

铝镁合金温热介质充液成形加载条件及 温度场影响研究

邵天巍¹, 郎利辉², 赵香妮², 绳斯佳², 张瑜³

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 技术中心, 沈阳 110136;
2. 北京航空航天大学, 北京 100191; 3. 沈阳航空航天大学, 沈阳 110136)

摘要: **目的** 探究液室压力和拉深速度以及温度场分布规律对成形性能的影响。**方法** 在通用有限元软件 MSC.Marc 中建立 5A06 铝镁合金温热介质充液成形有限元模拟的专用平台, 对典型零件温热介质充液成形进行有限元模拟。**结果** 在液室压力为 5 MPa、拉深速度为 5 mm/s 的情况下成形效果最好, 最佳温度场分布为凹模与板料温度 250 °C、凸模温度 20 °C、压边圈温度 300 °C, 在此条件下, 凸模直径为 100 mm 时极限拉深深度可达到 161.4 mm。**结论** 液室压力和拉深速度以及温度场的分布对成形性能有着显著影响。

关键词: 铝镁合金; 温热介质充液成形; 有限元模拟; 加载条件; 温度场

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.04.016

中图分类号: TG389 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)04-0122-07

Effects of Loading Conditions and Temperature Fields on Warm Hydroforming of 5A06 Aluminum-magnesium Alloy

SHAO Tian-wei¹, LANG Li-hui², ZHAO Xiang-ni², SHENG Si-jia², ZHANG Yu³

(1. Technical Center, AECC Shenyang Liming Aero-engine Co., Ltd., Shenyang 110136, China;
2. Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

ABSTRACT: The paper aims to explore effects of liquid chamber pressure, drawing speed and temperature field distribution on forming properties. A special finite element simulation platform for warm hydroforming of 5A06 Al-Mg alloy was set up in general finite element software MSC.Marc to simulate warm hydroforming of typical parts. The forming effect was the best when the liquid chamber pressure was 5 MPa and the drawing speed was 5 mm/s. The optimum temperature field distribution was 250 °C for the die and sheet, 20 °C for the punch, and 300 °C for the bead ring. When the punch diameter was 100mm, the ultimate drawing depth could reach 161.4 mm. Liquid chamber pressure, drawing speed and temperature field distribution have significant impacts on the formability.

KEY WORDS: Al-Mg alloy; warm hydroforming; FEM; loading conditions; temperature field

近年来, 铝镁合金因其具有材质轻、抗腐蚀能力好等诸多特点而得到了越来越广泛的应用, 但是由于铝合金的塑性较低、成形性能较差, 采用传统的拉深成形工艺成形难度较大^[1-4], 因此, 学术界提出了温

热介质充液成形技术^[5-14], 该成形技术兼具了热成形及充液成形的双重优势, 有着广阔的应用前景。

文中将温热单拉试验中获得的数据以用户材料库的形式写入通用有限元软件 MSC.Marc 中, 通过对

收稿日期: 2019-04-15

作者简介: 邵天巍(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为钣金成形和焊接工艺。

通讯作者: 郎利辉(1970—), 男, 博士, 教授, 主要研究高温高压成形、柔性介质成形、复合材料成形等。

筒形件温热介质充液成形的热力耦合有限元进行模拟，在建立的最佳温度场下研究了液室压力和拉深速度对铝镁合金温热介质充液成形性能的影响及规律；同时，研究了温度场分布规律、控制方法及其对成形性能的影响，并获得了其最佳温度场分布，为后续的试验研究奠定了基础。

1 温热介质充液成形技术简介

温热介质充液成形时，将加热到一定温度的流体介质充入到经过预热的模具型腔，通过加热和冷却装置将模具和流体介质的温度控制在一定范围内，使得板材能够在温热状态下按照设计的加载路径成形。温热介质充液成形的原理见图 1，板材的加热是通过加热元件和充液成形介质来实现的，而充液成形介质的加热是在外部成套设备上完成的。

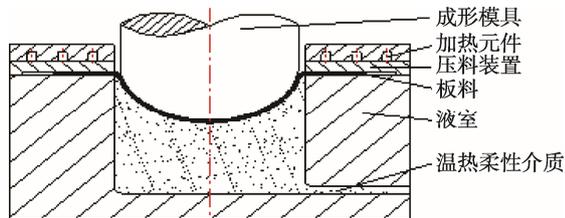


图 1 温热介质充液成形原理
Fig.1 Schematic diagram of warm hydroforming

由于温热介质充液成形是对温热成形技术和充液成形技术的综合运用，兼具了这两种先进成形技术的双重优点，既可以克服铝合金等轻质材料在室温下塑性差的缺点，极大提高材料的成形性能，又能继承液压柔性成形的特点，成形精密复杂零件。

