

# 平板件电磁成形技术的研究进展

陈晓伟, 王文平, 万敏, 熊威人, 龙安林

(北京航空航天大学, 北京 100191)

**摘要:** 在简述了平板件电磁成形原理的基础上, 从以下 4 个方面综述了此技术的国内外研究进展: 成形线圈设计方面, 列举了平板线圈, 匀压力线圈, 并列线圈以及工艺校形线圈的使用; 磁场力计算方面, 讲述了解析法和有限元法的应用; 试验研究方面, 阐述了电磁成形板材成形性能研究、电磁辅助成形研究的进展; 数值模拟方面, 叙述了各种数值模拟方法以及有限元软件的应用。最后, 指出了平板件电磁成形技术推广过程中所需攻克的技术难题。

**关键词:** 平板件电磁成形; 线圈设计; 磁场力计算; 数值模拟

中图分类号: TG391

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)02-0514-07

交通工具零部件轻量化是节约能源、减少有害气体排放的有效途径, 而且是提高飞机、汽车等运载工具性能的重要途径。实现工件轻量化的途径包括, 采用轻合金材料、采用轻量化的结构形式。但由于轻合金本身的难成形特性, 所以对轻合金成形技术研究提出了挑战<sup>[1-3]</sup>。

高速成形又称高能率成形, 是一种在极短时间内释放高能量而使金属变形的成形方法。高速成形主要有爆炸成形、电液成形和电磁成形等, 其中电磁成形是一种利用磁脉冲力驱动工件变形的高速成形技术。与爆炸成形相比, 它降低了成形过程中的危险性, 避免了空气污染; 与电液成形相比, 其设备简便, 易操作。除此之外, 电磁成形还具有诸多优点, 可改善金属材料的成形性能, 因为成形过程中无机械接触而无需使用润滑液, 所以整个过程绿色、环保, 并且与传统加工方法相比显著减小了工件的回弹和起皱, 提高了零件的精确度<sup>[4,5]</sup>。综上所述, 电磁成形技术在板材成形方面具有独有的优势, 因此在轻合金平板件成形中将有着光明的应用前景。本文从成形线圈设计、磁场力计算、试验研究以及数值模拟技术应用等几方面介绍了近些年国内外平板件电磁成形技术的研究进展。

## 1 平板件电磁成形原理

平板件电磁成形的原理如图 1 所示。首先将电能储存在电容器中, 闭合间隙开关, 储能电容器对工作线圈快速放电并在其周围产生一脉冲磁场, 该磁场的轴向分

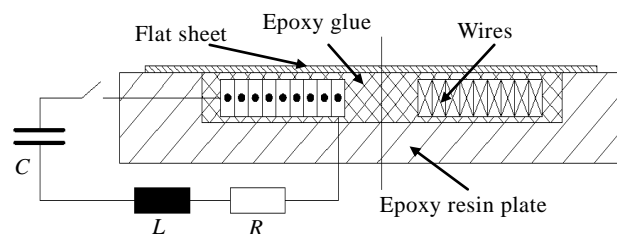


图 1 平板件电磁成形示意图

Fig.1 Working schemes for electromagnetic flat sheet forming

量  $B$  穿过平板件而产生感应电流 (涡流), 感应电流也在平板件周围产生磁感应强度为  $B'$  的磁场。放电瞬间, 金属板件内部因  $B$  和  $B'$  方向相反而相互削弱, 同时线圈与工件之间则方向相同而得到加强。因而, 金属平板件在磁脉冲力的作用下背离线圈而变形<sup>[6]</sup>。

电磁成形过程中充电电压高达几千甚至上万伏, 所以电容器存储的能量极高, 能量大小  $E$  取决于充电电压  $U$  和电容  $C$ , 如公式 (1) 所示。

$$E=1/2(CU^2) \quad (1)$$

## 2 成形线圈设计

成形线圈是电磁成形过程中的重要工具, 其电参数、形状及几何尺寸将直接影响板件上磁场力的大小和分布状态, 进而影响着板件的变形效果。

平板件电磁成形过程中平板线圈应用比较广泛,

收稿日期: 2014-03-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) (2011CB12800, 2011CB012804)

