

引文格式: 徐俊瑞, 李毅, 王宇阳, 等. 6061 铝合金管件磁脉冲冲击介质胀形变形规律研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(10): 68-74.
XU Junrui, LI Yi, WANG Yuyang, et al. Research on deformation law of 6061 aluminum alloy tube formed by medium bulging process with magnetic pulse impacting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(10): 68-74.

6061 铝合金管件磁脉冲冲击介质胀形变形规律研究*

徐俊瑞^{1,2,3}, 李毅¹, 王宇阳¹, 赵雨东¹, 王元丰¹, 汪强昆¹, 闫亮明³

- (1. 内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 呼和浩特 010051;
2. 内蒙古工业大学先进轻金属材料开发与加工防护教育部工程研究中心, 呼和浩特 010051;
3. 内蒙古工业大学内蒙古自治区轻金属材料重点实验室, 呼和浩特 010051)

[摘要] 以 6061 铝合金管件为研究对象, 利用 ANSYS 仿真软件, 建立了电磁场、变形场有限元模型, 针对管件胀形高度变化、壁厚减薄、应力应变分布、变形均匀性等变形规律进行了分析研究。研究发现, 磁脉冲冲击介质胀形可有效改善传统管件磁脉冲胀形存在的严重壁厚减薄、轴向变形不均匀性等问题, 使变形轮廓增大, 均匀变形长度增加。成形中管件胀形高度与放电能量呈线性关系。介质高度一定时, 随着放电能量增加, 变形均匀性变化较小。介质高度随管件变形量增加而增加, 合适的介质高度可提高管件的变形均匀性、改善圆角处贴模和避免介质失效。

关键词: 6061 铝合金; 磁脉冲管件成形; 数值模拟; 放电能量; 介质高度

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.10.068



徐俊瑞

教授, 博士, 研究方向为航空航天用轻金属材料构件成形。

零部件轻量化是航空业发展需求, 这促进了铝合金管材及其构件的

应用^[1-2]。6061 铝合金管材的高质量与高效成形工艺, 对于航空制造具有重要的技术研究价值。磁脉冲成形就是顺应这一需求而迅速发展起来的铝合金管材成形方法之一。

磁脉冲成形是一种高速率成形技术, 其原理是利用线圈产生的磁场将洛伦兹力施加到工件上。与准静态过程相比, 具有较高的应变速率, 能够提高材料的成形极限^[3]。研究表明, 高成形速率可以将 6061-T4 铝合金的成形极限提高两倍以上^[4]。在高成形速率下, 惯性效应抑制了颈缩过程中试样的应变梯度, 从而使失效应变增加^[5]。

目前, 磁脉冲成形在管件上已经被广泛应用, 可以实现管件的胀形、缩颈和连接^[6-8]。对放电能量预测^[9]、

管件长度与位置的选择^[10]和线圈结构参数的研究^[11], 使管件磁脉冲成形理论愈加成熟。设计凹型线圈^[12]或采用渐进成形的方法^[13]解决了传统磁脉冲胀形存在的管件壁厚减小、轴向变形不均匀等问题。多向磁压力的管件胀形工艺可以显著增加轴向进给量, 减小拉应力和壁厚减薄, 因此可以获得较高的胀形高度^[14]。

传统的磁脉冲管件胀形依然存在着一些问题, 线圈的大小受限于管直径的大小, 如成形效果受限于管材料的导电性, 并且存在壁厚减薄严重、轴向变形不均匀等问题。本文采用管件磁脉冲冲击介质胀形工艺, 将磁脉冲成形与柔性胀形工艺相结合^[15], 用平板线圈代替螺旋线圈, 利用其与驱动板产生的电磁力冲击介质从而使管件

* 基金项目: 内蒙古自然科学基金(2021MS05004); 内蒙古高等学校青年科技英才(NJYT22087)。

发生胀形。为了研究该工艺的可行性,在 ANSYS 中建立 2D 模型,选用 6061 铝合金管件作为研究对象,通过仿真方法,研究管件胀形变形规律。

1 管件胀形工艺及其结构

管件传统磁脉冲胀形与磁脉冲冲击介质胀形结构对比如图 1 所示。图 1 (a)为管件传统磁脉冲胀形结构,图 1 (b)为管件磁脉冲冲击介质胀形结构。管件传统磁脉冲胀形结构中,螺线管线圈置于管件内部,管件受线圈施加的瞬间电磁力作用,发生高速率胀形;磁脉冲冲击介质胀形结构利用平板线圈代替螺线管线圈,线圈中通过快速变化的电流,周围产生变化的磁场,铜驱动板在变化的磁场中产生感应电流并形成与线圈反向的磁场,铜驱动板受到电磁力作用驱动冲击装置向下运动,介质在冲击作用下被压缩变形,管件受到介质变形的作用力发生塑形变形。此方法中平板线圈不受限于管内径大小。冲击装置包含带有台阶的放大器和冲头,为防止驱动板变形,台阶与冲头部分选用钢结构,高度为 2mm,直径与驱动板一样。锥形部分大、小端直径分别为 84mm 和 24mm,底角为 45°。依据曹增强等^[16]的研究,放大器结构采用台阶形式,旨在提高冲击力作用。

