

综 述

镁合金管件热态内压成形研究进展

刘钢, 苑世剑, 何祝斌

(哈尔滨工业大学液力成形工程研究中心, 哈尔滨 150001)

摘要: 首先简介了热态内压成形国内外研究现状, 然后重点介绍了哈尔滨工业大学在热态内压成形装置和镁合金热态内压成形方面的研究进展。所研制的热态内压成形装置可在一定温度下实现镁合金大膨胀率变径管、弯曲轴线变截面管的研制。采用 AZ31B 镁合金管材获得膨胀率 30%, 最大减薄率 6.7% 的变径管件; 采用 AZ61A 镁合金管材试制了正方形截面件和某轿车样件, 采用 AZ31 镁合金管材试制了截面带有小圆角的管件。介绍了上述样件的工艺过程, 表明镁合金热态内压成形工艺具有广阔的应用前景。

关键词: 热态内压成形; 镁合金; 管材液压成形; 内高压成形

中图分类号: TG306 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2009)01-0027-05

Development of Warm Hydroforming for Magnesium Alloy Tubes

LIU Gang, YUAN Shi-jian, HE Zhu-bin

(Engineering Research Center of Hydroforming, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: State of the art in warm hydroforming is introduced first. Then, research development of Harbin Institute of Technology (HIT) is described, including warm hydroforming instrument and Magnesium alloy warm hydroforming processes. The warm hydroforming instrument developed by HIT is available for R&D of Mg-alloy tubular parts with multiple diameters and high expansion ratio and parts with bent axis and various cross sections. An AZ31B part with the maximum expansion ratio of 30% and the maximum thinning ratio of 6.7% has been formed. By using of AZ61A, a part with square cross-section and a automotive sample part have been manufactured. In addition, a AZ31 part with small corner radii on cross sections is formed. The processes for the parts mentioned above are introduced and show that warm hydroforming of Magnesium alloy has prospective applications in future.

Key words: warm hydroforming; magnesium alloy; tube hydroforming; internal high pressure forming

结构轻量化是汽车等运输工具节能减排的要求,也是航空航天飞行器提高有效载荷和射程,武器装备提高机动性能的重要手段,因此成为先进制造技术的重要发展方向。结构轻量化有 2 条主要途径:材料途径,即采用镁合金、铝合金、钛合金和复合

材料等轻质材料^[1];结构途径,即采用空心变截面、变厚度薄壁壳体等结构。对于承受弯扭载荷为主的结构,采用空心变截面构件,既可以减轻质量又可以充分利用材料的强度^[2-3]。采用轻合金管材制造空心变截面轻体结构,综合了材料减重和结构减重两

收稿日期: 2009-06-17

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划;国家杰出青年基金项目(50525516);国家十一五科技支撑计划(2006BAE04B03)

作者简介: 刘钢(1970-),男,吉林人,博士,教授,博导,主要研究方向为内高压成形、轻合金热成形。

个途径的优势,将取得更好的轻量化效果^[4]。

由于镁合金等轻合金往往在室温下塑性较低、成形困难,近年来在管材室温内高压成形基础上,发展起来一种采用加热加压介质成形空心变截面零件的热态内压成形方法,即:在一定加热温度下,利用管材塑性提高和屈服强度降低实现室温难成形材料管件的內压成形^[5-7]。热态內压成形主要有两方面优点:提高管材內压成形极限、满足复杂零件成形要求;降低成形压力,减小合模压力机吨位^[8-9]。

文中简要介绍热态內压成形国内外研究现状,主要介绍哈尔滨工业大学在镁合金热态內压成形方面的研究进展,包括热态內压成形装置研制,大膨胀率和变截面构件研制等。

1 热态內压成形国内外研究现状

轻合金热态內压成形的基本原理是在一定温度下,通过液体或气体介质在管材内部施加压力,同时沿管材轴向施加推力,使管材贴模成形为空心变截面零件。德国最早研制了热态內压成形装置,如不来梅大学、纽伦堡大学等研制了最高成形温度 300℃,最高压力 100 MPa 热态內压成形系统,为了减小模具和液体间的温度梯度,采用热油加热模具^[10-11];斯图加特大学研制了采用气体介质的內压成形系统,可在 250~350℃ 范围进行镁合金管成形^[12];开姆尼茨大学研制的气体介质內压成形系统温度可达 1250℃,最高压力达 70 MPa^[13]。美国俄亥俄州立大学研制了完全将管件和模具浸入热油中的成形装置,最高加热温度约为 300℃^[14]。

