超高强度钢 DP1000 液压成形 A 柱的关键技术

王娜[1]，李稚凡[1]，陈新平[2]

（1.上海宝钢高新技术零部件有限公司，上海 201908；
2.宝山钢铁股份有限公司中央研究院，上海 201900）

摘要：目的 研究超高强度钢 DP1000 液压成形 A 柱仿真技术和试验效果，解决批量生产中 DP100 焊管技术和同步冲孔等关键技术。**方法** 基于 Autoform 有限元模拟软件，仿真分析了 DP1000 液压成形 A 柱的可行性，试验了 DP1000 液压成形 A 柱零件。通过对比高频焊管和激光焊管的液压成形零件焊缝质量，解决量产零件开裂问题，开展了 DP1000 液压成形 A 柱的 Cr12MoV、ASP30 和 SKH51 不同材料的同步冲孔效果，解决 DP1000 材料冲头寿命和冲孔质量问题。**结果** 采用 DP1000 材料可以获得液压成形 A 柱，具有制造可行性。与高频焊管相比，具有较小的热影响区和硬度变化较小的激光焊管，更适合 DP1000 液压成形 A 柱使用。**结论** ASP30 和 SKH51 比传统的 Cr12MoV 更适合于 DP1000 材料液压成形 A 柱同步冲孔，冲头寿命提高 80 多倍，冲孔质量良好。

关键词：超高强钢车身；A 柱；液压成形；DP1000

DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.002

中图分类号：TG394 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2017)06-0006-05

Key Technology of AHSS DP1000 Hydroforming A Pillar

WANG Na[1], *LI Zhi-fan*[1], *CHEN Xin-ping*[2]

(1.Baosteel High-tech Components Co., Ltd., Shanghai 201908, China;
2.Central Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

ABSTRACT: The paper aims to study simulation technology and experiment result of AHSS DP1000 hydroforming A pillar to solve key technologies on welding pipe, synchronous punching, etc. in batch production with DP100. The formability of A pillar with AHSS DP1000 was studied by simulation and experiment based on Autoform. The quality of weld seam was compared by experiment between ERW and laser welding tube. The synchronous hydro-piercing was studied by different punch materials with Cr12MoV and ASP30 and SKH51. The issue on service life and punching quality of DP1000 punch was solved. Application of DP1000 material could obtain hydroforming A pillar and it was feasible for manufacturing. Compared with ERW, laser welding tube of less HAZ and stable hardness was more suitable for DP1000 hydroforming A pillar. The ASP30 and SKH51 punch material are more suitable than traditional Cr12MoV material during hydro-piercing of AHSS DP1000 hydroforming A pillar. The punch life is increased by 80 times and the punch quality is good.

KEY WORDS: AHSS; hydroforming; A pillar; DP1000

新的汽车碰撞法规于 2018 年 7 月 1 日实施，对汽车的碰撞性能有了更高的要求，增加了新能源汽车的试验程序和评价方法等，因此，轻量化、高强化是汽车车身设计的重要发展方向。车身最重要的结构件就是 A/B 柱，传统的车身 A/B 柱主要是冷冲压成形实现的，近年来，随着热冲压技术的大力发展，热冲压 A/B

收稿日期：2017-10-16

作者简介：王娜（1979—），女，博士，工程师，主要研究方向为汽车零部件先进成形技术。

柱越来越被广泛应用，为了满足 C-NCAP 碰撞和轻量化要求，出现了补丁板热冲压成形 A/B 柱[1—3]、变厚度板热冲压 A/B 柱[2]，其强度均大于 1500 MPa，由于零件局部区域需要在碰撞试验中满足吸能要求，强度太高，吸能效果有限，因此，变强度热冲压 A/B 柱技术应运而生，变强度 A/B 柱热冲压技术被大众、奥迪等汽车厂使用[4—7]，但是其成形难度大，对模具要求高，成本高，推广进度缓慢。

