

基于有限元的模具结构对 AZ91 镁合金管转角分流挤压 焊合压力的影响

党利¹, 李云帆², 王蕊³, 单晨晨¹, 马遥力¹, 马胜龙²

(1. 郑州航空工业管理学院 航空发动机学院, 河南 郑州 450046; 2. 河南职业技术学院 现代信息技术学院, 河南 郑州 450046;
3. 河南职业技术学院 电子与物联网学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 将转角挤压剪切变形原理和镁合金管材分流挤压相结合, 设计了镁合金管转角焊合室分流挤压模具。新模具在保证挤压舌针刚度的前提下增加了焊合室的有效高度和焊合时间, 从而有利于提高焊缝的焊合性能。基于 DEFORM 有限元平台建立了 AZ91 镁合金管转角焊合室分流挤压有限元模型, 并进行了可靠性验证。然后, 基于该有限元模型研究了转角角度、分流桥结构和凹模结构尺寸对焊合室内平均压应力的影响规律。结果表明: 随着分流模转角 β 和凹模结构尺寸 a 的增大, 焊合室内的平均压应力逐渐增加; 对于雨滴形分流桥结构, 随着分流桥锥度 γ 的增大, 焊合室内的平均压应力有所增大, 但是增幅不明显。

关键词: 镁合金管; 分流挤压; 转角焊合室; 模具结构; 焊合压应力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.03.014

中图分类号: TG319 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2022) 03-0089-08

Influence of mold structure on welding pressure in angular porthole extrusion for AZ91 magnesium alloy pipe based on FEM

Dang Li¹, Li Yunfan², Wang Rui³, Shan Chenchen¹, Ma Yaoli¹, Ma Shenglong²

(1. School of Aeronautics Engine, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China; 2. School of Modern Information Technology, Henan Vocational Technology College, Zhengzhou 450046, China; 3. School of Electronics and Internet, Henan Vocational Technology College, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: The porthole extrusion mold for angular welding chamber of magnesium alloy pipe was designed by combining the shear deformation principle of angular extrusion with porthole extrusion of magnesium alloy pipe, and the new mold increased the effective height of the welding chamber and the welding time under the premise of ensuring the rigidity of extrusion needle, which was beneficial to improve the welding performance of welding seam. Then, the finite element model of porthole extrusion for the angular welding chamber of AZ91 magnesium alloy pipe was developed based on DEFORM finite element platform, and its reliability was verified. Furthermore, the influence laws of rotation angle, porthole bridge structure and die structure size on the average compressive stress in the welding chamber were revealed based the finite element model. The results show that the average compressive stress in the welding chamber increases gradually with the increasing of rotation angle β of porthole mold and die structure size a . For the raindrop-shaped porthole bridge structure, with the increasing of porthole bridge taper γ , the average compressive stress in the welding chamber increases, but the increase is not obvious.

Key words: magnesium alloy pipe; porthole extrusion; angular welding chamber; die structure; welding compressive stress

镁合金管由于具有轻质、优异的抗振性和电磁屏蔽性等特点, 在汽车、高铁等重要工业领域得到广泛的应用。分流挤压成形由于具有生产效率高、尺寸精度高、管材截面形状丰富等优点, 成为实现高精度镁合金管材短流程制造的高效手段^[1-2]。

但是, 在分流挤压成形工艺中, 沿长度方向的分

流金属焊合焊缝是决定管材质量的关键因素。焊缝的焊合质量不仅严重影响内高压胀形等后续加工工艺, 还影响镁合金零部件的可靠性。图 1 为分流挤压管在内高压胀形和扩口工艺中沿焊缝开裂的情况。因此, 提高焊缝的焊合质量是分流挤压工艺中的要点。

在分流挤压成形过程中, 焊合室的高度是影响焊合性能极为重要的参数之一。有学者研究表明, 增加焊合室高度可增加焊合时间, 并非非常有助于提高焊缝的焊合性能^[3]。但是, 也存在致使舌针刚度降低的问题, 从而降低管材壁厚的尺寸精度^[4]。据此设计一种转角焊合室分流挤压模具, 在保证型芯

收稿日期: 2021-02-02; 修订日期: 2021-05-06

基金项目: 河南省科技攻关项目 (212102210450); 郑州航空
校级教改项目 (zhjy21-(01-100))