作者简介: 陈晓伟, 男, 1983 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: chenxiaowei-1983@163.com

根据平板线圈的外形不同可分为圆形线圈、椭圆形线圈、矩形线圈以及并列线圈。除平板线圈外，针对平板件电磁成形工艺匀压力线圈的使用也较为常见。

Sergey F. Goloovashchenko<sup>[7]</sup>设计了多种平板线圈（如图 2 所示）用来研究各种板材的成形性能，并且在环氧板的外轮廓通过过盈配合装配钢制外箍，钢制外箍既可以增加线圈强度延长其使用寿命，也可以通过其周边加工的工艺孔实现与模具的有效连接。

初红艳等<sup>[8]</sup>通过理论推导得到应用椭圆线圈时板件上磁场力的分布规律，并试验论证了计算结果的有效性。结论指出，对于长形板件，采用椭圆线圈要优于圆形线圈，但线圈中心对应的板件部位变形严重不足，所以椭圆线圈不适用于中心部位变形要求较高的工件。

D. A. Oliveira<sup>[9]</sup>等采用并列双矩形线圈（如图 3 所示）对 AA5754 和 AA5182 铝合金进行了成形研究。并列双矩形线圈的使用避免了线圈中心对应的板材区域磁场力为零的弊端，将零磁场力区域转移到了图中所示的所谓“死点区域”，2 个矩形线圈交界的地方可以产生较大的磁场力，所以对板材中心变形要求较高的工件可以采用并列线圈。

俄亥俄州立大学的一些学者对平板件电磁成形工艺进行了大量的研究，其中 Manish Kamal<sup>[10,11]</sup>提出了一种可使板材上产生均匀磁场力的线圈结构即匀压力线圈，其原理如图 4 所示。匀压力线圈中的外通道由良好导电性能的铝或铜制作，金属板件上产生感应电流后，板件与外通道形成一个感应电流的闭合回路，

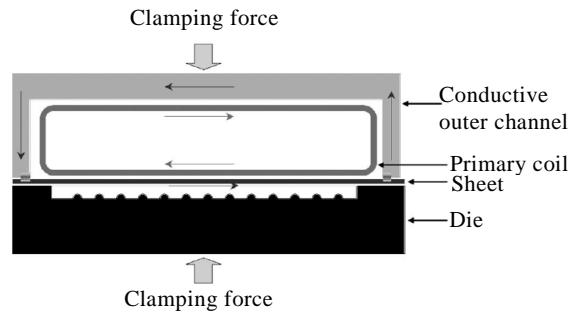


图 4 匀压力线圈示意图

Fig.4 Schematic of a uniform pressure coil<sup>[10,11]</sup>

使得板材上的感应电流分布均匀，从而板件上可以得到均匀分布的磁场力。Manish<sup>[11]</sup>在匀压力线圈的设计上做了大量的工作，对外通道的结构及材质进行了优化，且导线的结构由普通铜导线的缠绕形式改进为铜块切削形式。最终改进的匀压力线圈（如图 5 所示）可进行较高电能的电磁成形试验，且使用寿命更长。

总之，可以根据平板件不同的成形要求而设计不同结构的线圈。尤其是电磁辅助成形和针对半成品工件的校形工艺，可以根据工件要求的最终形状而制作特殊形状的线圈。如图 6 所示是张开<sup>[12]</sup>等为弯曲件的电磁校形而设计的线圈，图 7 是刘大海<sup>[13]</sup>等为 U 形件电磁辅助弯曲成形而设计的成形系统示意图及成形线圈。

