

铝合金板材脉冲电磁力调形研究

龙安林, 王文平, 方春平, 吴向东, 万敏

(北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要:为促进铝合金板材在脉冲电磁力作用下调形方法的工艺化, 研制了调形设备, 满足了规格小于等于 1500 mm×800 mm×6 mm 的试件调形要求。基于此设备, 研究了电磁力调形道次对 2198-T3 铝合金试件形貌和曲率半径的影响。采用平面螺旋电磁线圈对试件进行不同道次的调形试验, 结果显示原始平直状态的试件经过调形后呈现出双曲率的曲面特征。随着调形道次的增加, 试件曲率半径减小, 弯曲变形量增大, 其变形量随调形道次的增加而趋于饱和。

关键词:铝合金板材; 脉冲电磁力; 调形道次; 曲面特征

中图分类号: TG391

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)12-3721-07

脉冲电流通过电磁线圈时会与线圈临近的导体中感应出涡流, 涡流与磁场共同产生脉冲波形式的电磁力作用于导体。脉冲电磁力的实质是对导体起排斥作用的洛伦兹力, 作用时间通常为微秒级^[1]。涡流的趋肤效应使得脉冲电磁力仅作用于导体的表层区域, 研究时可将其等效成作用于导体表面的面载荷^[2], 峰值压力可以达到 300~500 MPa^[1]。

国内外相关研究者以脉冲电磁力为基础研究了电磁成形^[3-5]、电磁连接^[6,7]、电磁校形^[8,9]、电磁裁剪^[10]以及电磁表面处理^[11,12]等工艺。目前, 研究者对于脉冲电磁力的应用研究还在继续。吴向东等^[13]提出了一种将脉冲电磁力应用于蒙皮壁板类试件的电磁脉冲强化和调形方法, 并通过对 2024-T3 铝合金进行试验, 验证了该方法的可行性。在此基础上, Wang^[14]等研究了橡胶垫层厚度、电容器组放电电压对调形试件曲率半径的影响。结果显示, 利用该方法进行蒙皮壁板类试件调形时必须在试件与球面钉头垫模之间添加橡胶垫层, 以防止试件由于局部变形产生凹坑, 保证表面质量。试件曲率半径随橡胶垫层厚度增加而增加, 随电容器组放电电压增加而减小。这种基于球面钉头垫模的脉冲电磁力调形方法耦合了电磁场、脉冲电磁力场、球面钉头垫模约束力场等物理场, 体现多重学科交叉应用, 具有极大的科研价值。

本研究参考文献[11-14]研制了铝合金板材脉冲电磁力调形设备, 可实现电磁线圈在复杂运动路径下对规格小于等于 1500 mm×800 mm×6 mm 的铝合金板材进行多道次脉冲电磁力调形。以规格为 900

mm×150 mm×1.6 mm 的 2198-T3 铝合金板材为研究对象进行脉冲电磁力调形试验, 分析平面螺旋电磁线圈诱发的脉冲电磁力对调形试件的影响。实验中脉冲电磁力的调形道次定义为脉冲电磁力对试件单位面积的打击次数。研究结果为脉冲电磁力调形方法的工艺化及工艺参数优化提供依据, 也扩展了脉冲电磁力的应用范围。

1 调形设备

1.1 结构设计

图 1 所示为运用三维 CAD 软件 CATIA 建立的设备三维模型。设备主要由电磁线圈、可移动框架、板材夹头、底部支撑基座、电器元件柜、控制面板以及其余运动执行、检测部件组成。设备主体采用立式上下结构, 线圈具有 x 、 y 、 z 3 个方向的运动自由度。考虑到板材脉冲电磁力调形过程中会有高电压、大电流、大噪声以及脉冲振动等危险因素, 电器元件柜与控制面板采用分离式结构设计以确保试验安全进行。