宝钢将传统的液压成形技术与超高强钢材料结合[8—9]，开发超高强钢液压成形 A/B 柱，该零件为空心变截面轻质管状结构，管式液压成形设计可以取消法兰连接，在有限的空间内使截面积最大化，具有更好的刚度性能及结构连续性，是提高碰撞性能、实现结构轻量化的有效手段[10—13]。相比冲压件，液压成形管一次成形，尺寸稳定，生产过程环保，成本低，尤其是在新能源汽车等新型汽车开发模式和要求下，备受青睐。A/B 柱均为车身安全结构件，特别对车身 A/B 柱，采用超高强钢液压成形管件，在侧碰过程中，通过高强钢与管件液压成形技术结合传递冲击力，同时可以有效减小 A/B 柱变形，从而保护乘员安全。以福特汽车为例，福特已经开发了多个超高强钢车身液压成形零件，并成为了多种车型的全球平台件。

文中以某汽车的车身 A 柱为研究对象，采用 DP1000 超高强钢材料，应用液压成形技术开展设计，针对液压成形的仿真工艺技术、液压成形过程中的焊管技术和超高强钢同步冲孔技术进行了研究，并进行了试验验证，掌握了超高强钢液压成形 A 柱的关键技术，为汽车厂的批量使用奠定了技术基础。

1　超高强度钢 DP1000 液压成形 A 柱仿真技术

1.1　实验材料

研究用板材材质为超高强钢 DP1000，含有质量分数为 0.15%的 C，2.36%的 Mn，0.28%的 Si，0.09%的 P，0.01%的 S，0.02%的 Cu。所用板坯厚度为 1.8 mm，直径为 60 mm，其屈服强度和抗拉强度分别达到了 680 和 1053 MPa，断裂总伸长率为 11.7%，n 值为 0.09。

1.2　DP1000 液压成形 A 柱仿真分析

运用 CAE 分析软件 Auroform 的液压成形模块，采用 DP1000 材料对液压成形 A 柱进行成形仿真分析，DP1000 液压成形模拟成形极限见图 1，其中成形极限图中 FLC 曲线为对应板材 FLC 曲线下移后的结果，根据经验制管后，管材 FLC 曲线低于板材 FLC 曲线，管材 FLC 曲线测量成本较高且周期较长，文中根据经验对板材 FLC 曲线进行了向下偏移。液压成形分析过程，A 柱的最大变形量约 2%，如图 2 所示，采用 500 mm 半径的推弯实现零件的弯曲。