### 3 磁场力计算

研究电磁成形主要包括两个方面：一是磁场力的

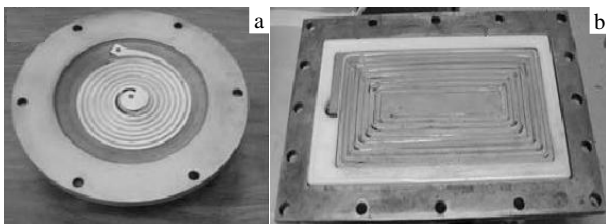


图 2 平板线圈

Fig.2 Flat coil: (a) round and (b) rectangle<sup>[7]</sup>

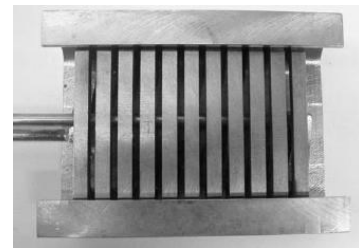


图 5 匀压力线圈

Fig.5 Uniform pressure coil<sup>[11]</sup>

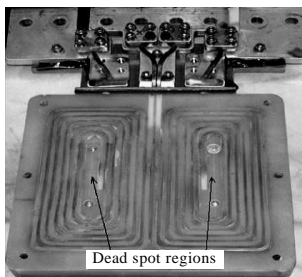


图 3 并列双矩形线圈

Fig.3 Alongside double rectangular coil<sup>[9]</sup>



图 6 电磁校形线圈

Fig.6 Electromagnetic sizing coil<sup>[12]</sup>

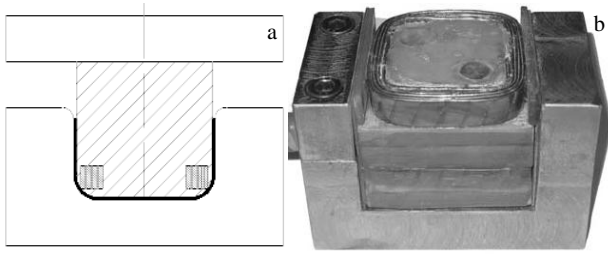


图 7 筒形件电磁辅助成形线圈

Fig.7 Coil for electromagnetically assisted bending of U-shape parts: (a) diagram of forming system and (b) picture of coil<sup>[13]</sup>

研究，二是磁场力作用下板料变形分析，而磁场力的研究是分析板料变形过程、优化力能及工艺参数的基础<sup>[14]</sup>。影响磁场力的因素很多，除成形系统中电容、电压等电参数外，还有成形线圈的外形和尺寸、平板件的导电性和电感及几何尺寸、线圈和板件间的间隙宽度以及板件平面方向上与线圈的相对位置等。李春峰<sup>[15]</sup>将计算磁场力的方法归纳为 4 种，分别是等效电路法，等效磁路法，解析法和有限元法，其中后 2 种方法应用较多。

平板件电磁成形中磁场力的理论计算过程非常复杂，所以与管件电磁成形相比，关于平板件电磁成形磁场力的研究较少。Fischer 甚至宣称没有一个解析解可以严格表述平板件成形过程的磁场力。尽管如此，还是有大量的学者对平板件电磁成形过程中的磁场力进行了理论推导，并求得了其近似解<sup>[16]</sup>。

Bauer 等根据洛伦兹力公式对磁场力进行了初步推导，得出沿板材厚度方向的磁场力如下。

$$F_z = -\mu_0 H \frac{\partial H}{\partial Z} = -\frac{1}{2} \mu_0 \frac{\partial (H^2)}{\partial Z} \quad (2)$$

式中  $\mu_0$  为真空磁导率， $H$  为磁场强度， $Z$  为沿板件厚度的方向。

将式 (2) 磁场力的体积力形式推导为平面力形式即磁压力  $P$  可表示为：

$$P(r,t) = \int_{h_0}^{h_t} F(r,t) dr = \frac{1}{2} \mu (H_{\text{gap}}^2(t) - H_{\text{pen}}^2(t)) \quad (3)$$

式中， $h_t$  和  $h_0$  分别代表板件沿厚度方向的上下 2 个表面即紧贴线圈表面和背离线圈表面， $H_{\text{gap}}$  为线圈和板件之间磁场强度， $H_{\text{pen}}$  为渗透到工件内部的磁场强度。