2 有限元模型

2.1 电磁场模型

利用 ANSYS Multiphysics 模块,建立电磁场有限元模型(图 2 (a)),采用 ANSYS Multiphysics/LS-DYNA,

建立变形场有限元模型(图 2 (b))。电磁场有限元模型中包含线圈、铜驱动板、近场空气、远场空气。线圈、铜驱动板、近场空气采用 PLANE13 单元,远场空气采用 INFIN110 单元。具体参数见表 1。

模拟中采用哈尔滨工业大学 EMF-20 型电磁成形机参数^[17],电容为 100 μ F,最大能量为 20kJ。线圈由

截面为 2mm \times 5mm 的紫铜绕制而成,内径为 15mm,匝数为 30 匝,每匝间隙为 1mm。驱动板厚度通过趋肤深度确定,根据式(1)计算得到趋肤深度为 1.48mm,考虑抵抗冲击变形,选用厚 3mm 的驱动板。

$$Z = \sqrt{\frac{2}{\mu\delta\omega}} \quad (1)$$

式中, μ 为真空磁导率; δ 为材料电

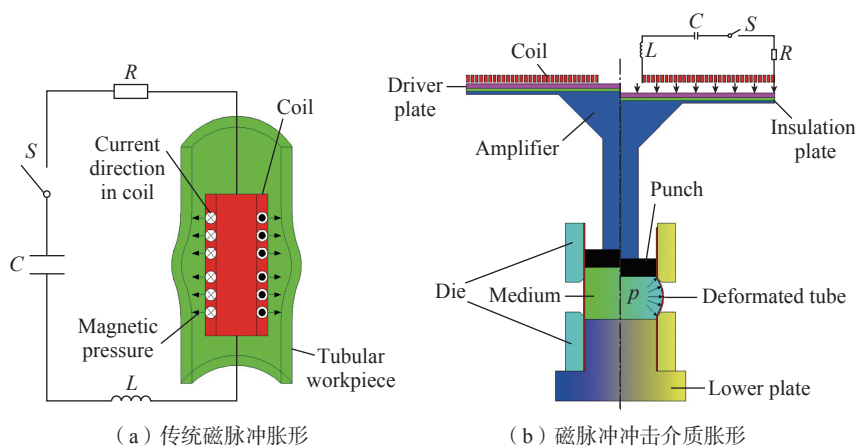


图 1 管件胀形结构

Fig.1 Structure of tube bulging

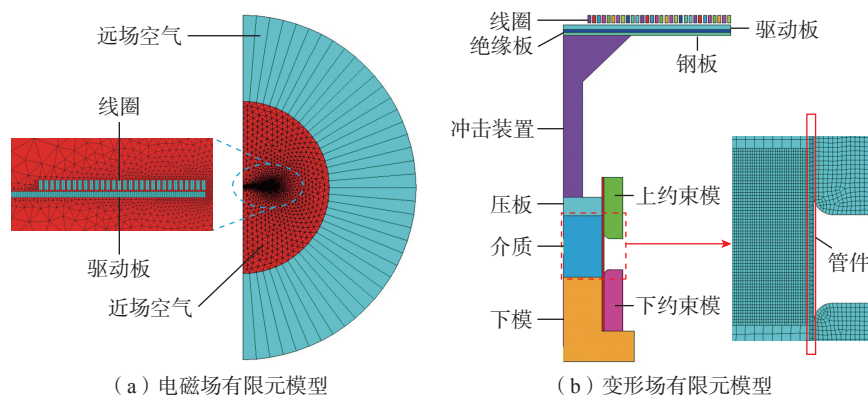


图 2 管件磁脉冲冲击介质胀形有限元模型

Fig.2 Finite element model of medium bulging with magnetic pulse impacting of tube

表 1 材料属性、单元类型和网格划分

Table 1 Material properties, element types and meshing

名称	材质	电阻率 / ($\Omega \cdot m$)	相对磁导率	单元类型	网格划分
线圈	紫铜	1.72×10^{-8}	1	PLANE13	映射网格
驱动板	紫铜	1.72×10^{-8}	1	PLANE13	映射网格
近场空气	—	$+\infty$	1	PLANE13	自由网格
远场空气	—	$+\infty$	1	INFIN110	映射网格