作者简介: 党利 (1982-), 男, 博士, 讲师

E-mail: dangli8868@163.com

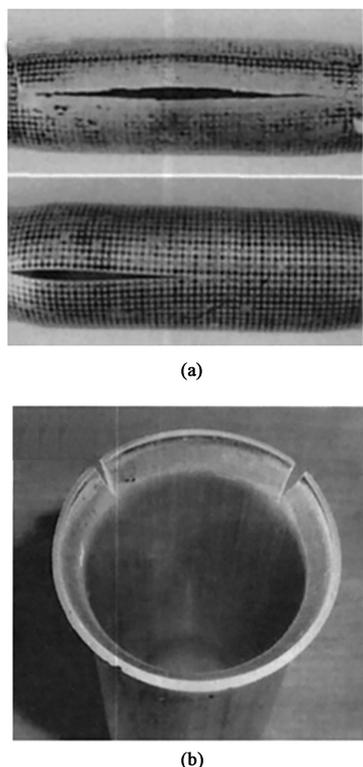


图 1 镁合金管胀形开裂 (a) 和扩口开裂 (b) 缺陷
Fig. 1 Defects of bulging cracking (a) and flaring cracking (b) for magnesium alloy pipe

刚度的前提下, 增加焊接室的有效焊接高度, 并且还可利用转角剪切变形原理增加预焊金属的变形量, 提高镁合金管的动态再结晶程度, 进而提高管材性能和焊缝焊接性能。

增加焊接室高度可提高焊接时间和焊接性能。但是, 模具结构也直接影响金属的流动特征, 从而影响焊接室内的静水压应力分布状态。许光城等^[5]研究了导料室模具结构对中空铝挤压型材分流挤压焊接压应力的影响, 结果表明, 通过更改导料室角度可有效提高焊接室压应力。倪正顺等^[6]研究了多孔模焊接室结构对型材挤压成形过程的影响, 结果表明, 增加焊接室级数可以有效地改善金属流动均匀性、提高型材的焊缝质量; 喻俊荃^[7]研究了铝合金分流挤压焊接行为, 结果表明, 合理的焊接室结构可积极地促进分流挤压焊缝的焊接; 孙世仁等^[8]研究了复杂截面空心铝型材挤压焊接室的结构尺寸对焊接质量的影响, 结果表明, 合理的焊接室结构可提高焊缝的焊接性能。刘健等^[9]研究了分流桥结构对铝型材分流挤压纵向焊缝焊接性能的影响, 结果表明, 随着分流桥下方尺寸变窄, 焊接性能有所提高。朱俊瑞等^[10]和张允继^[11]分别研究了不同型材

的分流桥宽度对焊接压应力的影响, 结果表明, 随着分流桥宽度的减小, 焊接面的焊接压应力增大。

由上述研究结果可知, 在型材挤压成形过程中, 模具结构对焊接性能有重要的影响, 而焊接压应力是决定焊接性能的一个重要指标。据此, 本文采用有限元法揭示焊接室的转角角度、分流桥结构和凹模结构尺寸对镁合金管材转角焊接室在分流挤压成形过程中焊接压应力的影响规律, 从而为实际生产提供合理的参考依据。

1 模具设计

1.1 转角分流模具总装图

本文所设计的模具总装图如图 2 所示, 其中, β 为分流模转角, 此转角焊接室分流挤压模具包括挤压杆、挤压筒、舌针、分流模和凹模, 其中分流模与凹模之间配合形成有焊接室。分流模包括芯部和模体, 以及用于连接芯部和模体而沿圆周向设置的多个分流桥, 相邻的分流桥之间形成分流孔。芯部外壁自上而下由上锥形面、下锥形面和下内凹面顺次连接构成, 其中下锥形面为倒锥形面, 上锥形面和下锥形面的连接处形成转角; 模体内壁为与芯部上锥形面相对的锥形面, 凹模内壁上部为与芯部下锥形面相对的倒锥形面, 凹模内壁下部为与芯部下内凹面相对的内凹面; 模体与凹模的连接处形成转角结构; 舌针沿轴线连接于芯部上。

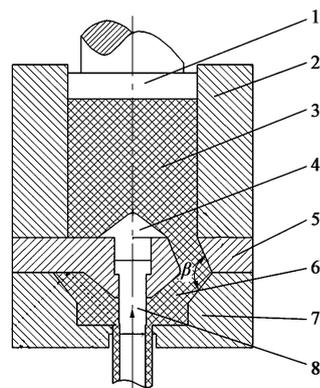


图 2 模具总装图

1. 挤压垫 2. 挤压筒 3. 坯料 4. 导流模
5. 分流模 6. 焊合金属 7. 凹模 8. 舌针

Fig. 2 Diagram of die assembly

分流模下方带有锥度, 并且凹模和分流模相结合而形成转角, 在转角剪切变形机制下提高分流金属的变形量, 激发镁合金发生动态再结晶, 从而提高管材的焊接质量。为了研究转角对分流挤压焊接室压应力的影响规律, 采用参数 $\beta = \{105, 110, 115, 120\}^\circ$ 。