黄尚宇<sup>[17]</sup>针对使用圆形螺旋线圈时板材所受磁场力情况进行了理论推导。得到磁压力的计算公式如下：

$$P = \frac{[B_r(r, d_0 + \delta/2) + B_r'(r, -\delta'_0/2)]^2}{2\mu_0} \quad (4)$$

式中， $B_r$  为成形线圈产生的磁感应强度， $B_r'$  为板材上感应电流产生的磁感应强度， $B_r$  和  $B_r'$  都可以根据麦克斯韦方程组而推导出来，文献[17]详细阐述了这个过程，这里不再赘述。

Da Xu<sup>[18]</sup>等通过理论推导计算出板材所受垂直于板材平面的磁场力公式，且以体积力（洛伦兹力）的形式将其表示出来，如式 (5) 所示。

$$f_z = -J_{\theta e} B_r = -\mu \left( \frac{\eta N I_{\text{max}}}{2\pi h} \right)^2 \sqrt{(\alpha\beta)^2 + \left( \frac{\alpha}{\beta} \right)^2} \times e^{2(\alpha\beta z - \delta t)} \sin\left(\omega t + \frac{\alpha}{\beta} z + \theta\right) \sin\left(\omega t + \frac{\alpha}{\beta} z\right) R^2(r) \quad (5)$$

式中， $\mu$  为磁导率， $\eta$  为导电修正系数 ( $0 < \eta < 1$ )， $N$  为每径向长度单元的线圈匝数， $I_{\text{max}}$  为放电电流峰值， $h$  为线圈的厚度， $z$  为工件上沿厚度方向上的深度， $\delta$  为放电电流衰减系数， $t$  为时间变量， $R(t)$  为磁场强度的径向分量， $r$  为距圆心的径向距离。 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\theta$  为公式推导出的量，其计算过程见文献[18]。

从上可以看出，平板件电磁成形过程中磁场力的理论计算，过程复杂且精度较低。

然而，随着有限元技术的快速发展，使用有限元法来求解磁场力在计算精度和方便程度上都明显优于其它方法<sup>[15]</sup>。

Ali Meriched<sup>[19]</sup>等通过建立二维对称模型，对薄板成形进行了数值模拟，计算了板材上的磁场强度、感应电流分布以及磁场力密度。Jianghua Deng<sup>[20]</sup>等利用有限元软件 ANSYS 建立了 2D 电磁场模型，对板材上产生吸引磁场力的情况进行了分析。W. Xu<sup>[21]</sup>等也利用 ANSYS 建立了 2D 电磁场模型，分析了板材所受的磁场力，并指出对板材进行网格划分时，板材上表面（即贴近线圈表面）到下表面网格尺寸由小到大有规律地逐渐变化的划分方法更适合于模拟集肤效应，并且指出体积力是表示磁场力最科学的形式。Ji Li<sup>[22]</sup>等利用 COMSOL 有限元软件建立了 2D 模型，分析了带有盲孔工件上的磁场力分布，探讨了磁场力对工件盲孔部位的强化效果。Xiaohui Cui<sup>[23]</sup>等利用 ANSYS 软件建立了 3D 模型，分析了使用匀压力线圈时板材上的受力分布，还针对线圈的失效问题分析了线圈的受力情况。陈晓伟<sup>[24]</sup>等在 ANSYS/EMAG 中建立了 3D 模型，分析了当平板件的平面尺寸小于线圈尺寸时板材上感应电流密度和磁场力分布，指出板材上感应电流通道宽度的变化会引起电流聚集，最终导致板材上磁场力分布严重不均。

## 4 试验研究

平板件电磁成形可分为自由成形和有模成形，自由成形主要用于精度要求不高的锥形件成形，而后者主要用于压印、压凹及曲面零件成形等<sup>[25]</sup>。平板件电磁成形的试验研究主要包括，板材成形性能研究、针对工件导电性不好甚至非导电材料电磁成形中驱动片的使用、集磁器的使用、以及关于模具结构及其材质的研究等。