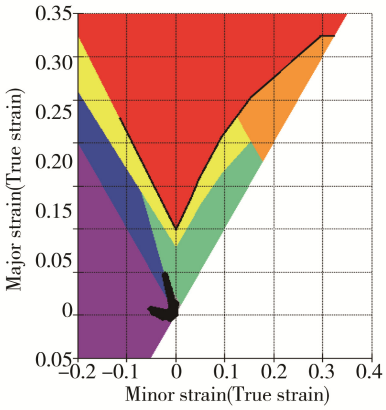


图 1　DP1000 液压成形模拟 FLD

Fig.1 FLD of DP1000 hydroforming simulation

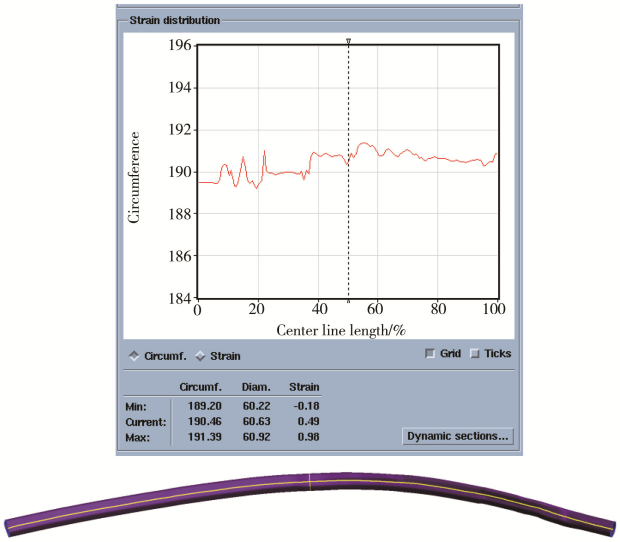
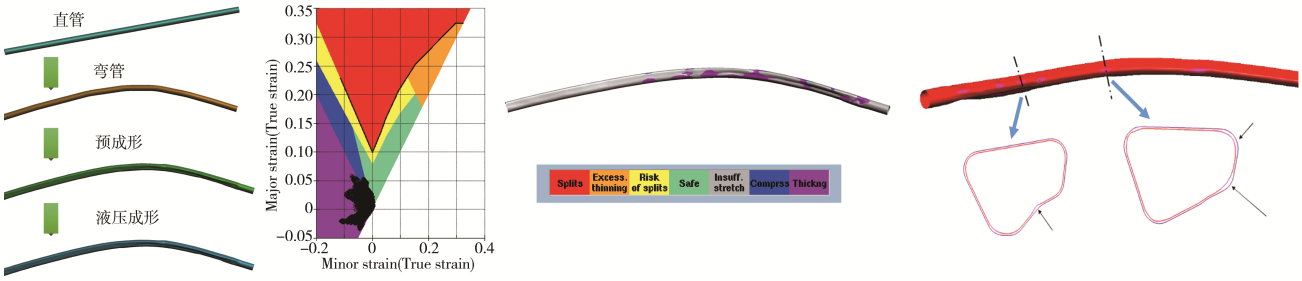


图 2　DP1000 液压成形管件截面变化

Fig.2 Section change of DP1000 hydroforming pipe fitting

对 DP1000 材料 A 柱液压成形零件进行仿真分析，通过直管-弯管-预成形-液压成形的几道工序，成形压力为 1300 MPa，合模力为 40 000 kN，轴向进给量为 8 mm，仿真结果见图 3，可以看出，成形性优异，不存在开裂和起皱等风险。液压成形结束后，零件的贴模性良好，材料基本能完全按照零件的设计方向进行流动，并与模具贴合，具有良好的成形尺寸精度。

试验采用 CAE 仿真设计的参数，在 5000 t 液压成形压机上进行验证，获得的零件实物见图 4，零件的尺寸精度与 CAE 仿真进行对比，零件的最大减薄为 5.6%，零件的扫描报告显示，贴模性与仿真结果一致。