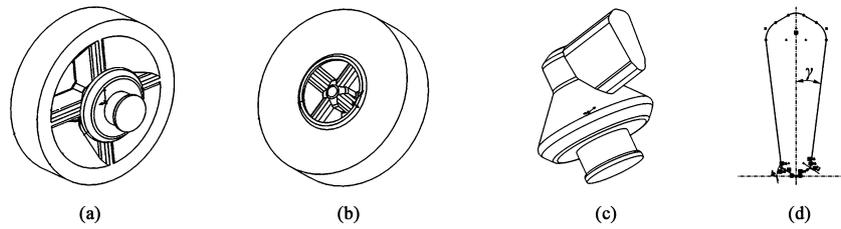


图3 分流模结构图

(a) 凹模仰视结构 (b) 凹模俯视结构 (c) 凹模分流桥结果 (d) 分流桥平面参数

Fig. 3 Structure diagrams of porthole die

(a) Bottom view structure of die (b) Top view structure of die (c) Result of die porthole bridge (d) Plane parameters of porthole bridge

1.2 分流模和分流桥

分流模的上方接挤压筒，下方接凹模，本文所述的分流模结构如图3所示，其中， γ 为分流桥锥角，沿挤压方向呈喇叭口形状。根据文献[11]的研究结果可知，分流桥底部的倒锥形结构有利于提高焊合室内的焊合压应力。基于此，本文将底部锥形结构延伸为倒雨滴形，并研究倒雨滴形状分流桥对转角分流挤压焊合室压应力的影响规律，采用如图3d所示结构，调整参数 γ 可得到不同形状的分流桥，本文选择 $\gamma = \{3, 5, 7, 9\}^\circ$ 。

1.3 凹模结构

凹模在分流模下方，为一回转体形状，具体结构如图4所示，在凹模上部有一锥面，和分流模相配合，共同组成转角焊合室。为了研究凹模结构尺寸对转角分流挤压焊合室压应力的影响规律，采用如图4b所示结构，通过调整凹模结构尺寸 a 可得到不同焊合室的型腔体积，本文选择 $a = \{55, 60, 65, 70\}$ mm。

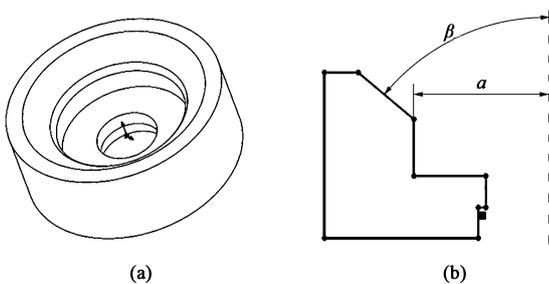


图4 凹模结构

(a) 三维图 (b) 平面参数图

Fig. 4 Structure of die

(a) 3D diagram (b) Diagram of plane parameters

2 有限元模型

有限元模型包括几何结构模型、材料模型和边界条件。材料模型包括材料的本构方程和镁合金材料物理特性参数。由文献[12]可得AZ91镁合金

的本构模型如式(1)所示，其中参数取值见表1。除了本构模型外，在有限元模型中所需的物理特性参数有：泊松比为0.35，弹性模量为45 GPa。

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha \bar{\sigma})]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中： $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率； $\bar{\sigma}$ 为等效应力； R 为气体常数，取 $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ； T 为绝对温度； A 、 α 、 n 为材料常数； Q 为变形激活能。

表1 本构方程参数值

Table 1 Parameter values of constitutive equation

| 参数 | 数值 |
|--------------------------------------|-------------------------|
| A | 2.8405×10^{12} |
| α | 0.021 |
| n | 5.578 |
| $Q/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$ | 1.77×10^5 |

