

摩擦与润滑

7A09 铝合金高温摩擦模型及微观机理分析

韩传德¹, 夏建生^{1,2}, 赵 军², 窦沙沙¹, 朱少华¹, 刘榕滔¹

(1. 盐城工学院 机械工程学院, 江苏 盐城 224000; 2. 燕山大学 机械工程学院, 河北 秦皇岛 066000)

摘要: 采用 CFT-I 型摩擦试验机, 研究了润滑条件下不同的载荷、摩擦速度和温度对 7A09 铝合金摩擦因数的影响, 并采用 SEM 分析微观状态下不同摩擦因素的作用机理。通过分析建立了基于不同载荷、摩擦速度和温度的变摩擦因数模型, 并通过试验验证了模型的准确性。利用 ABAQUS 的子程序开发接口 Fric 和高级计算机语言 Fortran 对摩擦模型进行导入和有限元模拟, 通过对比库伦摩擦模型的仿真结果和冲压试验的结果进行验证。结果表明: 摩擦因数随着载荷的增加、摩擦速度的增加、温度的增加而减小; 基于不同载荷、摩擦速度和温度的变摩擦因数模型的数据的拟合程度较好; 变摩擦因数模型的仿真结果更接近于冲压试验的结果, 铝板的减薄处在侧壁, 验证了摩擦模型的有效性。

关键词: 7A09 铝合金; 热冲压; 微观形貌; 变摩擦因数模型; 库伦摩擦模型

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.09.025

中图分类号: TG146.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 09-0197-07

High-temperature friction model and microscopic mechanism analysis on 7A09 aluminum alloy

Han Chuande¹, Xia Jiansheng^{1,2}, Zhao Jun², Dou Shasha¹, Zhu Shaohua¹, Liu Rongtao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: The influences of different loads, friction speeds and temperatures on the friction coefficient of 7A09 aluminum alloy under lubrication condition were studied by friction testing machine CFT-I, and the action mechanism of different friction factors in microscopic state was analyzed by SEM. Then, a variable friction coefficient model based on different loads, friction speeds and temperatures was established through analysis, and the accuracy of the model was verified by tests. Furthermore, the friction model was imported and simulated in finite element by using ABAQUS subroutine development interface Fric and advanced computer language Fortran, and it was verified by comparing the simulation result of Coulomb friction model with the result of stamping test. The results show that the friction coefficient decreases with the increasing of load, friction speed and temperature, the data fitting degree of the variable friction coefficient model based on different loads, friction speeds and temperatures is better, the simulation result of the variable friction coefficient model is closer to the result of stamping test, and the thinning of aluminum plate occurs on the side wall, which verifies the validity of the friction model.

Key words: 7A09 aluminium alloy; hot stamping; micro-morphology; variable friction coefficient model; Coulomb friction model

在当下绿色低碳的出行理念以及日益严峻的能源匮乏问题的影响下, 车辆厂商不再一味地追求汽车的动力性能, 而是将燃油经济性作为新时代汽车的一大卖点。车辆制造商为了提高车辆的燃油经济性, 通过将低碳钢制成的零件逐渐替换为轻质材料——铝合金, 极大地减轻了车身重量, 从而大大提高了车辆的燃油经济性^[1]。7A09 铝合金作为 Al-

Zn-Mg-Cu 系超硬铝合金, 其自身具有较高的抗拉强度和较低的密度, 以及良好的抗变形能力, 同时, 具有较好的耐腐蚀性能和热加工性, 而且具有易加工和加工后不翘曲等良好的加工性能。在近几年逐渐受到各大车辆零部件制造商的喜爱, 逐渐开始应用于车辆重要零件的加工, 不仅可以有效地减轻车辆的重量, 而且可以简化生产过程、提高生产效率。

目前, 国内外学者对板料的摩擦模型进行了许多研究。Ghiotti A 等^[2]研究了材料热处理和主要工艺参数对 AA7075 铝合金板料的热冲压过程中的摩擦行为的影响。通过温度、润滑条件、接触压力和摩擦速度的变化获得了温度、润滑剂、载荷和摩擦

