文章编号: 1004-0609(2012)12-3342-06

汽车用 5182 铝合金板温冲压实验研究及数值模拟

陈婕尔1,王孟君1,2,杨刚1,周威1,李光耀2

(1. 中南大学 有色金属材料科学与工程教育部重点实验室,长沙 410083;2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室,长沙,410082)

摘 要: 以 5182 铝合金板本构方程为基础,采用 ABAQUS 有限元模拟软件对 5182 铝合金板温冲压过程进行数 值模拟,研究冲压温度和冲压速度等工艺因素对板材成形性能的影响;通过温冲压实验探讨 5182 铝合金板在不 同冲压温度、冲压速度下的极限拉深比(LDR)。实验及模拟结果表明:冲压速度为 0.1 mm/s 时,合金的 LDR 值 并非随着温度的升高而单调增加;冲压温度为 523 K 时,随着冲压速度的增加,LDR 值逐渐降低;5182 铝合金 板的冲压性能主要受变形过程中板材的温度梯度与应变速率的影响;模拟结果与实验结果具有良好的一致性。 关键词:5182 铝合金;温冲压;极限拉伸化;数值模拟 中图分类号:中图分类号:TG386.3 文献标志码:A

Experimental study and numerical simulation of warm stamping of 5182 aluminum alloy for automotive body

CHEN Jie-er¹, WANG Meng-jun^{1, 2}, YANG Gang¹, ZHOU Wei¹, LI Guang-yao²

 Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials Science and Engineering, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University,

Changsha 410082, China)

Abstract: Based on the constitutive equation of 5182 aluminum alloy, the influence of process parameters, such as drawing temperature and stamping speed, was investigated by ABAQUS soft during the numerical simulation. By warm stamping experiment, the limiting drawing ratio (LDR) value of 5182 aluminum alloy sheet at different stamping temperatures and stamping speeds was obtained. The experimental and simulation results show that the LDR value of 5182 aluminum alloy does not increase with the raise of forming temperature monotonously when the drawing speed is 0.1 mm/s. LDR value decreases with the increase of stamping speed ,when the forming temperature is 523 K. The drawing property of 5182 aluminum alloy is mainly affected by the temperature gradient and strain rate in the deformation process. The simulation results fit well with the experimental ones.

Key words: 5182 aluminum alloy; warm stamping; limiting drawing ratio; numerical simulation

随着汽车工业的快速发展,环境污染与能源短缺 已经成为社会日益凸出的问题。因此,减轻汽车质量 以降低能耗,提高燃料的经济性,减少污染成为各大 汽车厂商的主要措施之一^[1-2]。轻质材料的应用是实 现轻量化的主要方法。在众多轻质材料中,铝合金以 其密度低、比强度和比刚度较高等优点而受到广泛的 关注^[3-4]。目前,国内外研究人员对汽车车身铝合金板 材的研究主要集中在 Al-Cu-Mg(2000 系)、Al-Mg(5000

基金项目: 汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金资助(31115029)

收稿日期: 2011-09-28; 修订日期: 2012-10-15

通信作者: 王孟君, 教授; 电话: 0731-88836408; E-mail: wmj1965@yahoo.com.cn

系)和 Al-Mg-Si(6000 系)三大系列上^[5]。热处理不可强 化的 5000 系铝合金由于其强度、成形性和抗腐蚀性等 方面具有普碳钢板的优点,能用于汽车内板等形状复 杂的部位^[6]。

当前,国内外对 5182 铝合金板在汽车车身覆盖件 中的应用研究仍处于起步阶段^[7–8]。汽车用铝合金板的 应用与传统的汽车用钢板相比有很大的差距,主要表 现在铝合金板在室温条件下其成形性能较差,成形时 易导致金属流动不均,从而引发裂纹和起皱等缺陷。 有关研究表明^[9–21]: 5182 铝合金板在温变形条件下其 塑性会有较大提高。且随着计算机技术的快速发展以 及有限元软件的成熟,利用有限元研究铝合金温成形 过程已经得到了广泛的应用^[22–24]。为此,本文作者采 用温冲压试验,结合 ABAQUS 有限元软件,考虑材 料变形温度与应变率的影响,研究冲压温度和冲压速 度的变化对 5182 铝合金板料冲压成形性能的影响。

1 极限拉深比实验

实验材料采用厚为 1.4mm 的退火态 5182 铝合金 冷轧板材,合金化学成分列于表 1。

板材的生产工艺流程为: 熔炼→铸造→锯切→铣 面→均匀化→热轧→冷轧(板厚 1.4 mm) →退火(380 ℃, 24 h)^[25]。

表1 5182 铝合金化学成分

Table 1Chemical compositions of 5182 aluminum alloy(mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg
0.10	0.22	0.03	0.24	4.33
Cr	Ni	Zn	Ti	Al
0.2	0.01	0.03	0.115	Bal.

