

筒形件充液热拉深及冷却对性能影响的研究

杨希英, 郎利辉, 刘康宁, 张文尚

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: **目的** 研究筒形件充液热拉深及冷却对性能影响。**方法** 在自主开发的 RJ50 实验机上进行了 7075 筒形件充液热拉深实验。在 210 ℃ 下, 对不同成形缺陷及影响因素进行了分析, 并对成形的零件选择两种冷却介质进行冷却, 并研究了宏观力学性能及微观组织演化。**结果** 与温热成形相比, 充液热拉深零件具有更高的尺寸精度; 在充液热拉深条件下, 水冷较空冷对筒形件成形后屈服强度及强度极限有轻微提高, 对延伸率影响不大, 水冷导致的第二相粒子要比空冷多, 但水冷致晶粒粗化缓慢。**结论** 充液热拉深可以显著提高零件的尺寸精度; 充液热拉深后并及时冷却的方法, 在维持材料力学性能及防止材料劣化方面是有利的。

关键词: 充液热拉深; 7075 铝合金; 力学性能; 微观组织

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.02.006

中图分类号: TG394

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2015)02-0035-06

The Effect of Warm Hydroforming and Cooling on the Properties of Hydroformed Part

YANG Xi-ying, LANG Li-hui, LIU Kang-ning, ZHANG Wen-shang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: The aim of this study was to investigate warm hydroforming and the influence of cooling on macro and micro properties of hydroformed part. The cylindrical cup warm hydroforming of 7075 aluminum alloy sheet was carried out on a self-developed YRJ50 test machine. The different forming defects and influencing processing parameters were analyzed at 210 ℃. The macro and micro properties of hydroformed parts cooled using two different cooling media were also investigated. The warm hydroformed part had higher dimensional precision than the warm formed part. Under the condition of warm sheet hydroforming with thereafter rapid cooling, the yield stress and ultimate strength were slightly increased by water cooling as compared to air cooling, while the influence on elongation at fracture was little between the two cooling modes. The second-phase particles caused by water cooling were more than those by air cooling, but water cooling led to slow roughening of grain. Warm hydroforming could significantly increase the dimensional accuracy of hydroformed parts. Timely water cooling after warm sheet hydroforming was beneficial for maintaining material mechanical properties and preventing deterioration.

KEY WORDS: warm hydroforming; 7075 aluminum alloy; mechanical property; microstructure

轻量化是汽车及航空航天制造业的发展趋势, 采用轻质合金材料是轻量化的重要措施之一^[1]。铝合金板材室温成形性能较差, 采用普通拉深成形的工艺

冗余、成形精度低且质量不稳定^[2-4]。国外汽车公司已用超塑成形作为先进钣金成形技术生产出大型铝合金覆盖件, 但由于细晶的超塑合金板材成本过高,

收稿日期: 2015-01-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(1175024)

作者简介: 杨希英(1985—), 男, 河北人, 博士研究生, 主要研究方向为液压成形。

其应用受到限制。

板材充液热拉深在提高成形极限方面有很大优势,其复合了室温充液成形工艺及热拉深工艺,兼具了两者的优势^[5-7]。高温环境下材料塑性提高,然而不可避免的微观组织变化将导致材料性能劣势^[8-10]。对于板材充液热拉深工艺,同样需要解决这样的问题。在高温梯度场下,微观组织劣化趋势或被抑制,或朝有利方向转变^[11]。

基于此,文中采用可热处理铝合金板材温热充液成形后及时快速冷却。在开发的拉深试验机上进行7075 铝合金充液热拉深实验,对温热成形特征及影响因素进行了分析,并对成形后的零件选择不同冷却介质冷却,研究其宏观力学性能及微观组织演化。为铝合金板材充液热拉深在汽车制造领域的应用提供一定的研究依据。