2 温热介质充液成形有限元模拟及结果分析

2.1 有限元模型的建立

5A06 铝镁合金不同温度下的物理参数见表 1—4。参阅 MSC.Marc 用户手册，将热单拉试验中获得的不同温度不同应变速率下的应力应变曲线^[15]与表 1—表 4 中不同温度下的物理参数，以用户材料库的形式写入 MSC.Marc，建立 5A06 铝镁合金温热环境下有限元模拟的专用平台，为后续模拟奠定基础。在此专用平台的基础上，以筒形件为例，建立其热力耦合模型，进行 5A06 铝镁合金温热介质充液成形的有限元模拟。板料选取 Marc2007 中新引入的实体壳单元，该单元可以有效实现双面接触及检测。根据此模型的特点，并考虑到计算效率，特建立其 1/4 模型如图 2 所示，材料选用厚度为 1.4 mm 的 5A06 铝镁合金板材。

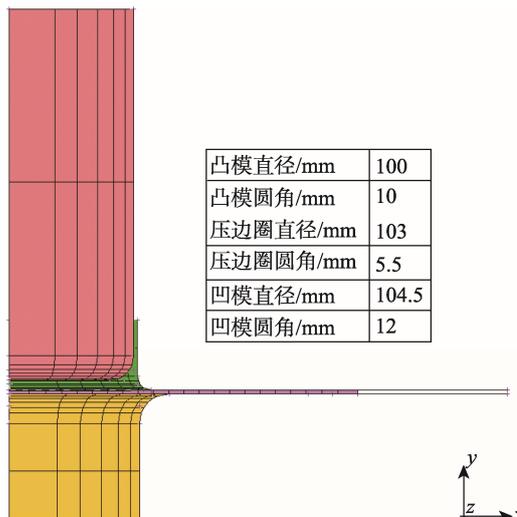


图 2 有限元模型
Fig.2 Finite element model

表 1 5A06 铝镁合金不同温度下的热导率
Tab.1 Thermal conductivity of 5A06 aluminum-magnesium alloy at different temperatures

| 温度/°C | 25 | 100 | 200 | 300 | 400 |
|-------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | 117 | 121 | 126 | 130 | 138 |

表 2 5A06 铝镁合金不同温度下的比热容
Tab.2 Specific heat capacity of 5A06 aluminum-magnesium alloy at different temperatures

| 温度/°C | 100 | 200 | 300 | 400 |
|---------------------------------------------|-----|------|------|------|
| 比热容/(J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹) | 921 | 1005 | 1047 | 1089 |

表 3 5A06 铝镁合金不同温度下热膨胀系数
Tab.3 Thermal expansion coefficient of 5A06 aluminum-magnesium alloy at different temperatures

| 温度/°C | 20 | 20~200 | 20~300 | 20~400 |
|----------------------------------------------|------|--------|--------|--------|
| 线膨胀系数 (× 10 ⁻⁶)/°C ⁻¹ | 22.8 | 24.7 | 25.5 | 26.5 |

表 4 5A06 铝镁合金不同温度下弹性模量
Tab.4 Elastic modulus of 5A06 aluminum-magnesium alloy at different temperatures

| 温度/°C | 20 | 100 | 200 | 250 | 300 |
|----------|----|-----|-----|-----|-----|
| 弹性模量/GPa | 71 | 65 | 57 | 55 | 43 |

2.2 加载条件研究

由之前的研究结果可知，5A06 铝镁合金温热介质充液成形的最佳温度场为：凹模与板料温度 250 °C、凸模温度 20 °C、压边圈温度 300 °C。在最佳温度场下，研究液室压力和拉深速度对成形性能的影响。

2.2.1 液室压力的影响

拉深深度随液室压力的变化曲线如图 3 所示。不加液室压力时的拉深深度为 55.3 mm，当液室压力为 5 MPa 时，拉深深度达到最大值 161.4 mm，提高了近