导率; ω 为放角频率。

通过计算, 获得磁脉冲成形等效电路中电阻 R 为 0.04Ω , 电感 L 为 $64.5 \times 10^{-6}\text{H}$ 。利用公式(2)~(4) 获得线圈中电流的变化, 将电流密度(电流/线圈截面积)加载于仿真模型中的线圈结构, 有

$$I(t) = \frac{U_c}{\omega L} e^{-\beta t} \sin \omega t \quad (2)$$

$$\beta = \frac{R}{2L} \quad (3)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (4)$$

式中, U_c 为放电电压; β 为放电电流衰减系数; ω 为角频率; L 为电感; R 为电阻; C 为电容。

2.2 变形场模型

本文以 6061 铝合金管件为研究对象, 管坯外径为 50mm, 壁厚为 1mm, 长度为 100mm。

变形场有限元模型(图 2(b)) 中包含线圈、铜驱动板、绝缘板、钢板、冲击装置、压板、介质、下模、6061 铝合金管件、上约束模和下约束模。模型均采用 PLANE162 单元。

磁脉冲冲击介质胀形属于高速率成形, 需要考虑应变率的影响, 材料本构模型选用 Johnson-Cook 模型^[18]:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C_s \ln \varepsilon^*) [1 - (T^*)^m] \quad (5)$$

式中, A 为屈服应力, MPa; B 为应变硬化模量, MPa; n 为硬化系数; C_s 为应变率敏感性系数; T^* 为无量纲温度; m 为温度软化系数; ε_p 为等效

塑性应变; ε^* 为无量纲应变速率。

模拟中不考虑温度的影响, 6061 铝合金材料的本构模型参数参考刘再德等^[18]的研究, 见表 2。管件与介质的摩擦系数为 0.2, 管件与模具的摩擦系数为 0.1^[19]。

介质选用硅橡胶, 本文介质选用不可压缩橡胶模型 Mooney-Rivlin 模型, 介质参数见表 3^[19-20]。

3 结果分析

3.1 管件胀形对比分析

3.1.1 胀形轮廓与减薄率

为了便于对比分析, 设置传统磁脉冲胀形与磁脉冲冲击介质胀形的最大胀形高度相同, 为 4.45mm。管件和模具参数一致, 胀形轮廓如图 3 所示。可以看出, 磁脉冲冲击介质胀形, 除管件中心高度外, 其他变形区域均高于传统磁脉冲胀形。

卢永进^[21]指出, 当 $|D_{\max} - D_{\min}| \leq 0.2|D_{\max}|$ 时满足均匀变形, 其中 D_{\max} 为最大节点位移, D_{\min} 为最小节点位移, 胀形时节点位移为正。由图 4 可知最大节点位移为 4.45mm, 推出最小节点位移为 3.56mm。可计算出传统磁脉冲胀形的均匀变形长度为 8.2mm, 磁脉冲冲击介质胀形的均匀变形长度为 10.1mm, 较传统胀形提高了 23.17%。因介质具有柔性作用, 对管件的充填性比较好, 有助于提高管件变形轮廓高度和均匀性。

图 4 为壁厚减薄率对比分析。可以看出, 磁脉冲冲击介质胀形中间

变形区域壁厚减薄率明显低于传统磁脉冲胀形; 最大减薄率由传统磁脉冲胀形的 10.5% 减少为 8.5%。主要原因为介质对管件表面施加切向黏着力, 当管件变形时, 切向黏着力会带动管件上端向变形区域移动, 对变形区域进行轴向补料, 从而避免管件的局部减薄。

将模拟结果与 Ouyang 等^[22]传统管件胀形试验结果进行对比分析, 如图 5 所示。利用本文的模拟方法, 先进行传统磁脉冲胀形模拟与试验结果的对比, 结果偏差较小, 表明模拟方法可行。与传统磁脉冲胀形试验值对比发现, 磁脉冲冲击介质胀形均匀性更好, 均匀性长度由 28mm 提高到 53mm, 提高了将近 1 倍。结合图 3 的变形轮廓图, 发现当管件变形量与变形区域更大时, 本工艺对管件均匀性提高更加显著。

3.1.2 塑性应变与受力分析

管件胀形塑性应变对比如图 6

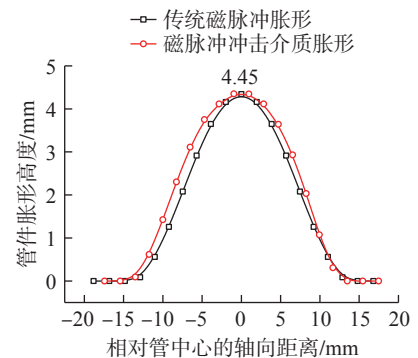


图 3 胀形轮廓对比

Fig.3 Comparison of bulging contours

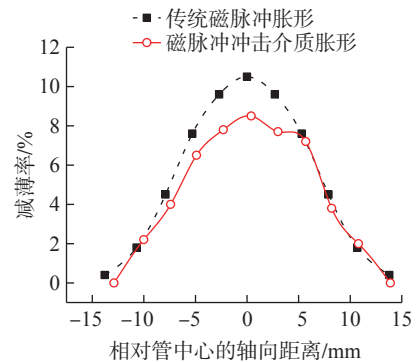


图 4 壁厚减薄率对比

Fig.4 Comparison of thickness reduction rate

表 2 6061 铝合金 Johnson-Cook 本构模型参数^[18]