边界条件也是金属挤压有限元模型中必不可少的，边界条件包括：坯料和模具之间的摩擦因数为1，坯料和模具之间的热交换系数为 $11 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot \text{C}^\circ)^{-1}$ [12]，坯料和环境之间的热交换系数为 $0.12 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot \text{C}^\circ)^{-1}$ ，模具和环境之间的热交换系数为 $0.70 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot \text{C}^\circ)^{-1}$ ，坯料和环境之间的热交换系数为 $0.02 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{mm} \cdot \text{C}^\circ)^{-1}$ 。

文献[12]对AZ91镁合金板材进行了实际挤压实验，并测量记录了挤压过程中的挤压力，实验中采用平面挤压模具，其坯料和板材尺寸以及挤压参数如表2所示。板材挤压的几何模型如图5所示。挤压力是材料挤压过程中热力耦合效应的综合外在表现，常被用来检测有限元模型的可靠性[13-14]。文献[12]通过实际挤压实验测得了表2条件下的镁合金板材在挤压成形过程中的实际挤压力，因此，本文采用AZ91镁合金板材挤压来验证模型的可靠性。图6为模拟挤压力和实测实验挤压力的对比，可以看出两者的变化趋势相同，二者的最大相对误差为5.6%，所以，本文建立的有限元模型具有很

表 2 AZ91 镁合金板材实际挤压实验的几何模型信息和挤压条件

Table 2 Geometric model information and extrusion conditions of AZ91 magnesium alloy sheet in practical extrusion experiment

| 参数 | 数值 |
|--|---------|
| 坯料外径×坯料长度/(mm×mm) | Φ47×200 |
| 挤压筒直径/mm | Φ50 |
| 板材宽度×板材厚度 (mm×mm) | 30×3 |
| 坯料初始温度 $T_0/^\circ\text{C}$ | 400 |
| 模具预热温度 $T_m/^\circ\text{C}$ | 350 |
| 挤压速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$ | 1 |

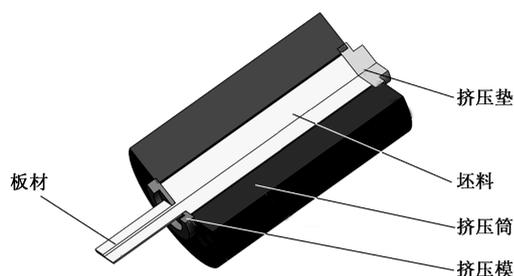


图 5 AZ91 镁合金板材挤压几何模型

Fig. 5 Geometric model of extrusion for AZ91 magnesium alloy sheet

好的可靠性,材料模型、边界条件和网格划分方式能够准确地描述在 AZ91 镁合金板材在挤压成形过

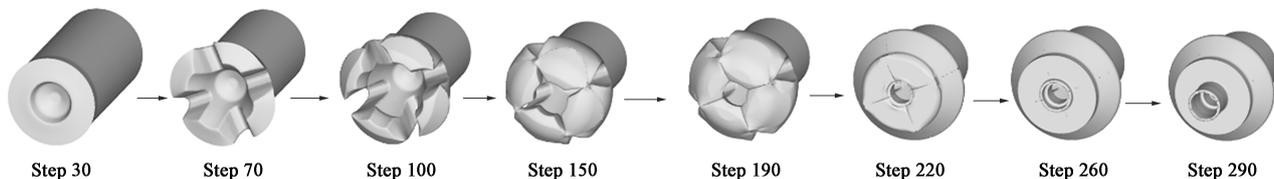


图 7 转角分流挤压金属流动过程

Fig. 7 Metal flow process of angular porthole extrusion

3.2 应变场

图 8a 为分流金属转角前和转角后的等效应变情况,可以看出,分流金属经过转角后由于剪切变形的作用,变形量明显增加。图 8b 为所取样本点 $P1 \sim P6$ 的等效应变值,可以看出,坯料被分流挤压后等效应变为 0.7 左右,流经转角剪切变形后,等效应变增大至 1.4 左右,可达到完全再结晶变形的程度。由此可以看出,转角变形的设计可以有效增大预焊合金金属的变形量,从而有利于提高管材质量,晶粒的细化也有利于促进焊缝的焊合。