2倍。由图4和图5所示的不同液室压力下的厚度分布及应变分布可以看出,当液室压力为5 MPa时,筒壁的厚度分布及应变分布趋于均匀,过高或者过低的液室压力都会引起筒壁厚度急剧减薄,应变迅速增大,影响成形性能。这是因为温热介质充液成形时,坯料在液室压力的作用下紧紧贴向凸模,并在坯料与凸模之间产生了很大的摩擦力,缓和了板料在凸模圆角附近的径向拉应力,提高了传力区的承载能力;同时,流体在坯料与凹模圆角处产生一种流体润滑状态,减少了凸缘及凹模口附近的摩擦,使凸缘部分的径向拉应力减小,有利于提高成形极限。但是当液室压力超过一定极限时,造成板料成形过程中的胀形、弯曲及反弯曲变形强烈,超过了其极限值而发生破裂,进而限制了其拉深深度。

2.2.2 拉深速度的影响

选取拉深速度为0.1, 1, 5 mm/s, 在液室压力为5 MPa的情况下研究拉深速度对成形性能的影响。各拉深速度下的成形深度曲线如图6所示,当拉深速度由5 mm/s降至0.1 mm/s时,拉深深度由161.4 mm降低至105.7 mm。由图7所示厚度分布与图8所示应变

分布可知,当拉深速度为0.1 mm/s时,筒壁的壁厚迅速减薄、应变急剧增大,导致破裂发生。这是因为当拉深速度过低时,由于成形过程持续较长,随着凸模的下行,因热传导的作用,板料温度最终趋近于凸模温度,使得整个成形过程类似于室温下的充液成形。而当拉深速度较大时,如在本试验机允许的最大拉深

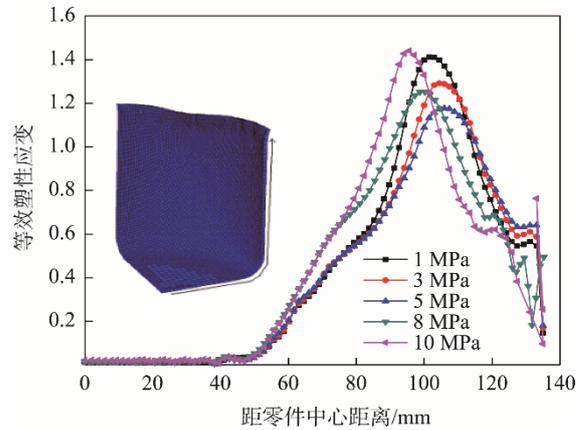


图5 不同液室压力下的应变分布
Fig.5 Strain distribution diagram under different liquid pressures

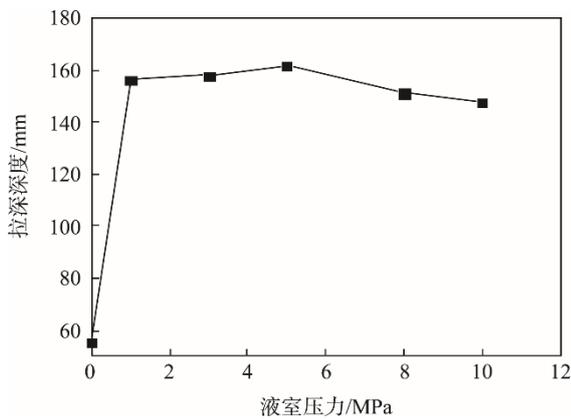


图3 不同液室压力下的拉深深度
Fig.3 Drawing depth under different liquid pressures

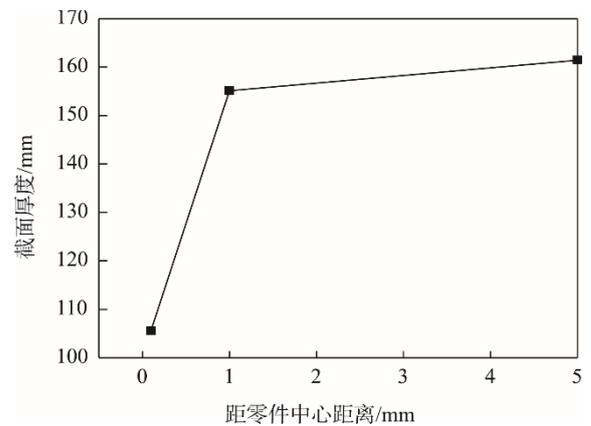


图6 不同拉深速度下的拉深深度
Fig.6 Drawing depth at different forming speeds

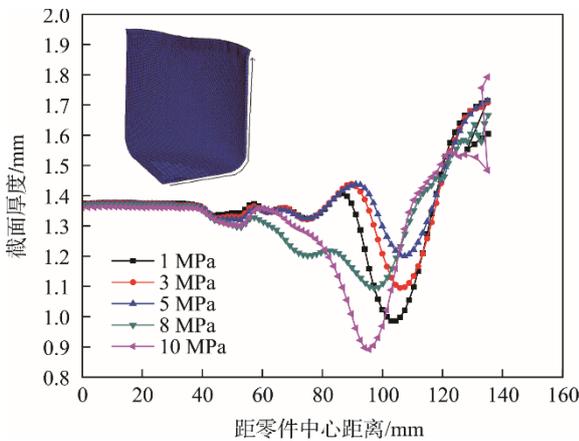


图4 不同液室压力下的厚度分布
Fig.4 Thickness distribution diagram under different liquid pressures

