基于磁力控制的径向分区压边拉深工艺研究

张红升^{1,2}, 秦泗吉^{1*}, 曹丽琴², 孟林园¹, 程啸¹, 毛耀本¹

1. 燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室, 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学环境与化学工程学院, 秦皇岛 066004

* E-mail: plastics@ysu.edu.cn

收稿日期: 2020-04-26; 接受日期: 2020-06-28; 网络版发表日期: 2020-11-25

国家自然科学基金(批准号: 51675466, 51175451)和河北省自然科学基金(编号: E2018203373)资助项目

摘要 本文提出一种由永磁体提供磁力的径向分区压边方法, 可以获得更加合理的压边力分布. 根据软磁材料的特点构建了磁极单元, 通过瞬时低强度电流可以改变磁极单元的磁力状态. 拉力实验证明磁极单元可以提供足够的磁吸力, 满足压边要求. 温升实验的测量结果验证了磁极单元不会产生过热问题. 根据拉深工艺特点, 设计了基于电控永磁技术的压边装置和拉深模具, 拉深过程中施加压边力无需持续通电, 因此具有节能、安全的优点. 采用理论推导确定了径向分区压边方法的可行性, 并采用数值模拟分析了板坯上压边力的初始分布. 结果表明, 相对于整体压边, 径向分区压边施加的压边力可以作用在更大的径向区域内. 通过成形模拟进一步验证了径向分区压边方法的有效性, 压边力沿径向分布更加合理, 可以更好地控制板坯厚度的变化. 最后, 通过镀锌板的拉深实验证明电控永磁技术用于压边装置是可行的, 径向分区压边方法可以有效抑制起皱, 改善板坯成形效果.

关键词 拉深成形, 磁路设计, 压边力, 径向分区压边, 起皱

1 引言

起皱和破裂是板坯拉深成形过程中常见的两种缺陷. 影响成形缺陷的因素很多, 如材料特性、摩擦条件和压边力(blank holding force, BHF)等. 对于进入实际制造阶段的拉深成形, 压边力通常是主要的控制参数. 压边力不足可能使法兰区因周向压缩应力过大导致起皱; 压边力太大又将过多地限制板坯平面内金属的合理流动, 增加成形件破裂的风险^[1].

多年来, 针对压边力的研究, 主要集中在预测和控制压边力曲线^[2], 设计新的压边装置和压边力加载方

式, 并获得更合理的压边力分布^[3~5].

传统压边方法中, 根据压边力的动力来源, 大体上可将压边装置分为机械式^[6,7]和液压式^[8]. 机械式压边方法中, 刚性压边通过压力机的行程和位移来限定压边力, 精度不高; 弹性压边通常借助橡胶等弹性体来传递力, 由于弹性体的压缩量只能单调递增, 导致压边力一般也只能随拉深行程单调增大. 液压式压边通过液压系统实现对压边力的控制, 但控制响应速度慢, 且系统较为复杂, 成本较高. 为了提高板材的成形质量, 还开发了很多新的压边方法, 如同步电机与多杆机构组成的复合型压边技术^[9], 使机械压力压边具有

引用格式: 张红升, 秦泗吉, 曹丽琴, 等. 基于磁力控制的径向分区压边拉深工艺研究. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 388–398

Zhang H S, Qin S J, Cao L Q, et al. Deep drawing with radial segmental blank holder based on magnetic control (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 388–398, doi: [10.1360/SST-2020-0174](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0174)

部分柔性化的特点^[10].

近些年来, 随着电磁技术在成形工艺中的应用, Seo^[11]首次提出了采用电磁力作为压边力的方法, 并基于传统机械式压力机, 设计了一种可以有效提高成形质量的电磁压边圈. Lai等人^[12]提出了更先进的脉冲电磁压边系统, 利用短时的高强度脉冲电流可以获得更大的电压边力. 采用脉冲电磁场极大地减小了压边装置的尺寸, 缓解了电磁压边装置发热量较大的问题. 在此基础上, Huang等人^[13,14]提出了基于脉冲电磁斥力的更高效、更节能电磁压边系统. 脉冲电磁力是由脉冲电磁场和涡电流之间的交互作用产生的, 磁感应强度分布更均匀, 漏磁大幅度减少, 可极大地降低压边装置的规模和建造费用. 针对电磁压边装置的温度控制, 李昊等人^[15,16]从基础理论、成形工艺和模具技术等方面对电磁压边技术进行了深入的研究, 并在有效控制励磁电流的基础上, 开发了针对传统拉深工艺的电磁压边系统. Cao等人^[17]研究了降低电磁成形中线圈温升的方法, 可以应用在电磁压边系统中.

