

铝合金板成形性及成形工艺研究现状*

邓学峰 张 辉 陈振华

(湖南大学材料科学与工程学院,长沙 410082)

摘要 介绍了铝合金板材成形过程中影响其成形性能的主要因素,提高铝合金成形性能的先进成形工艺,以及有限元分析技术在铝合金板成形领域应用中的进展。指出开展对高性能铝合金板成形性能的实验研究与成形工艺有限元数值模拟有利于拓宽高性能铝合金板成形件在高技术领域的应用。

关键词 铝合金 板成形 有限元分析方法

Sheet Metal Formability and Forming Process of Aluminum Alloy

DENG Xuefeng ZHANG Hui CHEN Zhenhua

(College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082)

Abstract The main influencing factors on the formability of wrought sheet aluminum alloys, advanced forming processes and the application of the finite element analysis method in sheet forming of wrought aluminum alloys are summarized in this paper. It is emphasized that developing mathematical models by experimentally investigating of sheet formability and analyzing sheet forming process by using finite element method are necessary for the application of wrought aluminum alloys.

Key words wrought aluminum alloys, sheet metal forming, finite element method

0 引言

铝及其合金具有强度高、耐腐蚀性强、比强度高、焊接性好等优点,在各行业得到广泛应用,尤其在军事设备、航空仪器、运输工具等高新技术应用领域的应用,取得了良好的减重效果。

但相对于铝合金挤压型材,铝合金板材的应用受到了很大的限制,主要原因是铝合金板的成形性能相对较差,导致成形过程工艺的控制复杂并增加了加工成本。如 AUDI A8 的车身钣金件采用 $6\times\times\times$ 系列铝材,这些铝合金的纯度和工艺稳定性要求很高。在制造 AUDI A8 时采用连续退火处理工艺以提高其强度,连续退火生产线的费用及热处理能耗都很大^[1]。LY12 是一种应用较为广泛的航空铝合金材料,如国产 N5 A 型飞机在舵面系统大量采用 LY12 作超薄蒙皮结构^[2]。目前,国内很多学者对 LY12 进行了超塑性成形工艺的研究^[3],然而产生超塑性需要满足高温和低应变速率的条件,限制了该技术的应用范围。近年开发的高性能铝合金,如快速凝固技术制备的耐热铝合金在 300℃ 以上还具有较好的力学性能^[4],但由于成形性能差,阻碍了该合金的广泛应用。因此,研究类似高性能铝合金板材成形特性,改进铝合金板成形工艺,有着很好的应用前景和重要的意义。

1 铝合金板成形性研究

1.1 材料性能参数对成形特性的影响

材料自身性能参数是通过均匀拉伸实验、胀形实验等测试方式,直接和间接地推导出反映材料固有成形能力的一些力学性能参数。主要包括材料的流变应力曲线、应变硬化系数 n 、应

变速率敏感系数 m 、各向异性系数 r 和伸长率 δ 等。

(1) 材料的流变应力

流变应力反映了材料在塑性变形条件下的应力变化规律,常通过应力-应变曲线描述,金属的流变应力是研究材料变形特征的基础。在建立材料变形过程的数学模型时,研究者常常以数学表达式近似地把真应力-真应变曲线表达出来,于是产生了研究金属变形的雏形,如加工硬化方程、有初始屈服应力的刚塑性硬化方程等。金属材料在不同变形温度下,流变应力的变化有很大的差异。温度升高对金属有软化作用,钢、铜、铝等不同材料一般在加热变形条件下,随着变形温度的升高,流变应力下降,从而提高了金属的成形性能。但一些特殊的金属在某些温度区域,由于金属的脆性会出现一些脆区,如耐热铝合金 FVS0812 在 200~300℃ 之间存在着中温脆区^[5]。如果要对这些金属进行温成形,则需要避开这个温度区域进行。

(2) 应变硬化行为

应变硬化即加工硬化,是影响金属板成形的一个最主要的因素。在塑性变形期间,板料的变薄会引起应变硬化,常用应变硬化指数 n 来描述应变硬化特性。对于各向同性合金, n 是常数,应变硬化是控制材料成形的重要属性。对于板件的冲压成形, n 是最主要的系数,它决定了缩颈发生前应变的分布。Daoming Li^[6] 对 5182、5754 和 6111-T4 等 3 种铝合金板在不同温度和不同应变速率下进行拉伸实验,通过对 n 值的分析表明, n 值会随温度升高或应变速率下降而降低。

