

23

机电学院

054 系



序号	姓名	职 称 或学历	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
1	王 辉 高 霖 陈明和	博士生 教 授 教 授	054	各向异性板料成形极限面的研究	南航学报	2007, 39(3)
2	唐于芳 高霖	硕士生 教授	054	基于三角形膜单元的钣金成形有限元 逆算法	山东大学学报	2007,37(2)
3	崔 震 高 霖 陆启建	博士生 教 授 高 工	054	复杂钣金零件渐进成形方法	机 械 工 程 学 报	2007,43(12)
4	G. Hussain N. U. Dar L. Gao M. H. Chen	博士生 教 授 教 授	054	A comparative study on the forming limits of an aluminum sheet-metal in negative incremental forming	Journal of Materials Processing Technology	2007,187—188
5	G. Hussain L. Gao	博士生 教 授	054	A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming	International Journal of Machine Tools & Manufacture	2007,47
6	G. Hussain L. Gao	博士生 教 授	054	An experimental study on some formability evaluation methods in negative incremental forming	Journal of Materials Processing Technology	2,007,186
7	G. Hussain L. Gao	教 授 教 授	054	The effect of variation in the curvature of part on the formability in incremental forming	International Journal of Machine Tools & Manufacture	2007,47
8	G Hussain L Gao Wang Hui	博士生 教 授 博士生	054	A FUNDAMENTAL INVESTIGATION ON THE FORMABILITY OF A COMMERCIALY-PURE TITANIUM SHEET-METAL IN THE INCREMENTAL FORMING AND STAMPING PROCESSES	ASME MSEC2007 Conference	2007,37(2)
9	程筱胜 廖文和 戴 宁	高工 教 授 讲师	054	标准牙冠和桥体数据库的建立	东南大学学报（医学 版）	2007, Vol.26(1):1-3
10	程筱胜 廖文和 戴 宁	高工 教 授 讲师	054	基于“薄膜变形”的牙齿曲面重建算 法研究与实现	机械科学与技术,	2007, Vol.26(9):1220- 1224,1228
11	程筱胜 廖文和 张翔	高工 教 授 博士生	054	上下颌模型正中状态下的虚拟对位	生物医学工程学杂志	2007, Vol.24(6):1270- 1273
12	刘长毅 张亚勤	副教授 硕士生 硕士生	054	集成三维设计模型的装配顺序规划	机械科学与技术	2007, 26(10)
13	谢兰生	副教授	54	Diffusion bonding of aluminum alloy using a high-boiling liquid protection	MATERIALS SCIENCE FORUM	2007,551-552

14	谢兰生	副教授	54	Kelvin结构开孔泡沫材料的弹性性能研究	应用力学学报	2007, 3
15	周清 Goroh Itoh Mitsuo Niinomi	副教授	054	Mechanical properties and high temperature deformation of beta titanium alloys	Mater. Sci. Forum	2007, 546-549
16	戴宁 廖文和 程筱胜	讲师 教授 副高	054	磨牙全颈环内冠的制作	生物医学工程学杂志	2007,24(1):129-132
17	戴宁 廖文和 程筱胜	讲师 教授 副高	054	虚拟咬合运动初步仿真模拟的研究与实现	生物医学工程学杂志	2007,24(5):1073-1078
18	安涛 廖文和 戴宁	博士生 教授 讲师	054	The Topological Reconstruction Algorithm for STL Data based on Red-Black Tree	International Academic Publishers Limited	2007: 301-304
19	崔海华 王震 戴宁	博士生 博士生 讲师	54	一种新的基于结构光的三维测量模型	第三届全国几何设计与计算学术会议论文集	2007: 220-226
20	王乾 程筱胜 戴宁	硕士生 高工 讲师	054	基于变分隐式曲面的三角网格孔洞修补	中国制造业信息化(学术版)	2007, Vol.35(23): 75-78
21	钮叶新 戴宁 袁天然	硕士生 讲师 博士生	054	基于隐式曲面的三角网格模型等距算法	中国制造业信息化(学术版)	2007, Vol.36(3): 57-
22	刘大峰 廖文和 戴宁	博士生 教授 讲师	054	散乱点云去噪算法的研究与实现	东南大学学报(自然科学版)	2007,vol.37(6): 1108-1112
23	安鲁陵 周 嫻 周来水	教授 硕士生 教授	054	复合材料纤维铺放路径规划与丝数求解	航空学报	2007, 28(03)
24	安鲁陵 杨玉岭 肖军 周来水	教授 硕士生 教授 教授	054	复合材料纤维自动铺放碰撞干涉检测	宇航材料工艺	2007, 37(02)
25	安鲁陵 张丽艳	教授 教授	054	Research on Planar Figure Based Relief Modeling	The 3rd Korca-China Joint Conference on Geometric and Visual Computing	2007. 8
26	郝小忠 程筱胜 何 磊	助工 高工 工程师	054 054 053	整体叶轮CAD/CAM技术应用研究与实现	中国制造业信息化	2007, 36(1)
27	刘 浩 廖文和	讲 师 教 授	054	基于Catmull-Clark细分的曲面重构	中国科学院研究生院学报	2007, 24(3)
28	刘 浩 廖文和 张湘玉	讲 师 教 授 博士生	054	非均匀C-C细分曲面的曲率分析	机械科学与技术	2007, 26(12)
29	何 钢 刘 浩 廖文和	博士生 讲 师 教 授	054	基于联合细分的曲线网插值曲面的光顺性研究	机械科学与技术	2007, 26(7)