电控永磁技术(electro-permanent magnet, EPM)^[18]是近年来广泛应用于工业领域^[19,20]的一种磁力控制方法, 具有安全、可控的优点. 鉴于电控永磁技术在磁力控制方面的优点, 本文将此技术引入压边系统的设计中, 并与分区压边技术相结合, 提出了一种节能、可控的由永磁体提供磁力的径向分区压边方法. 新方法只需要在施加和卸载压边力的瞬间通入短时低强度电流, 而在拉深过程中无需持续通电. 通过理论分析、数值模拟和实验等手段对基于电控永磁技术的新压边方法的有效性进行了验证. 同时, 将提出的径向分区压边方法与整体压边方法进行了对比, 实验结果表明, 径向分区压边方法的成形效果优于整体压边.

2 磁路工作原理及磁极单元设计

2.1 电路设计

永磁材料根据其闭合磁滞回线围成的面积分为硬磁材料和软磁材料. 硬磁材料具有非常大的磁滞回线面积, 磁性非常稳定, 是理想的永磁体. 软磁材料的磁滞回线面积非常狭窄, 较易磁化, 也容易退磁, 只需要很小的一个外部激励磁场就可以改变软磁体的磁极方向.

类似于传统电磁技术, 电控永磁技术的磁路中, 需

要借助外部电流的正接和反接来改变软磁体的极性, 从而调整磁力吸盘处于有磁状态, 还是不对外显磁的无磁状态.

图1(a)为常规电磁技术的电路控制示意图. 单刀开关闭合时构成闭合回路, 直流电流流经负载线圈产生稳定的电磁场. 单刀开关打开时回路断开, 电磁场消失. 图1(b)为简化后的电控永磁技术的电路控制图. 将单刀开关1接通n1端, 开关2接通p2端, 此时电流以正向流过负载线圈, 产生的电磁场使得电控永磁的磁路处于充磁状态. 当把两个开关分别接通n2和p1端时, 电流反方向通过线圈负载, 磁路处于消磁状态.

2.2 磁路及磁极单元设计

为了使压边装置能较好地应用于传统压力机上, 并最大限度提高磁力等级, 根据图1(b)所示, 电路设计的磁场发生单元(磁极单元)采用矩形截面. 图2为包含4个磁极单元的结构示意图. 硬磁材料NdFeB制作的主磁体1和导磁性较好的纯铁制作的极芯3位于上层, 软磁材料AlNiCo制作可逆磁体2及缠绕其上的线圈绕组4位于下层. 制作磁力吸盘时, 需要将上述部件用隔磁

图1 (网络版彩图)电路结构示意图. (a) 电磁技术; (b) 电控永磁技术

Figure 1 (Color online) Circuit structure diagram. (a) Electromagnetic technology; (b) EPM technology.

图2 (网络版彩图)4磁极单元的结构示意图

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of four magnetic pole units.

的环氧树脂密封于兼做磁轭的钢壳中。

磁极单元都是成对工作的, 为了验证所设计磁路的有效性, 采用图3所示的2磁极单元来阐述磁路的工作原理。如图3(a)所示, 向绕组4中通入瞬时的低强度电流, 基于软磁材料的特性, 电流产生的短时电磁场可以很轻易地改变可逆磁体2的极性, 使可逆磁体2的顶部和毗邻的主磁体1具有相同的极性, 此时记为充磁状态。由于磁极单元结构的限制, 两种永磁体N极发出的磁场线, 只能经由导磁性的被吸板才能归于S极, 形成闭合磁路。此时, 由于磁力作用, 被吸板被磁极单元紧紧吸住。由于磁力是由永磁体产生的, 断电后磁力不会消减, 因此没有断电失磁的风险。

如图3(b)所示, 向线圈绕组中通入反向电流, 翻转可逆磁体2的极性方向。断电后, 磁场线在磁极单元内部构成闭合回路, 对外几乎不表现出磁性, 将此标记为消磁状态。被吸板和磁极单元之间几乎没有磁力。

2.3 磁极单元磁路分析

为了验证所设计磁路的合理性和有效性, 采用Ansys软件对图3所示的2磁极单元进行磁场分析, 材料属性见表1, 分析所得磁感应强度结果见图4。从图4(a)可以看出, 充磁状态下大量的磁场线在被吸板中叠加, 使得被吸板获得较大的磁感应强度, 可被磁极单元牢

固吸住。如图4(b)所示, 消磁状态下, 永磁体发出的磁场线高密度地闭合于磁极单元内部, 被吸板中磁感应强度接近为零, 磁极单元对被吸板几乎没有吸力。

为了确定磁路的实际效果, 采用图5所示的拉伸试验机对断开电源后的4磁极单元进行拉伸试验, 记录拉力随拉伸距离的变化, 结果见图6。可以看出, 采用所设计磁路的4磁极单元最大磁力超过了16 kN, 单位面积上约为1.6 MPa, 完全能够满足拉深工艺的压边需求。

表1 磁场分析的材料属性

Table 1 Material properties of magnetic field analysis

特性	材料				
	NdFeB	AlNiCo	硅钢	纯铁	空气/树脂
矫顽力 (kA/m)	928	59	0	0	—
相对磁导率	1.05	17.05	9000	4000	1

图4 (网络版彩图)2磁极单元磁场磁感应强度分析结果。(a) 充磁; (b) 消磁

Figure 4 (Color online) Magnetic flux density distribution of two magnetic pole units. (a) Magnetization; (b) demagnetization.