(3) 应变速率硬化行为

应变速率硬化是指变形过程中材料因应变速率的变化而抵

* 湖南省科技厅(20033348073)

邓学峰:男,1980年生,硕士研究生,从事铝加工成形研究 E-mail: littlebees1980@163.com 张辉:通讯作者,男,教授,博士,从事有色金属塑性加工理论与技术研究 Tel:0731-8821648

制局部应变产生的一种固有行为,常利用应变速率敏感系数 m 来描述。 m 值为正时会降低应变速率的增长和减小在变形过程中类似缩颈等失稳现象发生时的应变率梯度;相反, m 值为负时会加速局部应变的进行,从而引起材料在拉伸过程中出现锯齿流等现象。因此,应变速率敏感行为对抵制缩颈的产生和锯齿流现象的出现都是一个十分重要的材料属性。Daoming Li^[6]对 5182、5754 和 6111-T4 这 3 种铝合金板的研究发现,温度升高可以使 m 值提高,从而提高材料成形性。

(4) 各向异性行为

塑性的各向异性指数用 r 值来表示。对于钢材来说, r 值越大,拉深性能越好^[7,8]。但铝合金与钢材在变形性能上有很大的差异,铝合金板成形时,很多情况下是不能套用钢板的变形规律的。与应变硬化指数 n 不同,H. Takuda^[9]在对铝合金 5182-O 实验中测得的 r 值基本不随温度变化而变化。于忠奇等^[6]对 $5 \times \times \times$ 和 $6 \times \times \times$ 系列铝合金板进行拉伸实验,并将实验结果进行回归,然后对各性能参数进行评价,提出 r 值对拉深性能并无相关性。 r 值对铝合金成形性能的影响还需做大量实验进行论证。

(5) 其它属性参数

除了上面介绍的几个在材料模型里面比较重要的参数之外,影响材料成形特征的还有屈服强度、抗拉强度、屈强比、伸长率 δ 、平面应变抗拉强度和单向抗拉强度比 X_b 等,这些参数也能反映材料成形性能的好坏。虽然以上这些性能参数不能完全反映出材料的成形特征,但对这些参数及其作用的掌握,对建立正确的材料成形模型是很重要的。

1.2 成形条件对材料成形性的影响

成形条件包括实际加工时的成形温度、模具、压边力和摩擦系数等工艺参数。

(1) 温度组合模式的影响

温度组合模式是针对温成形条件下工具和坯料的温度组合而言的。在升温条件下,材料的成形性能有很大的提高。美国通用公司用 5182-O 合金进行 V-6 油箱内板的生产,在同时把模具和坯料的温度提高到 120℃ 的条件下取得了成功^[10]。但不是单一地把温度升高就可以获得最好的成形性能。Daoming Li^[10]同时使冲头、凹模在与坯料相同的温度下进行拉深实验,拉深深度有所提高。但这种方案并不是最优的,研究表明,在凹模温度比冲头温度高 50℃ 时能得到最好的效果。还有很多研究都是使冲头保持在室温或利用特殊冷却装置使其温度降到 -10℃ 以下进行实验^[11],这是利用坯料和相对冷的冲头接触,使接触部分的 n 值增大,从而避免了拉深过程中经常出现的冲头圆角部分的拉裂现象,达到提高拉深深度的效果。

除了对材料的成形性能有影响外,升温条件也使冲头载荷较在室温条件成形有了很大的变化。在升温条件下,可以以较小的载荷和较快的速度进行成形。另一方面,H. Takuda^[9]得到的实验结果是极限拉深率(LDR)随温度的升高而下降。因此并不是一味升高温度都可以提高成形性能,成形工艺参数的优化应该考虑周全。

(2) 模具圆角的影响

模具的圆角部分往往是应变梯度变化最大的地方,所以也是深拉过程中最容易发生塑性失效的区域。对于不同的金属,圆角对其成形特性的影响是不同的。M. Jain 等^[12]对铝合金 5754 和 6111 进行了深拉性能的实验,研究发现,当凹模圆角半径从 12mm 降到 6mm 时,两种合金的 LDR 下降都比较平缓;当

圆角半径从 6mm 继续下降时,两种合金的 LDR 出现了急剧下降的现象,铝合金 6111 表现得比前者更加激烈。实际上,在凹模半径为 3mm 时,两种合金都无法进行深冲。对于同一种合金,温度升高能使工件冲出更尖锐的圆角。H. Takuda^[9]对铝合金 5182-O 在室温和 250℃ 下进行的实验结果表明,对不同凹模圆角得到的拉深率从室温下的 2.0 左右升高到 250℃ 时的 2.5 以上。