30	张湘玉 刘浩 廖文和	博士生 讲师 教授	054	平面超椭圆曲线的二次NURBS逼近	南京航空航天大学学报	2007, 39(5)
31	张臣 周来水 安鲁陵 周儒荣	讲师 教授 教授 教授	054	基于仿真的数控铣削加工参数优化研究	中国机械工程	2007, 18(20)
32	张臣 周来水 安鲁陵 周儒荣	讲师 教授 教授 教授	054	Off-line Feedrate Optimization for 3-Axis NC Milling Based on Control of Cutting Force	第三届几何与可视计算中韩联合会议	2007
33	张臣	讲师	054	提高《微机原理与应用》课堂教学质量的研究与探讨	中国科技信息	2007, 19
34	金霞	讲师	054	板材FMS基于RBOPN模型的死锁分析	东南大学学报	2007, 37卷 3 期
35	王小平 周儒荣 叶正麟 张丽艳	副教授 教授 教授 教授	054	Constructing Spherical Curves by Interpolation	Advances in Engineering Software	2007, 38(3)
36	王小平 张维中 张丽艳	副教授 教授 教授	054	Intersection of a Ruled Surface with a Free-form Surface	Numerical Algorithms	2007, 46(1)
37	徐岩 祝恒云 吕常魁	副教授 副教授 副教授	054	SVC算法在客户资源分析中的应用	武汉大学学报(工学版)	2007, 40 (4)
38	徐岩 朱恒民	副教授 讲师	054	数据挖掘与数据库的集成方法	吉林大学学报(信息科学版)	2007, 25 (2)
39	徐岩	副教授	054	关于飞行器制造工程专业《模具CAD / CAM》教学的思路	南昌高专学报	2007, 22 (1)
40	陈明和 高霖 左敦稳 王珉	教授 教授 教授 教授	054 054 052 052	Application of the forming limit stress diagram to forming limit prediction for the multi-step forming of auto panels	Journal of Materials Processing Technology	2007, 187-188
41	陈明和 芮玉龙 周建华 王珉	教授 硕士 高工 教授	054 054 054 052	Numerical Simulation and Experimental Investigation of High Strain Rate Superplastic Forming (SPF) of Al-6Mg-0.2Sc Alloy.	Materials Science Forum	2007, 551-552
42	陈明和 李金华 高霖 左敦稳 王珉	教授 硕士 教授 教授 教授	054 054 054 052 052	Development and Application of the Finite Element Analysis Program of the Stress-based Forming Limit Criterion for Sheet Metal Forming	Materials Science Forum	2007, 561-565
43	范平 陈明和 周兆锋	硕士 教授 硕士	054 054 054	板料无模成形技术——热应力成形	新技术新工艺	2007, 11
44	李迎光 潘志毅 闫瑞杰 廖文和	副教授 博士生 硕士生 教授	054	Research on the collaborative design technology for airplane tooling	2007 11th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design	2007
45	宋文娟 宋承志 李迎光	硕士生 研高工 副教授	054	基于知识的飞机型架靶标智能设计技术	中国制造业信息化	2007年36卷23期

