

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

黄东男^{1,2}, 张志豪¹, 李静媛¹, 谢建新¹

(1. 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083;

2. 内蒙古工业大学 材料科学与工程学院, 呼和浩特 010051)

摘要: 基于 Deform-3D 有限元分析平台, 采用所开发的焊合过程网格重构技术, 分析方形管分流模双孔挤压时焊合室深度及焊合角对成形质量的影响。结果表明: 焊合面平均静水压力、分流桥底部等效应力及模芯最大偏移量随焊合室深度的增加而增加; 综合考虑焊合质量、模具应力集中及型材尺寸精度等因素, 分流模合适的焊合室深度为 10~16mm; 随着焊合角的增加, 焊合室内死区体积及挤压力均增大, 而模芯最大变形偏移量呈减小趋势; 综合考虑焊合角对挤压过程死区大小、模芯的稳定性及挤压力大小的影响, 分流模合适的焊合角为 30°~45°。实验结果和模拟结果在金属流动景象、死区位置、死区形状等方面吻合较好。

关键词: 有限元模拟; 分流模挤压; 焊合室深度; 焊合角

中图分类号: TG379

文献标志码: A

Influences of welding chamber depth and welding angle on forming quality of extrusion of square tube by porthole die

HUANG Dong-nan^{1,2}, ZHANG Zhi-hao¹, LI Jing-yuan¹, XIE Jian-xin¹

(1. Advanced Materials and Technologies Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

(2. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: Adopting commercial FEM soft Deform-3D and welding mesh reconstruction method, the influences of welding chamber depth and welding angle on forming quality of diplopore extrusion of square tube by a porthole die were analyzed. The results show that, the hydrostatic stress of welding plane, equivalent stress on the bottom of flow-separating bridge and maximal offset of die mandrel increase with increasing the welding chamber depth. Comprehensively considering the factors of welding quality, stress concentration of die and size-precision of the profile, the reasonable welding chamber depth of the porthole die is from 10mm to 16mm. With the welding angle increasing, the dead zone volume in welding chamber and the extrusion force increase, but the maximal offset of the die mandrel decreases. Comprehensively considering the influences of welding angle on the dead zone during extrusion, the stability of die mandrel and the extrusion force, the reasonable welding angle of the porthole die is from 30° to 45°. The experimental and simulation results agree well in the metal flow, position and shape of dead zone.

Key words: finite element simulation; porthole-die extrusion; welding chamber depth; welding angle

依靠源于实践的经验规律和模具设计者个人经验的传统设计方法, 往往难以解决挤压模具设计中的优化方案选择、金属流动精确控制等方面的问题^[1~4]。有限元数值模拟技术可获得挤压过程中模具结构和挤压工艺参数等对金属流动变形行为、模具内部应力场及

位移场的影响, 从而为合理设计模具结构、制定挤压工艺提供重要的参考依据^[5~6]。但目前的有限元模拟技术只能针对焊合面与对称面位置一致的空心型材分流模挤压进行模拟分析^[7~10], 为了实现焊合面为非流动对称面空心型材挤压全过程(包括焊合阶段)的数值模

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB613703); 材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题研究基金资助项目(09-01)

收稿日期: 2009-10-29; 修订日期: 2010-04-15

通信作者: 谢建新, 教授, 博士; 电话: 010-62332254; E-mail: jxxie@mater.ustb.edu.cn

拟, 谢建新等^[11]提出了一种基于逆向工程技术的焊合面网格修复技术, 采用该技术实现了方形管分流模双孔挤压全过程的三维有限元数值模拟, 分析了分流孔的配置方案对金属流动行为、成形质量等的影响, 并进行了实验验证^[12]。

焊合室深度及焊合角(即分流孔流动角)的大小是分流模设计的关键参数之一^[13], 如程磊等^[14]分析了口琴管挤压模具(焊合面与对称面位置一致)的焊合室深度对挤压力及金属流动的影响。而针对焊合面为非流动对称面的空心型材挤压模具, 关于其分流孔配置、焊合室深度和焊合角等对模具使用寿命和型材成形质量等方面的研究尚无文献报道。本文作者在前期研究结果的基础上^[12], 重点分析 6005A 方管型材分流模双孔挤压时焊合室深度和焊合角对成形质量的影响。

1 计算条件

分流模双孔挤压方管的工模具结构、边界条件、挤压工艺条件、几何模型的构建见文献[12]。为便于与 650 t 挤压机的实验结果相比较, 本研究以 $L15 \text{ mm} \times t2 \text{ mm}$ (其中 L 表示边长, t 表示厚度, 下同)的方管为例, 分析分流模双孔挤压时焊合室深度及焊合角对模具寿命及型材成形质量的影响。