(3) 压边力的影响

压边力在金属成形过程中有着很重要的作用,可有效防止金属法兰区域起皱。压边力太小会使起皱剧烈;然而压边力过大,会使金属流进模腔困难,发生拉裂。一直以来,很多学者都在研究压边力对成形性能的影响。实验表明^[13],在金属的深拉成形过程中,所需要的压边力和冲头载荷有着相似的变化规律。理想的压边力应该是在深拉开始阶段随着失稳起皱趋势增加而增大,到了毛坯外径减小至 $R_1 = 0.85R_0$ 时起皱最为严重,压边力也应该达到最大,此后失稳起皱趋势减弱,压边力也应该递减^[14]。

Daoming Li^[6]的实验结果表明,在增大压边力时,坯料的成形深度总体呈下降趋势,当达到一定值的时候基本趋于平稳。因此,优化成形工艺应该选择适当的压边力。

(4) 润滑条件的影响

润滑剂的使用有助于改善铝合金板成形过程中的接触摩擦状态,使铝板的应变分布更趋于合理,从而提高板材的成形性能。邹正华等^[15]对铝合金 5182 在成形温度 250℃、压边力 1.17 MPa 条件下的 3 种润滑状态进行了实验研究,结果表明,润滑状态下的极限拉深高度大大提升,改善了板料的可成形性。另外,他发现在成形过程中摩擦系数是变化的,而且在不同的变形区域摩擦系数也不尽相同,实验中随着冲头行程的增加,摩擦系数呈增加的趋势^[16]。还有研究表明^[2],随着板厚的减小,在成形力中摩擦力所占比例加大,容易导致变形不均匀和不稳定,产生破裂现象,板料的成形极限也会随之下降。因此,优化成形工艺必须考虑摩擦润滑对成形性能的影响。

(5) 其它成形条件的影响

影响成形特性的其它成形条件还包括成形速率、保压持续时间以及材料在多工序成形时工序间的次序等。这些条件对材料的成形特性造成的影响有:成形速率越低,材料成形性能越好;保压时间越长,材料回弹越小等,但实际生产中必须顾及到生产效率问题。

2 铝合金板材先进成形工艺的研究

2.1 板材液压成形

板材液压成形是在模腔内充满液体的状态下将材料置于模面上,材料随冲头的前进被压入充满液体的模腔内,同时被液体产生的压力紧贴冲头,从而形成“摩擦保持效果”;而且液体可以从板料法兰与凹模间溢出,减少有害摩擦阻力而形成“溢流润滑效果”^[17],因此使板成形极限得到极大的提高。常规冲压只有 2.0 左右极限深冲比的铝合金板,用该法冲压可达 2.3,超过软钢常法冲压的极限深冲比 2.2^[7]。目前板材液压成形主要应用于汽车覆盖件生产,世界众多著名汽车制造商都在采用此技术;同时,该技术也用于航天航空制品的生产,如通信用的雷达罩也逐渐采用液压成形加工^[18]。

2.2 控制压边力成形

压边力是板料成形技术中的重要控制手段,在实际深拉的

过程中理想的压边力应该是变化的。韩丹莹等^[19]通过采用多级压边力方法,在成形初期和中期允许法兰轻微起皱前提下使用低的防皱压力,在成形后期使用高的压边力从而消除这种轻微的起皱,达到提高筒形件成形极限的目的。

传统的压边方式是采用刚性压边圈,压边力均匀分布在压边圈上。对于表面形状复杂的深拉件,深拉成形过程中金属材料的流动在各个部分是不均匀的,如果都采用恒定的均匀压边力,可能导致在同一零件上同时出现起皱和拉裂的现象。弹性结构的压边装置可以比较好地解决这个问题。余海燕等^[20]对6111-T4铝合金板进行研究,以阶梯盒形件为研究对象进行深冲实验,通过多点压边力控制系统对恒压边力和变压边力方案的效果进行比较,结果发现,变压边力方案下的工件基本消除了恒压边力方案中出现的起皱和破裂,得到了很好的效果。