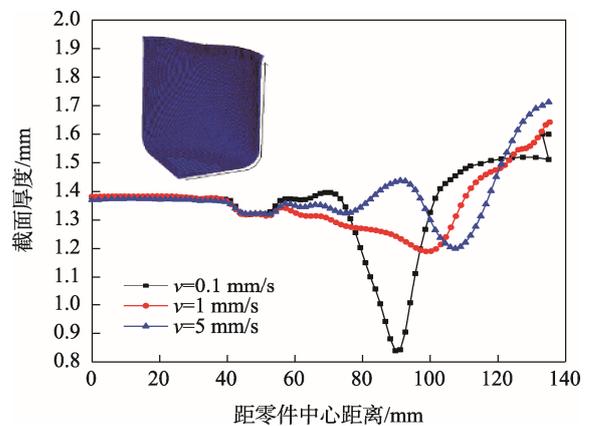


图7 不同拉深速度下的厚度分布
Fig.7 Thickness distribution diagram at different forming speeds

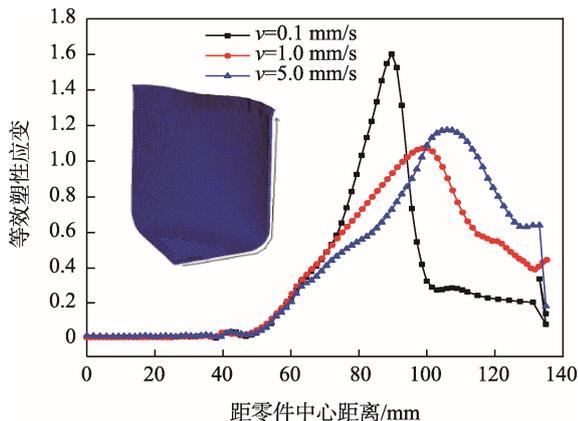


图 8 不同拉深速度下的应变分布

Fig.8 Strain distribution diagram at different forming speeds

速度 5 mm/s 的情况下，由于整个成形过程持续时间相对较短，热传导还未充分发生，可以保证必要的温度场分布，使得成形过程充分进行。就本模拟结果来看，拉深速度为 5 mm/s 时，成形效果最佳。

2.3 温度场控制研究

2.3.1 等温温度场对成形过程的影响

从图 9 可以看出，在其他工艺参数相同的条件下（拉深速度 5 mm/s，液室压力 5 MPa），当成形温度升至 250 °C 时，极限拉深深度达到最大，从常温下的 87.2 mm 增至 129.1 mm，但是当成形温度继续升高至 300 °C 时，极限拉深深度反而下降。这是因为随着温度的升高，材料的变形抗力降低，利于材料的流动，但是当温度高于 250 °C 时，由于铝镁合金板材组织结构的变化引发了材料冶金学的一些问题，反而不利于成形。由图 10 所示厚度场与图 11 所示应变场可以看出，当温度低于 150 °C 时，厚度场与应变场变化比较均匀，但当温度高于 200 °C 时，截面厚度曲线在凸模圆角附近与凹模圆角附近出现很明显的低谷，即成形过程中可能的危险区域，应变场也在凹模圆角附近达到了峰值。

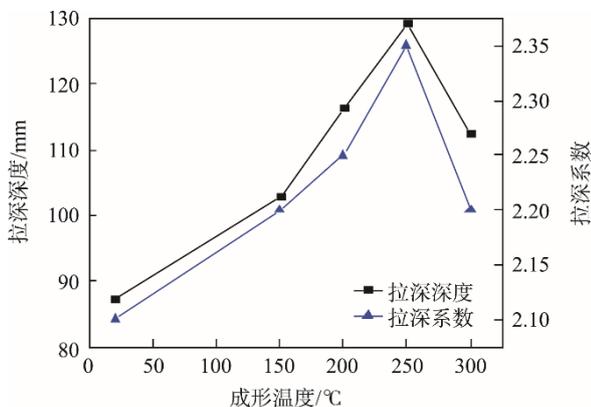


图 9 不同温度下的极限拉深深度与极限拉深系数

Fig.9 Ultimate drawing depth and ultimate drawing coefficient at different temperatures