挤压筒直径 D 为 95 mm, 分流孔外接圆直径 D_c 为 84 mm, 分流孔外接圆直径 D_c 与挤压筒直径 D 之比为 0.88; 上模高 $H_1=50 \text{ mm}$, 下模高 $H_2=50 \text{ mm}$; 模孔 $d=15 \text{ mm}$, 模芯 $d_m=11 \text{ mm}$; 中间分流孔 Q_1 的宽度 $b=16 \text{ mm}$, 中间分流孔 Q_1 和两侧分流孔 Q_2 的面积比为 0.93; 焊合角 $\theta=15^\circ\sim90^\circ$, 焊合室深度 $h=7\sim19 \text{ mm}$ 。焊合压缩比(即分流孔总面积与制品断面积之比) $K=9.3$, 挤压比 $R=34.1$ 。

分析方管金属流动过程时, 将变形温度下的 6005A 铝合金坯料设为粘塑性材料, 模具材料设为刚性。分析模具受力及变形情况时, 将模具改为弹性材料, 并将挤压稳态时得到的坯料的应力场施加给模具, 从而经过计算获得挤压过程中模具的应力分布及弹性变形量。

2 模拟结果与讨论

2.1 焊合室深度对焊合室内静水压力的影响

分流模挤压过程中, 焊合室内静水压力大小决定型材的焊合质量, 焊合面上的静水压力越高, 型材的焊合质量就越好。本研究计算了焊合室深度 h 为 7~19

mm 时, 焊合面的静水压力变化, 其结果如图 1 所示。由图 1 可知, 随着焊合室深度的增加, 焊合面的静水压力逐渐增大。当焊合室深度为 7 mm 时, 焊合面的平均静水压力为 97 MPa。前期计算表明^[12]: 此时焊合面附近温度约为 527 , 在此温度下, 6005A 铝合金屈服强度约为 44 MPa, 平均静水压力仅为合金屈服强度的 2.2 倍, 容易导致焊合不良。

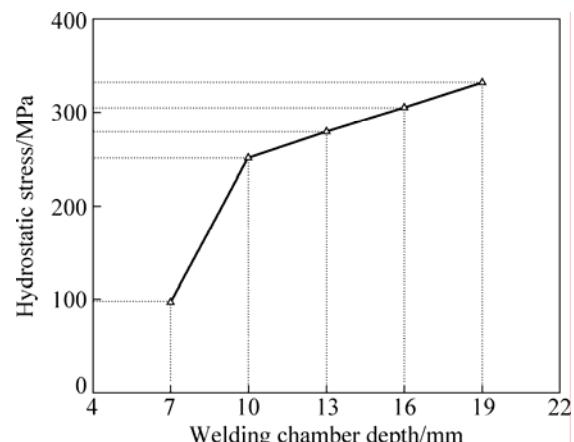


图 1 焊合室深度对焊合面上静水压力的影响

Fig.1 Effect of hydrostatic stress of welding plane on welding chamber depth

当焊合室深度 h 增加时, 焊合室体积增加, 挤压力增大, 从而使静水压力增大。 h 由 7 mm 增加到 10 mm 时, 焊合面的静水压力迅速增大, 由 97 MPa 增加到 251 MPa, 达到金属屈服强度的 5.7 倍, 当 h 由 10 mm 继续增加时, 焊合面的静水压力继续增加, 但增加速度明显下降; 当 $h=19 \text{ m}$ 时, 静水压力增加到 331 MPa, 达到金属屈服强度的 7.5 倍, 因此当焊合室深度 $h=10 \text{ mm}$ 时, 能够获得充分的焊合强度。

2.2 焊合室深度对模具受力及模芯稳定性的影响

以上分析表明, 焊合室越深越有利于提高焊合质量, 但随着焊合室深度的增加, 模芯长度随之增加, 焊合室内金属体积也随之增大, 使得摩擦力增加, 挤压力升高, 易造成模具应力集中较大的部位(如分流桥底部和模芯等)发生变形甚至断裂。

分流桥底部及模芯表面等效应力分布的计算结果如图 2 所示。由图 2 可知, 挤压过程中分流桥底部存在较大的应力集中, 并随焊合室深度的增加而增大。

分流桥底部等效应力随焊合室深度的变化规律如图 3 所示。由图 3 可见, 当焊合室深度 h 为 7~16 mm 时, 应力增加较为平缓, 分流桥底部应力集中处的等效应力为 781~1 024 MPa, 小于热作模具钢 H13 的抗