2.3 温成形

铝合金在温度升高的条件下进行塑性加工,成形性能比其在室温时有很大的提高。所谓的温成形主要是针对在常温下的加工方法,是一种将材料加热到回复或再结晶温度下进行加工成形的工艺。对坯料和模具的加热方式主要是通过坯料的预热和在模具内加入发热元件和温控元件从而达到对温度的准确控制。近年来 Daoming Li 对 5754、5182+Mn、6111-T4 等 3 种铝合金板材做了大量的实验。实验内容包括热拉伸实验,冲头、凹模在不同温度组合下的杯形深拉实验以及胀形实验等。比较了应变强化铝合金和析出强化铝合金的成型性能,得出了优化的成形温度,冲头、凹模在成形过程中优化的温度组合以及各种优化的加工条件等^[6,10]。美国通用公司生产 V-6 油箱内板采用的就是温成形工艺^[10]。

2.4 超塑性成形

超塑性成形是指板材在特定的温度和变形速度下产生超塑性后进行成形的工艺。超塑性成形法可分为阳模成形法和阴模成形法,前者适用于大型的浅成形件,后者适用于深成形件和复杂的成形件。超塑性成形法具有能进行常规冲压不可能实现的复杂件整体成形、对金属模强度要求低等优点。但超塑性现象只在温度较高(一般为 500℃左右)、低变形速度的情况下出现,成形时间比温成形的长。周义等^[21]用铝合金 5182 以超塑性成形方式进行了汽车前挡泥板成形实验,在成形温度控制在 450~500℃、最大胀形压力达到 0.42MPa 的条件下,实验取得成功,整个成形时间为 30~60min。由此可见,超塑性工艺不能面向大批量的生产,只适合于多品种小批量的生产。由于超塑性成形对满足设计和性能要求等多方面都具有独特的优越性^[22],高应变速率的超塑性材料及其成形技术的开发对推广超塑性成形工艺具有积极的意义。

3 成形性能的有限元模拟方法研究

3.1 有限元模拟技术的特点

随着计算机技术的不断发展,材料成形的有限元模拟分析方法得到了越来越广泛的应用。自 20 世纪 90 年代以来,有限元分析软件的算法得到很大的改进,除了传统使用的 Hollomon 方程、Swift 方程等只考虑应变硬化对材料影响的数学模型外,研究者还提出了如 Fields and Backofen 方程、Grosman 方程等综合考虑应变硬化、应变速率敏感性和温度对成形特性影响的数学模型^[23]。这些研究使计算条件更加接近实际加工条件,计算结果更加真实可信。自上述分析可知,影响材料成形性能的

参数较多,包括材料自身的性能参数,加工条件中的温度组合、模具的几何形状、摩擦润滑条件等;在深拉成形过程中材料还可能发生断裂、起皱、回弹等现象,这些参数如果要一一找到其中的相互关系和加工条件对成形特性的影响大小,通过传统实验方式则需要做大量深拉实验,既花费时间又使实验成本大幅上升。有限元分析方法为研究者对材料成形性能和成形过程中的行为研究提供了一条很好的分析途径。不仅如此,现在的有限元技术在借助计算机二维、三维图形技术的帮助下,通过友好的图形界面,研究者还可以轻易了解到在成形部件上的残余应力分布、各部分的板料厚度、温度分布梯度等传统方式难以测量出来的参数,更轻松地掌握成形的结果。用有限元分析方法进行模拟实验,研究者可以在计算机上轻松得到多组实验结果进行筛选^[24],从中选取优化的加工参数进行实际加工实验对照,从而达到省钱、高效的研究开发效果。

有限元分析方法模拟结果的准确性主要取决于材料模型的准确性、屈服准则的选择以及加工条件如模具的几何模型、压边力、润滑条件下的摩擦等参数和实际加工情况的相符性等。

3.2 材料模型和屈服准则的选择

材料的模型主要包括材料的流变应力方程、延伸率、弹性模量、屈服强度等各项参数。其中,材料的流变应力方程是材料模型里面最主要的部分之一。为了能准确表征板料成形过程中的屈服行为,分析时对屈服准则的选取也是极为重要的。目前比较流行的屈服准则有 Tresca、Von-Mises、Hill 等分别提出的在一般应力状态下的各种材料屈服条件,以适应各种材料的力学分析。在对不锈钢板等各向异性材料进行模拟时多使用 Von-Mises 或 Hill-48 屈服准则,但对于以上 2 个屈服准则是否适合于如铝合金类低 r 值的材料,许多研究者提出了质疑。Barlat 和 Lian 于 1989 年提出一个新的平面各向异性屈服函数,即 Barlat-89 屈服准则^[25]。Eric T. Harpell 等对 Von-Mises、Hill-48 和 Barlat-89 屈服准则做了比较实验^[26],指出使用 Barlat-89 屈服准则比使用 Von-Mises 和 Hill-48 屈服准则更精确。Barlat-89 屈服准则对应变分布的预测和实验测量值的偏差在 5% 以内。柳泽等^[27]对 08Al 板进行了模拟实验和加工实验结果的比较,也得出 Barlat-89 屈服准则比其它的屈服准则更能精确地描述薄板材料性能的结论。由此可见,使用更适合的屈服准则,模拟结果会更精确。Barlat 等继续对屈服准则加以改进,分别在 1991 年和 1997 年提出了六参数屈服准则(YLD91)和 Balart-97 屈服准则(YLD96),从而为选择更合适的屈服准则进行铝合金板成形模拟提供了更可靠的依据^[28]。