Mala Seth<sup>[26]</sup>等使用平板圆形螺旋线圈，以 6111 T4 铝合金作为驱动片对低合金轧制钢材的电磁成形进行了研究，与准静态成形相比板件的成形性得到了显著提高。利用高速摄像机观察板材撞击模具的速度，并得出结论板件的运动速度和电容器的释放电能呈线性正比例关系。而 J. M. Imbert<sup>[27]</sup>等对 1 mm 厚 AA5754 铝合金平板件进行了电磁自由成形和有模成形试验，结果指出自由成形时板件的成形性能与准静态相比并没有显示出明显的提高，而有模成形中板材成形性提高较显著，从而得出结论，板件和模具之间相互作用而形成的应力状态是抑制板材破坏进而提高其成形性能的主要原因。Manish Kamal<sup>[28]</sup>等对 0.5 mm 厚 6061-O 铝合金板材使用两步成形法加工手机外壳，首先使用匀压力线圈成形手机外壳的精细浮雕部分，经过简单修边之后使用特制的线圈实现半成品的翻边。翻边使用的特制线圈和最终成品如图 8，图 9 所示。Steven Woodward<sup>[29]</sup>等利用磁场力对 2 个简单的铝合金航空半成品件进行电磁校形，并且对放电能量、线圈结构

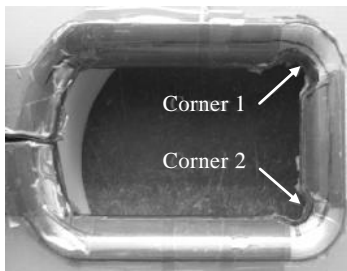


图 8 翻边线圈

Fig.8 Coil for flanging<sup>[28]</sup>



图 9 试验成品

Fig.9 Final part of experiment<sup>[28]</sup>

等进行了优化，与传统加工方法相比，电磁校形技术在减小回弹与起皱方面表现出了明显优势。

国内主要是哈尔滨工业大学和武汉理工大学的研究人员对平板件电磁成形进行了一些试验研究。Qingjuan Zhao<sup>[30]</sup>等对 T2 铜板的电磁微涨形进行了试验研究，分析了放电电压、模具模腔深度等因素对板件变形高度的影响。刘大海、于海平<sup>[31-33]</sup>等对 5052 铝合金平板件的电磁成形进行了大量的研究工作。在 5052 铝合金平板件电磁动态拉伸试验中，通过理论分析和微观组织观察论证了惯性力对抑制结构失稳进而提高材料成形性能起主要作用。继而在 5052 铝合金平板件准静态—电磁混合成形试验基础上，进行了筒形件磁脉冲辅助成形研究，所成形的筒形件如图 10 所示。Xu Junrui<sup>[34,35]</sup>等对 AZ31 镁合金平板件在室温下分别进行了以 6111 T4 铝合金薄片为驱动片的自由涨形试验和电磁单拉试验，对比于准静态成形材料表现出了较好的成形性，最后指出惯性力是材料成形性提高的第一要因。孟正华<sup>[36,37]</sup>等使用匀压力线圈对 AZ31 镁合金进行了在温热条件下的电磁自由涨形试验，分析了温度以及各种电参数对板件成形高度的影响。何志磊<sup>[38]</sup>等研究了 AZ31 镁合金的电磁成形极限，相比于准静态成形 AZ31 镁合金电磁成形表现出了良好的成形性。刘全胜<sup>[39]</sup>等对薄板件的电磁冲裁进行了研究，分析了电压和线圈的变化对薄板电磁冲裁断裂模式的影响。

## 5 数值模拟技术的应用

因为电磁成形过程涉及电学、电磁学、电动力学和塑性动力学，并且板件的变形是在微秒级完成的极快速变形，使用数理理论推导以及试验研究很难完整地分析电磁成形过程。而数值模拟技术可以实现几种物理场有效耦合，是计算磁场力、分析板材变形过程、进行工艺参数优化的有效手段。