3.3 焊合室内压应力分析

图 9 为转角焊合室内焊合压应力分布云图(图

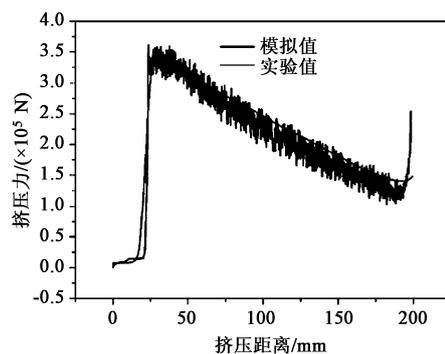


图 6 挤压力模拟值和实验值对比

Fig. 6 Comparison between simulation and experimental values of extrusion forces

程中挤压力和场量的变化情况。

3 模拟结果分析

3.1 成形过程

转角焊合室分流挤压成形过程如图 7 所示,可以看出:在初始的分流阶段,金属流经第 1 个转角,由于转角的作用,4 股金属向外扩张;在流经第 2 个转角时,分流金属会发生剪切变形,然后重新汇合,并在焊合室的约束下,金属合流在一起,并充满型腔;然后,继续在压力作用下形成管材。可以看出,在整个成形过程中无折叠缺陷,可成形表面质量良好的管材。

9a) 和径向平均压应力分布曲线(图 9b)。可以看出,焊合室内压应力分布均匀,静水压应力分布在 260 MPa 左右,远大于此变形条件下的屈服应力(40 MPa),满足焊合条件。并且,沿径向由内向外压应力逐渐增加,由此表明转角对焊合室内的静水压应力无副作用。

3.4 模拟条件及衡量指标

为了揭示模具结构的几何参数对转角焊合室内压应力的影响规律,采用如下的模拟条件:模具预热温度 $T_d = 400^\circ\text{C}$,坯料预热温度 $T_0 = 410^\circ\text{C}$,挤压速度 $v = 5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,分流模转角 $\beta = \{105, 110, 115, 120\}^\circ$,分流桥锥角 $\gamma = \{3, 5, 7, 9\}^\circ$,凹模结构尺寸 $a = \{55, 60, 65, 70\} \text{ mm}$ 。

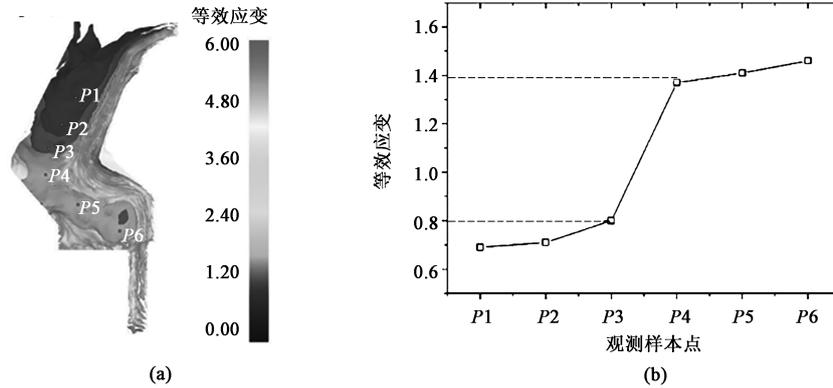


图 8 分流金属转角后等效应变变化情况

(a) 样本点选取 (b) 样本点等效应变分布

Fig. 8 Variation of equivalent strain after porthole metal turning

(a) Selection of sample points (b) Equivalent strain distribution of sample points

为了揭示挤压参数对转角焊合室内平均压应力的影响规律，将图 9 中的 60 个点的平均值作为衡量指标。

3.5 模具结构对焊合压应力的影响

3.5.1 凹模转角

图 10 为不同转角下的焊合室内平均压应力分布云

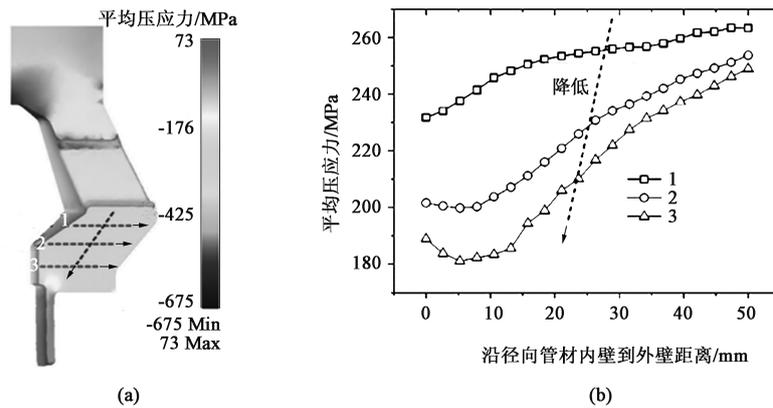


图 9 转角焊合室内平均压应力分布特征

(a) 平均压应力分布云图 (b) 径向平均压应力分布曲线

Fig. 9 Distribution features of average compressive stresses in angular welding chamber