Table 2 Johnson-Cook constitutive model parameters of 6061 aluminum alloy^[18]

屈服应力 A/MPa	应变硬化模量 B/MPa	硬化系数 n	应变率敏感性系数 C_s
205.78	130.59	0.357	0.015

表 3 Mooney-Rivlin 模型参数^[19-20]

Table 3 Mooney-Rivlin model parameters^[19-20]

泊松比	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	c_1/MPa	c_2/MPa
0.49	1150	1	0.9

所示。两种工艺应变最大区域均为管径最大变形处,磁脉冲冲击介质胀形最大塑性应变为 0.169,传统磁脉冲胀形为 0.177,表明磁脉冲冲击介

质胀形可有效降低塑性应变分布。总体上,磁脉冲冲击介质胀形环向和轴向应变高于传统磁脉冲胀形,且环向应变为正,变形直径变大;厚向应

变小于传统磁脉冲胀形,表明壁厚减薄小于传统磁脉冲胀形。
图 7 为管件磁脉冲冲击介质胀形受力分析。介质对管件产生压力,压力可以随管件局部变形而迅速增加,建立起适用于管件变形的压力。同时,介质摩擦力 f_2 会对管件进行补料,控制局部减薄。胀形区受到径向压应力 σ_r 、轴向压应力 σ_z 和环向拉应力 σ_θ 作用,变形最大处应力值分别为 -14.6MPa 、 -61.3MPa 和 302.8MPa 。直壁段受径向压应力 σ_r 、轴向压应力 σ_z (最大应力值为 -144.8MPa),以及介质与管件之间的摩擦力 f_2 和管件与模具之间的摩擦力 f_1 ,因受模具的限制环向不发生变形,故环向应力 σ_θ 为 0。圆角处

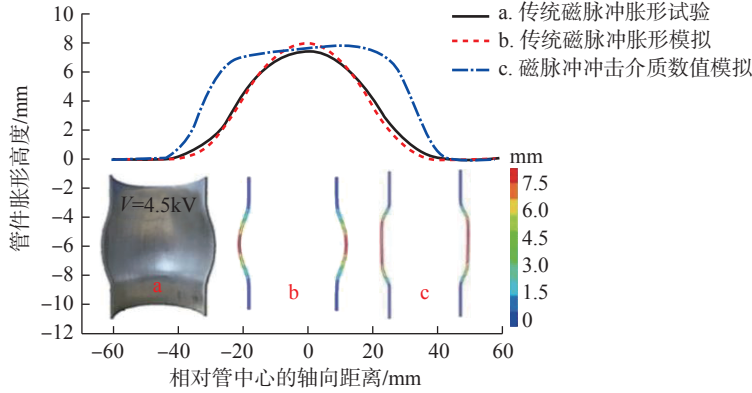


图 5 模拟结果与 Ouyang 等^[22]传统管件胀形试验对比
Fig.5 Simulation results are compared with traditional bulging test of Ouyang et al^[22]