在热态內压成形装置研究基础上,各国学者主要围绕不同温度下管材应力-应变曲线的确定、成形极限图以及摩擦等问题开展了研究。德国学者对 ZM21 镁合金热态內压成形性能进行了研究,并在 350℃ 研制了总膨胀率达 116% 的方截面管件^[15]。日本学者采用 AZ31 在 350~450℃ 进行了三通管件內压成形的初步研究^[16]。美国韦恩州立大学开展了镁合金热态內压成形组织演化研究,发现受热不均的 AZ31 镁合金管材,变形后不同部位组织差异巨大,管件中部温度约 400℃。虽然变形量大,却几乎未发现孪晶,而在管件两端温度约 200℃,存在高密度孪晶^[17],还发现应变速率较高时(大于 10 s⁻²)发生了“非稳态蠕变”现象,从力学角度分析了

其对提高热成形效率的重要作用,但尚未从材料学角度揭示其物理本质^[18]。哈尔滨工业大学提出了环形试样拉伸测试方法,采用该方法配合热态胀形方法测试了镁合金、铝合金管材的成形性能^[19]。从现有研究结果来看,镁合金热态內压成形机理、工艺和模具的优化等方面还有待深入研究。

2 热态內压成形装置研制

热态內压成形工艺原理如图 1 所示,其基本原

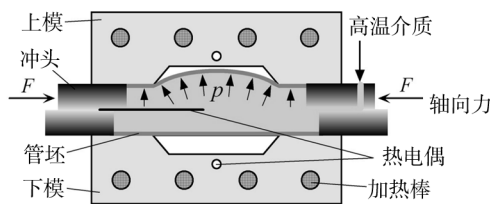


图1 热态內压成形原理

Fig. 1 Principle of IHPF at elevated temperature

理是将管材置于加热到设定温度的模具中,通过管材内部的高温高压液体和管端轴向补料的共同作用使管材贴模成形为所需工件。在成形过程中利用测温 and 控温装置保持管材内部液体介质和模具的温度。哈尔滨工业大学以独立研制的数控内高压成形机为平台,解决了高温高压液体介质传输和密封问题,实现热态介质內压和轴向进给匹配的闭环控制,研制了最高温度 315℃,最高压力 100 MPa 的热态內压成形装置^[19-20]。

热态內压成形装置主要由三大单元组成:介质增压单元、介质传输单元和成形单元。介质增压单元通过常温增压器,利用一个冷热介质转换器成对热态介质的增压和控制;介质传输单元通过高温油泵将热态介质输送到工件中;成形单元主要包含模具、冲头、加热器、测温 and 控温器,对模具和介质的温度进行控制,最终在模具内完成零件的成形。采用能同时满足高温和高压条件的介质、阀和密封机构,并实现对温度和压力的精确控制是热态內压成形装置的关键。