收稿日期: 2023-02-01; 修订日期: 2023-05-19

作者简介: 韩传德 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1597805431@qq.com

通信作者: 夏建生 (1980-), 男, 博士, 教授

E-mail: Xiajiansheng@163.com

速度对板料摩擦因数的影响。鲜小红等^[3]通过有限元软件对新能源汽车顶盖冲压成形过程进行数值分析,验证了坯料表面摩擦力和冲压深度对冲压成形过程中材料流动性的影响规律,最终确定了汽车驾驶室顶盖的最佳成形工艺条件。李晓军等^[4]研究了压边力、板料与凹模以及压边圈之间的摩擦因数对冲压成形工艺的影响。通过 3 因素 5 水平正交试验建立模型,并结合有限元分析软件来试验零件的精确成形,最终求解并验证了航空钣金构件的最佳成形工艺参数。Ramezani M 等^[5]在 ABAQUS/Standard 中模拟了平面应变弯曲过程,并采用 Stribeck 摩擦模型预测板料的回弹。结果表明,Stribeck 摩擦模型的有限元分析结果与试验得出的结论吻合较好,证明了摩擦模型对于有限元分析中单一的库伦摩擦定律具有显著的适用性。岳峰丽等^[6]研究了板料与凸模、板料与凹模之间的摩擦因数等关键工艺参数对大型柴油发动机油底壳成形工艺的影响规律,通过有限元软件分析最终获得了最佳工艺参数组合,并验证了方案的准确性和仿真的可靠性。

在板料冲压成形过程中,摩擦力作为影响板料成形的重要因素,常常决定了板料的成形质量。而在有限元软件中,通常简单地用库伦摩擦定律来描述板料成形过程中的摩擦力大小,这极大地影响了有限元模拟的精确度。因此,通过建立变摩擦因数的摩擦模型来准确地描述板料在冲压阶段的摩擦力大小,可以极大地提高有限元模拟的精度,从而有效地提高板料冲压的成形质量。这对计算机辅助冲压成形具有十分重要的意义^[7]。

本文采用 CFT-I 型摩擦试验机进行摩擦试验,研究 7A09 铝合金基于润滑条件在不同载荷、摩擦速度和温度的情况下摩擦因数的变化趋势,并利用扫描电子显微镜分析微观下摩擦因数的变化机理。以此构建了基于不同载荷、摩擦速度和温度的 7A09 铝合金变摩擦因数模型,并通过试验进一步验证摩擦模型的准确性。之后,通过 ABAQUS 子程序开发模块将变摩擦因数模型用 Fortran 编译为 Fric 子程序并导入 ABAQUS 中进行热冲压模拟,分析壁厚情况。最后利用冲压机进行冲压试验,对得到的冲压件进行壁厚测量并与模拟结果对比,验证变摩擦因数模型的准确性。

1 试验

1.1 试验材料与仪器

采用上海亨美金属(集团)有限公司销售的经

过 T6 热处理(固溶+时效)的 7A09 铝合金,抗拉强度为 490 MPa,屈服强度为 410 MPa,伸长率为 7%,其化学成分如表 1 所示^[8]。

表 1 7A09 铝合金的组成成分(%,质量分数)
Table 1 Compositions of 7A09 aluminum alloy(%, mass fraction)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	其他	Al
0.5	0.5	1.8	0.15	2.5	0.21	5.5	0.1	0.15	余量

本试验采用 CFT-I 型摩擦试验机进行摩擦试验,压头采用硬度为 58 HRC 的 440c 不锈钢,润滑剂选择固体润滑剂 BN。微观形貌利用 Nova NanoSEM 450 进行观察。

1.2 摩擦试验方案

试验选用的 7A09 铝合金板料厚度为 1 mm,先对板料进行预处理,将板料裁切为宽度为 30 mm 的正方形薄片,之后使用 75%乙醇溶液对需要进行摩擦试验的表面进行清洗并阴干。润滑剂采用高温润滑剂 BN,将润滑剂均匀地喷涂在阴干的铝合金板料表面。试验采用 CFT-I 型摩擦试验机进行往复式摩擦试验,选择 440c 不锈钢球头进行摩擦,摩擦区域的长度为 5 mm。采用敞口式加热炉对铝合金进行加热,在试验前先将处理好的铝合金板料用压板固定在加热炉上。温度由控温箱进行控制,并用红外测温枪对板料表面温度进行二次测量。达到预定温度后保温 5 min 再进行试验。试验装置如图 1 所示。