46	鲁世红 李小燕	副教授 研究生	054	Al-Mg-Sc合金板激光冲击成形的 试验研究与有限元分析	金属热处理	2007,32(11)
47	李小燕 鲁世红	研究生 副教授	054	Al-Mg-Sc合金板激光冲击 成形的有限元分析	激光应用	2007,27(2)
48	朱延娟 周来水 张丽艳	博士生 教 授 教 授	054	3维碎片拼合的算法研究	中国图象图形学报	2007, 12 (1)
49	李 涛 周来水	博士生 教 授	054	Doo-Sabin细分曲面的圆角算法	机械科学与技术	2007, 26 (2)
50	张 虹 周来水	硕士生 教 授	054	飞机复合材料构件工装设计知识库研 究与实现	中国制造业信息化	2007, 26 (15)
51	陈 功 周来水 安鲁陵 邓冬梅	博士生 教 授 教 授 博士生	054	基于CATIA V5的零组件快速装配设计 技术研究	机械科学与技术	2007, 26 (10)
52	邓冬梅 陈 功 周来水 安鲁陵 李 薇	博士生 博士生 教 授 教 授 哈 飞	054	基于CATIA的组件库建库工具的设计 与实现	华南理工大学学报	2007, 35 (1)
53	陈 功 周来水 安鲁陵 詹 雯	博士生 教 授 教 授 硕士生	054	基于弹簧-质点模型曲面展开的改进 算法	计算机辅助设计与图形 学学报	2007, 19 (8)
54	张德礼 周来水	博士生 教 授	054	Intelligent NURBS Interpolator Based on the Adaptive Feedrate Control	Chinese Journal of Aeronautics	2007, (20)
55	顾步云 周来水 刘胜兰 张维中	博士生 教 授 讲 师 副教授	054	基于平面散乱点集的曲线重建算法	机械科学与技术	2007, 26 (4)
56	王 坚 周来水 张丽艳 朱延娟	博士生 教 授 教 授 博士生	054	基于遗传算法的曲面匹配	中国图象图形学报	2007, 12 (4)
57	邓冬梅 周来水 安鲁陵 王桂宾	博士生 教 授 教 授 硕士生	054	矩形件优化排样的研究	宇航材料工艺	2007, (4)
58	周 海 周来水	博士生 教 授	054	三角网格模型的细分曲面拟合	南京航空航天大学学报	2007, 39 (2)
59	康书杰 周来水 张德礼	硕士生 教 授 博士生	054	数控刀位点的B样条精确拟合	机械工程与自动化	2007, (2)
60	詹 雯 周来水 陈 功	硕士生 教 授 副教授	054	一种复杂曲面展开的通用算法	信息技术	2007, 36 (1)
61	汪 俊 周来水 安鲁陵 谭昌柏	博士生 教 授 教 授 讲 师	054	一种新的约束识别与求解算法	机械科学与技术	2007, 26 (4)