3 镁合金管件热态內压成形

3.1 镁合金变径管热态內压成形

采用 AZ31B 镁合金挤压无缝管,通过热态內压

成形获得了膨胀率 30% 的变径管件。管材直径为 $\phi 44$ mm, 壁厚为 1.8 mm, 变形区直边长度为 44 mm。

在 178℃, 配合一定的轴向补料进行热态内压成形, 获得如图 2 所示膨胀率 30% 的变径管件, 沿轴向减薄率分布如图 3 所示, 最大减薄率仅 6.7%。



图2 热态内压成形变径管

Fig.2 Part with changeable diameter formed by warm hydroforming

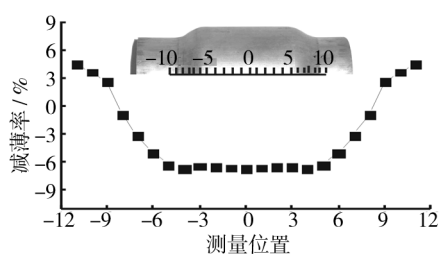


图3 变径管件轴向壁厚分布

Fig.3 Thickness distribution along axial direction

而该管材在同样温度下不补料直接胀形时, 膨胀 30% 时就会发生破裂, 无法成形为变径管件^[21]。

3.2 镁合金正方形截面件热态内压成形

采用 AZ61A 镁合金分流模挤压管材进行了正方形截面件热态内压成形研究。管材外径 70mm, 壁厚 4mm。根据拉伸性能测试, 当温度超过 225℃ 时, AZ61A 镁合金的均匀延伸率和应变硬化指数明显下降, 材料的均匀变形能力降低, 因此 AZ61A 镁合金热态内压成形的温度不宜过高^[22]。在 180, 210, 225, 240℃, 内压 28 MPa 下, 成形的正方形截面件如图 4 所示, 获得到外圆角半径平均值依次为 16, 14, 13.25, 12.25mm, 可见, 随温度升高, 方形件圆角明显减小。根据实验结果测试正方形截面件的圆角壁厚分布, 发现不同温度下成形的方截面件壁厚变化趋势相同, 圆角与直边的过渡区减薄最严重, 如图 5 所示, 最大减薄率约为 10%。

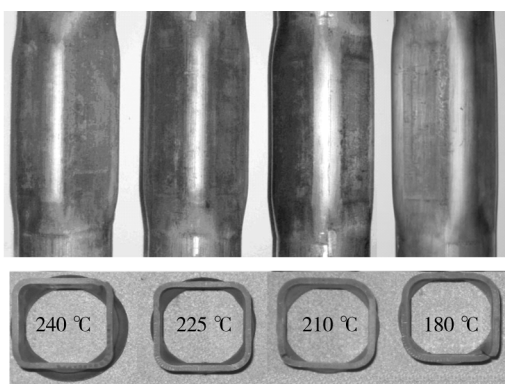


图4 不同温度下成形出的方形件(内压 28 MPa)^[22]

Fig.4 Parts with square-section formed at different temperatures

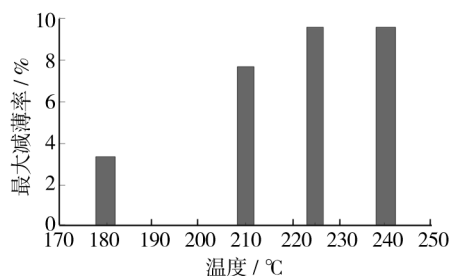


图5 不同温度下最大减薄率

Fig.5 Maximum thinning ratios at different temperatures

3.3 镁合金弯曲轴线变截面件热态内压成形

3.3.1 AZ61A 变截面件热态内压成形

图 6 所示为轴线为曲线的空心变截面结构件, A-

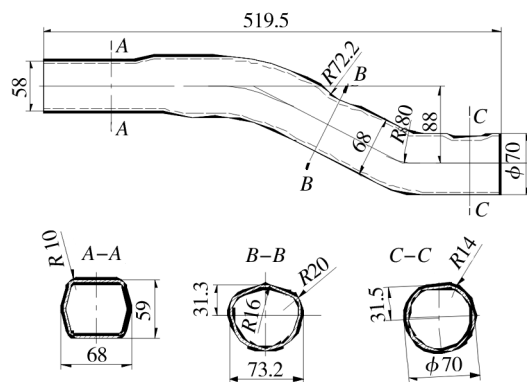
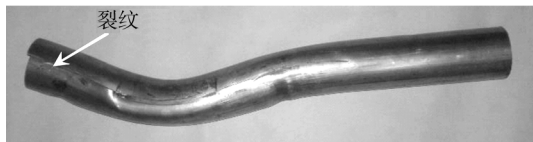


图6 轿车后轴纵臂形状尺寸示意

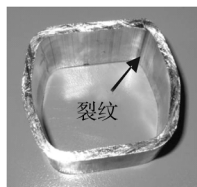
Fig.6 Shape and dimensions of rear axle arm