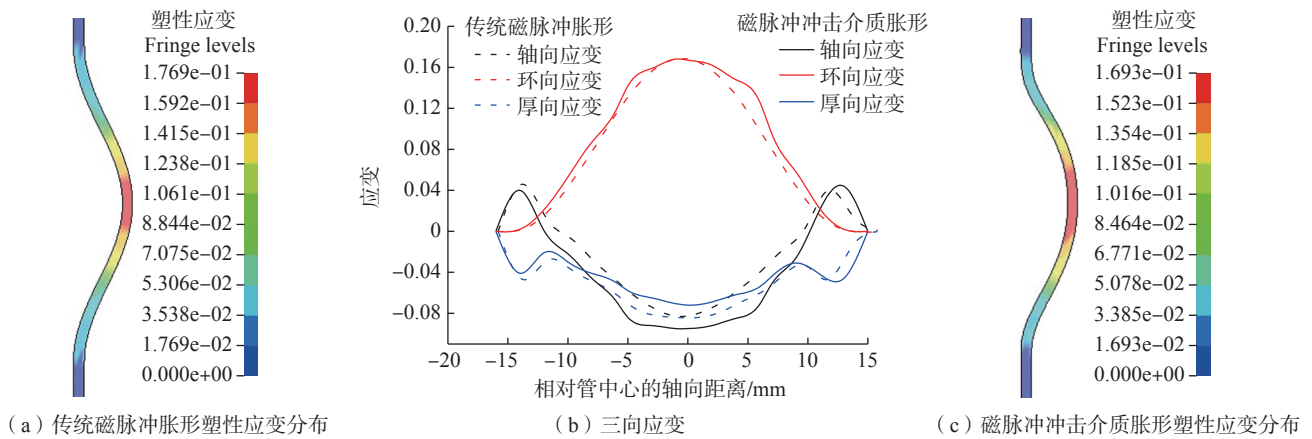


图 6 塑性应变对比
Fig.6 Plastic strain comparison

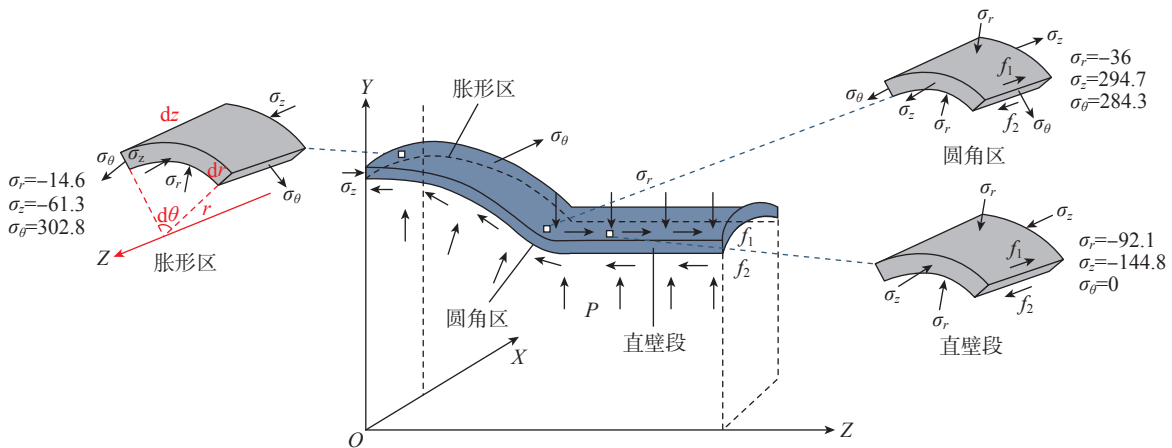


图 7 管件胀形受力分析 (MPa)
Fig.7 Analysis of force on tube bulging process (MPa)

受径向压应力 σ_r 、轴向拉应力 σ_z (最大处应力值为 294.7MPa)、环向拉应力 σ_θ (最大处应力值为 284.3MPa) 和摩擦力 f_2 和 f_1 。

3.2 工艺参数对胀形的影响

3.2.1 放电能量的影响

为研究不同放电能量对管件成形的影响,将介质高度固定不变。研究中选用 30mm 的介质高度,放电能量分别设置为 7.5kJ、8kJ、8.5kJ、9kJ、9.5kJ 和 10kJ。图 8 为不同放电能量下管件变形区域的胀形轮廓。可以看出,最大胀形高度随放电能量的增加而增加,膨胀率由 7.5kJ 时的 8.92%,提高到 10kJ 下的 16.04%。在 7.5kJ 时管件中心均匀变形长度为 8.33mm, 10kJ 时为 8.58mm。介质高度不变时,放电能量增加,均匀变形长度变化较小。由于冲击胀形时,管件下端受约束,上端受介质黏着力作用向轴向补料,使得两端圆角处的变形有不同。

图 9 为不同放电能量下管件减薄率变化。放电能量 7.5kJ 时,胀形直径小,管件中心区域壁厚减薄率较小。放电能量增加,减薄率增加。介质高度不变,变形量增大,介质难以充分填充变形区域,切向黏着力不足以对管件胀形区进行充分补料,使管件的胀形处明显减薄。最大减薄率发生在最大胀形直径处,放电能量 10kJ 时为 7.57%,是放电能量 7.5kJ 时的 1.95 倍。

当放电能量增加到 11.25kJ 时,介质高度不变,较大的电磁力会使冲击装置过度压缩介质,使得介质从上端压板与管件之间溢出,导致成形失效,如图 10 所示。

3.2.2 介质高度的影响

图 11 为不同介质高度下管件胀形最大高度变化。可以看出,低介质高度对应相对高的成形高度,但介质高度太小,不足以使管件产生变形;介质高度增加导致胀形高度下降,这是因为放电能量不变,增加介质高度时,压缩介质需要更多的能量。

通过大量的模拟研究发现,管件胀形高度对应合适的介质高度,介质高度的选择需在自由胀形区高度即为上下约束模具之间的距离(本文自由胀形区域高度为 29mm)的基础上,随管件的变形量增加而增加,增加的高度最少为管件最大胀形高度的两倍。最大胀形高度大于等于 5mm 时,上述增加值可向上浮动 2~3mm。