拉强度(1117 MPa ^[15])；而当 h 大于 16 mm 时，等效应力快速增加；当 $h=19\text{ mm}$ 时，等效应力高达 1270 MPa ，已超过H13抗拉强度。

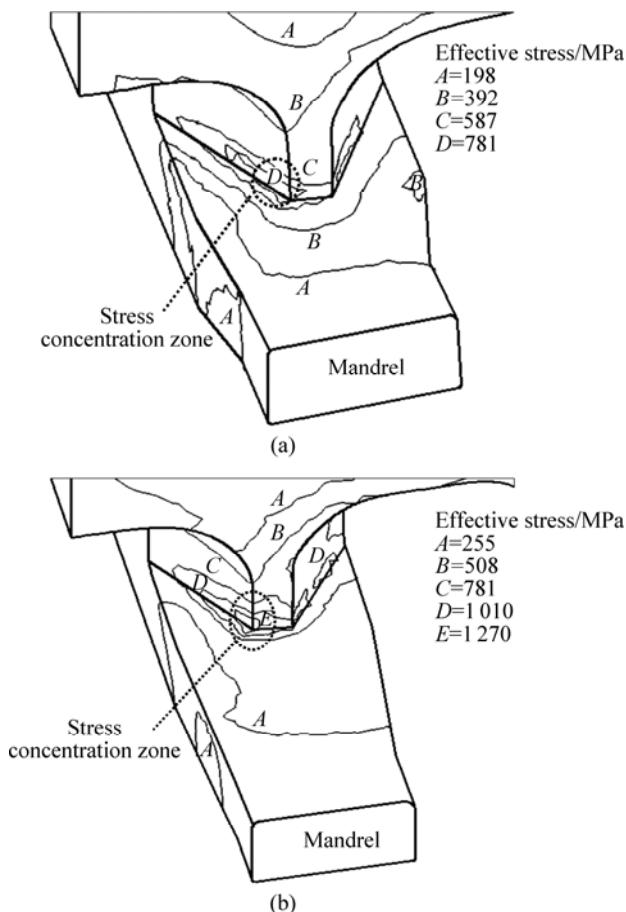


图2 分流桥底部及模芯表面的等效应力分布

Fig.2 Effective stress distribution of port bridge bottom and mandrel surface: (a) $h=7\text{ mm}$, mandrel length 13 mm ; (b) $h=19\text{ mm}$, mandrel length 25 mm

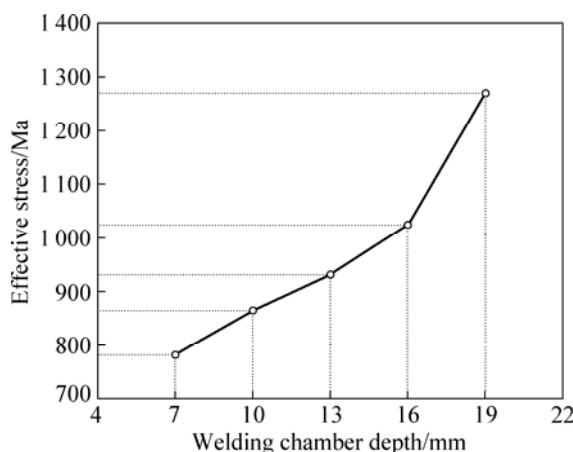


图3 分流桥底部等效应力随焊合室深度的变化

Fig.3 Change of effective stress of port bridge bottom with welding chamber depth

随 h 增加，挤压压力增加，同时由于模芯长度增加，使得模芯稳定性降低。不同焊合室深度时模芯偏移方向及偏移量分布如图4所示。由图4可知，挤压过程中模芯向中间分流孔(箭头方向)偏移，模芯头部偏移量最大。当 h 较小为 7 mm 时，模芯最大偏移量 0.008 mm ；而当焊合室深度增加到 19 mm 时，模芯最大偏移量为 0.264 mm ，是焊合室深度 7 mm 时的 33 倍。

模芯受不均应力作用而产生偏移是型材断面壁厚偏差的主要因素之一。图5所示为模芯最大偏移量随焊合室深度的变化。由图5可知，模芯偏移量随着焊合室深度 h 的增加而增加。根据铝型材国家标准(GB5237.1-2004)，当型材壁厚为 2 mm 时，允许偏差为 $\pm 0.2\text{ mm}$ 。当 h 小于 16 mm 时，模芯偏移量皆小于 0.2 mm ，由模芯偏移引起的挤出方管型材壁厚偏差小