A, B-B 和 C-C 为 3 个典型截面。此类零件内压成形一般需通过弯曲、预成形和终成形 3 个工序完成。采用的材料与前述正方形截面件的管材相同。

首先进行弯曲工序,该分流模挤压管材焊缝强度较弱,当焊缝位于弯曲中性层时,由于弯曲内侧和外侧的相对运动,易导致沿焊缝处剪切变形引起开裂,如图7a所示。在弯曲管件基础上,进行截面预



a 弯曲焊缝开裂



b 预成形圆角开裂

图7 弯曲和预成形发生开裂缺陷

Fig. 7 Fractures during bending and preforming

成形。因该件可直接置入终成形模具,因此截面的预成形采用终成形模腔通过合模实现。在室温下,因截面 A-A 处在预成形时要由圆形变形为近似六边形,圆角部位发生较大应变,导致开裂,如图7b所示。

在弯曲过程中将焊缝置于剪切变形较小的 45° 角位置,可避免开裂获得合格预弯管预坯,然后在 225°C 左右进行预成形,避免了圆角部位的开裂^[23]。

预成形后进行管端密封,并注入高温高压液体介质,保持液体介质和模具温度在 $250^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$,当内压达到 40MPa 时获得后轴纵臂样件如图8所示,最终尺寸满足零件设计要求。

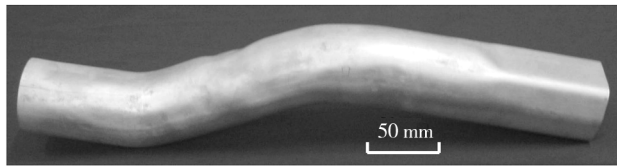


图8 镁合金后轴纵臂样件

Fig. 8 Magnesium alloy sample part of rear axle arm

3.3.2 AZ31 变截面件热态内压成形

图9所示为截面上需成形出小圆角的镁合金管件。采用管坯直径 32mm ,壁厚 1.5mm ,材料为AZ31挤压无缝管。该管件也需要通过弯曲、合模预成形、热态内压成形等3个过程进行成形。

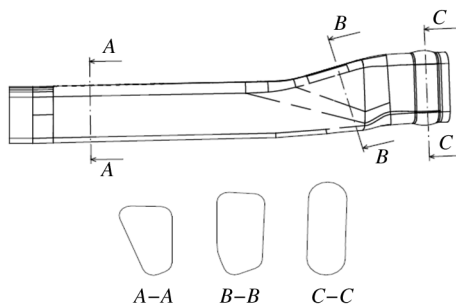
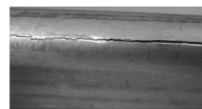


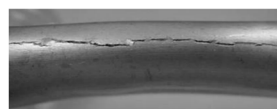
图9 镁合金异形截面管件示意

Fig. 9 Tubular part with different cross-sections

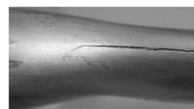
在将预弯管坯置入成形模具中进行合模时,因截面圆角较小,易发生如图10所示纵向裂纹。将模



a A-A 截面



b B-B 截面上方



c C-C 截面下方

图10 常温预成形典型位置开裂缺陷

Fig. 10 Fractures occurred at different position during pre-forming at room temperature

具和管材预热后,在 $170 \sim 180^\circ\text{C}$ 之间进行合模,即可避免开裂发生。合模预成形后,在 220°C 进行内压成形,可获得合格的零件,成形过程如图11所示^[24]。



图11 AZ31 变截面件成形过程

Fig. 11 Forming process of AZ31 tubular part with different cross-sections

4 结语

热态内压成形通过提高成形温度,改善材料塑性,提高室温难变形镁合金等材料的成形极限,用于复杂轻量化结构件制造,应用前景广阔。国内外在热态内压成形研究领域已经开展了一些工作,目前热态成形装置已经在工业生产中有所应用,但是热态内压成形机理和工艺优化研究还刚刚开展,还有很多理论问题和实际应用问题有待研究解决。

哈尔滨工业大学在热态内压成形装置、管材热成形性能、大膨胀率变径管件、弯曲轴线变截面管件研究方面均取得一定的研究成果,将进一步开展镁合金管材热态内压成形变形机理、工艺和模具优化等研究工作,为镁合金管件在轻量化结构制造领域的应用做好技术储备。

参考文献:

- [1] 王渠东,丁文江. 镁合金及其成形技术的国内外动态与发展[J]. 世界科技研究与发展, 2004, 26(3): 39-46.
- [2] DOHMANN F, BOHM A, DUDZIAK K. The Shaping of Hollow Shaped Workpieces by Liquid Bulge Forming [C]// Proc of 4th ICTP, Beijing, 1993: 447-452.
- [3] AHMETOGLU M, ALTAN T. Tube Hydroforming: State-of-the-art and Future Trends [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98: 25-33.
- [4] FROES F H, ELIEZER D, AGHION E. The Science, Technology, and Applications of Magnesium [J]. JOM, 1998, 50(9): 30-34.
- [5] SIEGERT K, HAUSSERMANN M, LOSCH B, et al. Recent Developments in Hydroforming Technology [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98: 251-258.
- [6] MULT E H, GEIGER M. Sheet and Tube Hydroforming at Elevated Temperatures [C]. International Conference on Hydroforming, Fellbach, Germany, 2003: 259-278.
- [7] SILLEKENS W H, BOHLEN J. The MAGNEXTRUSCO Project: European Community Research on Hydrostatic Extrusion of Magnesium [C]. The 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications, Weinheim, Germany, 2004: 1046-1051.
- [8] LIU Gang, JAEGER S, SIEGERT K. Forming Limit and Loading Path of Mg-alloy Tube Bulging [J]. Materials Science Forum, 2005, 488-489: 637-640.
- [9] YUAN Shi-jian, QI Jun, HE Zhu-bin. An Experimental Investigation into the Formability of Hydroforming 5A02 Al-tubes at Elevated Temperature [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177: 680-683.
- [10] VOLLERTSEN F. Challenges and Chances of Hydroforming of Aluminum Alloys [C]. Chinese-germany ultralight symposium, Beijing, 2001: 71-79.
- [11] NOVOTNY S, GEIGER M. Process Design for Hydroforming of Lightweight Metal Sheets at Elevated Temperatures [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 138: 594-599.
- [12] SIEGERT K. Pneumatic Bulging of Magnesium AZ31 Sheet Metals at Elevated Temperatures [J]. CIRP Ann-Manuf Technol, 2003, 52(1): 241-244.
- [13] NEUGEBAUER R, STERZING A, SCHIECK F. Opportunities for Progressive Applications by Means of Integrating and Combining Various Technologies with Hydroforming [C]. TUBEHYDRO2007, Harbin, 2007: 79-87.
- [14] ALTAN T, KAYA S, AUE-U-LAN Y. Forming Al and Mg Alloy Sheet and Tube at Elevated Temperatures [J]. Key Engineering Materials, 2007, 344: 317-324.
- [15] POP R, WAGNER S, LIEWALD M. Warm IHP forming of Magnesium and Titanium tubes [C]. Hydroforming of Sheets, Tubes and Profiles, Fellbach, Germany, 2008: 157-180.
- [16] ATSUSHI Okamoto, HISASHI Naoi, YOSHITAKA Kuwahara. Study on Hot Bulge Forming for Tees of Magnesium Alloy Pipe Joints [C]. Tube Hydroforming Technology- Proceedings of TUBEHYDRO2007, Harbin, 2007: 121-128.
- [17] LIU Yi, WU Xin. A Microstructure Study on an AZ31 Magnesium Alloy Tube after Hot Metal Gas Forming Process [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2007, 16(3): 354-359.
- [18] WU Xin. Non-Steady-State Creep Behavior in Tube Gas Forming [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2007, 16(4): 418-431.

(下转第 61 页)

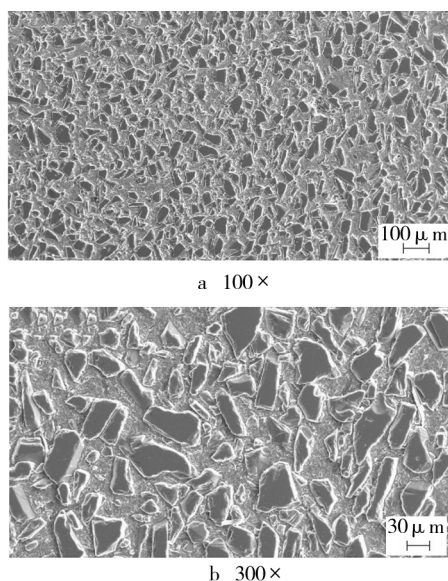


图8 高温压缩后的 SiCp/Al 复合材料的 SEM 图

Fig.8 SEM of SiCp/Al composite after Hot Compression

$\ln[\sin h(0.02\sigma)] = 0.43 \ln \dot{\varepsilon} + 2.0 \times 10^4 \frac{1}{T} - 16.73$,
变形激活能 $Q = 388.93 \text{ kJ/mol}$ 。回归方程结果与实验所得数据变化趋势基本一致。