62	郑建冬 张丽艳 周 玲 王小平	博士生 教 授 硕士生 副教授	054	基于单数码相机自由拍摄的空间点定位	航空学报	2007, 28(6)
63	周 玲 张丽艳 张维中 郑建冬	硕士生 教 授 博士生 副教授	054	近景摄影测量中标记点的自动检测	应用科学学报	2007, 25 (3)
64	张 辉 张丽艳 陈 江 赵转萍	博士生 教 授 硕士生 副教授	054	基于平面模板自由拍摄的双目立体测量系统的现场标定	航空学报	2007,28(3)
65	朱 聘 张丽艳	博士生 教 授	054	五轴数控仿真全局干涉检测算法研究	中国制造业信息化	2007,36(1)
66	郑建冬 张丽艳 王宏涛 杜小宇	博士生 教 授 副教授 硕士生	054	Measurement of 3D Curve Structures By Using One Hand-held Digital Camera	The 3rd Korea and China Joint Conference on Geometric and Visual Computing, Seoul	2007
67	张丽艳 G. Nielsen	教 授 教 授	054	3D Face Animation Based on Raw Scanned Data of Real Individuals	The 10th International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics (CAD/Graphics 2007)	2007
68	田 威 廖文和	讲 师 教 授	054	铁路货车制造中柔性工艺装备的研究与开发	中国机械工程	2007, 18(7)
69	王 珂 廖文和 郭 宇	博士生 教 授 副教授	054	工程机械复杂产品实例的XML表示方法研究	机械科学与技术	2007, 24 (5)
70	俞 烽 廖文和 郭 宇	博士生 教 授 副教授	054	工艺快速扩散系统的研究	中国机械工程	2007, 18(19)
71	刘金山 廖文和	博士生 教 授	054	基于零件特征关注度的夹具实例相似性检索方法	计算机辅助设计与图形学学报	2007, 19(10)
72	刘金山 廖文和 刘长毅	博士生 教 授 副教授	054	基于图的夹具特征识别方法研究	机械科学与技术	2007, 26(6)
73	王 珂 廖文和 郭 宇	博士生 教 授 副教授	054	基于位索引的多层次实例检索模型研究	中国机械工程	2007, 18(16)
74	李秀娟 廖文和 刘 浩	博士生 教 授 副教授	054	基于翼型反设计的遗传算法	南京航空航天大学学报	2007, 39(2)
75	苏 艳 廖文和 郭 宇	博士生 教 授 副教授	054	面向大批量定制设计的定制客户动态聚类方法研究	中国机械工程	2007, 18(22)
76	苏 艳 廖文和 郭 宇	博士生 教 授 副教授	054	面向可配置产品设计的群体客户偏好配置特征融合技术	中国机械工程	2007, 18(20)
77	何 钢 廖文和 刘 浩	博士生 教 授 副教授	054	应用在联合细分曲面的离散PDE光顺方法	东南大学学报	2007,37(1)
78	包金宇 廖文和	博士生 教 授	054	面向协同设计的冲突自动消解系统研究	机械科学与技术	2007, 26(2)

79	宋利康 崔德刚 周儒荣	博士生 高工 教授	054	基于过程工程的航空企业建模技术研究 与实现	航空学报	2007, 28 (4)
80	宋利康 崔德刚 周儒荣	博士生 高工 教授	054	企业模型与ERP系统间映射技术	航空学报	2007, 28 (6)
81	宋利康 庄海军 周儒荣	博士生 副教授 教授	054	权限管理中间件的研究与实现	南京航空航天大学学报	2007, 39 (4)
82	宋利康 周儒荣 张莉	博士生 教授 工程师	054	基于过程建模的ERP自动配置方法	机械科学与技术	2007, 26 (9)
83	李泂杲 高霖 韦红余 王辉	讲师 教授 实验师 博士	054	板成形磨擦系统测量影响因素	中国机械工程	2007, 18 (3)
84	陈建鹏 周晚林	硕士 副教授	054	The Research to Identifying the Impact Force Acting on the Aeroplane Wing	Proceedings of The Inter. Con	2007
85	谭昌柏 周来水 张丽艳 安鲁陵	讲师 教授 教授 教授	054	裁剪B样条曲面重建算法研究	中国机械工程	2007, 18 (19)
86	陶克梅	工程师	054	聚四氟乙烯与超细高岭土填充聚甲醛 复合材料的摩擦学性能	机械工程材料	2007, 31 (8)

各向异性板料成形极限面的研究

王辉¹ 高霖¹ 陈明和¹ 赵明琦²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016; 2. 马鞍山钢铁公司技术中心, 马鞍山, 243000)

摘要: 成形极限曲线(FLD)是表示板料成形性能的重要指标。由于板料各向异性的存在,导致了使用1条FLD来表示板料整个面内的成形极限存在很大误差。通过试验分析了板料面内的各向异性对板料应力和应变成形极限曲线的影响,研究了利用三维空间的成形极限曲面代替二维坐标下的FLD来表示材料整个面内的成形极限的方法,经过分析认为板料成形极限面可以为板料成形有限元仿真提供更准确的成形极限判据。

关键词: 板料成形; 成形极限面; 各向异性; 有限元仿真

中图分类号: TG386

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2007)03-0329-04

Forming Limit Surface of Anisotropic Sheet Metal

Wang Hui¹, Gao Lin¹, Chen Minghe¹, Zhao Mingqi²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Physical Laboratory of Maanshan Iron & Steel Co. Ltd., Maanshan, 243000, China)

Abstract: Forming limit diagram (FLD) and forming limit stress diagram (FLSD) are widely used as a valuable tool for analyzing sheet metal forming. However the normal FLD or FLSD assumes that the forming limit is isotropic on the plane of the sheet. In order to more accurately capture the physics of the material behavior, the issue of forming limit anisotropy must also be addressed. The influence of the anisotropy on the plane of the sheet to the FLD and FLSD is studied by the experiment. The forming limit surface in sheet metal forming can give a more accuracy criterion for the failure of sheet metal in FEM simulation.