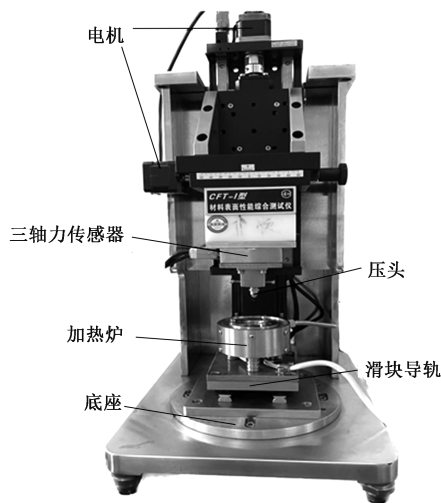


图 1 CFT-I 型摩擦试验机

Fig. 1 CFT-I friction testing machine

试验数据由连接控制机的计算机进行实时采集。设置载荷分别为 4、6、8、10、12、14 和 16 N,摩擦速度分别为 60、80、100、120、140、160 和 180 mm · s⁻¹,

温度分别为 150、180、210、240、270、300 和 330 ℃。

2 试验结果及分析

2.1 载荷与摩擦因数的关系

在室温环境下, 将板料加热至 240 ℃、以 $12 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的摩擦速度、采用 7 种不同载荷进行摩擦, 试验结果及拟合曲线如图 2 所示, 其中 μ 为摩擦因数。图 2 显示了载荷与摩擦因数之间的关系。随着载荷的增加, 摩擦因数降低, 最后趋于平稳。从物理学上来说, 摩擦因数的大小取决于板料的表面粗糙度, 与载荷无关。但这只是两个接触的表面假设为刚体的理想状态^[9]。

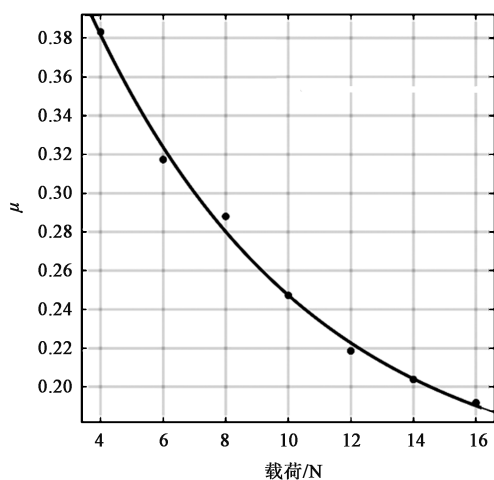


图 2 载荷与摩擦因数的关系

Fig. 2 Relationship between load and friction coefficients

而实际情况为, 铝合金在高温下会发生一定的软化, 从微观形貌角度而言 (图 3), 铝合金与摩擦头的接触面并不是绝对不变的。随着载荷的增加, 铝合金上表面会发生一定的变形, 从而导致摩擦的面积会变大。又由于接触面为球面, 所以导致了接触面积的增大幅度会远远大于压力的增幅^[10]。因此, 在一定的压力范围内, 摩擦因数会随着载荷的增加而减少。当超过这个范围之后, 随着压力的增加, 接触面积并不会再增加, 所以最终摩擦因数会趋于一个定值。

2.2 摩擦速度与摩擦因数的关系

在室温环境下, 将板料加热至 240 ℃, 载荷设定为 10 N, 采用 7 种不同的摩擦速度进行试验, 试验结果及拟合曲线如图 4 所示。图 4 显示了摩擦速度与摩擦因数之间的关系。随着摩擦速度的增加, 摩擦因数略微降低。该现象可以解释为: 在动摩擦