a 工艺流程　　b 模拟FLD　　c 未完全贴模位置

图 3　DP1000 液压成形仿真结果

Fig.3 CAE result of DP1000 hydroforming simulation

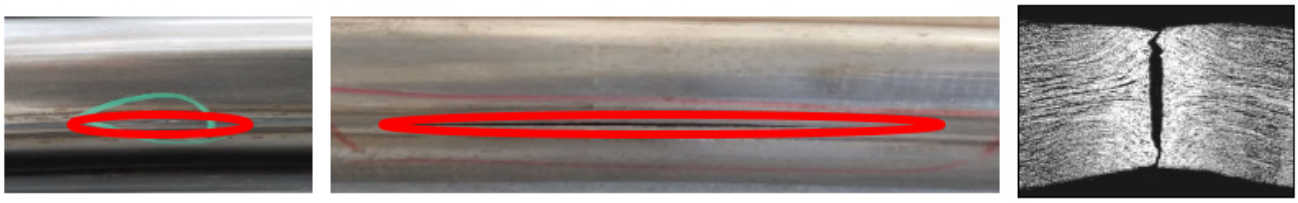
图 4　DP1000 液压成形试验零件

Fig.4 Part of DP1000 hydroforming test

2　超高强钢 DP1000 焊管技术

液压成形用焊管一般为高频电阻焊直管，一方面高频焊管成本低，另一方面，液压成形的零件抗拉强度都在 800 MPa 以下，高频焊管的性能满足液压成形要求，但是，对于 DP1000 级别的超高强钢，采用高频焊管技术，由于焊缝、热影响区和母材流动应力等因素，导致液压成形过程中焊缝位置容易出现开裂[14—16]。在试验研究过程中，采用高频焊管出现了典型的焊缝开裂问题，DP1000 液压成形零件焊缝开裂零件见图 5，可以看出，液压成形后焊缝及热影响区位置均发生了开裂。

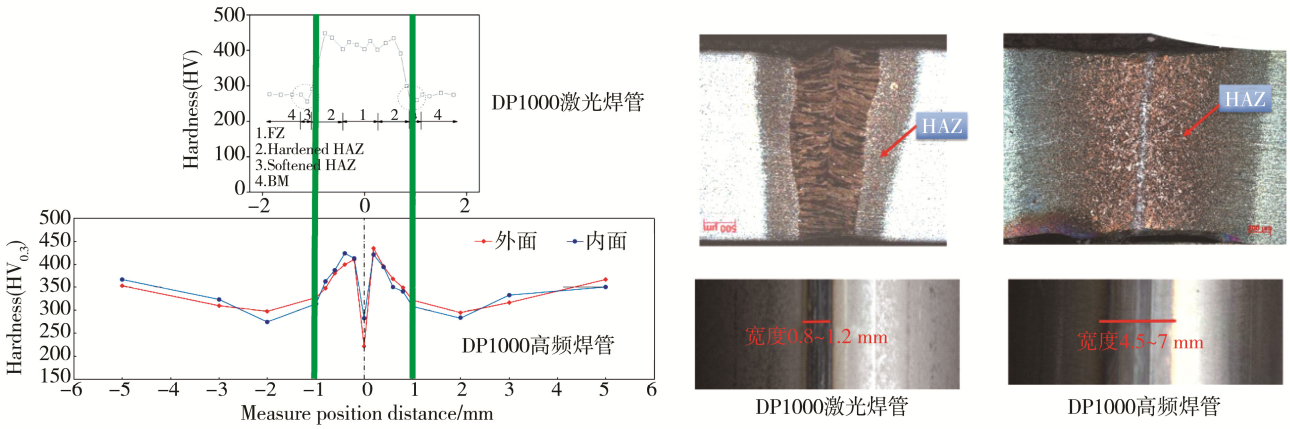
对开裂的零件部位进行深入分析，发现焊缝及附近位置的硬度分布情况和热影响区大小直接影响液压胀形时零件的材料流动。通过对焊缝位置的焊缝硬度及热影响区分布进行分析，DP1000 液压成形高频焊管和激光焊管分析见图 6，可以看出，ERW 焊管的热影响区较大，焊缝位置的硬度分布波动大，液压成形时，焊缝及热影响区敏感，材料流动困难，容易开裂，而激光焊管热影响区小，母材和焊缝位置的硬度差别不大，分布均匀，易于胀形时材料流动，可减少开裂的发生，更适合超高强钢液压成形，批量生产建议采用激光焊管。