Key words: sheet metal forming; forming limit surface; anisotropy; finite element simulation

引言

板料成形是金属塑性成形的一个重要组成部分,它在航空航天、汽车、轻工及家电等制造业中有着非常广泛的应用。近年来板料成形工艺技术在不断进步,特别是有限元仿真技术的发展,使得人们能够更科学快捷地进行工艺设计,制造出更复杂精密的板金零件。成形极限图(Forming limit diagram, FLD)的概念是60年代Keeler^[1]和Goodwin^[2]提出的,它反映了板料在各种应变路径下所

能够达到的最大应变,已成为有限元分析中一个不可缺少的成形极限判据。近年很多学者研究发现材料的FLD与变形的应变路径有很大关系,相同材料在不同的应变路径下成形极限变化很大^[3],这样用普通的线性加载条件下试验得到的FLD来评判复杂路径下板金零件的成形极限时就出现了偏差。Arrieux等学者经过研究发现在各种应变路径下的FLD经过转换得到的材料的应力成形极限图(Forming limit stress diagram, FLSD)几乎重合^[4-5],也就是说材料的FLSD与加载路径无关。于

基金项目: 国家自然科学基金(50275075)资助项目。

收稿日期: 2006-03-02; **修订日期:** 2006-05-19

作者简介: 王辉,男,博士研究生,1978年7月生;高霖(联系人),男,教授,博士生导师,Email: meelgao@nuaa.edu.cn。

是很多学者开始提出应该用材料的FLSD代替材料的FLD作为判据应用于多道次成形零件的工艺设计中,国内陈明等也对此做了一些研究^[6]。

无论是用应力还是应变成形极限曲线来表示材料的成形极限,都是假定材料在面内是各向同性的,然而实际上板金材料,特别是冷轧板在面内存在着很大的各向异性,板料面内沿不同方向的塑性存在很大差别。在进行板料的成形极限试验时试件截取的方位不同最后得到的成形极限也不同。同时由此计算得到的FLSD就不同,所以单独的一条FLD或者FLSD是无法准确地评价各向异性板整个面内的成形极限的。本文通过试验研究了板料各向异性对成形极限的影响,并提出用成形极限曲面来代替FLD表示各向异性板料的成形极限,以便为板料成形的有限元仿真提供更好的成形极限判据。

1 材料的各向异性对应变成形极限图的影响

板料选择马鞍山钢铁公司生产的DQ级冷轧钢板SPCD,厚度为0.8 mm,退火状态。

1.1 材料的基本性能和FLD试验方法

通过板料单向拉伸试验得到了材料的基本力学性能,如表1所示。

表1 试验用材料的基本力学性能

与轧制 方向角 度/(°)	屈服强 度 σ_s / MPa	抗拉强 度 σ_b / MPa	各向异 性系数 r	应变强 化系数 K / MPa	应变硬 化指数 n
0	192	305	1.910	512	0.205
45	205	315	1.680	519	0.194
90	200	300	2.550	523	0.188

FLD试验采用长方形试件,试件长度为180 mm,试件宽度采用30, 50, 70, 90, 110, 130, 150和180 mm的8种形状的试件。从板料上截取长度方向与板料的轧制方向角度 θ 分别成0, 45和90°的3组试样(图1)。然后采用丝网印刷的方法在板料

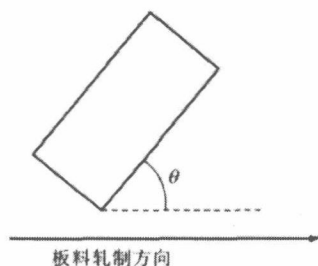


图1 试件的剪取方向

表面印制直径为2 mm的圆网格。在BHB双拉胀形试验机上按照Hecker^[7]推荐的试验方法进行了成形极限试验,测量变形后裂纹附近的网格长短轴,计算得到材料的真实应变。将不同试件的极限应变标在以两个主应变为坐标轴的坐标系内连成曲线就得到了材料的成形极限曲线。