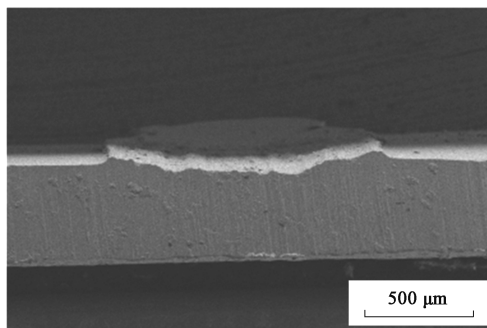


图 3 板料摩擦的横截面

Fig. 3 Cross-section of sheet metal friction

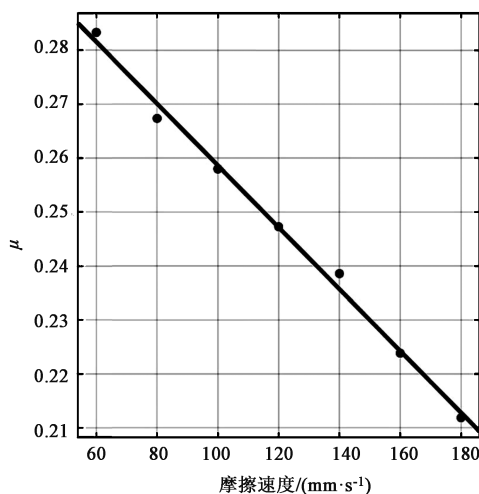


图 4 摩擦速度与摩擦因数的关系

Fig. 4 Relationship between friction speed and friction coefficient

条件下, 随着摩擦速度的加快, 板料表面凹凸不平区域的咬合度会降低^[11-12], 对板料的切削作用会降低, 因此摩擦因数会略微降低。

图 5a 为摩擦速度为 $60 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时板料表面产生的摩擦效果, 图 5b 为摩擦速度为 $180 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时板料表面产生的摩擦效果。可以明显观察到, 金属板料表面造成的切削效果不同, 较高摩擦速度下产生的划痕相较于较低摩擦速度下产生的划痕会明显更少、更浅。较低摩擦速度下的板料表面材料转移得更多, 因此, 造成的能量损失也会越大, 故摩擦因数偏大, 这与图 4 结果相一致^[13]。

2.3 温度与摩擦因数的关系

在室温环境下, 将板料摩擦速度设定为 $120 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 载荷设定为 10 N, 采用 7 种不同的板料加热温度进行试验, 试验结果及拟合曲线如图 6 所示。随着板料温度的上升, 摩擦因数逐渐降低。7A09 铝合金的固溶温度一般为 470 ℃, 因此, 在较高的温度下, 铝合金会发生软化效应, 从而导致材料的硬度发生变化。在硬度低的材料上表面产生摩

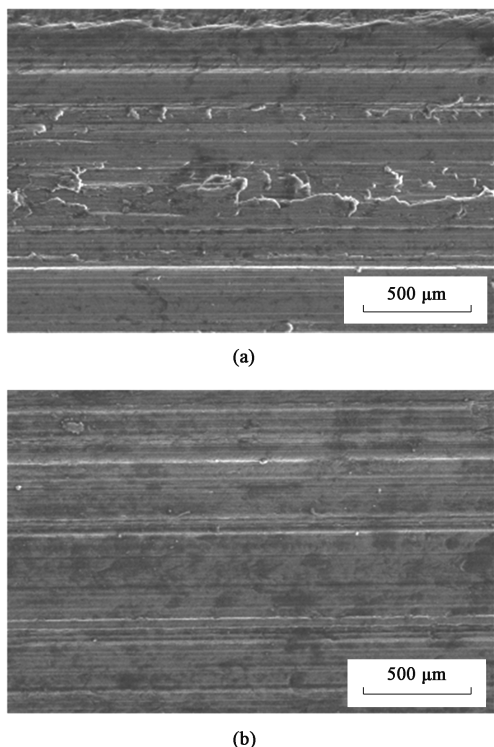


图 5 不同摩擦速度下的板料表面磨损

(a) $60 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) $180 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 5 Wear of sheet metal surface at different friction speeds

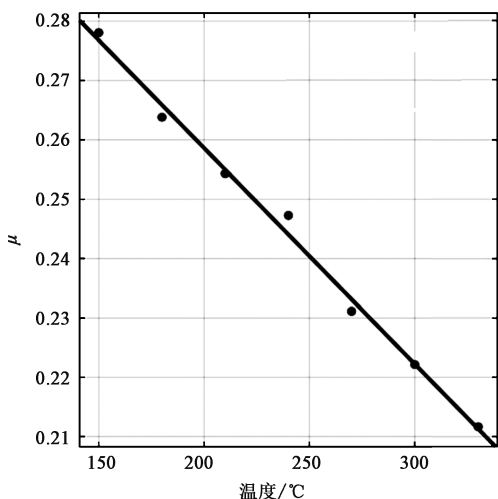


图 6 温度与摩擦因数的关系

Fig. 6 Relationship between temperature and friction coefficient

擦效应,摩擦头对材料表面的切削作用减弱,弹性作用增加,进而导致了材料摩擦因数降低^[14]。

3 摩擦模型的建立

3.1 载荷与摩擦因数的模型

通过上述试验获得了载荷与摩擦因数关系曲线(图2),通过对曲线走势的分析以及对试样板料的

微观形貌的观察,初步拟定载荷与摩擦因数关系的数学表达式为:

$$\mu = a_0 e^{a_1 F} + a_2 \quad (1)$$

式中: F 为载荷; a_0 、 a_1 和 a_2 为常数。

3.2 摩擦速度与摩擦因数的模型

通过上述试验获得了摩擦速度与摩擦因数的关系曲线(图4),通过对曲线走势的分析以及对试样板料的微观形貌的观察,初步拟定摩擦速度与摩擦因数关系的数学表达式为:

$$\mu = b_0 V + b_1 \quad (2)$$

式中: V 为板料的摩擦速度; b_0 和 b_1 为常数。

3.3 温度与摩擦因数的模型

通过上述试验获得了温度与摩擦因数的关系曲线(图6)。通过对曲线走势的分析,初步拟定温度与摩擦因数关系的数学表达式为:

$$\mu = c_0 T + c_1 \quad (3)$$

式中: T 为板料的温度; c_0 和 c_1 为常数。

3.4 数学摩擦模型

将式(1)、式(2)、式(3)表示为 m 阶多项式:

$$y = d_0 + d_1 x + d_2 x^2 + \cdots + d_m x^m + e \quad (4)$$

式中: y 试验因变量,即为摩擦因数 μ ; e 为指 x 的 $m+1$ 阶的高阶无穷小量; x 为试验的自变量,即 F 、 V 和 T ; d_0 、 d_1 、 d_2 、 \cdots 、 d_m 为常数。

因此,式(4)可写为:

$$s_r = \sum_{i=1}^n (y - d_0 - d_1 x_i - d_2 x_i^2 - \cdots - d_m x_i^m)^2 \quad (5)$$

式中: s_r 为系统的最小平方误差; x_i 为实验自变量 x 的第 i 个取值; n 为实验自变量的取值个数。

将式(5)对系数进行偏导后,令其值为零,从而求出各自变量的影响比重(系数)和系统的最小平方误差。最终将其代入式(4)中,求出摩擦模型如下:

$$\begin{aligned} \mu = & 0.486(0.4135e^{-0.1428F} + 0.1482) + 0.413 \times \\ & (-0.0005727V + 0.3159) + 0.001(-0.000364T + \\ & 0.3314) + 0.02474 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: F 为载荷, N; V 为摩擦速度, $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

3.5 摩擦模型的验证

为了验证摩擦模型的准确性,随机选取了3组不同的试验参数进行试验,将试验得到的摩擦因数与式(6)计算出来的摩擦因数进行比较。结果如表2所示。

表 2 摩擦因数试验值与计算值对比

Table 2 Comparison between test and calculated values of friction coefficient

温度/℃	载荷/N	摩擦速度/ (mm·s ⁻¹)	计算值	试验值	误差率/%
200	7	90	0.2802	0.2758	1.6
230	9	110	0.2570	0.2632	2.4
250	11	130	0.2385	0.2343	1.8

通过比较发现误差率小于 5%，符合正常的试验误差范围。因此，式（6）可以较为准确地反映出摩擦因数随着载荷、摩擦速度和温度的变化情况。

4 有限元分析及冲压验证

4.1 模型建立

采用三维建模软件 Creo 对冲压模具以及板料进行模型建立，板料直径为 Φ80 mm、厚度为 1 mm。其模具详细尺寸如表 3 所示（圆角半径均为 5 mm）。并将建立的上模、下模、压边圈和板料的模型转换为 Stp 格式，以部件的形式导入 ABAQUS 中^[15]。在 ABAQUS 中进行位置的约束以及调整，获得如图 7 所示的装配体。