图3 (网络版彩图)磁极单元磁路结构示意图。(a) 充磁; (b) 消磁

Figure 3 (Color online) Magnetic circuit of magnetic pole units. (a) Magnetization; (b) demagnetization.

图5 (网络版彩图)磁力测量试验

Figure 5 (Color online) Magnetic force measurement test.

2.4 磁极单元温升实验

采用图7所示的测温系统记录2磁极单元在连续充/消磁操作时的温度变化. 充磁和消磁操作耗时都是0.02 s, 按照一次拉深过程需要充磁和消磁各1次进行实验. 实验分别测量了1次拉深周期 T 为2和4 s时最高温度随时间的变化, 结果见图8. 可以看出, 经历初始阶段的快速升高后, 温度变化逐渐变缓. $T = 2$ s时, 经历180 min连续拉深操作后, 磁极单元最高温度也不到70°C. 而 $T = 4$ s时, 更是只有42.8°C, 完全满足拉深工艺要求. 从图8中所示模拟结果云图中可以看出, 最高温度位于两个磁极单元的对立面上.

3 拉深模具及磁力吸盘设计

3.1 拉深模具设计

图9是针对传统压力机设计的倒装拉深模具. 磁力

图 6 (网络版彩图)磁力测量结果

Figure 6 (Color online) Magnetic force measurement results.

图 7 (网络版彩图)温度测量系统

Figure 7 (Color online) Temperature measuring system.

吸盘与压边圈组成磁力吸盘, 氮气弹簧仅用于平衡磁垫自重, 在拉深过程中几乎不提供任何压边反力.

拉深时, 压力机滑块带动上部部件向下移动, 当凹模与磁垫上的成形板坯接触时, 通过电流控制器向磁垫中通入瞬时电流, 使得磁垫处于充磁状态. 在磁力的作用下, 板坯被凹模和压边圈压紧. 随后凹模继续下行, 完成拉深成形.

滑块到达下止点后开始回程, 磁垫在磁吸力的作用下随行, 并带动成形件从凸模上逐渐脱离. 当成形件即将完全脱落时, 磁垫反向通电进行消磁. 然后, 上部部件随滑块返回, 磁垫在氮气弹簧和限位螺栓的共同作用下复位.

整个拉深过程中, 只在施加压边力的充磁操作和

图 8 (网络版彩图)磁极单元最高温度变化曲线

Figure 8 (Color online) Maximum temperature curve of magnetic pole unit.

图 9 电控永磁压边拉深模具结构简图

Figure 9 Drawing die using EPM blank holder.

卸载压边力的消磁瞬间施加电流, 压边时磁垫处于断电状态。

3.2 磁垫磁场分析

图10中所示的磁垫包含46个磁极单元, 对称布置于方形压边圈周围。根据磁力的大小, 分了16个等级, 分别对应不同的压边力等级。磁垫的结构除了尽可能大的提供磁吸力, 还应保证能够实现消磁。

图10(a)为等级为16时磁垫的磁感应强度分布, 可以看出, 磁场区的磁感应强度分布比较均匀。从分析结果中可知, 最大磁吸力约为153 kN。如图10(b)所示, 磁垫能够顺利消磁, 消磁状态下残余磁吸力不足15 N。

4 径向分区压边方法

4.1 径向分区压边方法的基本原理

通常来说, 拉深过程中, 板坯厚度从法兰外缘向凹模口呈单调递减的趋势。因此, 压边圈施加的压边力大部分都集中在法兰外缘区域内, 对起皱趋势最大的部位实施有效压边。

但实际上, 这种压边方式存在一定弊端。由于边缘厚度增加, 压边力都集中在了外缘区域, 远离外缘的内部区域获得的压边力较少。在临界失稳状态下, 由于法兰外缘区的压边力能够完全抑制起皱, 起皱将发生在内部某处缺少有效压边的位置。此时, 整体压边方法沿径向的皱纹模型可用图11(a)中的曲线表示, 压边力主要集中在法兰边缘, 而皱纹最大幅值出现在远离边缘的某一位置上。这种压边效果不理想。

为了克服这个问题, 本文提出了径向分区压边方法。将压边圈沿径向分成多个独立的同心环, 每个压

边环可以对不同的法兰径向区域实施独立的、有效的压边。理想状态下, 径向分区压边方法的皱纹模型如图11(b)所示, 当压边力分配合理时, 能够实现法兰外缘 R_t 与临界点 R_c 之间具有相同的皱纹幅值。