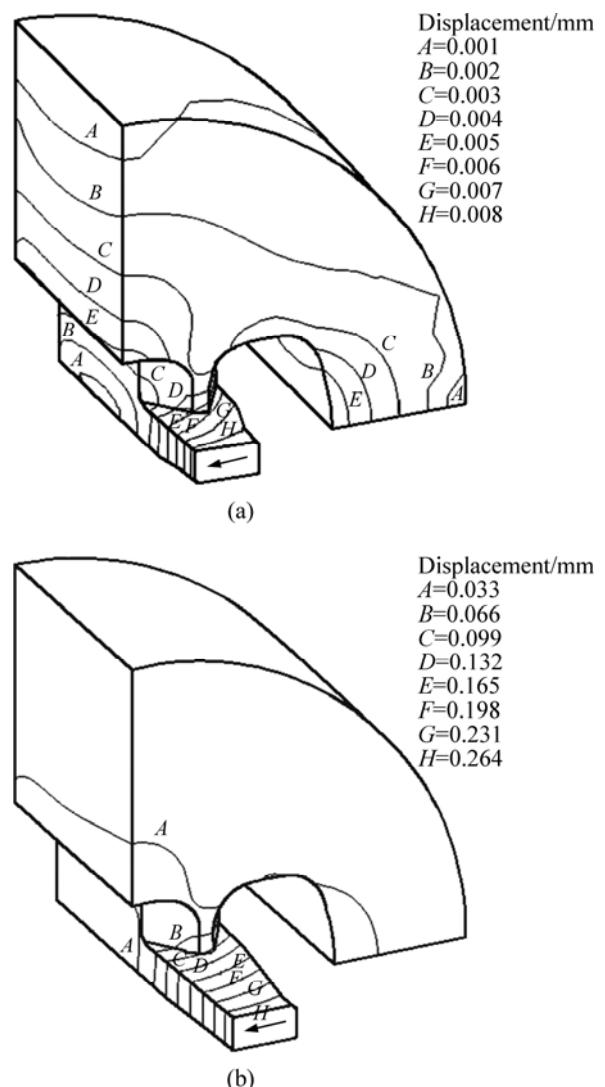


图4 模芯偏移方向及偏移量分布

Fig.4 Mandrel offset direction and offset distribution: (a) $h=7\text{ mm}$, mandrel length 13 mm ; (b) $h=19\text{ mm}$, mandrel length 25 mm

于 ± 0.2 mm, 因此, 该偏差符合国家标准的质量要求; 而 h 为19 mm时, 模芯偏移量大于0.2 mm, 方管壁厚偏差大于 ± 0.2 mm, 不能满足质量要求。

综合以上分析, 当焊合室深度 h 过小, 将导致焊合面焊合不良; h 过大将使得模芯稳定性降低, 模芯偏移量增大, 导致挤出方管断面壁厚超差, 并可在分流桥底部将产生较大的应力集中, 降低模具使用寿命。对于本研究所用方形管双孔挤压模具, 合理的焊合室深度为10~16 mm。

2.3 焊合角对金属流动及成形质量的影响

焊合角 θ (分流桥的斜度)对挤压过程中焊合室内金属流动死区大小、焊合质量以及挤压力有明显的影响。为此, 本研究针对焊合室深度为13 mm, 分流桥底端宽为3 mm, 焊合角 θ 分别为15°、30°、45°、60°、90°的情形, 分析了焊合角 θ 对金属流动行为、挤压力及焊合质量的影响。