Anter El-Azab<sup>[40]</sup>和 J. Unger<sup>[41]</sup>等简述了数值模拟技术在电磁成形中的应用，指出数值模拟过程的难点是实现电磁场、变形结构场、因变形引起的热场以及其它结构场系统的完全耦合，从而提出并建立了全耦合数学



图 10 筒形件

Fig.10 Cylindrical parts<sup>[31-33]</sup>

框架,并指出材料在动态变形时的本构模型的选取也是数值模拟的关键。继而 J. Unger<sup>[42]</sup>建立了 3D 有限元模型,对板材电磁成形的大变形进行了模拟,数值模拟过程中对模型进行了合理简化,从而节约了计算成本。J. P. M. Correia<sup>[43]</sup>等使用松散耦合法建立了 3D 简易模型对平板件电磁自由涨形进行了数值模拟研究,整个分析过程分为两步,首先计算出了板材上磁场力的大小以及分布,然后使用 ABAQUS/Explicit 模拟了板材的变形情况。M. Ahmed<sup>[44]</sup>等提出了变横截面积导线在成形线圈中的应用,使用 ANSYS 软件建立了二维模型,分析了这种新型线圈对板材上磁场力分布的影响,结果表明变横截面积导线的使用可显著提高板材上磁场力的均匀度。

国内也有很多研究人员对电磁成形数值模拟技术进行了研究。Haiping Yu 等<sup>[45,46]</sup>做了很多管件电磁成形的数值模拟研究,为平板件电磁成形的数值模拟提供了很好的参考。王立峰、黄尚宇<sup>[47,48]</sup>对平板件电磁成形过程进行了数值模拟,首先通过理论分析确定了模型边界条件和磁压力分布,然后利用 ADINA 软件分析了板材的变形。崔晓辉等<sup>[49,50]</sup>在平板件电磁成形数值模拟方面做了大量的工作,分别建立了 2D、3D 有限元模型且将顺序耦合法应用到平板件的自由涨形分析过程中,并对顺序耦合过程中计算周期数值的设定进行了分析。莫健华<sup>[51]</sup>等采用有限元软件 ANSYS 分别建立了 2D 和 3D 有限元模型对电磁成形集磁器的工作原理进行了研究,分析了集磁器的相对直径、厚度、中心圆孔半径等结构参数对板件上磁场力分布和强度的影响。Fenqiang Li<sup>[52]</sup>等针对 Ti-6Al-4V 钛合金平板件使用铜质驱动片的电磁成形过程,利用松散耦合法对其进行了数值模拟,模拟过程中首先使用 ANSYS/EMAG 计算出板件上磁场力强度及分布,然后将计算得到的磁场力导入到 ABAQUS/Explicit 中作为初始条件模拟板材的变形。

迄今为止,尽管针对平板件电磁成形的数值模拟研究取得了一定的成果,但是,以往的数值模拟还没有达到全耦合的水平,全耦合即实现电磁学、电动力学、塑性动力学、热力学等学科的完全耦合。另外,很少研究者在平板件电磁成形数值模拟过程中考虑板材各向异性这一因素的影响。

## 6 结 语

将电磁成形技术应用于轻合金平板件的塑性加工,能改善材料的成形性能,可显著减小工件的回弹和起皱,且生产过程无污染。但是,此技术要达到像普通压力加工那样普及,还需加强以下几个方面研究:

1) 在整个电磁成形系统中,应从储能电容器、间隙开关、传输放电电流导线、成形线圈以及成形模具各个环节中找出主要的能量损失源并对其进行改进,从而提高平板件电磁成形的能量利用率。

2) 成形线圈在电磁成形过程中要承受强烈的磁场力冲击和一定程度的温度升高,易造成线圈的早期失效。所以,需改进线圈的结构来改善线圈的受力状况,还应合理选择线圈浇注过程中所用环氧胶的种类,如成形线圈在连续高电能条件下生产或在温热环境中使用,还要考虑线圈冷却系统的设计。