基于能量法的研究可知^[21,22], 板坯临界起皱状态下, 周向压缩应力对单个皱纹所做的功为

$$U_0 = -\frac{b\delta\pi^2}{4n\phi} \left(\ln \frac{R_0}{R_t} \right)^{n-1} \int_r^{R_t} \frac{(f(\rho))^2}{\rho} \left[\left(1-n \right) \left(\frac{R_t}{\rho} \right)^n - 1 \right] d\rho, \quad (1)$$

其中, $f(\rho)$ 是关于质点径向坐标 ρ 的函数:

$$f_\rho(\rho) = \begin{cases} \frac{y_0}{R_c - r}(\rho - r), & r \leq \rho \leq R_c, \\ \frac{y_0 - \lambda y_0}{R_t - R_c}(\rho - R_c) + y_0, & R_c < \rho \leq R_t, \end{cases} \quad (2)$$

式中, b 是材料的强度系数, δ 是板坯厚度, n 是应变硬化指数, ϕ 是单个皱纹波形的圆心角, y_0 是最大皱纹高度, λ 是外缘处皱纹高度和 y_0 的比值, 介于0和1之间, R_0 是板坯初始半径, R_t 和 r 分别是法兰和凹模口半径。

而皱纹隆起所需的弯曲能为

$$U_b = \frac{nb\delta^3\pi^4}{12\phi^3} \left(\ln \frac{R_0}{R_t} \right)^{n-1} \int_r^{R_t} \frac{1}{\rho^3} (f_\rho(\rho))^2 d\rho. \quad (3)$$

根据能量法, 临界状态下起皱的内能(U_0 与 U_b)与压边力施加的外部能量 U_Q 相等^[22]。因此, 可以通过内力做功计算得到临界状态下压边力做功。

在临界点 R_c 至凹模口范围内, 整体压边和径向分区压边具有相同的皱纹模型, 因此, 压边力做功的计算方法也相同:

图10 (网络版彩图)磁垫磁感应强度分布。(a) 充磁; (b) 消磁

Figure 10 (Color online) Magnetic flux density distribution of magnetic cushion. (a) Magnetization; (b) demagnetization.

图11 (网络版彩图)径向皱纹模型。(a) 整体压边; (b) 径向分区压边

Figure 11 (Color online) Radial wrinkling model. (a) Single blank holder; (b) radial segmental blank holder.

$$\begin{aligned}
U_{Q1} = & -\frac{bt\pi^2}{4n\phi_0(R_c-r)^2} \ln\left(\frac{R_0}{R_t}\right)^{n-1} \\
& \times \int_r^{R_t} \frac{(\rho-r)^2}{\rho} \left[(1-n)\left(\frac{R_t}{\rho}\right)^n - 1 \right] d\rho \\
& -\frac{nb\delta^3\pi^4}{12\phi_0^3(R_c-r)^2} \ln\left(\frac{R_0}{R_t}\right)^{n-1} \\
& \times \int_r^{R_t} \frac{(\rho-r)^2}{\rho^3} d\rho.
\end{aligned} \quad (4)$$

在 $[R_c, R_t]$ 范围内, 整体压边方法压边力做功为

$$\begin{aligned}
U_{Q2} = & -\frac{b\delta\pi^2}{4n\phi} \ln\left(\frac{R_0}{R_t}\right)^{n-1} \\
& \times \int_r^{R_t} \frac{1}{\rho} \left[\frac{y_0 - \lambda y_0}{R_t - R_c} (\rho - R_c) + \lambda y_0 \right]^2 \left[(1-n)\left(\frac{R_t}{\rho}\right)^n - 1 \right] d\rho \\
& -\frac{nb\delta^3\pi^4}{12\phi^3} \ln\left(\frac{R_0}{R_t}\right)^{n-1} \\
& \times \int_r^{R_t} \frac{1}{\rho^3} \left[\frac{y_0 - \lambda y_0}{R_t - R_c} (\rho - R_c) + \lambda y_0 \right]^2 d\rho.
\end{aligned} \quad (5)$$

分区压边方法压边力做功为

$$\begin{aligned}
U'_{Q2} = & -\frac{b\delta\pi^2 y_0^2}{4n\phi} \ln\left(\frac{R_0}{R_t}\right)^{n-1} \int_r^{R_t} \frac{1}{\rho} \left[(1-n)\left(\frac{R_t}{\rho}\right)^n - 1 \right] d\rho \\
& -\frac{nb\delta^3\pi^4 y_0^2}{12\phi^3} \ln\left(\frac{R_0}{R_t}\right)^{n-1} \int_r^{R_t} \frac{1}{\rho^3} d\rho.
\end{aligned} \quad (6)$$

因此, 径向分区压边方法与整体压边方法压边力做功的差值恒小于零.

$$\Delta U_Q = U'_{Q2} - U_{Q2} < 0. \quad (7)$$

可知为了抑制相同幅值的皱纹, 相对于整体压边, 径向分区压边方法所需做功更小. 也就是说, 径向分区压边方法可通过较小压边力实现有效压边.