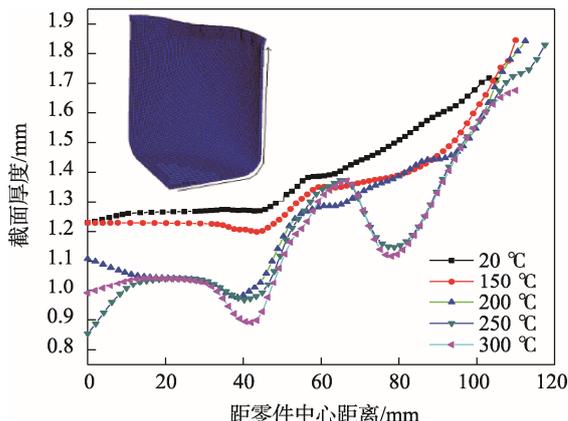


图 10 不同温度下截面厚度分布

Fig.10 Section thickness distribution diagram at different temperatures

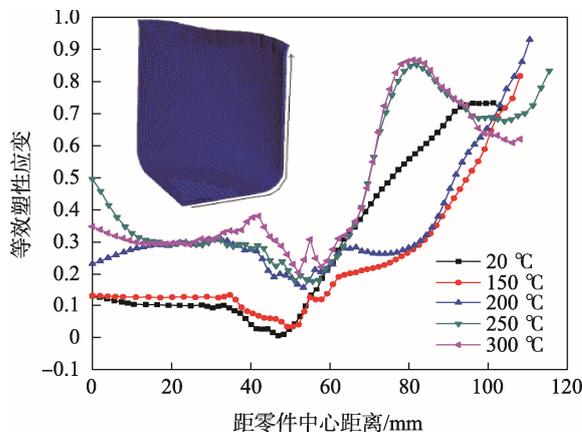


图 11 不同温度下应变场分布

Fig.11 Strain distribution diagram at different temperatures

2.3.2 凸模温度场控制及其对成形过程的影响

以板料温度为 250 °C 为例，在其他工艺参数相同的条件下（拉深速度 5 mm/s，液室压力 5 MPa，坯料直径 250 mm），改变凸模温度，做出其对拉深深度的影响曲线如图 12 所示。由图 12 可以看出，随着凸模温度的升高，拉深深度反而下降，当凸模温度由 20 °C 升至 300 °C 时，拉深深度由 140 mm 降至 25.3 mm。

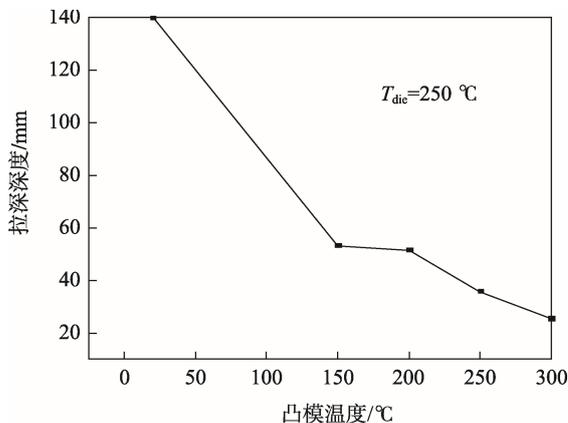


图 12 不同凸模温度下的拉深深度

Fig.12 Drawing depth at different punch temperatures

由图 13 所示厚度场与图 14 所示应变场可以看出,当凸模温度高于板料温度时,厚度场在凸模圆角附近急剧下降,应变场在凸模圆角附近急剧上升,即零件在这一区域很快被拉破。当凸模温度低于板料温度时,危险区域转移至凹模圆角附近,且厚度场分布与应变场分布均相对平缓。这是因为当凸模温度低于板料温度时,该处材料被凸模冷却,温度降低,使得该处材料的变形抗力提高,有效抑制了破裂的发生,并进一步提升了极限拉深深度,因此,在差温成形时,为达到最佳成形效果,应使凸模温度保持为室温。