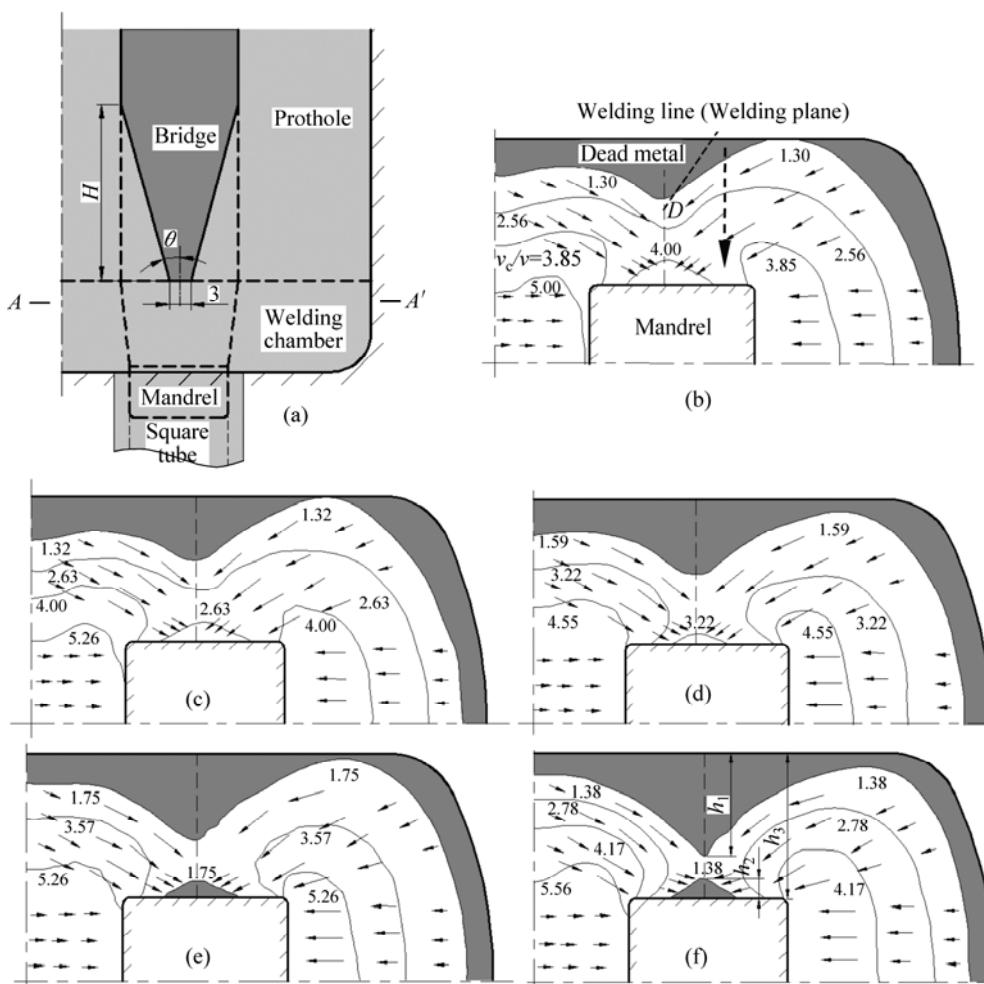


图6 焊合角 θ 对焊合室内A-A'面上金属流速分布及死区的影响

Fig.6 Effects of welding angle θ on distribution of metal flowing velocity and dead metal in welding chamber (profile A-A'): (a) Along central axis of profile model; (b) $\theta=15^\circ$; (c) $\theta=30^\circ$; (d) $\theta=45^\circ$; (e) $\theta=60^\circ$; (f) $\theta=90^\circ$

图6(a)所示为分流模挤压时沿对称轴线的剖面模型, 其中 H 表示不同焊合角的分流桥斜面高度。稳态厚偏差大于 ± 0.2 mm, 不能满足质量要求。

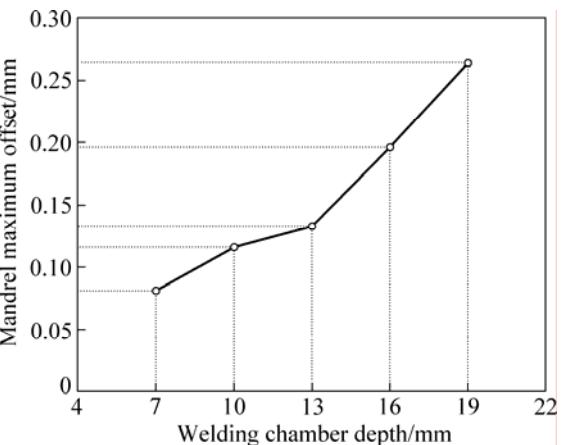


图5 模芯最大偏移量随焊合室深度的变化

Fig.5 Change of mandrel maximum offset with welding chamber depth

挤压时，垂直于挤压方向，在焊合室内沿图6(a)横断面A-A'上金属的流动速度及死区分布如图6(b)~(f)所示。其中 v 为挤压轴速度， v_c 为焊合室内金属流速，图中数字为 v_c/v 之值。

由图6可知，对于不同焊合角，焊合室内死区形成的位置、死区形状基本相同，但死区的大小有显著的差别：随着焊合角的增加，死区截面的顶点(图6(b)中的D点)沿焊缝逐渐下移，使得沿焊合室大面侧壁与模芯表面(图6(b)中箭头所示)之间的死区明显增大，而对焊合室小面侧壁(弧形侧壁)附近的死区大小几乎没有影响。当焊合角 $\theta=45^\circ$ 时，靠近模芯表面处没有死区，如图6(b)~(d)所示。而当焊合角 $\theta=60^\circ$ 时，靠近模芯处也产生了死区，如图6(e)和(f)中模芯轮廓处的阴影部分所示。这主要是由于在焊合过程中，随着焊合角的增加，焊合面的初始接触点由靠近分流桥底部向模口处移动。当焊合角 $\theta=60^\circ$ 时，焊合面初始接触点距剖面A-A'较远，距离模口较近，并且在焊合过程中，焊合面的金属并不紧贴模芯表面流动；在焊合过程中，金属将以焊合面初始接触点位置为中心向四周填充，使得模芯处产生较小面积的死区。而当焊合角 $\theta=45^\circ$ 时，焊合面初始接触点距横断面A-A'较近，即靠近分流桥底部，因而不容易在模芯表面产生死区。