脉冲电磁力调形过程中, 板材在夹头的作用下保持静止, 线圈可按照不同的运动轨迹遍历板材。如图 2 所示, 在工作平台上放置球面钉头垫模以及铝合金板材试件之后, 线圈可在板面上沿直线轨迹或者圆弧轨迹运动。对于非规则轨迹, 设备可以通过控制每一步位移增量的方式实现。线圈产生的脉冲电磁力仅作用在设备上部的闭式框架内, 框架以外的结构不承受工作载荷。闭式受力结构提高了结构刚度, 可有效抑制设备在调形过程中产生的振动。

收稿日期: 2016-12-18

基金项目: 国家重点基金研究发展计划 (“973” 计划) (2011CB012800, 2011CB012804)

作者简介: 龙安林, 男, 1990 年生, 博士生, 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191, 电话: 010-82338613, E-mail: anlinlong@buaa.edu.cn

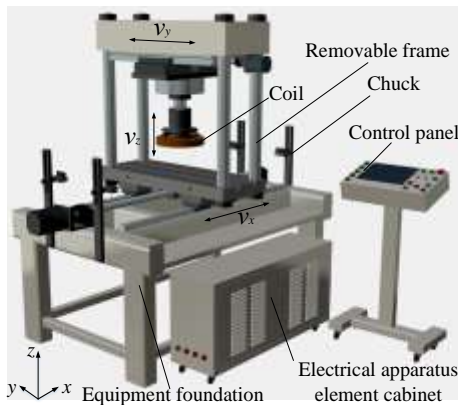


图 1 调形设备三维模型

Fig.1 Three-dimensional model of figuration adjustment equipment

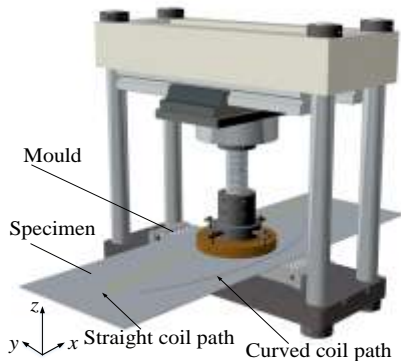


图 2 调形设备工作示意图

Fig.2 Work schematic diagram of figuration adjustment equipment

1.2 运动控制

电磁线圈在 xoy 水平面内的运动轨迹由 S7-200 PLC 控制两个步进电机实现，定位精度通过光栅尺测量， z 向进给则通过旋转双向螺杆实现。通常情况下，精度是指实际值与期望值之间的一致性，误差是精度的量化指标。手控机床生产的零件，其精度取决于机床精度和工人操作水平。数控机床生产的零件，其精度则主要取决于机床精度。机床误差按其产生原因可分为准静态误差与动态误差，前者包括几何误差、热变形误差等，约占机床总误差的 70%，后者包括机械结构振动误差、控制器误差等^[15]。定位误差作为机床误差的一种表现形式，是研究者的工作重点。文章结合设备实际工况，考虑由丝杠几何误差、电机驱动器分辨率和 PLC 脉冲输出质量引起的线圈定位误差，并

编写运动控制算法。

以电磁线圈圆弧运动轨迹为例，说明其运动控制算法，图 3 所示算法流程。首先输入圆弧轨迹的圆心坐标 (x_c, y_c) 、曲率半径 r 、起始角 α （以 x 轴正向为基准，逆时针为正）、终止角 β （以 x 轴正向为基准，逆时针为正）以及轨迹等分数 n 对于轨迹进行初始化。线圈每一步进给前，PLC 根据输入的参数计算下一个目标调形位置的理论坐标，再将理论坐标 (x_i, y_i) 与光栅尺实测的线圈当前坐标 (x_{cur}, y_{cur}) 做差，得出线圈进给的位移增量 (Δ_x, Δ_y) 。PLC 根据步进电机的脉冲当量 (T_x, T_y) 将位移增量转换成对应数量的脉冲 (P_x, P_y) ，并传输给步进电机驱动器，实现线圈的自动进给。脉冲发送完成后，PLC 将光栅尺反馈的位置与预设目标对比，得到定位误差 (E_x, E_y) ，若达到给定精度 (ϵ_x, ϵ_y) ，则本次定位结束，否则补发脉冲，直至符合定位精度。当 $0 \leq i \leq n$ 时重复上述过程。