通过上述分析可知, 由于径向分区压边方法施加的单位压边力分布更加合理, 因此, 采用较小的压边力即可抑制起皱. 同理, 由于施加的压边力更小, 径向压边方法将有助于提高板坯成形效果.

4.2 初始单位压边力分布的研究

基于磁垫结构设计的径向分区压边圈如图12(a)所示, 相对于整体压边圈(图12(b)), 分区压边圈被分为了同心的内外三环.

为了研究径向分区压边圈和整体压边圈的压边效果, 采用Ansys软件以板坯为目标进行了受力分析, 有限元模型包括被吸板、板坯和磁垫. 将磁场分析所得16等级时的磁吸力作为载荷条件, 施加在磁极单元区域, 板坯半径 $R_0 = 95 \text{ mm}$.

计算所得板坯上的接触压力(单位压边力)分布如图13所示. 从图13(a)可以看出, 整体压边圈施加的单

图12 (网络版彩图)磁垫. (a) 径向分区压边圈; (b) 整体压边圈

Figure 12 (Color online) Magnetic cushion. (a) Radial segmental blank holder; (b) single blank holder.

图13 (网络版彩图)接触压力的分布云图. (a) 整体压边; (b) 分区压边

Figure 13 (Color online) Blank holding pressure. (a) Single blank holder; (b) radial segmental blank holder.

位压边力主要集中在板坯边缘很窄的范围内。而径向分区压边方法施加的压边力, 沿径向的作用范围明显增大, 几乎覆盖了整个板坯的法兰区, 见图13(b)。

根据图13所示的分析计算结果(基于磁垫的最大设计能力, 等级16), 沿指定路径依次提取板坯上各节点的单位压边力值, 并绘制如图14所示的分别在两种压边方法作用下, 板坯上的单位压边力沿径向分布的线性化曲线。可以看出, 在总压边力相同的前提下, 在法兰外缘处, 整体压边的单位压边力远大于径向分区压边方法, 这将过多地限制金属的合理流动, 不利于提高成形极限。随着远离外缘, 整体压边方法施加的压边力急剧减小, 而相对来说, 径向分区压边方法施加的单位压边力在径向范围内的波动比较小, 几乎整个法兰区都能得到有效压边。

从分析结果可以初步判断, 径向分区压边方法不仅可以更好地抑制起皱, 还可以提高成形极限。

5 成形模拟和实验研究

5.1 成形过程模拟

为了进一步验证径向分区压边方法的有效性, 采用Dynaform软件进行板坯($R_0 = 95 \text{ mm}$, $\delta = 1 \text{ mm}$)成形过程模拟。模拟使用壳单元模型, 采用Barlat-Lian屈服准则和Hollomon硬化规则。凸模和凹模直径分别为90和92.5 mm。

在采用不同压边方法施加8 kN压边力作用下, 板坯厚度最大变化率如图15所示。其中, 横坐标代表成形件的拉深高度, 纵坐标表示在对应的拉深高度下,

图14 (网络版彩图)板坯上压边力的线性化曲线

Figure 14 (Color online) BHF linearized curve on sheet metal.

成形件所有截面厚度中, 相对于板坯初始厚度的最大变化百分比, 即最大增厚率和最大减薄率。可以看出, 随着拉深高度的增加, 板坯增厚和减薄程度愈加明显, 分区压边的增厚率和减薄率都始终小于采用整体压边的成形件。如图16所示, 当拉深高度约为32 mm时, 只有整体压边作用下的成形件发生起皱。也就是说, 在数值相同的压边力作用下, 由于单位压边力沿径向分布的更加合理, 适当增加了金属在板坯平面内的合理流动, 径向分区压边方法可以更好地抑制起皱。

5.2 实验研究

为了验证电控永磁径向分区压边方法的实际效果, 采用图17所示的实验装置对镀锌板($R_0 = 95 \text{ mm}$, $\delta = 1 \text{ mm}$)进行拉深实验。

实验在伺服压力机上进行, 通过控制器调节磁垫

图15 (网络版彩图)成形件的最大厚度变化率

Figure 15 (Color online) Maximum change rate of forming part wall thickness.

图16 (网络版彩图)拉深高度32 mm时成形件的减薄率。(a)整体压边; (b)分区压边

Figure 16 (Color online) Thinning rate of forming part when drawing height is 32 mm. (a) Single blank holder; (b) radial segmental blank holder.

1-压力机滑块; 2-上模板; 3-被吸板和凹模; 4-压边圈; 5-磁垫; 6-控制器; 7-凸模; 8-氮气弹簧; 9-下模板

图 17 (网络版彩图)拉深实验装置

Figure 17 (Color online) Experimental setup for deep drawing.

的磁感应强度可以施加不同等级的压边力. 不同磁感应强度等级的充磁耗时 t_m 都为20 ms, 区别在于通入的充磁电流强度 i_m 不同. 所设计磁垫设置的1~16个等级可通过6~15 A的充磁电流 i_m 来调节. 此外, 退磁电流强度 i_d 和耗时 t_d 分别为8 A和20 ms, 与充磁等级无关.