3) 因为平板件电磁成形过程复杂,涉及多学科的交叉,所以针对电磁成形理论的研究远落后于实践。理论指导的欠缺会成为电磁成形技术深入研究和推广普及的绊脚石,所以培养交叉学科人才,加强基础理论的研究也是非常必要的。

4) 尽管平板件电磁成形数值模拟技术取得了一定的研究进展,但建立完全耦合电磁学、电动力学、塑性动力学、热力学等多学科的有限元模型仍需要进一步的探索。

## 参考文献 References

- [1] Yang He(杨合), Li Luoxing(李落星), Wang Qudong(王渠东) et al. *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2010, 46(12): 31
- [2] Han Dong(韩冬), Zhan Mei(詹梅), Yang He(杨合). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(2): 243
- [3] Cao Xiaoqing(曹晓卿), Liu Yi(刘毅), Wang Jingwei(王敬伟) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(3): 550
- [4] Jiang Hongwei(江洪伟), Li Chunfeng(李春峰), Zhao Zhiheng(赵志衡) et al. *Materials Science and Technology*(材料科学与工程)[J], 2004, 12(4): 327
- [5] Okoye C N, Jiang J H, Hu Z D. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*[J], 2006, 46: 1248
- [6] Li Chunfeng(李春峰). *High Energy Rate Forming*(高能率成形技术)[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2001: 8
- [7] Golovashchenko Sergey F. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2007, 16: 314
- [8] Chu Hongyan(初红艳), Fei Renyuan(费仁元), Wu Haibo(吴海波) et al. *Forming and Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2002, 27(5): 38
- [9] Oliveira D A, Worswick M J, Finn M et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2005, 170: 35
- [10] Kamal Manish, Daehn Glenn S. *Journal of Manufacturing*