通过触摸屏设置圆弧轨迹参数，对线圈定位精度进行检测。轨迹圆心坐标设定为 $(500 \text{ mm}, 250 \text{ mm})$ ，曲率半径 $r=250 \text{ mm}$ ，起始角 $\alpha=0^\circ$ ，终止角 $\beta=360^\circ$ ，等分数 $n=6$ ，定位精度设置为 0.02 mm 。表 1 所示为轨迹各个定位点的预期坐标、实测坐标及误差。

从表 1 可以看出，上述以光栅尺采集的位置信号为基准并通过补发脉冲进行误差补偿的运动控制算法能有效保证线圈的定位精度。线圈每次定位前均采用下一预期坐标与当前实测坐标做差求解运动距离和对应的步进电机脉冲数，其定位误差不会随着定位次数的增加而累积。对比两轴定位精度可知， x 轴定位精度略高于 y 轴定位精度，其原因是两轴分别使用了不

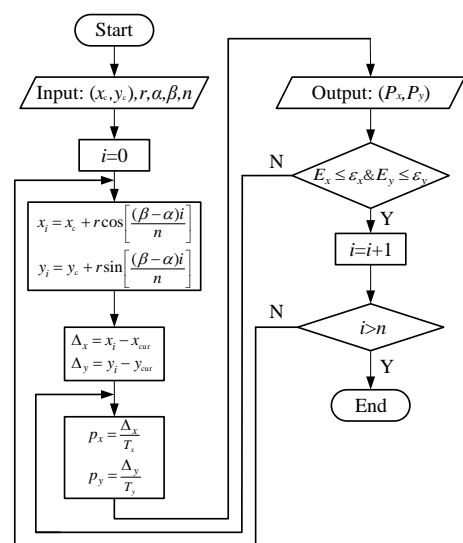


图 3 线圈定位控制算法

Fig.3 Control algorithm of coil positioning

表 1 线圈定位精度

Table 1 Precision of coil positioning (mm)

No.	Expected coordinate	Measured coordinate	Error
1	(750.000, 250.000)	(750.010, 249.995)	(-0.010, 0.005)
2	(625.000, 466.506)	(624.990, 466.490)	(0.010, 0.016)
3	(375.000, 466.506)	(374.995, 466.500)	(0.005, 0.006)
4	(250.000, 250.000)	(249.995, 250.020)	(0.005, -0.020)
5	(375.000, 33.494)	(375.005, 33.505)	(-0.005, -0.011)
6	(625.000, 33.494)	(625.005, 33.500)	(-0.005, -0.006)
7	(750.000, 250.000)	(750.005, 249.990)	(-0.005, 0.010)

同型号的步进电机和配套的驱动器，存在固有的分辨率差异。对于微量的补偿脉冲，y 轴电机不能有效地执行，导致了定位精度的微小差异。因此，运动控制算法可改善设备的定位精度，不能完全弥补硬件固有缺陷产生的误差。

2 调形试验

试验在自行研制的脉冲电磁力调形设备上进行，如图 4a 所示。球面钉头垫模结构如图 4b 所示，采用 6 行 8 列的排列方式，钉柱横截面积 30 mm×30 mm，钉头球面曲率半径为 35 mm。电磁线圈采用圆形螺旋线圈，如图 4c 所示，有效直径 60~250 mm，铜导线共 23 匝，导线截面尺寸规格为 1.7 mm×6.3 mm。放电设备中电容器组总电容 2400 μF，最大储能为 20 kJ。