(a) Distribution cloud diagram of average compressive stresses (b) Distribution curves of radial average compressive stresses

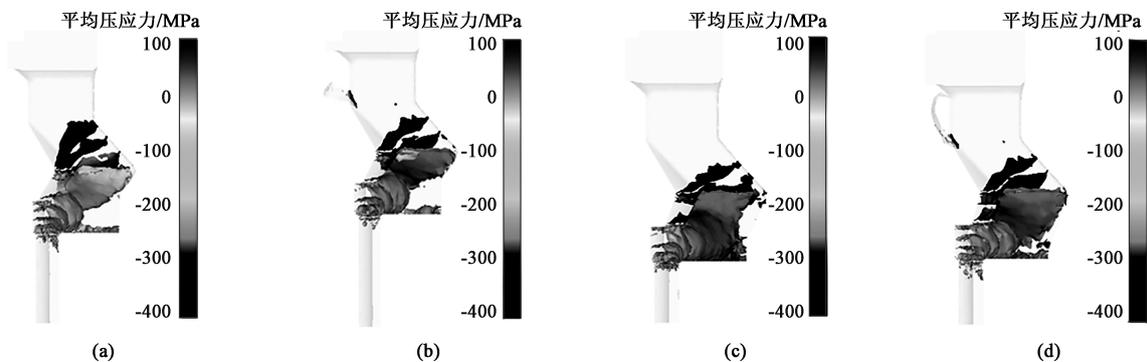


图 10 不同转角下焊合室内平均压应力分布云图

(a) $\beta = 105^\circ$ (b) $\beta = 110^\circ$ (c) $\beta = 115^\circ$ (d) $\beta = 120^\circ$

Fig. 10 Distribution cloud diagrams of average compressive stresses in welding chamber under different angles

图,可以看出,随着转角的逐渐增加,云图的颜色逐渐变深,说明平均压应力逐渐增加,并且焊合室内大数值的平均压应力区域也逐渐增加。

图 11 为转角对焊合室内平均压应力的影响规律,可以直观地看出,随着转角的增大,焊合室内的平均压应力增加。所以,转角增大有利于提高转

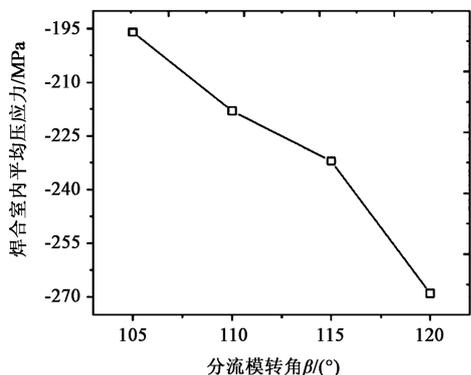


图 11 转角对焊合室内平均压应力的影响曲线

Fig. 11 Effect curve of angle on average compressive stress in welding chamber

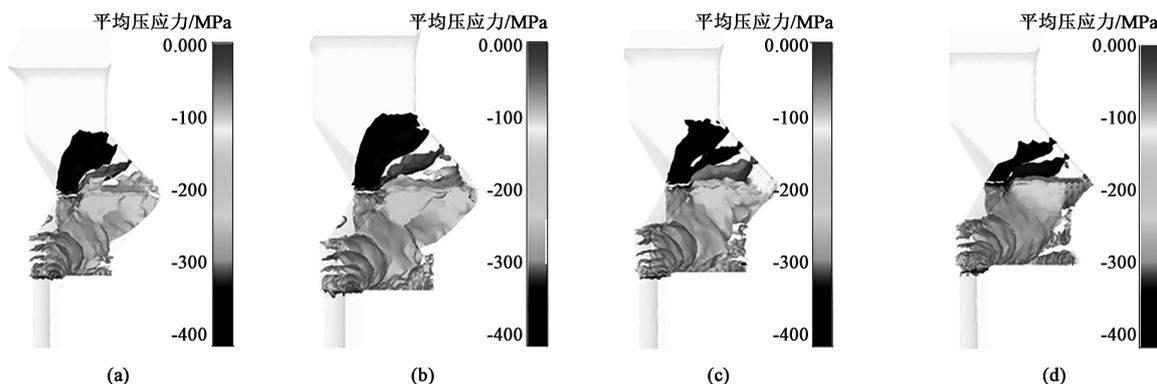


图 12 不同凹模结构尺寸下焊合室内平均压应力分布云图

(a) $a=55$ mm (b) $a=60$ mm (c) $a=65$ mm (d) $a=70$ mm

Fig. 12 Distribution cloud diagrams of average compressive stresses in welding chamber under different die structure sizes