1.2 各向异性对FLD的影响

图2给出了采用3组试件得到的板料的FLD,从中可以看到试件剪取的方向不同,最后得到的FLD曲线也不同,其中与轧制方向成90°的一组试件得到的成形极限曲线最高,0°方向的试件得到的曲线最低,45°方向的处于中间。平面应变点附近主应变差距最大达到了10%。由于板金零件在实际成形过程中受力状态很复杂,板料沿各个方向破裂的情况都可能存在,因此用一条FLD来表示板料全部的成形极限是不够准确的。板料的极限主应变还与所受到的最大主应力与板料的轧制方向的角度有关,所以要想比较全面地表示板料在整个面内的应变极限除两个主应变外还必须考虑主应变的轧制方向的角度。这样可以用以上3个因素组成一个三维坐标空间中的曲面来表示板料的成形极限,这个面称为应变成形极限面。采用以上试验得到的曲线,按照试件截取的角度绘制在三维坐标内拟合成曲面就可以得到板料应变成形极限面,如图3所示。这个曲面将整个区域分为安全与破裂两个区域,在进行板料的有限元分析时可以根据零件的两个主应变及其与轧制方向的角度3个坐标在曲面以上还是以下,判断这个零件是否达到了缩颈极限。

2 各向异性板料的应变成形极限到应力成形极限的转换关系

由于FLD具有路径相关性^[8],所以在处理多

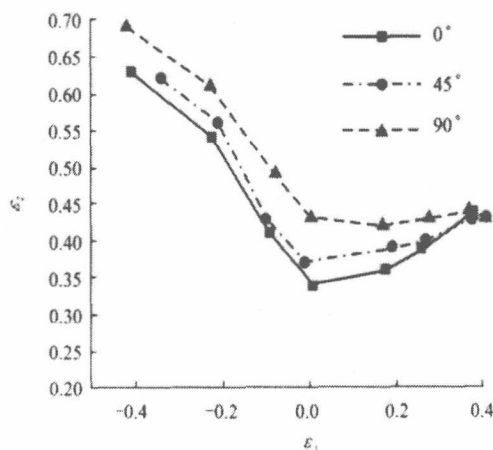


图2 沿不同角度得到的材料的FLD

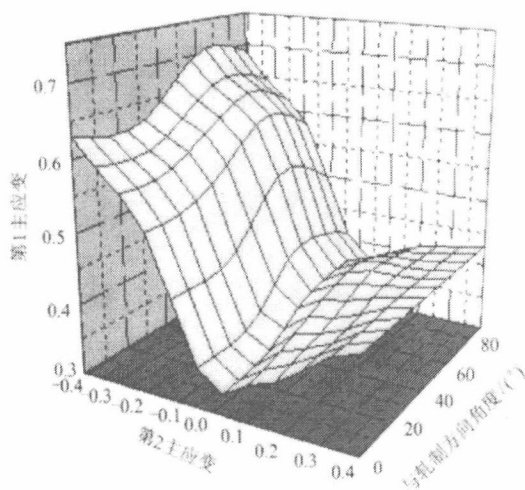


图3 板料的应变成形极限面

道次成形零件时人们往往采用具有与加载路径无关性的FLSD来作为判据。然而板料成形过程中板料的应力状态极其复杂,现在还无法通过试验设备直接测量得到。通常FLSD是由试验得到的板料的FLD之后再根据基本的塑性应力应变关系来计算出来。通常采用的转换方法如图4所示^[5]。

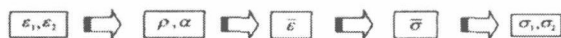


图4 极限应变转换极限应力的流程图

根据HLL的各向异性屈服准则,材料的屈服面和材料的应力应变关系可以由式(1,2)来表示。

$$f(\sigma_{ij}) = 0.5[F(\sigma_{ij} - \sigma_{zz}) + G(\sigma_{zz} - \sigma_{ii}) + H(\sigma_{ij} - \sigma_{ii}) + 2L\sigma_{iz}^2 + 2M\sigma_{iz}^2 + 2N\sigma_{ij}^2 - 1] = 0 \quad (1)$$