1 板材充液热拉深

1.1 实验条件

板材充液热拉深实验在自主开发的 YRJ50 拉深实验装置上进行。该设备可以实现不同成形温度和变液室压力的功能,如图 1 所示。在成形过程中,首先将预制好的板材放在充满介质的凹模型腔上部,利用压边装置进行合模,并按要求分别对模具、板材和流体介质进行加热,直到所需温度;接着利用压力转换装置预胀形,当到达设定条件,凸模下行,同时压力转换装置使热介质产生成形时所需高压,此时板材受压紧贴在凸模上,最终成形与凸模形状一致的零件。

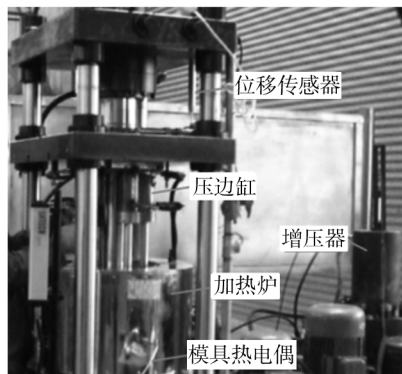


图1 板材充液热拉深实验装置

Fig. 1 Experimental setup of warm hydroforming of sheet

充液热拉深模具及尺寸如图 2 所示。模具材料采用热作模具钢 H13,该材料在 400 ℃ 以下具有优良的热稳定性。隔热垫板防止模具热量传至压力机工

作台,并防止模具热量损失。

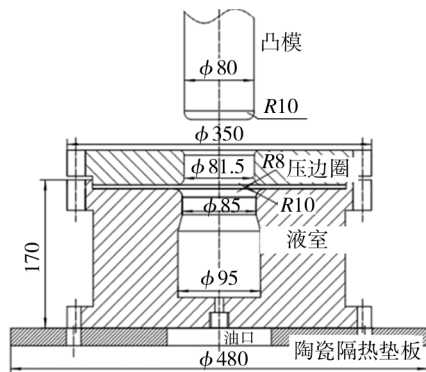


图2 成形模具尺寸及示意图

Fig. 2 Schematic and dimension of mold

材料选用厚度 1 mm 的 7075 铝合金,化学成分如表 1 所示。该材料为可热处理强化合金^[12],具有高比强度等优良特性,在汽车及航空制造领域应用广泛^[13]。针对充液热拉深工艺,如果温度过高将导致材料过度软化,由于液体高压的存在,使筒形件凹模圆角悬空带成为薄弱区而过早破裂。因此过高温度不利于充液热拉深,材料需要保留一定的强度^[14]。文中选择 210 ℃ 进行成形,板料直径 200 mm。对 7075 铝合金板材进行单拉试验,分别得到 210 ℃ 时,应变率为 0.0001, 0.001, 0.005 s⁻¹ 的应力应变曲线,如图 3 所示。

表1 7075 铝合金的质量分数 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 7075 alloy

Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Fe	Si	Ti	Others	Al
5.1	2.1	1.2	0.3	0.18	0.5	0.4	0.2	0.2	Bal.

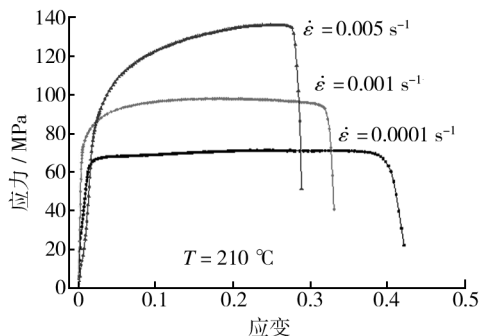


图3 7075 铝合金板材真实应力-真实应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of 7075 alloy sheet