本研究采用焊合室内死区的高度 h_1 和 h_2 之和，与焊合室侧壁和模芯表面之间的距离(焊缝长度) h_3 的比值，作为评价焊缝位置死区相对大小的指标，计算结果如图7所示。由图7可知，随着焊合角的增加，死区比值逐渐增大。当焊合角为 15° 时，死区比值仅为0.42，而当焊合角达 90° 时，其比值达0.84。

随着焊合角的增加，焊合室内死区增大，焊合质

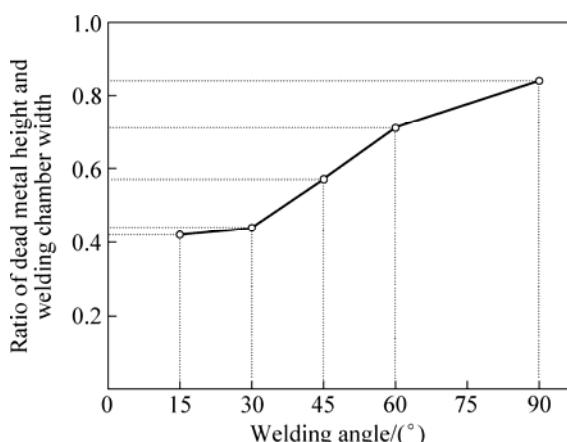


图7 焊合角对死区占焊合室比例的影响

Fig.7 Effect of welding angle on proportion of dead metal in welding chamber

量下降，容易在型材表面出现死皮、气泡及成层等缺陷，因此，从减少死区面积的角度考虑，焊合角应该越小越好。

计算结果表明，焊合角大小除了直接影响焊合室内死区体积之外，对挤压过程中模芯的稳定性及挤压力的大小也有着较大影响。

图8给出了随着焊合角的增加，模芯最大偏移量及挤压力的变化规律。由图8可知，随焊合角的增加，模芯最大偏移量先减小然后趋于平缓，而挤压力呈单调增加趋势。随着焊合角的增加，分流桥斜面高度H减小，使得挤压时摩擦面增大，且焊合室内金属径向流动趋势增强，死区增大，导致挤压力增加。上模高度(即分流桥高度) H_1 为50 mm时，在焊合角为 15° 的情况下，分流桥斜面高度H高达24.3 mm，约为分流桥高度的一半，使得挤压过程中分流桥强度降低，导致模芯稳定性差。随着焊合角的增加，分流桥斜面高度H减小，分流桥强度增加，从而使模芯稳定性增加，模芯最大偏移量减小。但当焊合角 $60^\circ\sim90^\circ$ 时，由于挤压力增加较大而使得模芯的稳定性开始下降，模芯的最大偏移量又呈增加趋势。

图8表明，当焊合角为 15° 时，模芯偏移量为0.216 mm，由此引起的方管型材壁厚偏差大于 ± 0.2 mm，不能满足铝型材国家标准要求(GB 5237.1-2004)。而当焊合角 $\theta=30^\circ$ 时，模芯偏移量迅速下降到0.1 mm以下，但当焊合角 $\theta=60^\circ$ 时，有较明显的增加。同时根据前述分析可知，其死区也较大。综合考虑焊合角对焊合室内死区大小、模芯的稳定性及挤压力大小的影响，方形管双孔挤压模具合适的焊合角 θ 为 $30^\circ\sim45^\circ$ 。