a 焊缝开裂　　b 金相照片

图 5　DP1000 液压成形零件焊缝开裂零件

Fig.5 Weld seam crack of DP1000 hydroforming part



a 焊缝显微硬度HV对比　　b 焊缝热影响区对比

DP1000激光焊管　　DP1000高频焊管

图 6　DP1000 液压成形高频焊管和激光焊管分析

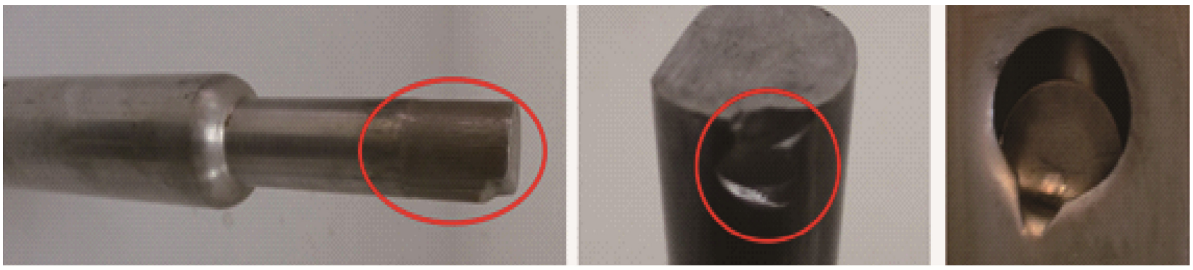
Fig.6 Laser welding tube and ERW tube of DP1000 hydroforming

3　高强钢 DP1000 同步冲孔技术

液压成形同步冲孔就是液压胀形完成后，在管内液体压力的支撑作用下，利用冲头或管内液体压力，将管壁材料分离的一种加工方法[17]。传统的液压成形用冲头材料主要为 Cr12MoV 或者 SKD11，该材料为冷作模具钢，在 300 MPa 以下的低强度钢液压成形时，冲头寿命高达 5 万冲程，随着超高强钢液压成形零件(DP1000)的批量应用，由于零件材料强度的提高，传统冲头容易磨损，寿命低，一般不超过 5000 冲程，严重影响连续生产，单纯提高冲头的硬度，又会导致冲头韧性下降，刃口容易崩裂，Cr12MoV 传统材料用于 DP1000 液压成形的冲头缺陷见图 7，可以看出，采用传统的冲头材料在 DP1000 液压成形过程中，冲头磨损严重，崩裂现象发生，导致冲孔撕裂质量问题发生。

为解决连续生产冲头寿命和冲孔缺陷问题，探索 DP000 材料液压成形同步冲孔的冲头材料选择，对冲头材料进行了研究，针对传统的冲头材料 Cr12MoV 和高耐磨的 ASP30 和 SKH51 进行研究，探索热处理工艺优制定了合理参数，获得适合 DP000 材料的冲头材料和热处理工艺。通过多级热处理工艺，DP1000 液压成形冲头材料 Cr12MoV 热处理曲线见图 8，试验获得 Cr12MoV 的硬度为 HRC60~HRC63，高耐磨的冲头材料 ASP30 和 SKH51 热处理曲线见图 9，ASP30 的硬度为 HRC65~HRC67，SKH51 的硬度为 HRC62~HRC64。

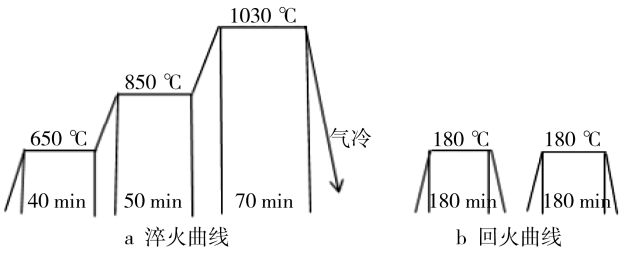
通过对三种冲头材料进行实际的冲孔验证，Cr12MoV 冲头在 3000 冲程后直径减小超过 0.4 mm，而 SKH51 及 ASP30 冲头使用寿命均超过 40000 万冲程，并且冲头直径仅减小了 0.15 mm，DP1000 液压成形冲头效果见图 10，可以看出，SKH51 和 ASP30 材料的冲头比传统的 Cr12MoV 材料更适合 DP1000 材料的液压成形同步冲孔，适合连续生产。