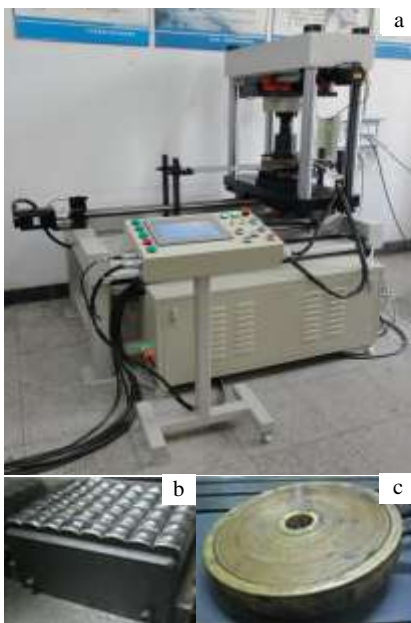


图 4 调形设备、球面钉头垫模与电磁线圈

Fig.4 Figuration adjustment equipment (a), mould with spherical nails (b) and electromagnetic coil (c)

板材脉冲电磁力调形如图 5 所示。板材在其长度方向水平拉力 F 的作用下保持平直状态。球面钉头垫模与板材之间铺有橡胶垫，以改善电磁调形板料的表面质量。在板材宽度方向，安装时保证电磁线圈、板材以及橡胶垫的对称面重合，该对称面与球面钉头垫模对称面间距为 D (mm) (图 5 中的 A 向视图)。给定 D 值之后，电磁线圈、橡胶垫和球面钉头垫模沿板材长度方向同步运动，每次进给量为 S (mm)。通过设置不同的间距 D 和进给量 S 就可以得到板材在不同脉冲电磁力调形道次作用下的试验结果。

试验方案如表 2 所示。电容器组的充电电压选择 1800 V。试件选用规格为 900 mm×150 mm×1.6 mm 的 2198-T3 态铝合金，橡胶垫厚度为 1.5 mm。

3 结果与讨论

3.1 电磁力分布

电磁力分布与电磁线圈的几何形貌有关，同时也受到线圈和板料相对尺寸关系的影响^[16,17]。本研究运用通用有限元软件 ANSYS 分析脉冲电磁力分布情况。电路分析中采用 CIRCU124 单元构建双回路模型，参考文献[18,19]进行电参数设置，如表 3 所示，线圈电流随时间的变化曲线如图 6 所示。从图中可以看出，线圈中的电流在 300 μs 时达到最大值 10026.4 A。

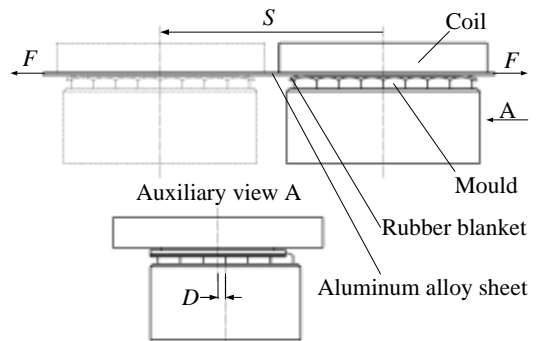


图 5 调形试验示意图

Fig.5 Schematic diagram of figuration adjustment test

表 2 试验方案

Table 2 Test protocol

Test	S/mm	D/mm
a	30.0	0.0
b	15.0	0.0
c	15.0	+7.5
		-7.5

表 3 双回路模型电参数

Electrical parameter	Value
Capacitance/F	2.4×10^{-3}
Discharge voltage/V	1800
Circuit resistance/ Ω	8.9×10^{-2}
Coil inductance/H	2.4×10^{-5}
Sheet resistance/ Ω	2.8×10^{-5}
Sheet inductance/H	1×10^{-5}
Mutual inductance/H	3.07×10^{-7}