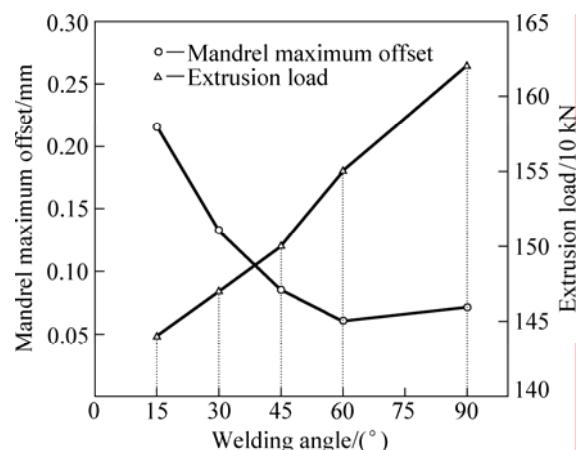


图8 焊合角对模芯最大偏移量及挤压力的影响

Fig.8 Effects of welding angle on mandrel maximum offset and extrusion load

3 实验验证

为验证模拟结果, 以方管($L15 \text{ mm} \times t2 \text{ mm}$)为例, 设计加工了焊合角为 30° 的双孔分流模, 并在650 t卧式挤压机上进行挤压实验。挤压工艺参数与计算中所用参数相同。

稳态挤压时, 金属流动行为的实验结果和模拟结果如图9所示。截取如图9(a)所示的挤压实验试样, 并对取样平面A和B进行打磨抛光, 采用25%的NaOH水溶液侵蚀2 min, 试样的低倍金相组织如图9(b)和(d)所示。其中, 将晶粒未发生明显变形的区域视为死区。有限元模拟的金属流速分布如图(c)和(e)所示。对比模拟结果和实验结果可知, 两者在金属流动景象、死区位置和形状等方面基本吻合, 表明本研究所建立的几何模型、边界条件的处理、模拟结果等较为合理, 对分流模结构设计及优化具有参考意义。

4 结论

1) 焊合面的平均静水压力、分流桥底部的等效应力及模芯最大偏移量随焊合室深度的增加而增加, 当焊合室深度由7 mm增加到19 mm时, 焊合面上平均静水压力由97 MPa增加到331 MPa, 模芯最大偏移量由0.008 mm增加到0.264 mm, 增加了33倍, 而分流桥底部最大等效应力由781 MPa增加到1 270 MPa。综合考虑焊合质量、模具应力集中及型材尺寸精度等因素, 方形管双孔挤压模具的合理的焊合室深度为10~16 mm。

2) 随着焊合角的增加, 焊合室内死区体积及挤压力均逐渐增加, 而模芯最大偏移量呈减小趋势。综合考虑焊合角对挤压过程死区大小、模芯的稳定性及挤压压力大小的影响, 对于方形管双孔挤压模具合适的焊合角为 $30^\circ\sim45^\circ$ 。