表 3 模具尺寸（mm）

Table 3 Die sizes（mm）

参数	上模	压边圈	下模
外圆直径	Φ38	Φ105	Φ105
高度	36	8	20
内圆直径	Φ8	Φ50	Φ40

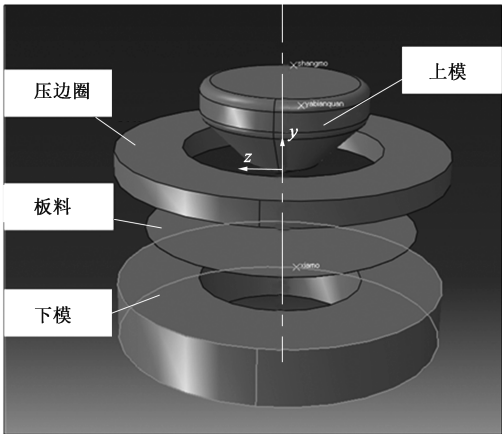


图 7 热冲压模型

Fig. 7 Hot stamping model

4.2 有限元参数设定

板料采用厚度为 1 mm 的 7A09 铝合金，经过 T6 热处理，其杨氏模量为 74 GPa，泊松比为 0.31，导热系数为 116 W·(m·K)⁻¹。随着温度的变化，7A09 铝合金的杨氏模量会发生改变，泊松比几乎无变化，其杨氏模量和温度的关系如表 4 所示。模具采用 440c 不锈钢材质，其杨氏模量为 200 GPa，泊松比为 0.27，导热系数为 24.2 W·(m·K)⁻¹。首先定义环境温度为 18℃，定义绝对零度为 -273.15℃。设定板料的初始温度为 230℃，板料的热辐射系数为 0.7，板料与空气的对流换热系数为 0.02 mW·(mm²·K)⁻¹。板料的单元格式选择 DC3D8，获得的单元总数为 16000，上模、下模和压边装置采用 C3D8RT 单元格式。选择成形过程为热-力耦合过程^[16]。

表 4 7A09 铝合金杨氏模量和温度的关系

Table 4 Relationship between Young's modulus of 7A09 aluminum alloy and temperature

温度/℃	杨氏模量/GPa
18	74
100	72
150	69
200	65
250	61
300	55
350	49

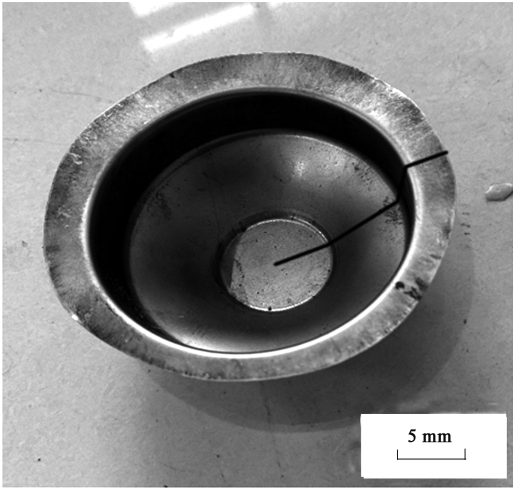
在约束方面，将下模设定为固定约束，并将板料置于下模上表面。分析步分为两步：（1）第 1 步，将压边圈压在板料上表面，设定压边力为 1.2 kN；（2）第 2 步，设定上模的冲压速度为 120 mm·s⁻¹，冲压深度为 20 mm，上模的施加载荷为 5 kN。

对在板料与模具接触中产生的摩擦行为，采用式（6）所建立的摩擦模型来进行描述，这样可以更加准确地反映出在不同因素下产生的摩擦力对板料的作用情况。首先，需要将式（6）转换为 Fric 子程序。在 ABAQUS 中，Fric 是关于摩擦的子程序，该接口提供了对于复杂摩擦模型的导入方法。将式（6）用计算机高级编程语言 Fortran 转换为计算机能够识别的公式。再利用 ABAQUS 中提供的二次开发接口 Fric 对式（6）的运行逻辑进行定义。然后，在相互接触中的摩擦因数中选择用户自定义。最后，在创建作业的时候提交用户子程序选项中，提交编