下文进行举例分析。自由胀形区域高度为 29mm,设计 3 种组合。组合 1: 胀形高度 3mm,介质高度 35mm; 组合 2: 胀形高度 4.5mm,介质高度 38mm; 组合 3: 胀形高度 6mm,介质高度 43mm (上浮 2mm)。3 种组合下的胀形轮廓云图如图 12 所示。从等值线可以看出,随着胀形高度的增加,中心变形区域的等值线在扩大,均匀变形长度增加。通过计算,组合 1 的均匀变形长度为 9.5mm,组合 2 为 10.2mm,组合 3 为 12.85mm。

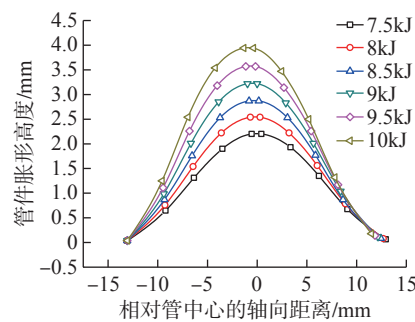


图 8 不同放电能量的胀形轮廓
Fig.8 Bulging profile of different discharge energy

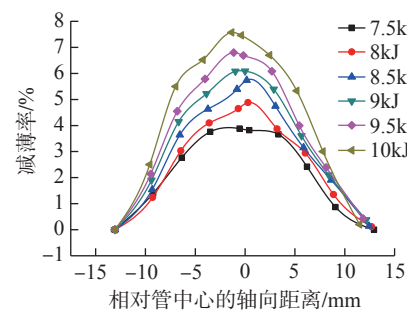


图 9 不同放电能量下的减薄率
Fig.9 Thinning rate of different discharge energy

组合 2 均匀性相比于组合 1 提高了 7.37%,组合 3 均匀性相比于组合 2 提高了 26%。根据管件变形量,适当增大介质高度,能提高变形均匀性、模具圆角处贴模性,也可防止介质顶端失效。

图 13 为 3 种组合下的最大等效应变。组合 3 的最大等效应变为 0.226,小于常温下准静态 6061 铝合金的极限应变 0.24^[23]; 此时膨胀率为 24%,高于常温下的最大膨胀率(17.4%),而最大减薄率仅为 12.73%。

4 结论

(1) 与传统磁脉冲胀形对比,磁脉冲冲击介质胀形中变形轮廓增大,最大塑性应变、减薄率降低,变形均匀长度增加;环向和轴向应变高于传统磁脉冲胀形,厚向应变减小。管件与介质之间的摩擦力对管件进行补料,控制局部减薄。