在磁垫磁感应强度等级为5时, 实验所得成形件如图18(a)~(c)所示. 其中, 图18(a)和(b)的拉深高度相同, 都为35 mm, 区别在于前者采用整体压边方法, 后者采用径向分区压边方法. 可以看出, 由于施加的压边力不足以抑制起皱, 图18(a)中采用整体压边的成形件皱纹非常明显. 如图18(b)所示, 相较于整体压边, 由于径向分区压边方法施加的单位压边力沿径向的分布更加合理, 因而采用较小的压边力(磁感应强度等级5)即可有效地抑制起皱. 为了验证径向分区压边条件下板坯的成形极限, 增加实验拉深高度. 当拉深高度约为50 mm时, 采用径向分区压边的成形件破裂, 见图18(c).

从实验结果可以看出, 由于压边力分布得更加合理, 径向分区方法可以更有效地抑制起皱, 并对提高成形极限有一定的作用.

6 讨论

6.1 电控永磁压边技术的节能效果

如图19所示, 可将压边力施加过程看作一个准静态问题. 图中(a)是传统压边方法借助压边反力 F_3 施加压边力的示意图, 根据力的平衡条件, F_3 与冲压力 F_1 和

图 18 (网络版彩图)拉深成形件. (a) 整体压边-35 mm; (b) 分区压边-35 mm; (c) 分区压边-50 mm

Figure 18 (Color online) Drawn cups. (a) Single blank holder-35 mm; (b) radial segmental blank holder-35 mm; (c) radial segmental blank holder-50 mm.

图 19 压边方法受力示意图. (a) 传统压边; (b) 电控永磁压边
Figure 19 Force diagram of different blank holders. (a) Conventional blank holder; (b) EPM blank holder.

板坯成形力 F_2 的关系为

$$F_1 = F_2 + F_3, \quad (8)$$

图19(b)为采用电控永磁压边的示意图. 由于压边力是由磁力吸盘与凹模之间的磁力提供的, 属于压边系统的内力, 故

$$F_1 = F_2. \quad (9)$$

所以, 采用电控永磁压边方法, 可以极大地减少压力机在施加压边力的过程的能量消耗. 需要指出的是, 电控永磁压边方法需要考虑充退磁电流的能耗.

电控永磁压边方法在压边过程中的能量消耗 W_1 包括充磁电流耗能 W_m 和退磁电流耗能 W_d 两部分:

$$W_1 = W_m + W_d = (i_m^2 \cdot t_m + i_d^2 \cdot t_d)R, \quad (10)$$

式中, R 为磁力吸盘中线圈绕组的阻值, 209 Ω .

根据能量守恒定律, 采用传统压边方法的拉深过程中, 施加压边力消耗的能量 W_2 等于压边力 F_3 所做的功, 即压边力与拉深方向上移动距离 H (拉深行程)的

乘积:

$$W_2 = F_3 \times H. \quad (11)$$

对比分析时, 取磁力吸盘最大等级16($F_3 = 153 \text{ kN}$, $i_m = 15 \text{ A}$), $H = 35 \text{ mm}$ 为条件参数进行计算, 其中压边力持续时间约为1 s. 将各参数分别代入方程(10)和方程(11)可得 $W_1 = 1.7 \text{ kJ}$, $W_2 = 5.3 \text{ kJ}$.

电磁压边根据实施方法不同, 所消耗的能量也不一样. 其中, 以采用脉冲电流的脉冲电磁压边方法的节能效果最好, 根据研究结果可知^[12], 施加153 kN压边力, 1 s消耗电能 W_3 约为77 kJ.

图20(a)为三种压边方法的能耗对比, 其中, 电磁压边能耗最高, 传统压边方法次之, 而电控永磁压边方法的能耗远低于前两者. 在所设定的拉深参数下, 电控永磁压边方法能耗只占传统压边能耗的32%, 而更只有电磁压边能耗的2.2%.

图20(b)和(c)为施加相同的压边力($F_3 = 153 \text{ kN}$)条件下, 拉深高度(压边力作用距离)和压边力持续时间对能量消耗的影响. 从图20(b)可以看出, 相对于传统压边, 电控永磁压边方法的节能效果随拉深高度的增加愈加明显. 虽然拉深高度小于11 mm时电控永磁压边方法的能耗更高, 但由于能耗总量较低(小于1.7 kJ),

故差值较小. 从图20(c)可以看出, 电磁压边的能耗始终高于电控永磁压边方法, 而随着压边持续时间的增加, 前者的能耗迅速增加, 后者能耗保持不变.

综上所述, 由于电控永磁压边方法不需持续电流来维持压边力, 因而能量消耗不随拉深高度和压边持续时间发生变化. 拉深高度越大、压边力持续时间越长, 电控永磁压边方法的节能效果愈加明显.