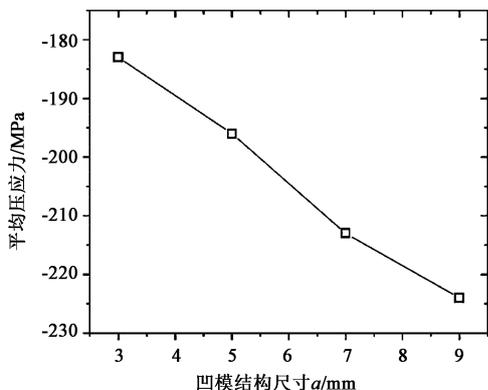


图 13 凹模结构尺寸 a 对焊合室内平均压应力的影响曲线

Fig. 13 Effect curve of die structure size a on average compressive stress in welding chamber

角焊合室内的焊合压应力,提高焊缝的焊合质量。

3.5.2 凹模型腔体积

图 12 为不同凹模结构尺寸下的平均压应力云图。可以看出,随着凹模结构尺寸的增加,应力面的颜色逐渐加深,说明焊合室内的平均压应力值逐渐增大,并且焊合压应力面积也不断增加。

图 13 为凹模结构尺寸 a 对焊合室内平均压应力的影响规律,可以看出,随着凹模结构尺寸增加,平均压应力增大。说明增加焊合室体积有利于提高焊合压应力,从而提高焊缝的焊合质量。另外,文献 [6] 研究结果表明,焊合室高度增大,焊合室内体积也增加,可提高焊合室的焊合压应力,和本文所得结果具有一致性。

3.5.3 分流桥结构

本文采用的分流桥结构如图 2 所示,不同锥度的分流桥结构的焊合室内的平均压应力云图如图 14 所示。可以看出,随着分流桥锥度的减小,焊合室内的平均压应力的云图颜色没有太大变化,但是高压应力区域的面积有所减小。

图 15 为不同分流桥锥角下的焊合室内的平均压应力分布曲线。可以看出,随着锥度增加,焊合室内的平均压应力略有增加,但是变化幅度很小。因此,在转角焊合室分流挤压过程中,分流桥锥角的增加对焊合室内压应力的影响不大。

4 结论

(1) 将等通道转角挤压和镁合金管分流挤压相结合,可显著提高预焊合金金属的变形量,有利于焊缝焊合;并且可在保证型芯刚度的情况下增加焊合室的有效高度,增加焊合时间,有助于提高焊合性能。

(2) 随着分流模转角 β 的增大,焊合室内的平

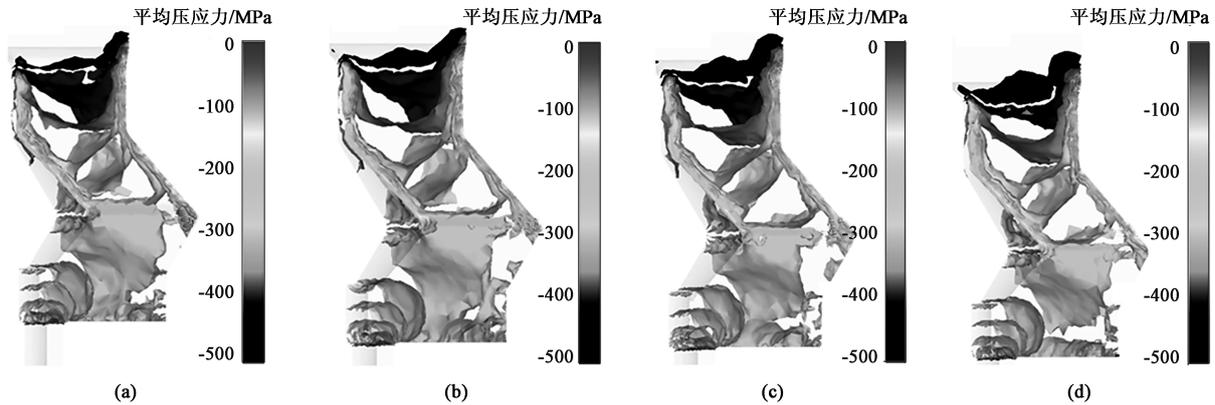


图 14 不同锥度的分流桥结构下焊合室内平均压应力分布云图

(a) $\gamma=3^\circ$ (b) $\gamma=5^\circ$ (c) $\gamma=7^\circ$ (d) $\gamma=9^\circ$