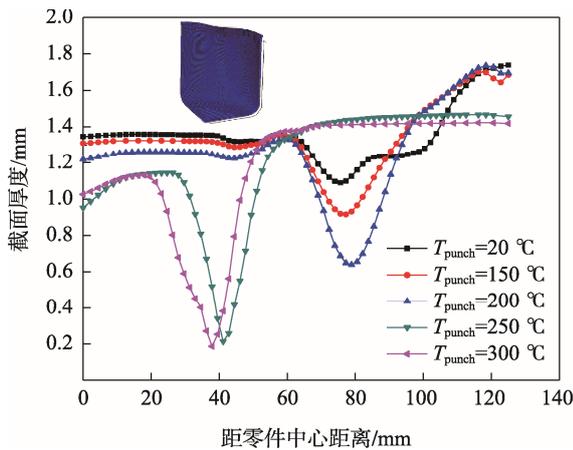


图 13 不同凸模温度下的截面厚度分布
Fig.13 Section thickness distribution diagram at different punch temperatures

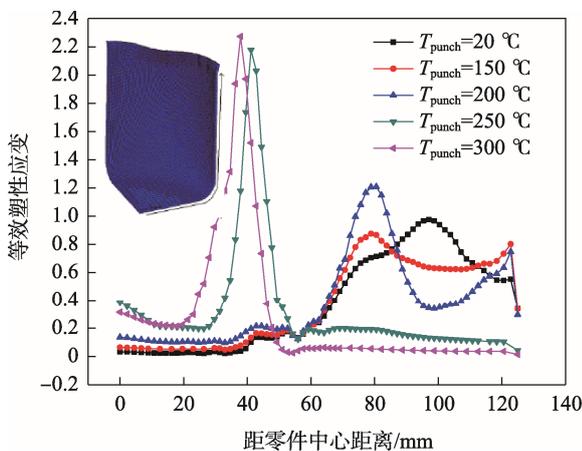


图 14 不同凸模温度下的应变分布
Fig.14 Strain distribution diagram at different punch temperatures

2.3.3 压边圈温度场控制及其对成形过程的影响

以板料温度为 250 °C 为例,在其他工艺参数相同的条件下(拉深速度 5 mm/s,液室压力 5 MPa,坯料直径 250 mm),改变压边圈温度,做出其对拉深深度的影响曲线如图 15 所示,由图 15 可以看出,当压边圈温度低于板料温度时,板料的成形性能急剧下降,当压边圈温度由 300 °C 降至 20 °C 时,拉深深度由 148.2 mm 降至 32.3 mm。

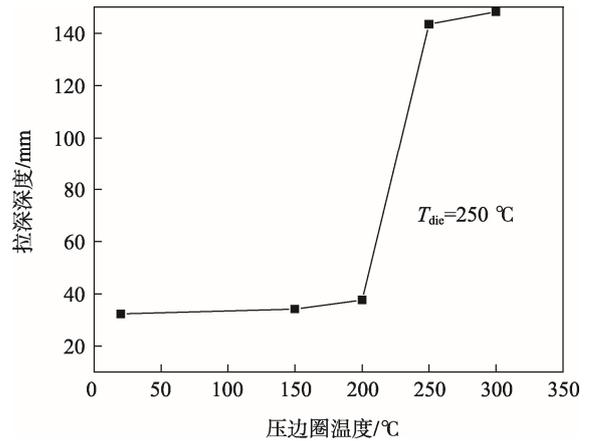


图 15 不同压边圈温度下的拉深深度
Fig.15 Drawing depth at different binder temperatures

由图 16 所示厚度场与图 17 所示应变场可以看出,当压边圈温度低于板料温度时,厚度场在凸模圆角附近急剧下降,应变场在凸模圆角附近急剧上升,即零件在这一区域很快被拉破。当压边圈温度高于板料温度时,可能的危险区域已转移至凹模圆角附近,且厚度场分布与应变场分布均相对平缓。这是因为,在筒形件拉深过程中,压边圈附近的材料应具有良好的流动性,随着温度升高,材料的变形阻力降低,利于材料流动,因此,在差温成形时,为达到最佳成形效果,应使压边圈温度高于板料温度。