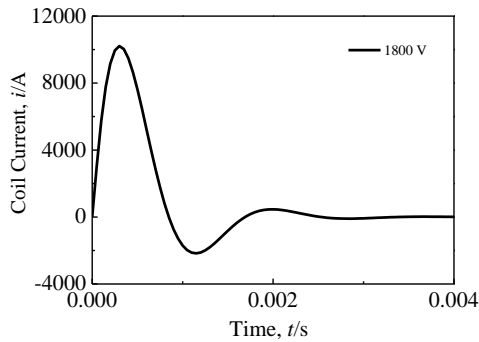


图 6 线圈电流随时间变化曲线
Fig.6 Coil current versus time

脉冲电磁力分析有限元模型如图 7 所示，图中仅展示了电磁线圈和铝合金板材。采用规格为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ 的六面体 SOLID97 单元对板材实体进行网格划分。以图 6 所示电流为激励，计算板材电磁力。图 8 所示为板材临近线圈表层单元在 $300 \mu\text{s}$ 时刻的垂直板面电磁力分布。过板材对称中心，沿长度方向定义路径 x_1x_2 ，沿宽度方向定义路径 y_1y_2 。电磁力沿 x_1x_2 、 y_1y_2 路径的分布情况如图 9 所示。

结合图 7、图 8 及图 9 可以看出，在 x 方向上板材尺寸大于线圈直径，最大电磁力出现在线圈半径的 $1/2$ 处，其值为 3.7 N 。在 y 方向上，板材尺寸小于线圈直径，涡流产生聚集，使得峰值电磁力增加到 16.6 N ，约为 x 方向最大电磁力的 4.5 倍。同时，涡流聚集增大了电磁力变化梯度，降低了电磁力分布的均匀性。

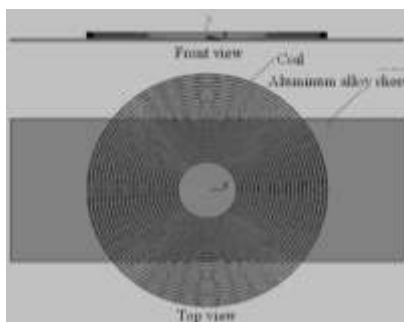


图 7 电磁力分析有限元模型

Fig.7 Finite element model for electromagnetic force analysis

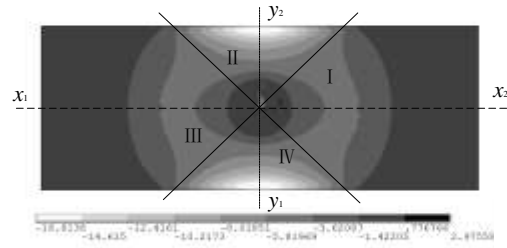


图 8 板材表层电磁力分布

Fig.8 Distribution of electromagnetic force on surface layer

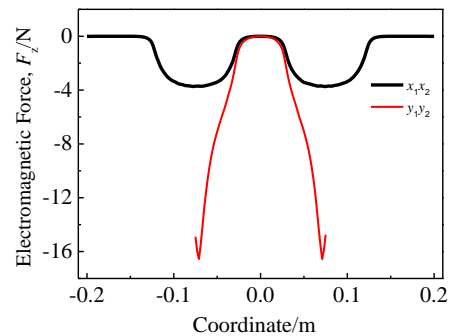


图 9 电磁力沿路径 x_1x_2 及 y_1y_2 分布

Fig.9 Distribution of electromagnetic force along path x_1x_2 and y_1y_2

3.2 试件形貌及曲率半径分布

图 10 所示为板材脉冲电磁力调形试件，图中试件编号与表 2 中方案编号对应。从图中可以看出，原始平直状态的试件在经过脉冲电磁力调形后向球形钉头垫模一侧弯曲。

沿试件上表面长度方向中心线提取试件的轮廓，绘制如图 11 所示曲线。结合表 2 可知，与方案 a 相比，方案 b 的脉冲电磁力调形道次增加了 1 倍，试件最大变形量由 24.0 mm 增加到 35.2 mm 。方案 c 的脉冲电磁力调形道次比方案 b 又增加了 1 倍，所得试件最大变形量为 38.4 mm ，较方案 b 仅增加了 3.2 mm 。