1.2 实验分析

在充液热拉深过程中,压边力与液室压力-行程曲线是成形工艺的主要参数。不合适的参数匹配导致常见的失效形式为起皱与破裂如图 4 所示。不同

于普通拉深成形,在压边力大的情况下,除因法兰区域材料流动困难而导致拉裂外,液室压力会使坯料在凹模圆角处反向胀起,见图 4a。

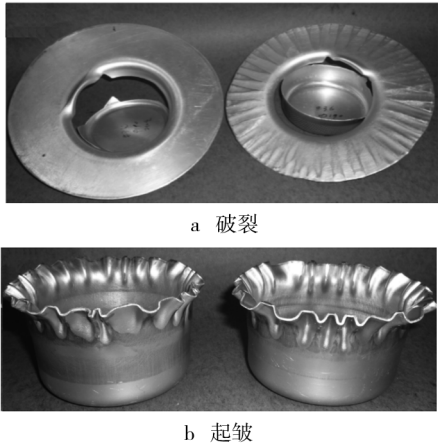


图 4 筒形件充液热拉深中的缺陷形式

Fig. 4 Fractures and wrinkles of cylindrical parts in warm hydroforming

图 5 为充液热拉深液室压力与凸模行程曲线,在压边力 7 t 情况下,凸模行程至 36 mm 时,液室压力达到 7.9 MPa,破裂后压力迅速下降。在压边力 3.6 t 情况下,凸模行程至 63 mm 时,液室压力达到 8.2 MPa,之后起皱失稳严重致使压边圈与液室表面间隙增大,在此之前建立起来的液室压力迅速下降,起皱失稳零件如图 4b 所示。起皱与破裂均会使拉深过程中液室压力提前卸压。因此,需要协调压边力与液室压力的匹配关系。

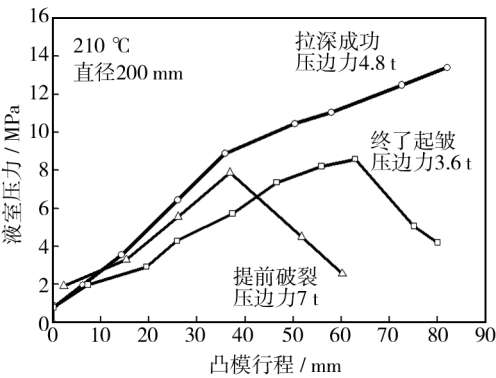


图 5 充液热拉深液室压力与凸模行程曲线

Fig. 5 Curves of liquid pressure vs. punch stroke in warm hydroforming

在 4.8 t 压边力作用下,拉深直径 80 mm 筒形件深度为 85 mm(拉深比 2.5),如图 6 所示。拉深过程中的液室压力-凸模行程曲线、拉深缸压力-行程曲线如图 7 所示。可以看到,当凸模行程至 25 mm 时,液

室压力趋于平衡,浮动在 12.3 ~ 14.4 MPa 之间。说明此时法兰处板料下表面与凹模表面已经建立起溢流油膜,其对压边圈的反作用力与施加的压边力达到了动态平衡。另外,拉深缸压力同样达到了平衡状态,维持在 9.1 ~ 9.7 MPa 之间。拉深缸直径为 200 mm,对应拉深力约为 18.2 ~ 19.4 t。

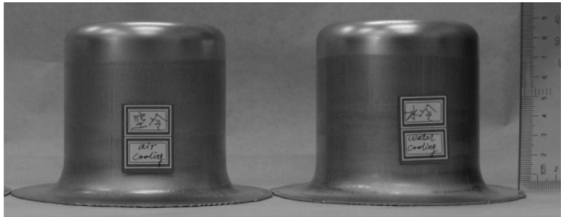


图 6 充液热拉深筒形件

Fig. 6 Cylindrical cups hydroformed by warm hydroforming processing

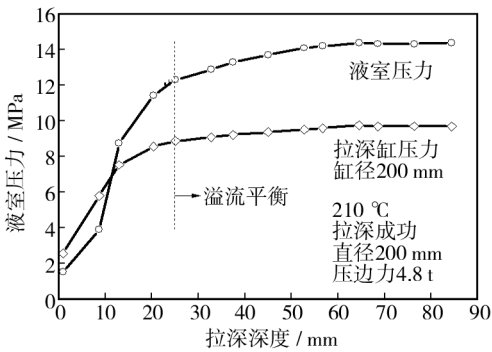


图 7 液室压力-凸模行程曲线及拉深缸压力-行程曲线

Fig. 7 Curves of liquid pressure vs. punch stroke and drawing force vs. punch stroke