图 1 所示为温冲压实验装置简图。采用极限拉深 比(LDR)来评定板材的冲压成形性能。凸模与凹模直 径分别为 d 30 mm 与 d 34 mm,凹模圆角与凸模圆角 半径均为 6 mm。试样采用线切割的方法制取直径为 45~75 mm、且以 1.5 mm 递增的大小不同的圆片状板 材。在实验过程中,将板料涂抹好润滑剂后放置于凹 模之上,并用压边圈压紧;热电偶同时加热凹模和压 边圈,凸模不加热。板料的加热温度分别为 323、373、 448、523 和 573 K,压边力为 3.0 N/mm²,以 0.1、0.5 和 1.5 mm/s 的冲压速度进行冲压实验,并在实验过程 中保持冲压速度不变。 图 2(a)所示为冲压速度为 0.1 mm/s、压边力为 3.0 N/mm²时不同冲压温度下 5182 铝合金实验 LDR 值。 由图 2(a)可知,随着冲压温度的升高,合金的 LDR 值 由 1.9 逐渐增大,523 K 时达到最大值 2.5;而当冲压



图1 冲压试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stamping experiment equipment





Fig. 2 LDR of different stamping temperatures at drawing speed of 0.1mm/s(a) and LDR of different stamping speeds at temperature of 523 K(b)

2012年12月

温度的继续升高,LDR 值开始下降。图 2(b)所示为变 形温度为 523 K、压边力为 3.0 N/mm²时,不同冲压速 度下 5182 铝合金的实验 LDR 值。从图 2(b)中可以看 出,随着冲压速度的增大,该合金的 LDR 值逐渐下降。

2 数值模拟及分析验证

2.1 数值模型建立及模拟参数的确定

通过 ABAQUS 有限元软件建立冲压成形过程模 拟模型,考虑到模型的对称性,取1/4 模型进行计算, 数值模型如图 3 所示;模型尺寸与试验装置尺寸一致。 凸模、压边圈和凹模设为刚体,板料设为变形体,采 用四节点壳单元划分网格。模拟中忽略板料的各向异 性、包辛格效应及板料与空气的热辐射作用。模拟过 程中,模具温度设为恒定。5182 铝合金板温冲压模拟 详细参数见表 2。材料的本构方程采用黄电源^[9]通过在 变形温度 323~523 K、应变速率 0.001~0.1 s⁻¹范围时 的应力应变曲线建立的 5182 铝合金相关的本构方程, 如式(1)所示。

$$\sigma = (-1.415\ 03T + 11.401\ 03\ln\dot{\varepsilon} + 1\ 095.617\ 1) \times$$

$$\varepsilon^{(0.052\ 29+0.007\ 318\ln\dot{\varepsilon} + 96.048\ 87\frac{1}{T})} \times$$

$$\dot{\varepsilon}^{(-0.570\ 89+0.004\ 87T-1.2814\ 6\times10^{-3}T^{2}+1.126\ 13\times10^{-8}T^{3})}$$
(1)

2.2 温度对成形性能的影响

图 4 所示为不同冲压温度下变形板料温度分布云 图。由图 4 可看出,在温冲压过程中,由于凸模与板 料的接触热传导的作用,使板料具有一定温度梯度(凸





Fig. 3 Schematic diagram of stamping model for finite element analysis (1/4)

表2 数值模拟参数

 Table 2
 Numerical simulation parameters

Parameter	Numerical value	
Density/(kg·mm ⁻³)	2.7×10^{-6}	
Poisson's ratio	0.33	
Blank temperature/K	323, 373, 448, 523, 573	
Punch temperature	RT	
Drawing speed/(mm \cdot s ⁻¹)	0.1, 1.0, 1.5	
$BHF/(N \cdot mm^{-2})$	3.0	
Fraction coefficient of punch and blank	0.125	
Fraction coefficient of die and blank	0.07	
Fraction coefficient of binder and blank	0.07	
$C/(\mathbf{J}\cdot\mathbf{kg}^{-1}\cdot\mathbf{K}^{-1})$	920	
$\lambda/(\mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-1}\cdot\mathrm{K}^{-1})$	121	
$h/(\mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-2}\cdot\mathrm{K}^{-1})$	1 400	