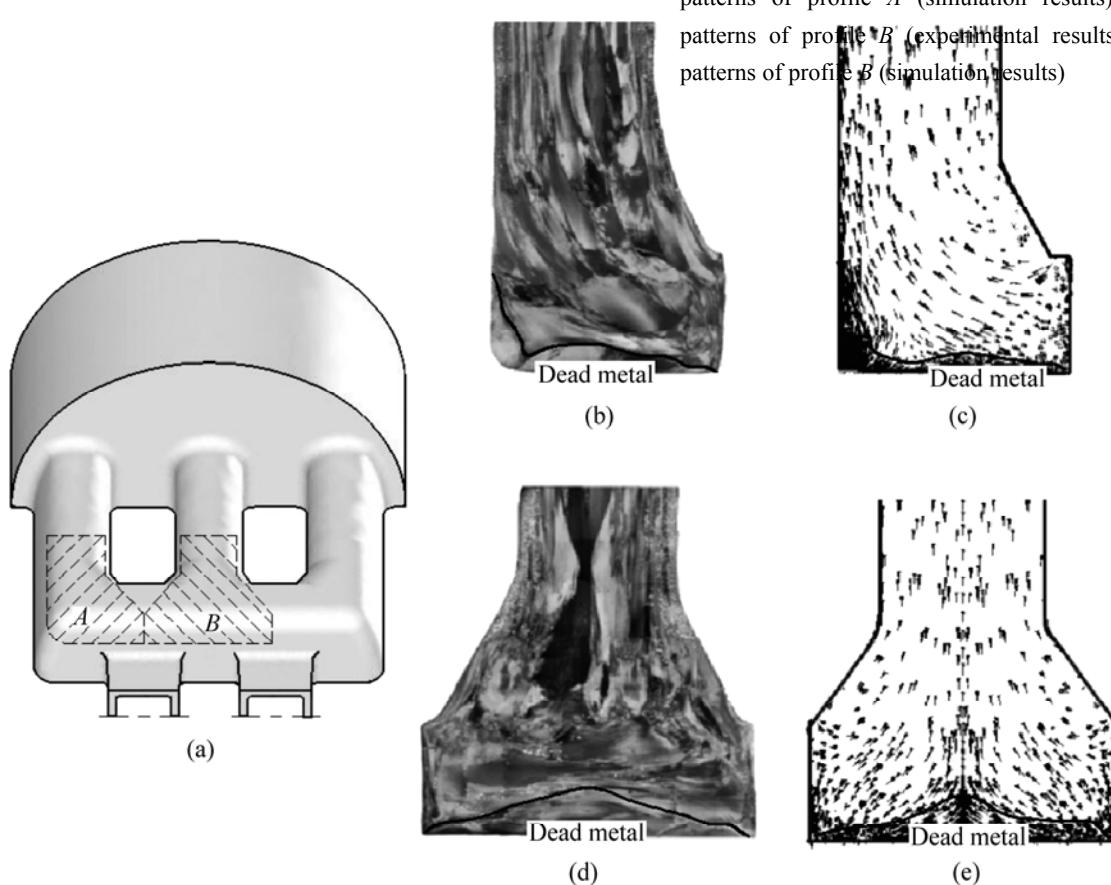


图9 金属流动景象的实验结果和模拟结果对比

Fig.9 Comparison of simulation and experimental results of metal flowing patterns: (a) Sampling positions; (b) Metal flow patterns of profile A (experimental results); (c) Metal flow

3) 对焊合室内金属流动行为进行了实验验证, 实验和模拟结果在金属流动景象、死区位置和形状等方面吻合较好。

REFERENCES

- [1] MURAKAMI S. Adoption of aluminum extrusion and its technology[J]. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 2008, 49(567): 25–30.(in Japanese)
- [2] CHANDA T, ZHOU J, KOWALSKI L. 3D FEM simulation of the thermal events during AA6061 aluminum extrusion[J]. Scripta Materialia, 1999, 41(2): 195–202.
- [3] YANG D Y, PARK K, KANG Y S. Integrated finite element simulation for the hot extrusion of complicated Al alloy profile[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1/3): 25–30.
- [4] JO H H, LEE S K, JUNG S C. A non-steady state FE analysis of Al tubes hot extrusion by a porthole die[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 173(2): 223–231.
- [5] YANG D Y, KIM K J. Design of processes and products through simulation of three-dimensional extrusion[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191(1/3): 2–6.
- [6] 邱利青, 张士宏. 分流组合模挤压过程数值模拟及模具优化设计[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(2): 123–127.
DI Li-qing, ZHANG Shi-hong. Porthole die extrusion process numerical simulation and optimal die design[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(2): 123–127.
- [7] JUNG M L, BYUNG M K, CHUNG G K. Effects of chamber shapes of porthole die on elastic deformation and extrusion process in condenser tube extrusion[J]. Materials and Design, 2005, 26(4): 327–336.
- [8] LI L, ZHANG H, ZHOU J. Numerical and experimental study on the extrusion through a porthole die to produce a hollow magnesium profile with longitudinal weld seams[J]. Materials and Design, 2008, 29(6): 1190–1198.
- [9] JO H H, LEE S K, LEE S B. Prediction of welding pressure in the non-steady state porthole die extrusion of Al7003 tubes[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(6): 753–759.
- [10] DONATI L, TOMESANI L. The prediction of seam welds quality in aluminum extrusion[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153: 366–373.
- [11] 谢建新, 黄东男, 李静媛, 张志豪. 一种空心型材分流模挤压焊合过程数值模拟技术: CN 101604350A[P]. 2009–12–16.
XIE Jian-xin, HUANG Dong-nan, LI Jing-yuan, ZHANG Zhi-hao. A numerical simulation technology for hollow profile extrusion by porthole die: CN 101604350A[P]. 2009–12–16.
- [12] 黄东男, 李静媛, 张志豪, 谢建新. 方形管分流模双孔挤压过程中金属的流动行为[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(3): 487–495.
HUANG Dong-nan, LI Jing-yuan, ZHANG Zhi-hao, XIE Jian-xin. The metal flowing behaviors during the diplopore extrusion of square tube by a porthole die[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(3): 488–495.
- [13] 谢建新, 刘静安. 金属挤压理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
XIE Jian-xin, LIU Jing-an. Theory and technology for metal extrusion[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.
- [14] 程磊, 谢水生, 黄国杰, 和优锋. 焊合室高度对分流组合模挤压成形过程的影响[J]. 稀有金属, 2008, 32(4): 442–446.
CHEN Lei, XIE Shui-sheng, HUANG Guo-jie, HE You-feng. Effects of height of welding chamber heights on extrusion forming process of porthole die[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2008, 32(4): 442–447.
- [15] 熊惟皓, 周理. 中国模具工程大典(第2卷)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
XIONG Wei-hao, ZHOU Li. China die and mould engineering canon(Volume 2)[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2007.

(编辑 何学锋)