这种状态称为溢流平衡状态^[15],此时两者之间建立起润滑油膜,达到溢流润滑的最佳状态。在此状态下成形的筒形件与液室模具表面很少接触或不接触,表面质量好。板料在流体压力的作用下紧密包裹在凸模外表面。热拉深筒形件外表面存在明显摩擦划痕。如图 8 所示,在相同尺寸凸模的情况下,采用

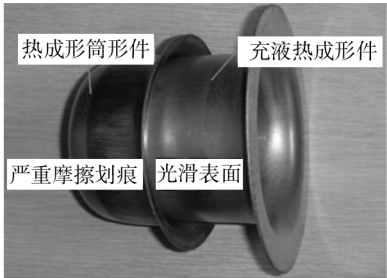


图 8 充液热拉深件与热拉深件比较

Fig. 8 Comparison of cups formed by warm hydroforming and warm forming

充液热拉深工艺成形的筒形件完全可以置入热拉深的筒形件腔体内,说明热拉深筒形件直壁区域与凸模之间存在较大间隙,很难保证零件尺寸精度。

2 板材充液热拉深后性能评估

如前所述,充液热拉深需要材料具有一定的强度,成形温度不能过高,即属于温热成形的范畴。对于难变形材料,传统成形方法不能成形的情况下,采用充液热拉深工艺并快速冷却,可一定程度抑制宏观力学性能弱化及微观组织劣化,在满足产品服役条件的情况下,该复合工艺具有现实意义。

2.1 实验设计

7075 铝合金板材进行充液热拉深后,材料已经积累了变形量,位错及针扎处于不稳定状态。为此,本文选用空冷、水冷 2 种冷却方式使零件冷却至室温,不同冷却方式代表了不同冷却速度。相应技术路线如图 9 所示。

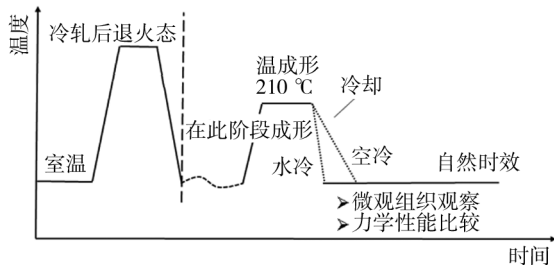


图 9 板材充液热拉深后快速冷却技术路线

Fig. 9 Processing route of warm hydroforming followed by rapid cooling

如图 10 所示,在筒形件直壁截取单拉试样,在常温下进行单向拉伸实验,评价屈服强度、抗拉强度、延伸率等力学性能参数。从法兰至筒底截取宽度 10 mm 长条,进行微观试样的制备。不同变形区域变形量不同,观察法兰、筒壁两个部位微观组织变化。

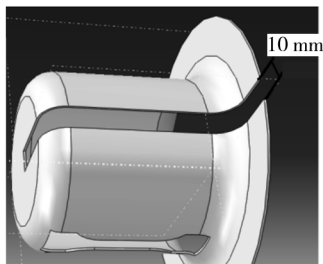


图 10 单拉试样及金相试样制取

Fig. 10 Specimens sampling for single tension and metallographic observation

2.2 冷却方式对成形件力学性能影响

单向拉伸实验在 Instron8801 电液伺服拉伸试验机上进行。每组 2 个试样,实验结果取平均值。延伸率符合 $L_0 = 5.65 \sqrt{S_0}$ 关系,其中, S_0 为试样标距内截面最小值, L_0 为计算延伸率的初始参考长度。

充液热拉深后零件力学性能实验结果如图 11 所示。空冷条件下,屈服强度为 224 MPa,强度极限为 260 MPa;水冷条件下,屈服强度为 228 MPa,强度极限为 265 MPa。可见,在温热条件下进行 7075 铝合金筒形件充液热拉深,水冷较空冷屈服强度及强度极限有轻微提高。2 种方式冷却后的延伸率,空冷为 11.83%,水冷为 11.18%,水冷较空冷有轻微降低,整体看影响不大。