模圆角处温度低, 凹模圆角处温度高); 随着冲压温度 的升高,变形板料的温度梯度差值增大。当冲压温度 低于 523 K 时,随着冲压温度的升高,在温度梯度的 作用下,温度较低的凸模圆角处板料的应变硬化指数 增大[7], 使凸模圆角处板料的减薄趋势逐渐转移至凹 模圆角处,从而减轻了凸模圆角处板料的拉裂趋势, 使合金的 LDR 值增加, 如图 5 所示。而当冲压温度达 到 573 K,冲压行程为 16 mm 时,此时板料温度梯度 的差值达到 234 K, 凹模圆角处板料最小厚度仅为 0.5672mm, 减薄率超过了25%, 出现断裂, 如图4(c) 与 5(c)所示。这主要是由于冲压温度升高,变形过程 中凹模圆角处板料的抗拉强度降低,且降低的程度超 过了塑性变形引起的加工硬化程度,造成板料在凹模 圆角断裂。极限拉深比实验结果如图 6 所示,极限拉 深比并非随着成形温度的上升而单调增大;随着温度 的升高, 塑性变形能力增强, 拉深性能明显改善, 但 合金的抗拉强度却逐渐降低,在 523 K 时, LDR 值达 到最大值 2.5。若板料的温度过高(超过 523 K 时),由 于凹模圆角处的危险截面抗拉强度降低,且降低的程 度超过了塑性变形的增强程度,从而增大了板料被拉 裂的趋势,模拟结果与实验结果基本一致。

2.3 速度对成形性能的影响

图 7 所示为不同冲压速度下板料温度分布云图。 从图 7 中可以看出,在相同的凸模行程下,随着冲压 速度的增加,板料的温度梯度差值变小。同时,冲压 速度的增加使得板料的应变速率增加。由于板料的应

变速率敏感系数随着变形温度的升高而增大[7],所以 凹模圆角处的变形板料所受到应变速率的影响要大于

凸模圆角处的板料,而且随着应变速率的增加,使得 板料的应变硬化指数增加^[7]。在温度梯度与应变速率 的双重影响下,合金的应变硬化得不到充分松弛,使 其强度和冲压变形抗力迅速增加、塑性变形能力降低, 危险截面在凸模圆角处产生,造成板料在凸模圆角处 断裂,如图 8 所示。极限拉深比实验结果如图 8(b)所 示。当拉深速度增至1.5 mm/s 时,在拉深很浅时板料 就在凸模圆角处被拉裂。





图 6 不同变形温度下的 5182 铝合金拉深杯形件

Fig. 6 Cup shell of 5182 aluminum alloy at different deformation temperatures





图 8 冲压速度为 1.5 mm/s 时的拉裂模拟图及实物图

Fig. 8 Crack simulation map(a) and physical map(b) at stamping speed of 1.5 mm/s

4 结论

1) 冲压温度和冲压速度对 5182 铝合金的冲压性 能具有重要影响;当冲压速度为 0.1 mm/s 时,随着冲 压温度的升高,5182 铝合金板的 LDR 先增加后减少, 在 523 K 时达到最大值 2.5;当冲压温度为 523 K 时,随着冲压速度的增加,LDR 值从 2.5 降低至 1.9。

2) 当冲压速度为 0.1 mm/s 时,随着冲压温度的 升高,变形板料的温度梯度逐渐增大,LDR 值逐渐增 大;当冲压温度为 523 K 时,随着冲压速度的增大, 变形板料的应变速率增大,温度梯度差值变小,合金 的 LDR 值减小。实验结果与模拟结果基本吻合。

REFERENCES

 MILLER W S, ZHUANG L, BOTTEMA J. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 280(1): 37–49.

- [2] 王孟君,黄电源,姜海涛. 汽车用铝合金的研究进展[J]. 金属 热处理, 2006, 31(9): 34-38.
 WANG Meng-jun, HUANG Dian-yuan, JIANG Hai-tao.
 Research progress of aluminium alloys for the automotive industry[J]. Heat Treatment of Metals, 2006, 31(9): 34-38.
- [3] NARGESS S. Lightening the material[J]. Automotive Engineering, 2003, 31(9): 70–71.
- [4] 肖永清. 铝合金是现代汽车轻量化的首选材料[J]. 铝加工, 2005(5): 36-39.
 XIAO Yong-qing. Aluminum alloy-the optimum material for

modern light weight automobile[J]. Aluminium Fabrication, 2005(5): 36–39.