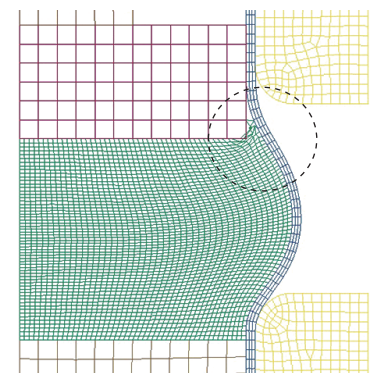


图 10 放电能量为 11.25kJ 时管件胀形
Fig.10 Tube bulging at 11.25kJ

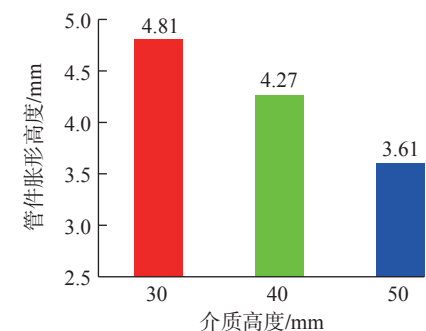


图 11 不同介质高度对成形的影响
Fig.11 Effect of different medium heights on forming

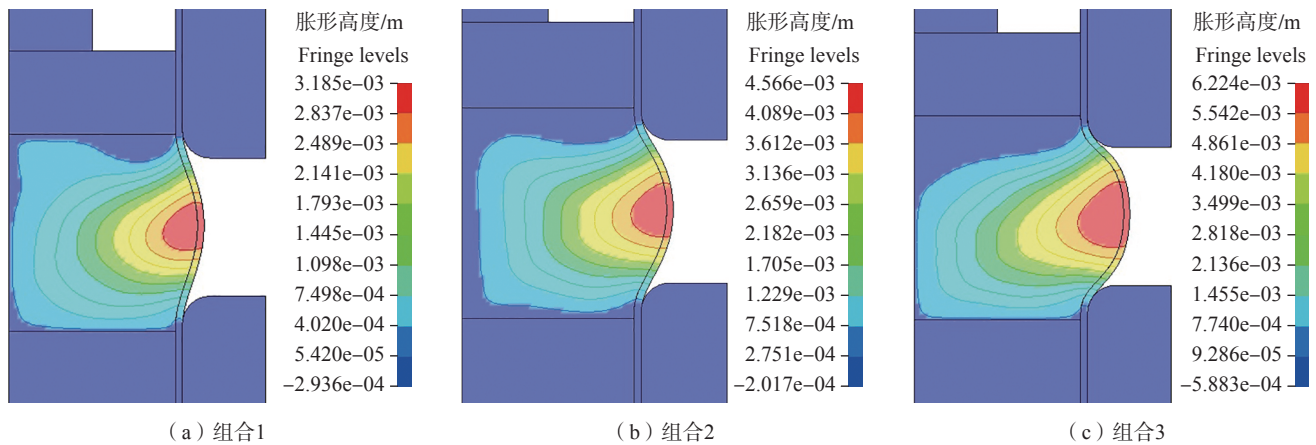


图 12 3 种组合的胀形轮廓

Fig.12 Bulging contours of 3 kinds of combinations

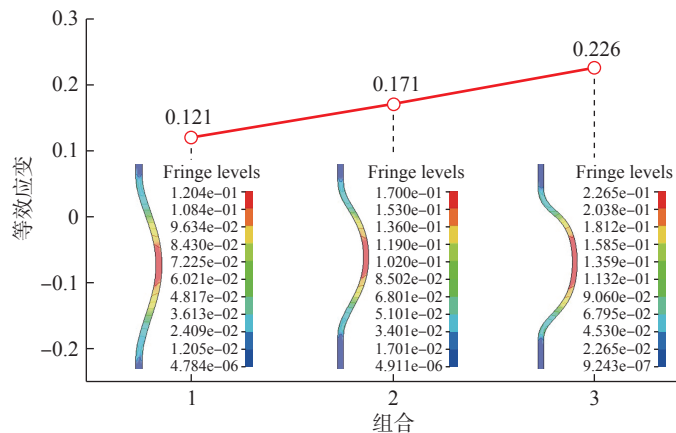


图 13 3 种组合的最大等效应变

Fig.13 Maximum equivalent strain of 3 kinds of combinations

(2) 放电能量增加,最大胀形高度增加;介质高度不变时,放电能量增加,均匀变形长度变化较小;放电能量增大,减薄率增加;放电能量较大时,介质从上端压板与管件之间溢出,成形失效。

(3) 介质高度增加,胀形高度降低;介质高度太小,不足以使管件充分变形;最佳介质高度为自由胀形区高度加上管件最大胀形高度的两倍;最大胀形高度大于等于 5mm 时,增加值可向上浮动 2~3mm;变形量增大,填充合适的介质高度,能提高变形均匀性,也可防止介质顶端失效。

参考文献

[1] 杨合,李落星,王渠东,等.轻合金

成形领域科学技术发展研究[J].机械工程学

报,2010,46(12):31-42.

YANG He, LI Luoxing, WANG Qudong, et al. Research on the development of advanced forming for lightweight alloy materials area[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 31-42.

[2] 苑世剑,韩聪,王小松.空心变截面构件内高压成形工艺与装备[J].机械工程学

报,2012,48(18):21-27.

YUAN Shijian, HAN Cong, WANG Xiaosong. Hydroforming processes and equipments of hollow structures with various sections[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 21-27.

[3] PSYK V, RISCH D, KINSEY B L, et al. Electromagnetic forming—A review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(5): 787-829.

[4] BALANETHIRAM V S, HU X Y, ALTYNOVA M, et al. Hyperplasticity: Enhanced formability at high rates[J]. Journal

of Materials Processing Technology, 1994, 45(1-4): 595-600.

[5] HU X Y, WAGONER R H, DAEHN G S, et al. The effect of inertia on tensile ductility[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1994, 25(12): 2723-2735.

[6] YU H P, CHEN J, LIU W, et al. Electromagnetic forming of aluminum circular tubes into square tubes: Experiment and numerical simulation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 613-623.

[7] 谢宏. 管件电磁缩径成形的有限元分析[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

XIE Hong. The finite element analysis of the electromagnetic tube-compression process[D]. Changchun: Jilin University, 2014.

[8] 范伟,莫健华,崔晓辉,等.金属管件电磁脉冲连接特性研究[J].锻压技术, 2015, 40(6): 43-49.

FAN Wei, MO Jianhua, CUI Xiaohui, et al. Research on electromagnetic pulse connection characteristics of metal tube[J]. Forging & Stamping Technology, 2015, 40(6): 43-49.