- Science and Engineering*[J], 2007, 129: 369
- [11] Kamal Manish. *Thesis for Doctorate*[D]. Columbus: The Ohio State University, 2005
- [12] Zhang Kai(张 开), Chen Shimin(陈士民), Meng Zhenghua(孟正华) *et al. Forging and Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2009, 34(2): 61
- [13] Liu Dahai(刘大海). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010
- [14] Kleiner M, Beerwald C, Homberg W. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*[J], 2005, 54(1): 225
- [15] Li Chunfeng(李春峰), Zhao Zhiheng(赵志衡), Li Jianhui(李建辉) *et al. Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2001, 8(2): 62
- [16] Psyk V, Risch D, Kinsey B L *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211: 787
- [17] Huang Shangyu(黄尚宇), Chang Zhihua(常志华), Wang Lifeng(王立峰) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 1998, 8(3): 441
- [18] Xu Da, Liu Xuesong, Fang Kun *et al. Journal of Applied Physics*[J], 2010, 107(12): 124907
- [19] Meriched Ali, Feliachi Mouloud, Mohellebi Hassane. *IEEE Transaction on Magnetic*[J], 2000, 36: 1808
- [20] Deng Jianghua, Li Chunfeng, Zhao Zhiheng *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 184: 190
- [21] Xu W, Liu X S, Yang J G *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2009, 209: 3320
- [22] Ji Li, Gary J Cheng. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2009, 51: 825
- [23] Cui Xiaohui, Mo Jianhua, Xiao Shijie *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21: 2484
- [24] Chen Xiaowei(陈晓伟), Wang Wenping(王文平), Wan Min(万 敏) *et al. Journal of Netshape Forming Engineering*(精密成形工程)[J], 2013, 5(2): 20
- [25] Sun Huiping(孙慧平), Guo Weigang(郭伟刚), Wu Xiaofeng(吴晓峰) *et al. Machine Tool and Hydraulics*(机床与液压)[J], 2007, 36(6): 44
- [26] Seth Mala, Vohnout Vincent J, Daehn Glenn S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2005, 168: 390
- [27] Imbert J M, Winkler S L, Worswick M J *et al. Journal of Engineering Materials and Technology*[J], 2005, 127: 145
- [28] Kamal Manish, Shang J, Cheng V *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 190: 41
- [29] Woodward Steven, Weddeling Christian, Daehn Glehn *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211: 886
- [30] Zhao Qingjuan, Wang Chunju, Yu Haiping *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21: 461
- [31] Liu Dahai, Yu Haiping, Li Chunfeng. *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2009, 19: 318
- [32] Liu Dahai, Yu Haiping, Li Chunfeng. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2011, 20: 223
- [33] Liu Dahai(刘大海), Yu Haiping(于海平), Li Chunfeng(李春峰). *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报) [J], 2012, 48(5): 519
- [34] Xu Junrui, Yu Haiping, Cui Junjia *et al. Material Science and Engineering A*[J], 2013, 569: 150
- [35] Xu Junrui, Yu Haiping, Li Chunfeng. *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2013, 22: 1179
- [36] Meng Zhenghua(孟正华), Huang Shangyu(黄尚宇), Hu Jianhua(胡建华) *et al. Journal of Mechanical Engineering* (机械工程学报)[J], 2011, 47(10): 38
- [37] Meng Zhenghua, Huang Shangyu, Hu Jianhua *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2011, 211: 863
- [38] He Zhilei(何志磊), Hu Jianhua(胡建华), Huang Shangyu(黄尚宇). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2010, 39(15): 21
- [39] Liu Quansheng(刘全胜), Huang Shangyu(黄尚宇), Chang Zhihua(常志华). *Forging and Stamping Technology*(锻压技术)[J], 2002, 27(1): 45
- [40] El-Azab Anter, Garnich Mark, Kapoor Ashish. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 142: 744
- [41] Unger J, Stiemer M, Svendsen B *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2006, 177: 270
- [42] Unger J, Stiemer M, Schwarze M *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2008, 199: 341
- [43] Correia J P M, Siddiqui M A, Belouettar S *et al. International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2008, 50: 1466
- [44] Ahmed M, Panthi S K, Ramakrishnan N *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2011, 21: 618
- [45] Yu Haiping, Li Chunfeng, Zhao Zhiheng *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2005, 168: 245
- [46] Yu Haiping, Li Chunfeng, Deng Jianghua. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2009, 209: 707
- [47] Wang Lifeng(王立峰), Huang Shangyu(黄尚宇). *Journal of System Simulation*(系统仿真学报)[J], 2006, 18(3): 757
- [48] Wang Lifeng, Chen Z Y, Li C X *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2006, 30: 395
- [49] Cui Xiaohui(崔晓辉), Mo Jianhua(莫健华), Wang Bo(王 波) *et al. Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学报)[J], 2011, 47(16): 45

- [50] Cui Xiaohui, Mo Jianhua, Xiao Shijie *et al.* *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2011, 57: 127
- [51] Mo Jianhua(莫健华), Wang Bo(王 波), Cui Xiaohui(崔晓辉) *et al.* *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2011, 18(1): 36
- [52] Li Fenqiang, Mo Jianhua, Hai Yangzhou *et al.* *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2013, 64: 1575

## Research Progress of Electromagnetic Flat Sheet Forming Technique

Chen Xiaowei, Wang Wenping, Wan Min, Xiong Weiren, Long Anlin

(Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** On the basis of brief introduction of electromagnetic flat sheet forming principle, the research progress of this technique at home and abroad is summarized in the following four aspects. In tool coils designing, the flat coil, uniform pressure coil, alongside double coil and the electromagnetic sizing coil are listed; in magnetic force calculation, the analytical method and the finite element method are narrated; in experimental research, the research for forming property of sheet and the study of electromagnetically assisted forming are stated; in the application of numerical simulation technique, the application of numerical simulation method and finite element software are related. At last, some technical challenges that should be overcome for popularizing the electromagnetic flat sheet forming technique are presented.

**Key words:** electromagnetic flat sheet forming; tool coil design; calculating the magnetic force; numerical simulation

---

Corresponding author: Wan Min, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, P. R. China, Tel: 0086-10-82338788, E-mail: mwan@buaa.edu.cn