. Influence of Tube Properties on Quality of Hydro- piercing[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21: 456—460.
- [9] 韩聪,苑世剑,苏海波,等.液压冲孔数值模拟[J]. 中国有色金属学报,2006,16(1):22—28.
 HAN Cong, YUAN Shi-jian, SU Hai-bo, et al. Numerical Simulation of Hydraulic Punching China[J]. Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(1): 22—28.
- [10] LIN Jun-feng, YUAN Shi-jian. Numerical Simulation of Hydroforming Hollow Crankshaft[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005, 15(S2):

132-135.

- [11] 王锡兵,常嘉茂. 汽车扭矩梁式悬架设计与仿真计算[J]. 农业装备与车辆工程, 2008(7): 29—31.
 WANG Xi-bing, CHANG Jia-mao. Design and Simulation of Automotive Twist-beam Suspension[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2008 (7):29—31.
- [12] 陈仙风,陈智勇,苏海波.不同成形工艺对扭力梁使 用性能的影响研究[J]. 锻压技术, 2014, 39(3): 112— 116.

CHEN Xian-feng, CHEN Zhi-yong, SU Hai-bo. Study on the Effects of Different Processing Technology on the Performance of the Torsion Beam[J]. Forging & Stamping Technology, 2014, 39(3): 112—116.

- [13] HANSENR, WECKER G. Method of Deforming an Initial Pipe Having a Circular Cross-section into a U Shaped and Device for Carrying out the Method: US, 6119501[P]. 2000-09-15.
- [14] KIM S H. Tool Design for the Tubular Press Forming of a Rear Suspension Member with the Finite Element Analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192/193: 181—187.
- [15] YOON S J, PARK J K, LEE M J, et al. Deformation during Hot Stamping Process of Tubular Beam[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Tube Hydroforming, Noboribetsu: Ken-ichi Manabe, 2011.