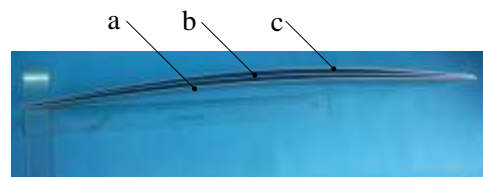


图 10 调形试件

Fig.10 Specimens after figuration adjustment

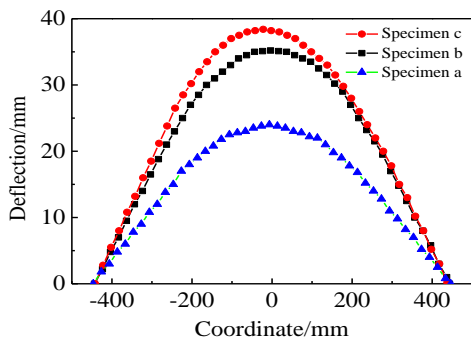


图 11 试件长度方向中心线的挠度

Fig.11 Deflection along the center line of specimens in length direction

为了获取试件上更多曲面、曲线信息，使用手持式 HANDYSCAN 三维扫描仪将试件轮廓扫描成点云，然后利用三维 CAD 软件 CATIA 通过点云生成 STL (stereo lithography) 格式的三维模型。三维模型用于观察试件的整体形貌，而试件的局部特征则可以运用 CATIA 的曲率分析功能对局部点云进行分析得到。在试件上表面沿长度方向和宽度方向分别截取 3 条截面线进行曲率半径分析，试件长度方向截面线为 S1、S2 和 S3，宽度方向截面线为 S4、S5 以及 S6。图 12 所示为试件 a 的 STL 三维模型与截面线分布示意图。

图 13 为试件 a 的整体模型及其截面线 S2、S4、S5、S6 的曲率半径 R (mm) 分布，其中 R_{max1} 和 R_{max2} 分别表示截面线两端曲率半径的极大值， R_{min} 表示曲率半径的极小值，图中与试件表面垂直的线段长短表示该点曲率半径幅值。从图中可以看出，试件 a 各截面线的曲率半径呈现出中间小、两端大的分布规律。试件在经过脉冲电磁力调形之后具有双曲率的曲面特征。采用同样的方式对试件 b 和试件 c 进行分析，其形貌与曲率半径分布规律与试件 a 类似。

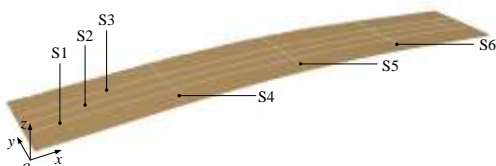


图 12 试件 a 模型与截面线分布

Fig.12 Scanned model of specimen a and distribution of section curves

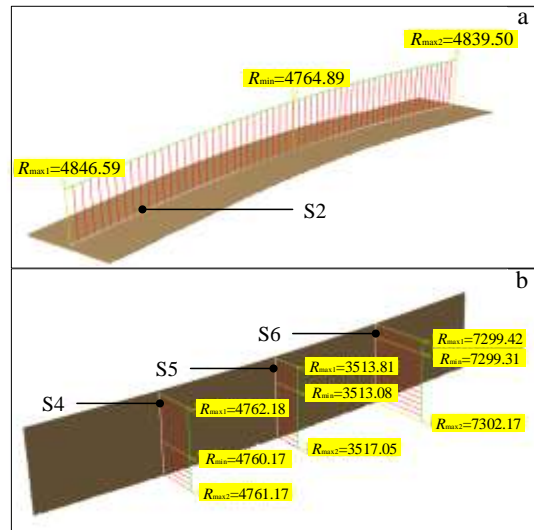


图 13 试件 a 模型与曲率半径分布

Fig.13 Scanned model of specimen a (a) and distribution of curvature radius (b)