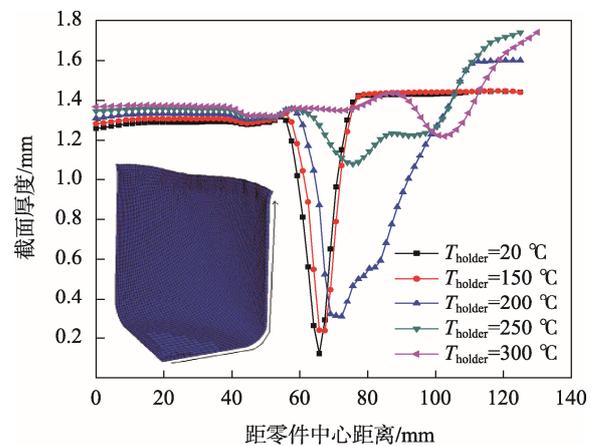


图 16 不同压边圈温度下的截面厚度分布
Fig.16 Section thickness distribution diagram at different binder temperatures

2.3.4 温度场分布总体分析及优化

由以上 3 步推知差温拉深的最佳温度场为板料与凹模温度 250 °C、凸模温度 20 °C、压边圈温度 300 °C,保持其他工艺参数不变(拉深速度 5 mm/s,液室压力 5 MPa),在凸模直径为 100 mm 的情况下极限拉深深度达到了 161.4 mm。该温度场下的截面厚度分布、等效应变分布和截面温度分布如图 18 和图 19 所示。

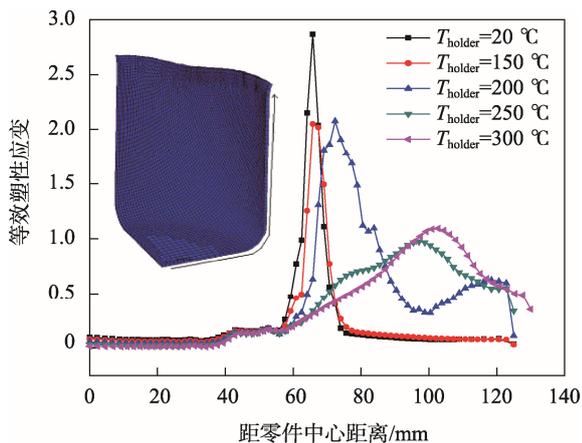


图 17 不同压边圈温度下的应变分布
Fig.17 Strain distribution diagram at different binder temperatures

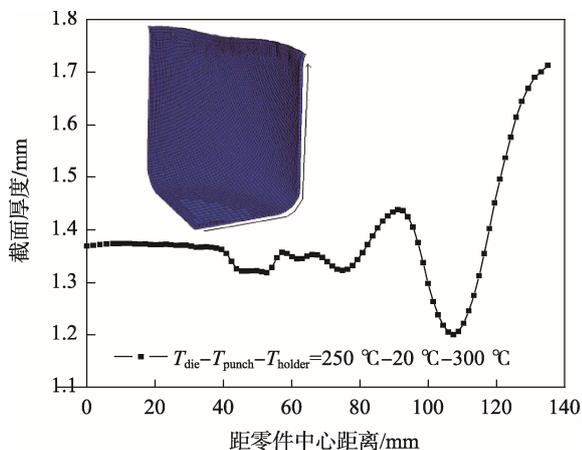


图 18 最佳温度场下的截面厚度分布
Fig.18 Section thickness distribution diagram under optimum temperature field

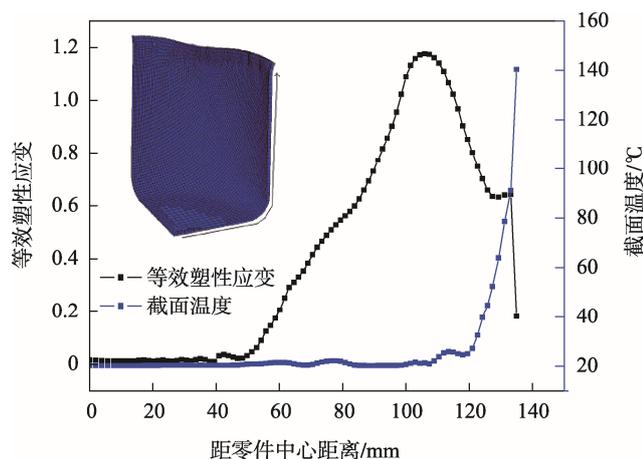


图 19 最佳温度场下的等效应变与温度分布
Fig.19 Equivalent strain and temperature distribution diagram under optimum temperature field

3 结论

1) 液室压力对成形性能有着显著影响, 因其特

有的摩擦保持效果及流体润滑作用, 可提高板料的成形性能, 但其存在一临界压力值, 当液室压力高于这一值时, 反而不利于成形。在最佳温度场下, 液室压力为 5 MPa 时成形效果最佳。