a 冲头磨损　　b 刃口崩裂　　c 冲孔撕裂

图 7　DP1000 液压成形冲头缺陷

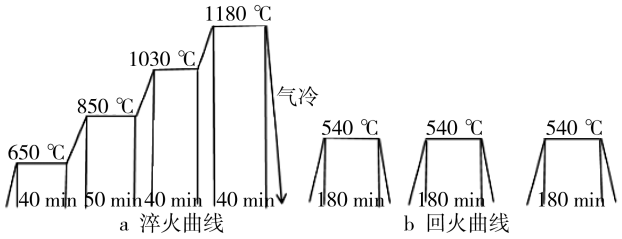
Fig.7 Defects of DP1000 hydroforming punch



a 淬火曲线　　b 回火曲线

图 8　DP1000 液压成形冲头材料 Cr12MoV 热处理曲线

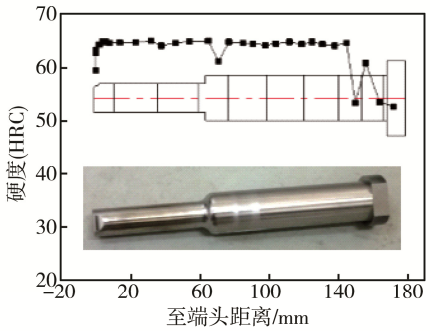
Fig.8 Heat treatment curve of Cr12MoV for DP1000 hydroforming punch



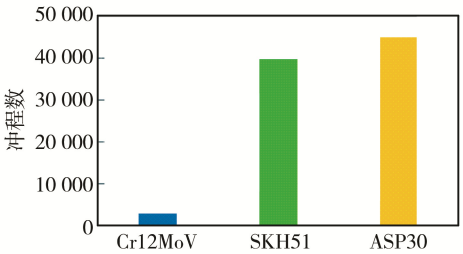
a 淬火曲线　　b 回火曲线

图 9　DP1000 液压成形冲头材料 ASP30 和 SKH51 热处理曲线

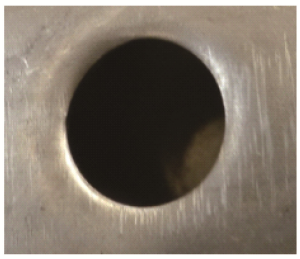
Fig.9 Heat treatment curve of ASP30 and SKH51 for DP1000 hydroforming punch



a 冲头硬度分布



b 三种材料冲头使用寿命对比



c SKH51和ASP30冲孔质量

图 10　DP1000 液压成形冲头效果

Fig.10 Effect of DP1000 hydroforming punch

4 结论

超高强钢与液压成形技术相结合，是满足汽车轻量化、高强化设计的有效途径之一，对 DP1000 材料的液压成形 A 柱仿真技术、焊管技术和同步冲孔技术进行了研究。

1) 液压成形仿真技术对 DP1000 材料液压成形零件成形过程具有一定的指导性，采用仿真技术可以提高零件开发效率，指导零件批量生产。

2) 对于 DP1000 级别的超高强度钢，液压成形过程焊缝敏感性高，激光焊管比 ERW 焊管更适合 DP1000 的超高强钢液压成形零件连续生产。

3) 同步冲孔技术适用于 DP1000 超高强钢液压成形过程，采用 SKH51 和 ASP30 材料的冲头比传统的 Cr12MoV 材料具有更长的使用寿命和良好的冲孔质量。

参考文献：

[1] 徐伟力, 管曙荣, 艾健, 等. 钢板热冲压新技术介绍[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(4): 39—43.
XU Wei-li, GUAN Shu-rong, AI Jian, et al. Introduction of Sheet Metal Hotforming[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(4): 39—43.

[2] KONDRATIKU J, KUHN P. Tribological Investigation on Friction and Wear Behavior of Coatings for Hot Sheet Metal Forming[J]. Wear, 2011, 270(11/12): 839—849.