此外, 虽然电磁压边耗能很大, 但由于其易于控制的优点, 已成为近期的研究热点. 而本文提出的电控永磁压边方法, 在继承了电磁压边优点的基础上, 耗能只有电磁压边方法的几十分之一, 因此具有很好的应用前景.

6.2 径向分区压边的优点

压边力的主要作用是在拉深过程增加板坯的摩擦力, 增大对变形金属的约束, 从而提高板坯的稳定性.

根据理论分析、数值模拟和实验验证可知, 整体压边施加的压边力主要集中于法兰外缘区域, 造成法兰外缘区域压边力过大, 限制了平面内金属的合理流动, 影响成形件的拉深高度. 法兰内部区域又由于缺少有效的压边, 容易发生起皱. 而径向分区压边方法中, 各分块的压边圈可独立施加压边力, 采用较小的

图20 (网络版彩图)压边方法能耗分析. (a) 三种压边方法对比; (b) 电控永磁压边和传统压边对比; (c) 电控永磁压边和电磁压边对比

Figure 20 (Color online) Analysis of energy consumption. (a) Comparison of three methods; (b) comparison of EPM blank holder and conventional blank holder; (c) comparison of EPM blank holder and electromagnetic blank holder.

压边力就可以对不同径向区域实施有效压边。径向分区压边方法对抑制起皱、提高成形极限都有一定的积极作用。

7 结论

(1) 提出了基于电控永磁技术的径向分区压边方法, 采用多个永磁体提供的耦合磁力作为动力源施加压边力。拉深过程中不需持续供电来维持压边力, 具有节能、安全可靠的优点。电控永磁压边装置可以与传统压力机有机结合, 且只需很小的瞬时电流就可以改变压边力状态。因此, 电控永磁压边方法有望在改进现有成形工艺设备、数字化和智能化控制方面有很好的应用前景。

(2) 采用有限元磁场分析对设计的磁路进行了验证, 并通过实验手段确定磁极单元的磁力大小和温升情况可以满足拉深工艺要求。

(3) 通过理论推导证明了径向分区压边方法的可行性, 并借助有限元静力分析对比了整体压边和径向分区压边作用下板坯上的初始单位压边力分布。结果表明, 相对于整体压边, 径向分区压边方法施加在板坯上的单位压边力分布更加合理。

(4) 通过成形模拟和实验的方法验证了基于电控永磁径向分区压边方法的有效性。相对于整体压边方法, 径向分区方法可以更好地抑制起皱, 提高成形极限。采用所设计的成形模具, 借助瞬时的小强度电流可以顺利加载和卸载压边力, 进一步验证了将电控永磁技术应用于压边工艺中的可行性。

参考文献

- 1 Obermeyer E J, Majlessi S A. A review of recent advances in the application of blank-holder force towards improving the forming limits of sheet metal parts. *J Mater Processing Tech*, 1998, 75: 222–234
- 2 Wang W R, Chen G L, Lin Z Q, et al. A new strategy for the optimization of variable blank holder force in sheet metal forming (in Chinese). *J Plast Eng*, 2007, 14: 102–108 [王武荣, 陈关龙, 林忠钦, 等. 板料成形中的新型可控压边力技术研究. 塑性工程学报, 2007, 14: 102–108]
- 3 Li X N, Wang Z Q, Yin J Q. Rectangular box drawing die design of controlled blank holder force (in Chinese). *Forg Stamp Tech*, 2006, 1: 46–47 [李西宁, 王仲奇, 殷俊清. 可控变压边力的盒形件拉深模具设计. 锻压技术, 2006, 1: 46–47]
- 4 Zheng L, Wang Z, Liu Z, et al. Formability and performance of 6K21-T4 aluminum automobile panels in VPF under variable blank holder force. *Int J Adv Manuf Technol*, 2018, 94: 571–584
- 5 Sun C Z, Chen G L, Lin Z Q, et al. Improvement of the formability of box deep drawing using variable blank-holder forces (in Chinese). *J Shanghai Jiao Tong Univ*, 2003, 37: 1883–1886 [孙成智, 陈关龙, 林忠钦, 等. 利用变压边力控制技术改善盒形件成形性能. 上海交通大学学报, 2003, 37: 1883–1886]
- 6 Liu Z Y, Xiong B Q, Li X W, et al. Deep drawing of 6A16 aluminum alloy for automobile body with various blank-holder forces. *Rare Met*, 2019, 38: 946–953
- 7 Yang L, Jin Z L, Qin S J, et al. Modeling and optimization of composite and servo-driven actuator for blank-holder force control (in Chinese). *J Mech Eng*, 2015, 51: 139–145 [杨莉, 金振林, 秦泗吉, 等. 复合伺服驱动压边力控制执行机构建模与优化. 机械工程学报, 2015, 51: 139–145]
- 8 Hassan M A, Suenaga R, Takakura N, et al. A novel process on friction aided deep drawing using tapered blank holder divided into four segments. *J Mater Processing Tech*, 2005, 159: 418–425
- 9 Osakada K, Mori K, Altan T, et al. Mechanical servo press technology for metal forming. *CIRP Ann*, 2011, 60: 651–672
- 10 Lu W Q, Hu Y W, Huang W X. Investigation of hybrid servo press based on heavy-load driving of AC motor (in Chinese). *Electr Mach Control Appl*, 2008, 35: 11–14 [鲁文其, 胡育文, 黄文新. 基于交流电机重载驱动的复合型伺服压力机. 电机与控制应用, 2008, 35: 11–14]
- 11 Seo Y R. Electromagnetic blank restrainer in sheet metal forming processes. *Int J Mech Sci*, 2008, 50: 743–751
- 12 Lai Z P, Cao Q L, Han X T, et al. Design, implementation, and testing of a pulsed electromagnetic blank holder system. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2016, 26: 1–5
- 13 Huang Y, Han X, Cao Q, et al. Design and analysis of a pulsed electromagnetic blankholder system for electromagnetic forming. *Procedia Eng*, 2017, 207: 347–352
- 14 Huang Y, Lai Z, Cao Q, et al. Controllable pulsed electromagnetic blank holder method for electromagnetic sheet metal forming. *Int J Adv Manuf*