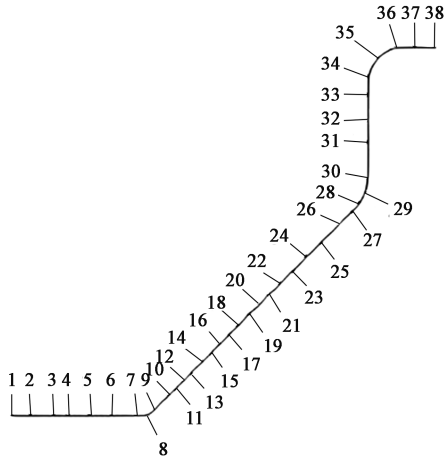
写好的 Fric 子程序。

4.3 仿真结果及冲压验证

图 8a 为铝合金薄板的实际冲压实物，图 8b 为冲压件按照图 8a 上的黑色曲线所测量的厚度测量点位。

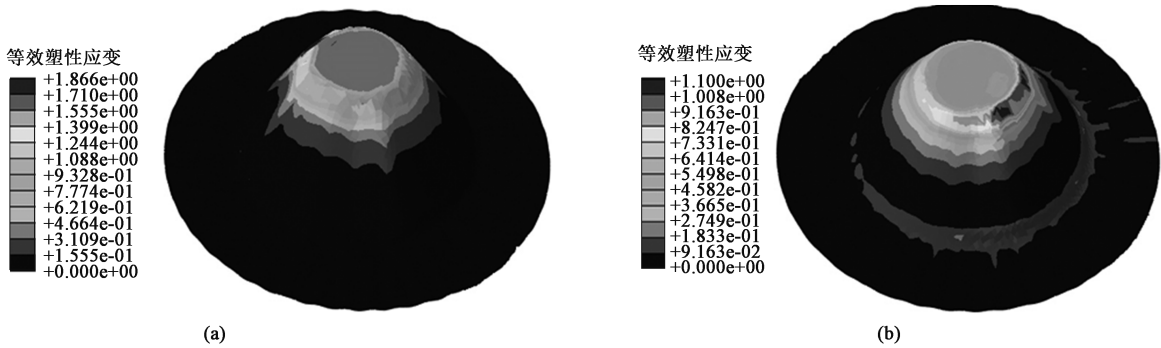


(a)



(b)

图 8 冲压件 (a) 与厚度测量点位 (b)
Fig. 8 Stamping part (a) and point positions for thickness measurement (b)



(a)

(b)

图 9 变摩擦因数模型 (a) 与库伦摩擦模型 (b) 下的等效塑性应变
Fig. 9 Equivalent plastic strains of variable friction coefficient model (a) and Coulomb friction model (b)

通过对冲压件的壁厚进行测定，绘制如图 10 所示的冲压件厚度分布图。发现零件的最大减薄区域在侧壁，这是由于上模向下的冲压力对侧壁产生了向下的张力，但同时板料还受到了下模和压边圈的共同作用产生的摩擦阻力^[17]。因此，在侧壁区域板料不能有效地产生流动，从而导致了侧壁的厚度最薄。通过对库伦摩擦模型和变摩擦因数模型仿真的结果的分析发现，变摩擦因数模型可以更加准确地描述实际生产中的冲压结果，说明了仿真结果的准确性，为实际的生产提供了有效的摩擦模型。

图 9a 为变摩擦因数模型的有限元仿真结果，图 9b 为库伦摩擦模型 $\mu=0.2$ 时的仿真结果。通过图 9 可以看出，与库伦摩擦模型相比，变摩擦因数模型的等效塑性应变较小，等效塑性应变主要集中在侧壁区域。

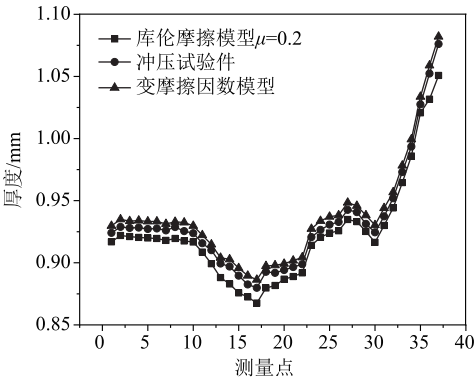


图 10 冲压件厚度分布图

Fig. 10 Thickness distribution diagram of stamping parts

5 结论

(1) 板料的摩擦因数随着载荷、摩擦速度和温度的增加而降低。其中, 载荷对摩擦因数的影响最大。

(2) 采用摩擦因数与载荷、摩擦速度和温度关系的数学模型, 对冲压成形过程进行有限元模拟, 得到的结果相较于库伦摩擦模型更加符合冲压试验的测量结果。

(3) 成形过程中的摩擦因数可以通过载荷、摩擦速度和温度来计算, 并且将数学模型应用于有限元分析中以提供真实的模拟结果。

参考文献:

- [1] 王强. 铝合金车身覆盖件冲压成形回弹仿真方法研究 [J]. 农业装备与车辆工程, 2012, 50 (4): 50-53.
Wang Q. Research on springback simulation method for stamping forming of aluminum alloy body panels [J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2012, 50 (4): 50-53.
- [2] Ghiotti A, Simonetto E, Bruschi S. Influence of process parameters on tribological behaviour of AA7075 in hot stamping [J]. Wear, 2019, 426-427: 348-356.
- [3] 鲜小红, 张定路, 陈英, 等. 基于 Dynaform 的新能源地库车顶盖冲压成形工艺有限元分析 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (12): 44-55.
Xian X H, Zhang D L, Chen Y, et al. Finite element analysis of stamping forming process for new energy basement car roof based on Dynaform [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (12): 44-55.
- [4] 李晓军, 门向南, 毕四龙, 等. 航空变曲率内蒙皮零件精确成形参数优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (11): 116-122.
Li X J, Men X N, Bi S L, et al. Optimization of accurate forming parameters for aerospace variable curvature inner skin parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (11): 116-122.
- [5] Ramezani M, Mohd Ripin Z, Ahmad R. Modelling of kinetic friction in V-bending of ultra-high-strength steel sheets [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 46 (1-4): 101-110.
- [6] 岳峰丽, 张鑫, 陈大勇, 等. 大型柴油发动机油底壳预成形工艺设计及优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 66-74.
Yue F L, Zhang X, Chen D Y, et al. Design and optimization of preforming process for large diesel engine oil pan [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 66-74.
- [7] 胡志力, 芦俊杰, 华林. 铝合金热冲压技术研究进展 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (2): 1-11.
Hu Z L, Lu J J, Hua L. Research progress of aluminum alloy hot stamping technology [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (2): 1-11.
- [8] 张江斌, 何克准, 李承波, 等. 7A09 铝合金热精轧板热处理工艺研究 [J]. 轻合金加工技术, 2018, 46 (2): 27-31.
Zhang J B, He K Z, Li C B, et al. Research on the heat treatment process of 7A09 aluminum alloy hot finish rolling plate [J]. Light Alloy Processing Technology, 2018, 46 (2): 27-31.
- [9] 罗恒, 王优强, 张平. 双液淬火下 7A09 铝合金的干滑动摩擦磨损性能 [J]. 材料导报, 2020, 34 (24): 24109-24113.
Luo H, Wang Y Q, Zhang P. Dry sliding friction and wear properties of 7A09 aluminum alloy under double liquid quenching [J]. Material Guide, 2020, 34 (24): 24109-24113.
- [10] Garabedian N T. A Direct Experimental Link Between Atomic-scale and Macroscale Friction [D]. Ann Arbor: University of Delaware, 2019.
- [11] Flegler F, Neuhauser S, Groche P. Influence of sheet metal texture on the adhesive wear and friction behaviour of EN AW-5083 aluminum under dry and starved lubrication [J]. Tribology International, 2020, 141: 105956.
- [12] 房玉鑫, 王优强, 张平, 等. 不同热处理下 2024 铝合金摩擦磨损行为和机理 [J]. 有色金属工程, 2022, 12 (4): 1-6.
Fang Y X, Wang Y Q, Zhang P, et al. Friction and wear behavior and mechanism of 2024 aluminum alloy under different heat treatments [J]. Non-ferrous Metal Engineering, 2022, 12 (4): 1-6.
- [13] Jin B, Chen G, Zhao J, et al. Coupling effect of boundary tribofilm and hydrodynamic film [J]. Cell Reports Physical Science, 2022, 3 (3): 100778.
- [14] Gruebler R, Hora P. Temperature dependent friction modeling for sheet metal forming [J]. International Journal of Material Forming, 2009, 2 (S1): 251-254.
- [15] 孙少华, 张剑阳, 董升朝, 等. 基于 ABAQUS 的铜钢复合板弯片冲压模拟与模具设计 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (17): 87-90.
Sun S H, Zhang J Y, Dong S C, et al. Bending and stamping simulation and die design of copper-steel composite plate based on ABAQUS [J]. Hot Working Technology, 2021, 50 (17): 87-90.
- [16] 孙占坤, 李涛. 中厚板 U 形冲压成形有限元模拟分析及回弹预测 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 81-88.
Sun Z K, Li T. Finite element simulation analysis and springback prediction of U-shaped stamping forming of medium and thick plates [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 81-88.
- [17] Klocke F, Trauth D, Shirobokov A, et al. FE-analysis and in situ visualization of pressure-, slip-rate-, and temperature-dependent coefficients of friction for advanced sheet metal forming: Development of a novel coupled user subroutine for shell and continuum discretization [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81 (1-4): 397-410.