3.3 对加工条件的模拟

对加工条件的模拟主要包括模具几何尺寸、压边力的控制、摩擦润滑条件等方面的模拟。

模具的几何尺寸主要是通过相应的机械辅助绘图软件(CAD)来构造二维的工件和模具图形或三维几何实体,以通用文件格式输出并导入有限元分析软件里。在有限元软件里需要进行网格转换,这一步也是关键的一步,网格越细密,模拟精度越高,但需要的计算速度也成倍地上升。因此,在划分网格时需要同时兼顾精度和效率。

压边力是深拉成形过程中一个很重要的工艺参数。无论是多级压边力方法还是多点压边力方法,如果单纯以传统实验开发都需要花费大量的资金。借助有限元分析方法可以轻易实现压边力的变化,使之更加接近理想压边力的变化方式。Mustafa

A. Ahmetoglu^[29]以有限元模拟方法验证得出,随时间而变化的压边力可以提高铝合金板的成形性能。利用有限元分析方法为实验进一步的验证提供了明确的方向。

接触摩擦条件是板料深拉成形计算和仿真领域的难点问题之一。在板料成形过程中板料上的作用力是通过板料表面和模具表面的接触传递的。模具表面为主约束表面,板料表面为从属表面,如何正确制定主从表面的接触状态并选择合适的位移约束条件和边界摩擦条件是数值模拟的关键^[30]。现行的有限元分析软件中,摩擦系数常常被作为一个常数,依靠选取不同大小的摩擦系数来反映成形中润滑的影响。而实际加工过程中摩擦系数是变化的。由于摩擦模型与实际不一致,导致模拟结果和实际结果的偏差。郭正华等^[16]研究铝合金在润滑条件下筒形件深拉过程中的摩擦模型,得出了计算摩擦系数随冲头行程变化的初步模型,虽然结果比实际情况偏小,但为进一步深入研究铝合金板温成形过程的摩擦学问题奠定了基础。

有限元分析方法在材料成形上的应用还有待进一步的研究,目前还没有开发出一个完整的分析模型能完全准确地模拟材料的成形过程。柳泽等^[27]以 Barlat-89 屈服准则对 08Al 板的实验结果表明,各向异性指数 r 值对成形影响很大。而于忠奇等^[8]以实验方式得出的结论是 r 值对成形性影响无相关性。这 2 种结论是相悖的。另外,对在润滑条件下摩擦模型的研究,还有待改进。因此,有限元分析的模拟结果必须通过实验验证其正确性。虽然有限元分析方法还有不完善的地方,但其的确为研究者们开发新的加工工艺、优化加工方案提供了方便的验证方案和比较精确的可行性预测。

4 结语

目前,有关铝合金板材成形性能与工艺研究主要集中在 $1 \times \times \times$ 、 $3 \times \times \times$ 、 $5 \times \times \times$ 、 $6 \times \times \times$ 系列商用铝合金上,对于特殊用途的高性能铝合金板如耐热铝合金等的研究相对较少。近年来,以新的成形技术开发出来的高性能铝合金,可广泛应用于各领域,替代原有的钢、铜、钛等比重大的材料,降低产品材料成本及重量。但由于自身依然存在成形性能相对差的缺点,阻碍了新开发的铝合金板在实际工业中的应用。因此,结合传统的性能实验方法和先进的有限元分析技术,可使铝合金板材成形性能与新成形工艺研究过程更加高效,成本更低,进而开发出高性能铝合金板材先进成形工艺,拓宽铝合金板材的应用领域。