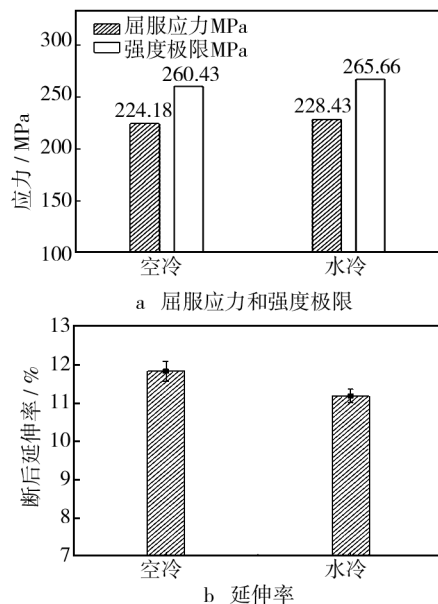


图 11 2 种冷却方式对屈服强度、强度极限及延伸率影响

Fig. 11 The influence of cooling modes on yield stress, ultimate strength and percentage of elongation at fracture

2.3 冷却方式对成形件微观组织影响

对空冷及水冷筒形件法兰和筒壁部分进行了金相和 EBSD 分析。采用 Keller 试剂 (1 mL HF, 1.5 mL HCl, 2.5 mL HNO₃, 95 mL H₂O) 对 7075 进行腐蚀,在 Axiovert200MAT 光学显微镜下进行观察。试样经电解抛光后在 JSM-7001F 热场发射扫描电子显微镜上进行 EBSD 观察,电压为 20 kV,扫描步长 0.5 μm,放大 500 倍。金相及 EBSD 实验结果如图 12 所示。

从图 12(a1)、(c1) 可以看出,7075 铝合金充液热拉深后,法兰处化合物破裂后沿压延方向排列。

由图 12(b1)、(d1) 可知,筒壁处化合物进一步破

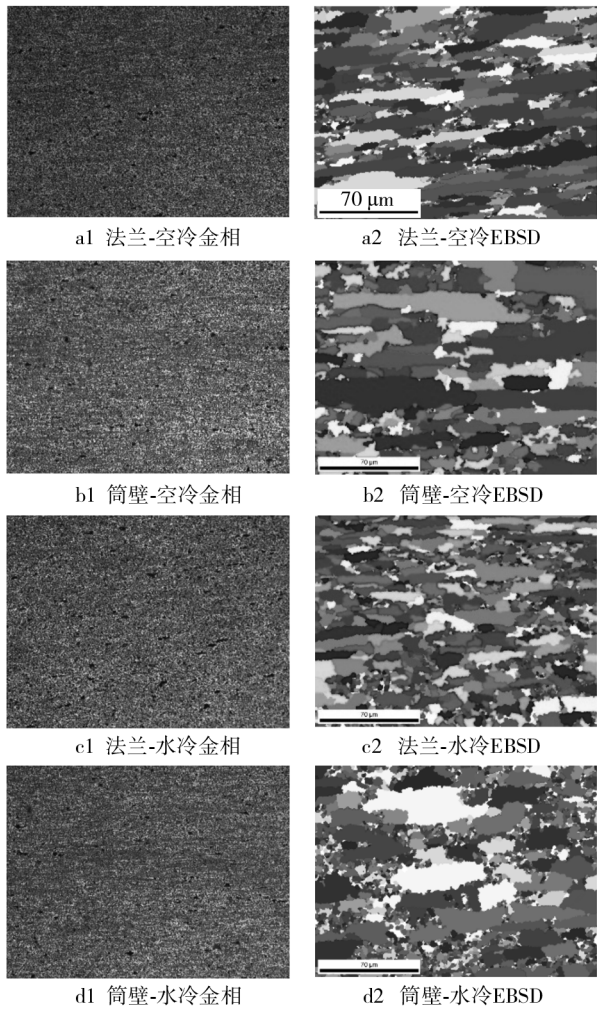


图 12 2 种冷却方式对微观组织的影响

Fig. 12 The influence of cooling modes on microstructures

碎,沿变形方向排列性较法兰处更强。整体上看,2 种冷却方式下金相组织存在较多的粗大第二相粒子,且这些第二相粒子在形态上各异,有针状的亚稳相,也有点状的稳定相^[11]。图 12 (a2) 至 (d2) 为采用 EBSD 技术观察到的晶粒形貌,沿压延方向,晶粒成长条状分布,在温热条件下,微观晶粒拉长主要由塑性变形引起,为动态回复过程。