3) 高体分 SiCp/Al 多功能复合材料高温压缩变形后,基体仍保持连续,压缩过程中,颗粒在压力作用下会翻转,部分颗粒破碎,颗粒尺寸、圆整度及分布均匀性明显提高,高温压缩变形有利于 SiC 颗粒尺寸及分布均匀性的调整。

参考文献:

- [1] GUO Shao-wen, LI Li-bo, ZHANG Guang-yu, et al. Adhesion Analysis of Electroless Ni Coating on SiCp/Al Composite Mirror Substrate[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(6): 960-963.
- [2] LEI Yu-cheng, ZHANG Zhen, NIE Jia-jun, et al. Effect of Ti-Al on Microstructures and Mechanical Properties of Plasma Arc In-situ Welded Joint of SiCp/Al MMCs [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18:809-813.
- [3] 郝斌,崔华,余志勇,等. 纳米 SiC 颗粒增强铝基复合材料制备工艺研究[J]. 材料工程,2006,1(1):489-492.
- [4] 崔岩. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料的航空航天应用[J]. 材料工程,2002,1(6):3-6.
- [5] BARDAL A. The Effect of Antimony on the Interface of Cast AlSi-SiC Composites[J]. Mater Sci,1983,28:2699-2705.

- [6] THUNEMANN M. Aluminum Matrix Composites Based on Preceramic-polymer-boned SiC Preforms [J]. Composites Science and Technology,2007,67:376~379.
- [7] WANG X J, HU X S, WU K, et al. Hot Deformation Behaviour of SiCp/AZ91 Magnesium Matrix Composite Fabricated by Stir Casting [J]. Material Science and Engineering A,2008,492(1-2):481-485.
- [8] 刘坚,毛大恒,冯广,等. 2124 铝合金高温压缩流变行为研究[J]. 湖南有色金属,2007,22(5):26-29.
- [9] 马宁,刘书田. 复合材料粘弹性本构关系与热应力松弛规律研究[J]. 复合材料学报,2005,22(1):158-160.
- [10] SPIGARELLI S, EVANGELISTA E, CERRI E, et al. Constitutive Equations for Hot Deformation of an Al-6061/20% Al₂O₃ Composite [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 12(319): 721-725.
- [11] 李进军,于家康. SiC 颗粒增强 Al 复合材料的热膨胀性能[J]. 陕西科技大学学报,2007,25(2):74-76.
- [12] 中国科学院数学研究所统计组. 常用数理统计方法[M]. 北京:科学出版社,1973:272-273.

(上接第31页)

- [19] 刘钢,何祝斌,苑世剑,等. 镁合金热态内高压成形装置及管材成形性能[J]. 航空制造技术,2007(增刊):470-477.
- [20] 齐军. 5A02 铝合金管材热态液压成形研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学博士学位论文,2008:76-83.
- [21] HE Zhu-bin, LIU Gang, WU Jia, et al. Mechanical Properties Testing and Formability Evaluation of AZ31B Extruded Tube at Elevated Temperature [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2008,18:s209-s213.
- [22] HU Lan, HAN Cong, HE Zhu-bin, et al. Warm Hydroforming for a Square-sectional Component of AZ61A Magnesium Alloy[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009,16(2): 227-231.
- [23] 刘钢,何祝斌,齐军,等. 轻合金管材热态内压成形性能测试及样件试制[J]. 锻压技术,2008,33(3):48-51.
- [24] YUAN Shi-jian, HE Zhu-bin, WANG Xiao-song, et al. Material Characterization and Formability Evaluation of AZ31B Mg Alloy Tube for Warm Tube Hydroforming [C]. The 9th International Conference on Technology of Plasticity, Korea, 2008: 1274-1279.