[9] 黄霞. 管件电磁成形变形分析及放电能量预测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

HUANG Xia. Deformation analysis and discharge energy forecast of tube electromagnetic forming[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

[10] LI Z, LIU S J, LI J P, et al. Effect of coil length and relative position on electromagnetic tube bulging[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1-4): 379-387.

[11] 朱树峰. 管件电磁成形线圈结构参数的研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.

ZHU Shufeng. Research on the structural parameters of the coil in the processing of tube

electromagnetic forming[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018.

[12] 邱立, 余一杰, 聂小鹏, 等. 管件电磁胀形过程中的材料变形性能问题与电磁力加载方案[J]. 电工技术学报, 2019, 34(2): 212-218.

QIU Li, YU Yijie, NIE Xiaopeng, et al. Study on material deformation performance and electromagnetic force loading in electromagnetic tube expansion process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(2): 212-218.

[13] 赵健, 莫健华, 崔晓辉, 等. 管件电磁渐进胀形的数值模拟及成形均匀性[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(5): 92-99.

ZHAO Jian, MO Jianhua, CUI Xiaohui, et al. Research on numerical simulation and forming uniformity of electromagnetic incremental tube bulging[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2012, 19(5): 92-99.

[14] CUI X H, MO J H, LI J J, et al. Tube bulging process using multidirectional magnetic pressure[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(5-8): 2075-2082.

[15] BELHASSEN L, KOUBAA S, WALI M, et al. Experimental and numerical investigation of flexible bulging process of aluminum

AA1050-H14 sheet metal with soft tools[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(9-12): 4837-4846.

[16] 曹增强, 余公藩. 基于有限元分析的应力波调制器结构设计[J]. 机械强度, 1999, 21(2): 106-108.

CAO Zengqiang, SHE Gongfan. The structure design of stress wave focussing means using finite element analyses[J]. Journal of Mechanical Strength, 1999, 21(2): 106-108.

[17] 张东赫. 轻量化电磁铆枪研制与铆接工艺试验[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

ZHANG Donghe. Development of lightweight electromagnetic riveter and riveting process experiment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[18] 刘再德, 王冠, 冯银成, 等. 6061铝合金高应变速率本构参数研究[J]. 矿冶工程, 2011, 31(6): 120-123.

LIU Zaide, WANG Guan, FENG Yincheng, et al. High-strain-rate constitutive parameters of 6061 aluminum alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2011, 31(6): 120-123.

[19] LIU J G, WANG Z J. Prediction of wrinkling and fracturing in viscous pressure

forming (VPF) by using the coupled deformation sectional finite element method[J]. Computational Materials Science, 2010, 48(2): 381-389.

[20] SHERGOLD O A, FLECK N A, RADFORD D. The uniaxial stress versus strain response of pig skin and silicone rubber at low and high strain rates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(9): 1384-1402.

[21] 卢永进. 管件电磁成形均匀性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.

LU Yongjin. Research on uniformity of tube electromagnetic forming[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

[22] OUYANG S W, WANG C, LI C X, et al. Improving the uniformity and controllability of tube deformation via a three-coil forming system[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(5-6): 1533-1544.

[23] 凡晓波, 王旭刚, 陈险烁, 等. 铝合金管材超低温介质压力胀形行为[J]. 锻压技术, 2021, 46(4): 1-6.

FAN Xiaobo, WANG Xugang, CHEN Xianshuo, et al. Behavior of ultra-low temperature medium bulging for aluminum alloy tube[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(4): 1-6.

Research on Deformation Law of 6061 Aluminum Alloy Tube Formed by Medium Bulging Process With Magnetic Pulse Impacting

XU Junrui^{1,2,3}, LI Yi¹, WANG Yuyang¹, ZHAO Yudong¹, WANG Yuanfeng¹,
WANG Qiangkun¹, YAN Liangming³

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

2. Engineering Research Center of Advanced Light Metal Materials Development and Processing Protection, Ministry of Education, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

3. Inner Mongolia Key Laboratory of Light Metal Materials, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

[ABSTRACT] 6061 aluminum alloy tube was taken as the research object, the simulation software ANSYS was used to establish the finite element model of electromagnetic field and deformation field. The deformation laws of height variation, thickness reduction, stress and strain distribution, deformation uniformity in tube bulging process were analyzed. The results show that the serious thickness reduction and inhomogeneity of axial deformation are improved by medium bulging process with magnetic pulse impacting, and deformation contours enlarges and uniform deformation length increases compared with traditional magnetic pulse bulging. The bulging height has a linear relationship with the discharge energy. Changes of deformation uniformity is small with discharge energy at constant medium height. Medium height increases with the increase of tube deformation. Appropriate medium height can enhance the uniformity of tube, improve the sticking die at round corner and avoid medium failure.

Keywords: 6061 aluminum alloy; Magnetic pulse forming of tube; Numerical simulation; Discharge energy; Medium height (责编 七七)