- [5] 王孟君,黄电源,姜海涛.汽车用铝合金的研究进展[J].金属 热处理,2006,31(9):35-39.
 WANG Meng-jun, HUANG Dian-yuan, JIANG Hai-tao. Research progress of aluminum alloys for the automotive industry[J]. Heat Treatment of Metals, 2006, 31(9): 35-39.
- [6] 王 莉. Al-Mg 合金的组织及力学性能[J]. 轻合金加工技术, 2005, 33(11): 46-48.
 WANG Li. Microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2005, 33(11): 46-48.
- [7] LORD J. A materials odyssey[J]. Automotive Industries, 2001, 28(10): 83–89.
- [8] 鲁晓楠,郑德荣.现代汽车车身成形新技术[J]. 锻压装备与 制造技术,2008(4):11-13.
 LU Xiao-nan, ZHENG De-rong. New stamping techniques for auto body[J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing

auto body[J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2008(4): 11–13. [9] 黄电源. 汽车用 5182 铝合金板材的温拉伸流变行为[J].中国

- 有色金属学报, 2008, 18(11): 1958–1963. WANG Meng-jun, REN Jie. Flow behavior of 5182 aluminum alloy for automotive body sheet during warn tensile deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(11): 1958–1963.
- [10] PALUMBO G, TRICARICO L. Numerical and experimental investigations on the warm deep drawing process of circular aluminum alloy specimens[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184(1/3): 115–123.
- [11] LI D, GHOSH A K. Biaxial warm forming behavior of aluminum sheet alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 145: 281–293.
- [12] FINCH D M, WILSON S P, DORN J E. Deep-drawing aluminum alloys at elevated temperatures[J]. ASM Transactions, 1946, 36: 254–289.
- [13] AYRES R A. Alloying aluminum with magnesium for ductility at warm temperatures (25 to 250 1C)[J]. Metallurgical

Transactions, 1979, 10A: 849-854.

- [14] MOON Y H, KANG Y K, PARK J W, GONG S R. Tool temperature control to increase the deep drawability of aluminum 1050 sheet[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41: 1283–1294.
- [15] LI D, GHOSH A. Tensile deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 352: 279–286.
- [16] SHEHATA F, PAINTER M J, PEARCE R. Warm forming of aluminum/magnesium alloy sheet[J]. Journal of Mechanical Working Technology, 1978, 2: 279–290.
- [17] KIM H S, KOC M. Numerical investigations on spring back characteristics of aluminum sheet metal alloy sin warm forming conditions[J]. Journal of Materials Processing Technology 2008, 204: 370–383.
- [18] TOROS S, OZTURK F, KACAR I. Review of warm forming of aluminum-magnesium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 207: 1–12.
- [19] NAKA T, YOSHIDA F. Deep drawability of type 5083 aluminium-magnesium alloy sheet under various conditions of temperature and forming speed[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 89/90: 19–23.
- [20] BOLT P J, LAMBOO N A P M, ROZIER P J C M. Feasibility of warm drawing of aluminium products[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 115: 118–121.
- [21] KIM H S, KOC M, NI J. Determination of proper temperature distribution for warm forming of aluminum sheet materials[J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 128: 613–621.
- [22] KEUM Y T, GHOO B Y, WAGINER R H. 3-Dimensional finite element analysis of non-isothermal forming processes for non-ferrous sheets[C]//Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications. Lisse: A.A. Balkema, 2001: 813–818.
- [23] 周 义,曾志鹏,金泉林. 工业铝合金汽车覆盖件的超塑性成形研究[J]. 塑性工程学报,2004,11(5):64-66.
 ZHOU Yi, ZENG Zhi-peng, JIN Quan-lin. Superplastic forming of commercial aluminum alloy car body panels[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2004, 11(5): 64-66.
- [24] 朱茹敏, 关绍康, 曹宏深. 铝镁硅合金车身板材皱曲特性的 数值模拟研究[J]. 轻合金加工技术, 2003, 31(2): 25-28. ZHU Ru-min, GUAN Shao-kang, CAO Hong-shen. Study on numerical simulation of buckling characteristic on new type Al-Mg-Si alloy auto body sheets[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2003, 31(2): 25-28.
- [25] 王孟君,黄电源. 退火对汽车用 5182 铝合金板材组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2006, 32(9): 18-20.
 WANG Meng-jun, HUANG Dian-yuan. Influence of annealing process on microstructure and properties of 5182 aluminium alloy sheet for automobile[J]. Heat Treatment of Metals, 2006, 32(9): 18-20.