各试件不同截面线上曲率半径最大值 R_{max} (mm) 和曲率半径变化率 δ 如表 4 所示。曲率半径最大值及其变化率分别定义为：

$$R_{max} = \max(R_{max1}, R_{max2}) \quad (1)$$

$$\delta = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{min}} \times 100\% \quad (2)$$

结合表 2 所示试验方案，对表 4 中的数据分析可知，随着脉冲电磁力调形道次的增加，试件各截面线的曲率半径均减小，长度方向截面线 S1、S2、S3 的曲率半径变化率显著增大，宽度方向截面线 S4、S5、S6 的曲率半径变化率略有增大，长、宽方向截面线曲率半径差异减小。对于同一试件，沿其长度方向截面线上的曲率半径变化大，而沿宽度方向截面线上的曲率半径变化小。

3.3 讨论

分析上述试验结果可知，在相同的电磁参数下，随着电磁调形道次的增加板材变形量不断增加、曲率半径逐渐减小，但是变形量增加的幅值和曲率半径减小的幅值并不与脉冲电磁力调形道次呈比例关系。理论上，当在相同的脉冲电磁力作用下，仅仅改变电磁调形道次，即仅增加电磁力打击次数，板件的曲率半径应该存在一个最小的极限值，后续将通过试验获得这一极限值。

由图 13 以及表 4 可知，试件在脉冲电磁力调形作用下表现出双曲率特征。在脉冲电磁力调形过程中，

表 4 试件曲率半径分布

Table 4 Distribution of curvature radius of specimens

Specimen	Section curve	R_{\max}/mm	R_{\min}/mm	$\delta/\%$
a	S1	5068.52	4681.44	8.27
	S2	4846.59	4764.89	1.71
	S3	4976.37	4668.48	6.60
	S4	4762.18	4760.17	0.04
	S5	3517.05	3513.08	0.11
	S6	7302.17	7299.31	0.04
b	S1	3499.67	3030.02	15.50
	S2	3468.94	3086.82	12.38
	S3	3369.04	3142.49	7.21
	S4	3566.83	3564.29	0.07
	S5	2848.70	2845.45	0.11
	S6	4743.65	4742.03	0.03
c	S1	3041.36	2340.33	29.95
	S2	2826.40	2406.76	17.44
	S3	2770.86	2445.60	13.30
	S4	2840.40	2837.73	0.09
	S5	2567.93	2564.64	0.13
	S6	4831.82	4829.67	0.04

当试件长、宽方向的尺寸均大于线圈直径时，脉冲电磁力的等值线是同心圆，而垫模采用的球面钉头施加给试件的约束力也是周向等值分布，因此脉冲电磁力调形后试件具有球面外形倾向。当试件宽度方向尺寸小于线圈尺寸时，根据图 8 可知宽度方向上电磁力由于涡流聚集而增大，但在各个区域（I、II、III、IV）内的脉冲电磁力仍可近似认为是周向等值分布，最终试件具有双曲率的曲面特征。但是由于试件宽度仅为 150 mm，在这些曲率半径下弧高最大约为 1 mm，因此从宏观上来看试件呈现出长度方向的单曲率形貌。

脉冲电磁力调形时，由于线圈中心的进给量远小于线圈的直径，试件同一区段会受到脉冲电磁力的重复打击。对于同一试件，其中间区段的脉冲电磁力调形道次多于试件端部的调形道次，在试件内产生区域调形道次差异，使得试件中部的曲率半径小，端部曲率半径大。对于不同试件，通过改变线圈的进给量调节试件的整体调形道次，线圈的进给量越小，调形道次越多，在试件间产生整体调形道次差异，使得整体调形道次多的试件曲率半径小，调形道次少的试件曲率半径大。试件整体调形道次的增加会增大试件区域调形道次差异，使得试件的曲率半径变化率增加。通过改变线圈进给量和运动轨迹的方式增加试件的脉冲电磁力的调形道次，可以降低试件各位置、各方向受力的不均匀性，缩小试件曲率半径在不同区域、不同方向上的差异，最终趋于等径球面。