2) 拉深速度对成形性能也有着重要影响。在最佳温度场下, 当拉深速度过小时, 间接使得温热介质充液成形工艺退化为室温下充液成形, 降低了成形性能。在本试验允许的速度范围内, 拉深速度为 5 mm/s 时成形效果最佳。

3) 通过对温度场分布规律的研究发现, 5A06 铝镁合金温热介质充液成形, 在等温拉深情况下温度为 250 °C 时成形效果最好, 凸模直径为 100 mm 时的极限拉深深度为 129.1 mm; 在差温拉深情况下, 随着凸模温度的升高, 成形性能显著下降, 且当压边圈温度低于板料温度时, 也会使成形性能迅速下降, 最佳温度场分布为凹模与板料温度 250 °C、凸模温度 20 °C、压边圈温度 300 °C, 此时凸模直径为 100 mm 时的极限拉深深度达到了 161.4 mm。

参考文献:

[1] 胡晓. 5A06 铝合金框形件拉深成形过程研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
HU Xiao. Study on Deep Drawing Process of 5A06 Aluminum Alloy Frame Parts[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[2] 靳鹏飞. 深冷处理的 5A06 铝合金 TIG 焊接接头组织与性能的研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2011.
JIN Peng-fei. Study on Microstructure and Properties of CMA Welded Joint of 5A06 Aluminum Alloy[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2011.

[3] 李落星, 周佳, 张辉. 车身用铝、镁合金先进挤压成形技术及应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 35—43.
LI Luo-xing, ZHOU Jia, ZHANG Hui. Advanced Extrusion Forming Technology and Application of Aluminum and Magnesium Alloy for Body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 35—43.

[4] 刘晓晶, 闫巍, 郭立伟. 铝镁合金双路径加载充液拉深成形的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(4): 698—702.
LIU Xiao-jing, YAN Wei, GUO Li-wei. Numerical Simulation of Liquid-filled Deep Drawing of Aluminum-magnesium Alloy by Double Path Loading[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(4) : 698—702.

[5] LEE Mun-yong, SOHN Sung-man, KANG Chang-yong, et al. Effects of Pre-treatment Conditions on Warm Hydroforming of 7075 Aluminum Tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004(155/156): 1337—1343.

[6] KEIGLER Mixhael, HERBERT Bauer, HARRISON

- David, et al. Enhancing the Formability of Aluminum Components via Temperature Controlled Hydroforming[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 167: 363—370.
- [7] ZHANG S H, REN L M, ZHOU L X, et al. Warm Hydroforming of Magnesium Alloy AZ31 Sheets[J]. *Materials Science Forum*, 2007, 546/547/548/549: 333—336.
- [8] 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. Study on Hydroforming of Warm Media of High Strength Aluminum Alloy Sheets[J]. *Journal of Plastic Engineering*, 2009, 16(1): 31—36.
- [9] STEFFEN Novotny, MARGARETHE Geiger. Process Design for Hydroforming of Lightweight Metal Sheets at Elevated Temperatures[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 138: 594—599.
- [10] SHAH M, BILLUR E, SARTKULVANICH P, et al. Cold and Warm Hydroforming of AA754-O Sheet: FE Simulation and Experiments[C]// *International Conference & Workshop on Numerical Simulation of 3d Sheet Metal Forming Processes*, 2011.
- [11] HO Choi, MUAMMER Ko, JUN Ni. A Study on the Analytical Modeling for Warm Hydro-mechanical Deep Drawing of Lightweight Materials[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, 47: 1752—1766.
- [12] HO Choi, MAUMMER Koc, JUN Ni. Determination of Optimal Loading Profiles in Warm Hydroforming of Lightweight Materials[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 190: 230—242.
- [13] KIM B J, VANTYNE C J, LEE Mun-yong. Finite Element Analysis and Experimental Confirmation of Warm Hydroforming Process for Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 187/188: 296—299.
- [14] FRANK Vollertsen. Hydroforming of Aluminum Alloys Using Heated Oil[C]// *Proceedings of the Ninth International Conference on Sheet Metal*, Leuven, 2001.
- [15] 邵天巍, 郎利辉, 赵香妮, 等. 5A06 铝镁合金温热环境变形机理的研究[J]. *精密成形工程*, 2019, 11(3): 104—110.
- SHAO Tian-wei, LANG Li-hui, ZHAO Xiang-ni, et al. Deformation Mechanism of 5A06 Aluminum-magnesium Alloy Sheet in Warm Environment[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2019, 11(3): 104—110.