- Technol*, 2019, 103: 4507–4517
- 15 Li H, Wang Q. Development on electromagnetic blank holding technology in sheet metal forming (in Chinese). *Manuf Tech Mach Tool*, 2018, 8: 54–59 [李昊, 王强. 薄板成形电磁压边技术研究进展. *制造技术与机床*, 2018, 8: 54–59]
 - 16 Li H, Wang Q, He F, et al. Design, numerical simulation, and experimental validation of a novel electromagnetic blank holding system for conventional drawing process. *Int J Adv Manuf Technol*, 2019, 102: 2183–2193
 - 17 Cao Q, Han X, Lai Z, et al. Analysis and reduction of coil temperature rise in electromagnetic forming. *J Mater Processing Tech*, 2015, 225: 185–194
 - 18 Abele E, Altintas Y, Brecher C. Machine tool spindle units. *CIRP Ann*, 2010, 59: 781–802
 - 19 Peng J G, Qin S J, Kong X H, et al. Analysis of permanent-electromagnet clamping technique and its influencing factors (in Chinese). *J Plast Eng*, 2011, 4: 18–23 [彭加耕, 秦洒吉, 孔晓华, 等. 电永磁夹紧方法及其影响因素. *塑性工程学报*, 2011, 4: 18–23]
 - 20 Chang P, Bao X G. New type of ship mooring device based on electronically controlled permanent magnetic chuck (in Chinese). *Navi China*, 2015, 38: 18–22, 33 [畅沛, 包雄关. 基于电控永磁吸盘的新型船舶系泊装置. *中国航海*, 2015, 38: 18–22, 33]
 - 21 Qin S, Xiong B, Lu H, et al. Critical blank-holder force in axisymmetric deep drawing. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2012, 22: s239–s246
 - 22 Senior B W. Flange wrinkling in deep-drawing operations. *J Mech Phys Solids*, 1956, 4: 235–246

Deep drawing with radial segmental blank holder based on magnetic control

ZHANG HongSheng^{1,2}, QIN SiJi¹, CAO LiQin², MENG LinYuan¹, CHENG Xiao¹ & MAO YaoBen¹

¹ Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science of Ministry of Education of China, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

² College of Environment and Chemical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

We propose a radial segmental blank holder technique based on the electro-permanent magnet (EPM) technology, in which we can obtain a more reasonable blank holding force (BHF). The magnetic pole unit was constructed according to the characteristics of soft magnetic materials and adjusted the magnetic state of the magnetic pole unit by an instantaneous low-intensity current. The tensile test revealed that the magnetic pole unit can provide a sufficiently large magnetic attraction force to satisfy the blank holding requirements. The measurement results of the temperature rise experiment verified that the magnetic pole unit would not cause overheating. According to the characteristics of the drawing process, the blank holder device and the drawing die based on EPM technology were designed. The BHF applied during the drawing process does not need to be continuously energized, so it has the advantages of energy-saving and safety. Theoretical derivation was used to determine the feasibility of the radial segmental blank holder technique and analyzed the initial distribution of the BHF on sheet metal using FEA. The results show that, compared with the conventional blank holder, we could implement the BHF applied by the new method in a larger radial area. We further verified the efficiency of the radial segmental blank holder technique by performing simulation. Since the BHF is more rationally distributed in the radial direction, we could control the sheet thickness variation better. Finally, the drawing experiment of the galvanized sheet revealed that the EPM technology is feasible for the blank holder, and the radial segmental blank holder technique can efficiently suppress wrinkling and enhance the performance.

deep drawing, magnetic circuit design, blank holding force, radial segmental blank holder, wrinkling

doi: [10.1360/SST-2020-0174](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0174)