4 结 论

1) 设备的定位精度由硬件机械特性和运动控制算法共同决定。在固有硬件的基础上，通过调整运动控制算法可以提高定位精度。

2) 平直铝合金试件经过脉冲电磁力调形后向球面钉头垫模一侧弯曲，弯曲变形量随调形道次的增加而增加。但二者之间均不存在正比例关系，弯曲变形量随脉冲电磁力调形道次增加而趋于饱和。

3) 使用平面螺旋电磁线圈进行脉冲电磁力调形时，试件呈现出双曲率的曲面特征，曲率半径随着调形道次的增加而减小。

参考文献 References

- [1] Li Chunfeng(李春峰). *High Energy Rate Forming*(高能率成形技术)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 2
- [2] Takatsu N, Kato M, Sato K *et al. Jsmc International Journal*[J], 1988, 31(1): 142
- [3] Kamal M, Shang J, Cheng V *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 190(1-3): 41
- [4] Batygin Y V, Golovashchenko S F, Gnatov A V. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2013, 213(3): 444
- [5] Li Fenqiang, Mo Jianhua, Zhou Haiyang *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2013, 64(9-12): 1575
- [6] Kore S D, Date P P, Kulkarni S V. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2007, 34(8): 1327
- [7] Jimbert P, Eguia I, Perez I *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211(5): 916
- [8] Iriondo E, Gutiérrez M A, González B *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211(5): 909
- [9] Iriondo E, Alcaraz J L, Daehn G S *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2013, 15(2): 183
- [10] Psyk V, Risch D, Kinsey B L *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211(5): 787
- [11] Shaw J S, Johnson N A. *US Patent*, 5813265[P], 1998
- [12] Dydo J R, Yushanov S P. *US Patent*, 8253081[P], 2012
- [13] Wu Xiangdong(吴向东), Wan Min(万敏), Wang Wenping(王文平) *et al. China Patent*, ZL201310018610.X[P], 2013
- [14] Wang Wenping, Wu Xiangdong, Wan Min *et al. 6th International Conference on High Speed Forming*[C]. Daejeon, Korea: KAIST, 2014: 243
- [15] Ramesh R, Mannan M A, Poo A N. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*[J], 2000, 40(9): 1235

- [16] Kamal M, Daehn G S. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*[J], 2007, 129(2): 369
- [17] Vanbenthysen R, Thibaudeau E, Kinsey B L *et al. Journal of Manufacturing Processes*[J], 2013, 15(2): 194
- [18] Chen Xiaowei(陈晓伟). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Beijing: Beihang University, 2015
- [19] Zhang Haitao(张海涛). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010

Figuration Adjustment of Aluminum Alloy Sheet Using Pulsed Electromagnetic Force

Long Anlin, Wang Wenping, Fang Chunping, Wu Xiangdong, Wan Min
(Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to promote the figuration adjustment method of aluminum alloy sheet using pulsed electromagnetic force to a mature process, an appropriate equipment was developed, which can satisfy the figuration adjustment of sheets not larger than 1500 mm×800 mm×6 mm. The effects of figuration adjustment times on the shape and curvature radius of 2198-T3 aluminum alloy specimens were studied based on that equipment. A flat spiral coil was used to conduct the figuration adjustment experiments of specimens in different action times of pulsed electromagnetic force. The results show that the original flat specimens present double curvature surface features after figuration adjustment. Curvature radius decreases with the increase of figuration adjustment times. Deflection increases with the increase of figuration adjustment times and will reach a saturation value.

Key words: aluminum alloy sheet; pulsed electromagnetic force; figuration adjustment times; surface feature

Corresponding author: Wang Wenping, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, P. R. China, Tel: 0086-10-82338613, E-mail: wwp_2003@163.com