参考文献

- 刘天湖,孙友松. 新材料新工艺在新型汽车开发中的应用. 金属成形工艺, 2001, 19(1): 49
- 傅俊旭. 铝合金超薄板料的成形性能与工艺. 航空工艺技术, 1994, (1): 14
- 许晓静,王伟. 工业供应态 LY12 铝合金的超塑性. 宇航材料工艺, 2002, (3): 44
- 詹美燕,陈振华,夏伟军. 喷射沉积-轧制工艺制备的 FVS0812 薄板的高温组织和力学性能. 中国有色金属学报, 2004, 14(8): 1348
- 陶友瑞. FVS0812 薄板半球成形零件拉深成形研究: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2004
- Li Daoming, Amit Ghosh. Tensile deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures. Mater Sci Eng, 2003, (A352): 279
- 陈叙. 汽车车身嵌板用铝合金板成形特性. 铝加工, 1994, 17(3): 20
- 于忠奇,赵亦希,林忠钦. 汽车用铝合金板拉深性能评估参数. 中国有色金属学报, 2004, 14(10): 1689
- Takuda H, Mori K, Masuda I, et al. Finite element simulation of warm deep drawing of aluminum alloy sheet when accounting for heat conduction. J Mater Proc Techn, 2002, (120): 412
- Li Daoming, Amit K, Ghosh, et al. Biaxial warm forming behavior of aluminum sheet alloys. J Mater Proc Techn, 2004, (145): 281
- Moon Y H, Kang Y K, Park J W, et al. Tool temperature control to increase the deep drawability of aluminum 1050 sheet. Int Machine Tools Manuf, 2001, (41): 1283
- Jain M, Allin J, Bull M J. Deep drawing characteristics of automotive aluminum alloys. Mater Sci Eng, 1998, (A256): 69
- 李良福编译. 在拉伸盒形件时控制压边力的研究. 模具技术, 1997, (5): 19
- 杨连发,李泉水,田玲,等. 拉延成形中的压边技术. 桂林电子工业学院学报, 2001, 21(4): 51
- 郭正华,李志刚,欧阳可居,等. 5182 铝合金板温成形工艺及摩擦学特性的研究. 锻压装备与制造技术, 2003, (6): 80
- 郭正华,李志刚,王璽九,等. 润滑条件下铝合金板成形模拟中摩擦模型的研究. 中国机械工程, 2004, 15(15): 1388
- 汤利辉,张士宏,康达昌. 板液压成形及无模充液拉深技术. 塑性工程学报, 2002, 9(4): 29
- 直妍,阳林,吴道建. 液压成形技术及其新进展. 热加工工艺, 2004, (12): 63
- 韩丹莹,程秋谋,朱华成,等. 多级压边力拉深方法的研究. 机械工程师, 1996, (5): 9
- 余海燕,陈关龙,林忠钦,等. 新型多点变压的压边力控制系统研制. 塑性工程学报, 2004, 11(5): 29
- 周义,曾志鹏,金泉林. 工业铝合金汽车覆盖件的超塑成形研究. 塑性工程学报, 2004, 11(5): 64
- 徐海卫,程晓农,许晓静. 高应变速率超塑性铝基材料的研究现状与展望. 江苏大学学报(自然科学版), 2002, 23(3): 67
- Gronostajski Z. The constitutive equations for FEM analysis. J Mater Proc Techn, 2000, 104: 40
- 李迪,毕新雯,李光利. 汽车覆盖件用铝合金板冲压成型的材料参数敏感性. 山东理工大学学报(自然科学版), 2004, 18(3): 27
- Barlat F, Lian J I. Plastic behavior and stretchability of sheet metals, part I. Int J Plasticity, 1989, (5): 51
- Eric T Harpell, Michael J Worswick, Mark Finn, et al. Numerical prediction of the limiting draw ratio for aluminum alloy sheet. J Mater Proc Techn, 2000, 100: 131
- 柳泽,傅沛福,李运兴,等. 平面各向异性金属盒形件拉深过程的有限元模拟. 塑性工程学报, 1997, 4(4): 44
- 孙成智,陈关龙,林忠钦,等. 各向异性屈服准则对铝合金板成形预测精度的影响. 塑性工程学报, 2004, 11(3): 59
- Mustafa A Ahmetoglu. Forming of aluminum alloys-application of computer simulations and blank holding force control. J Mater Proc Techn, 1997, (71): 147
- 杨连发,孙希延,李泉水,等. 板料拉深成形数值模拟的关键技术. 现代机械, 2002, (3): 49

(责任编辑 何欣)