[3] 侯荣华, 徐荣荣. 交通新能源评价指标研究[J]. 中国科技论文在线, 2010, 5(10): 784—788.
HOU Rong-hua, XU Rong-rong. Research on New Transportation Energy Assessment Indexes[J]. Science Paper Online, 2010, 5(10): 784—788.

[4] 高云凯, 高大威, 余海燕, 等. 汽车用高强度钢热成型技术[J]. 汽车技术, 2010(8): 56—60.
GAO Yun-kai, GAO Da-wei, YU Hai-yan, et al. Analysis on High-strength Steel Hot Forming Technology for Automobile[J]. Automobile Technology, 2010(8): 56—60.

[5] MAENO T, MORI K, NAGAI T. Improvement in Formability by Control of Temperature in Hot Stamping of Ultra-high Strength Steel Parts[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63(1): 301—304.

[6] MERKLEINA M, WIELANDA M, LECHNERA M, et al. Hot Stamping of Boron Steel Sheets with Tailored Properties: A Review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016(227): 11—24.

[7] 朱丽娟, 谷净巍, 吕义, 等. 超高强钢热冲压硬化机理[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(2): 376—379.
ZHU Li-juan, GU Zheng-wei, LYU Yi, et al. Mechanism of Hot Stamping Hardening for Ultra-high Strength Steel [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(2): 376—379.

[8] 蒋浩民, 陈新平, 范频, 等. 管件液压成形技术及其在车身轻量化中的应用[C]. 中国钢铁年会, 成都, 2007: 259—264.
JIANG Hao-min, CHEN Xin-ping, FAN Pin, et al. Tube Hydroforming Technology and Its Application in Lightweight of Auto Body[C]. China Iron and Steel Annual Meeting, Chengdu, 2007: 259—264.

[9] 蒋浩民. 宝钢汽车零部件产业发展概述[C].全国钢材深加工研讨会, 天津, 2014: 143—146.
JIANG Hao-min. Overview of the Automobile Parts Industry Development in Baosteel[C]. National Symposium on Deep Processing of Steel Products, Tianjin, 2014: 143—146.

[10] KENICHI Manabe, MASAAKI Amino. Effects of Process Parameters and Material Properties on Deformation Process in Tube Hydro-forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123: 285—291.

[11] DOHMANN F, HARTL C H. Tube Hydroforming Research and Practical Application[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71: 174—76.

[12] ALTAN T, KOC M, AUEULAN Y, et al. Formability and Design Issues in Tube Hydroforming[C]. Proceeding of the International Conference on Hydroforming, Stuttgart, 1999: 11—12.

[13] HARTL C. Research and Advances in Fundamentals and Industrial Applications of Hydroforming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2/3): 383—392.

[14] 贺佳, 阎启. 液压胀形用激光焊管产品的质量控制[J]. 物理测试, 2016, 34(4): 25—28.
HE Jia, YAN Qi. Uality Control of Laser Welded Tube Products for Hydroforming[J]. Physics Examination and Testing, 2016, 34(4): 25—28.

[15] 孙克锐, 杨连发. 焊缝管液压成形技术及热影响区对成形的影响[J]. 桂林电子科技大学学报, 2006, 26(5): 380—384.
SUN Ke-rui, YANG Lian-fa. Tailor-welded Tube in Hydroforming and Influence of the Heat Affected Zone on Bulge Forming[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2006, 26(5): 380—384.

[16] ROQUE A P, NATAL J R M. Influence of the Heat Affected Zone on Hydroforming with Tailor-welded Tubular Blanks[J]. COMPLAS VIII Barcelona: CIMNE, 2005: 1—4.

[17] 苏海波, 蒋浩民, 陈新平, 等. 液压冲孔技术研究与应用现状[J]. 锻压装备与制造技术, 2008, 43(5): 19—22.
SU Hai-bo, JIANG Hao-min, CHEN Xin-ping, et al. Application and Research on Hydro-piercing[J]. Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2008, 43(5): 19—21.