比较图 12 (a2) 与 (b2)、(c2) 与 (d2) 可知,相同冷却方式下,筒壁晶粒大于法兰处。在拉深过程中,法兰受两向压一向拉应力作用(周向压应力、厚向压应力),筒壁处除液体压力提供的厚度法向应力外,受一向拉应力作用,表现为筒壁处晶粒大于法兰处。不同冷却方式下的晶粒变化情况如图 13 所示。空冷方式下,法兰最大晶粒为 34 μm ,占取样区域面积分数为 13.3%,筒壁最大晶粒为 45 μm ,面积分数为 19.7%;水冷方式下,法兰最大晶粒为 20 μm ,面积分

数为 8.3%,筒壁最大晶粒为 37 μm ,面积分数为 9.4%。可见,空冷条件下,出现大量粗大晶粒,相比之下,水冷条件下晶粒细小均匀,且法兰与筒壁均比空冷条件下晶粒要小。两种方式的最大晶粒均出现在筒壁处,而水冷条件下筒壁最大晶粒为空冷条件下的 80% 左右。晶粒局部或整体异常粗大在成形中均是应该避免的,上述分析说明板材温热充液成形后水冷能够一定程度上抑制晶粒粗化,在维持材料力学性能及防止材料劣化方面是有利的。

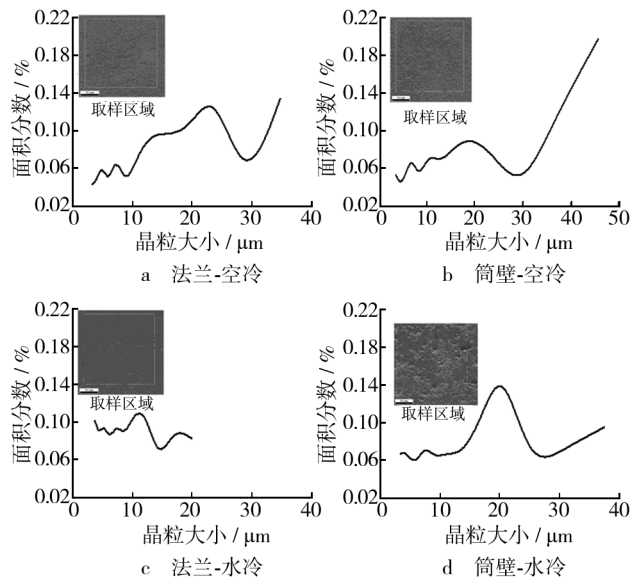


图 13 2 种冷却方式对晶粒大小的影响

Fig. 13 The influence of cooling modes on grain size

3 结论

1) 筒形件充液热拉深的主要缺陷为法兰处起皱和凹模圆角处破裂;在溢流平衡状态下,成形零件表面质量最好;与热拉深相比,充液热拉深零件表面质量及尺寸精度更高。

2) 对于不同冷却方式,水冷较空冷有较多的第二相粒子,屈服强度及强度极限有轻微提高,延伸率有微降趋势。

3) 采用 EBSD 技术能够观察到空冷方式下法兰与筒壁处晶粒均不同程度粗化,且筒壁处最严重,最大可达 45 μm 。水冷方式下,法兰处及筒壁处晶粒大小得到了抑制,较空冷方式细小均匀。

参考文献:

[1] 郎利辉,王永铭,谢亚苏,等. 某铝合金异形盒形件充液

- 成形坯料形状优化[J]. 精密成形工程, 2013, 5(3): 19—23.
- LANG Li-hui, WANG Yong-ming, XIE Ya-su, et al. The Blank Optimization of Aluminum Alloy Irregular Box Sheet Hydroforming Process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(3): 19—23.
- [2] 杨希英, 郎利辉, 郭禅, 等. 2A16 铝合金锥形件多级充液热拉深仿真及优化分析[J]. 精密成形工程, 2014, 6(6): 72—77.
- YANG Xi-ying, LANG Li-hui, GUO Chan, et al. Optimization and Simulation Investigation on Multi-step Sheet Warm Hydroforming of 2A16 Aluminum Alloy Conical Part[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(6): 72—77.
- [3] COLE G S, SHERMAN A M. Light Weight Materials for Automotive Applications[J]. Materials Characterization, 1995, 35(1): 3—9.
- [4] 陈龙, 张超, 曹婷婷, 等. 高强度复杂曲面件充液拉深工艺模拟研究[J]. 精密成形工程, 2012, 4(3): 39—42.
- CHEN Long, ZHANG Chao, CAO Ting-ting, et al. Simulation Research of Sheet Hydroforming Process for High Strength Steel Complex Surface Part[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(3): 39—42.
- [5] GROCHE P, HUBER R, DOERR J, et al. Hydromechanical Deep Drawing of Aluminium Alloys at Elevated Temperatures[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51(1): 215—218.
- [6] LANG L H, DANCKERT J, NIELSEN K B. Study on Hydromechanical Deep Drawing with Uniform Pressure onto the Blank[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(5): 495—502.
- [7] LANG Li-hui, WANG Yong-ming, XIE Ya-su, et al. Pre-bulging Effect During Sheet Hydroforming Process of Aluminum Alloy Box with Unequal Height and Flat Bottom[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(s2): 302—308.
- [8] LI D M, GHOSH A. Tensile Deformation Behavior of Aluminum Alloys at Warm Forming Temperatures[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 352(1/2): 279—286.
- [9] NAKA T, YOSHIDA F. The Effects of Temperature and Forming Speed on the Forming Limit Diagram for type 5083 Aluminum-Magnesium Alloy Sheet[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1-3): 648—653.
- [10] 何祝斌, 凡晓波, 苑世剑. 铝合金板材热成形-淬火一体化工艺研究进展[J]. 精密成形工程, 2014, 6(5): 37—44.
- HE Zhu-bin, FAN Xiao-bo, YUAN Shi-jian. Review of Hot Forming-quenching Integrated Process of Aluminum Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(5): 37—44.
- [11] 刘宝胜. 板材充液热拉深机理及关键技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012: 120—126.
- LIU Bao-sheng. Research on Forming Mechanism and Key Technologies of Warm Sheet Hydroforming[D]. Beijing: Beihang University, 2012: 120—126.
- [12] SOTIROV N, SIMON P, CHIMANI C, et al. Warm Deep Drawability of Peak-Aged 7075 Aluminium Sheet Alloy[J]. Key Engineering Materials, 2012, 504—506: 955—960.
- [13] TAJALLY M, EMADODDIN E. Mechanical and Anisotropic Behaviors of 7075 Aluminum Alloy Sheets[J]. Materials and Design, 2011, 32(3): 1594—1599.
- [14] 刘合军, 郎利辉, 李涛, 等. 高强度铝合金板材的温热介质充液成形研究[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(1): 31—36.
- LIU He-jun, LANG Li-hui, LI Tao, et al. Investigation on Warm/Hot Hydro-forming of High Strength Aluminum Alloy Sheet[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(1): 31—36.
- [15] LANG Li-hui, WANG Zhong-ren, KANG Da-chang, et al. Hydroforming Highlights: Sheet Hydroforming and Tube Hydroforming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 151(1-3): 165—177.

(上接第 29 页)

- [37] WANG Z K, ZHANG Q. Numerical Simulation of Involute Spline Shaft in Cold Rolling Forming[J]. Journal of Central South University Technology, 2008, 15(s2): 278—283.
- [38] TABOR D. The Hardness of Solids[J]. Review of Physics in Technology, 1970, 1(3): 145—179.
- [39] KAMOUNEH A A, NI J, STEPHENSON D, et al. Investigation of Work Hardening of Flat-rolled Helical-involute Gears through Grain-flow Analysis, FE-modeling, and Strain signature[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47: 1285—1291.