Fig. 14 Distribution cloud diagrams of average compressive stresses in welding chamber under porthole bridge structures with different tapers

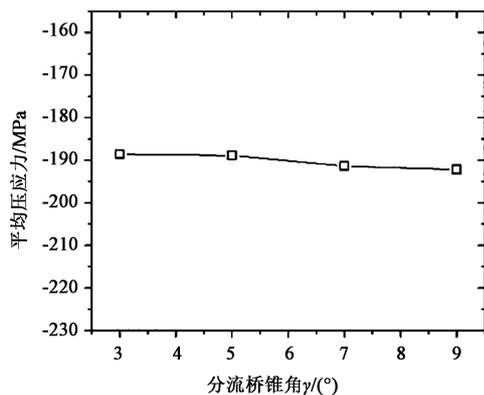


图 15 分流桥锥角对焊合室内平均压应力的影响曲线

Fig. 15 Effect curves of porthole bridge tapers on average compressive stress in welding chamber

均压应力增加, 从而有利于焊合压应力的增加, 提高焊缝的焊合性能。

(3) 随着凹模结构尺寸 a 的增大, 焊合室体积增大, 焊合室内的平均压应力和较大压应力区域的面积均增加, 从而有利于焊缝的焊合。

(4) 随着分流桥锥角 γ 的增大, 焊合室内的平均压应力数值和较大压应力区域的面积均有所增加, 但是增幅不大。

参考文献:

- [1] 何祝斌, 王小松, 苑世剑, 等. AZ31B 镁合金挤压管材内高压成形性能 [J]. 金属学报, 2007, 43 (5): 534-538.
He Z B, Wang X S, Yuan S J, et al. Formability of AZ31B magnesium alloy extruded tube under internal high pressure [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43 (5): 534-538.
- [2] 张金龙, 宋敏, 王栓强, 等. 焊合室高度对 AZ91 镁合金管材分流挤压的影响 [J]. 锻压装备与制造技术, 2016, 51 (6): 71-74.
Zhang J L, Song M, Wang S Q, et al. Influence of welding cham-

ber height to tube porthole extrusion of AZ91 magnesium alloy [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2016, 51 (6): 71-74.

- [3] He Y F, Xie S S, Cheng L. FEM simulation of welding quality in porthole die extrusion [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science, 2011, 26 (2): 292-296.
- [4] 黄东男, 张志豪, 李静媛, 等. 焊合室深度及焊合角对方形管分流模挤压成形质量的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 10 (5): 954-960.
Huang D N, Zhang Z H, Li J Y, et al. Influences of welding chamber depth and welding angle on forming quality of extrusion of square tube by porthole die [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 10 (5): 954-960.
- [5] 许光城, 许志鹏, 黄伯勤, 等. 导料室模具设计对中空铝挤型焊合压力影响之研究 [J]. 先进工程学报, 2011, 6 (3): 209-216.
Xu G C, Xu Z P, Huang B Q, et al. Study on the guiding chamber effect on welding pressure of in hollow extrusion die design [J]. Journal of Advanced Engineering, 2011, 6 (3): 209-216.
- [6] 倪正顺, 谢要花, 黄庄泉. 多孔模具结构对型材挤压成型过程的影响 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (1): 113-120.
Ni Z S, Xie Y H, Huang Z Q. Effect of welding chamber structure of multi-hole die on profile extrusion process [J]. Hot Working Technology, 2016, 45 (1): 113-120.
- [7] 喻俊荃. 铝合金型材分流挤压焊合行为与焊缝质量控制方法研究 [D]. 济南: 山东大学, 2018.
Yu J Q. Investigation on Extrusion Welding Behavior and Welding Quality Control Methods in the Porthole Die Extrusion Process of Aluminum Alloy Profiles [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [8] 孙世仁, 刘虹, 陈文琳. 复杂截面空心铝型材挤压过程数值模拟及模具结构改进 [J]. 模具工业, 2018, 44 (4): 19-23.
Sun S R, Liu H, Chen W L. Numerical simulation analysis of extrusion process for a complex cross-section hollow aluminum profile and the die improvement [J]. Die & Mould Industry, 2018, 44 (4): 19-23.

(下转第 115 页)