$$d\epsilon_{ij}^p = \frac{d\epsilon}{d\sigma_{ij}} d\lambda \quad (2)$$

式中: σ_{ij} 为应力张量; ϵ_{ij}^p 为屈服应变张量; F, G, H, L, M, N 为与厚向异性有关的系数。

如果最大主应变和板料的轧制方向重合为 j 方向,也就是 θ 角为 0° ,其垂直的方向为 i 方向。如图5所示。

那么材料的等效应力可以表示为

$$d\bar{\epsilon} = \frac{F+H}{(FG+GH+FH)^2} [F(Gd\epsilon_{ij} - Hd\epsilon_{ii})^2 + G(Hd\epsilon_{zz} - Fd\epsilon_{ii})^2 + H(Fd\epsilon_{ii} - Hd\epsilon_{zz})^2 + 2Nd\epsilon_{ij}^2] \quad (3)$$

$$\bar{\epsilon} = \sum d\bar{\epsilon} \quad (4)$$

对于低碳钢板等效应力与等效应变的关系可以由式(5)得到。

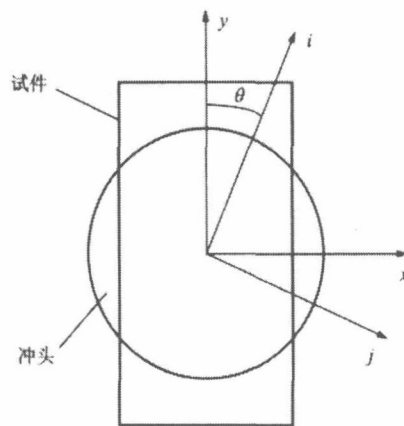


图5 试件方向和各向异性主轴的关系

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (5)$$

那么在材料轧制方向的应力便可以通过式(6~8)得出。

$$\sigma_{ii} = \frac{[(F+H)^2 d\epsilon_{ii} + H(F+H) d\epsilon_{ij}] \sigma}{(GF+GH+FH) d\epsilon} \quad (6)$$

$$\sigma_{jj} = \frac{[(G+H)(F+H) d\epsilon_{ij} + H(F+H) d\epsilon_{ii}] \sigma}{(GF+GH+FH) d\epsilon} \quad (7)$$

$$\sigma_{ij} = (F+H) d\epsilon_{ij} \sigma / (N d\epsilon) \quad (8)$$

然后再根据式(9,10)计算出材料的两个主应力。

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{ii} + \sigma_{jj}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{ii} - \sigma_{jj})^2 + 4\sigma_{ij}^2} \quad (9)$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_{ii} + \sigma_{jj}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_{ii} - \sigma_{jj})^2 + 4\sigma_{ij}^2} \quad (10)$$

在各向异性材料中如果试验时所切割试件的两个方向正好与材料的各向异性主轴相重合,那么在计算材料的FLSD时可以直接应用以上公式,但当材料的各向异性主轴与试件的两个主轴不重合时,那么就不能直接利用以上公式进行转换,必须将在试件拉伸方向的两个应变转换成各向异性主轴坐标下的应变,然后按照原来的公式进行转换。

如图5所示, i 为材料的轧制方向, j 为与其垂直的方向, x, y 为试件的截取方向,一般也是材料变形的两个主应变方向。转换关系如下^[9]

$$d\epsilon_{ii} = d\epsilon_x \cos^2 \theta + d\epsilon_y \sin^2 \theta$$

$$d\epsilon_{jj} = d\epsilon_x \sin^2 \theta + d\epsilon_y \cos^2 \theta$$

$$d\epsilon_{ij} = (d\epsilon_y - d\epsilon_x) \sin \theta \cos \theta$$

3 材料的应力成形极限面

根据前面得到的材料的基本性能参数和转换关系,将不同角度的FLD转换为应力坐标系内的曲线如图6所示。同FLD一样,可以看到由不同角度的FLD转换得到的FLSD也存在着差别,使用单

独的一条曲线不能准确地表示出材料整个面内的应力成形极限。将试验得到的与轧制方向成不同角度的 FLD 曲线, 运用上面的转换关系转换成 FLSD, 然后绘制在以两个主应力和最大主应力与材料轧制方向的角度 3 个坐标下, 捏合成曲面就得到了材料的应力成形极限面, 如图 7 所示。用这样一个三维坐标下的曲面可以更为准确地表示出材料整个面内的成形极限情况。

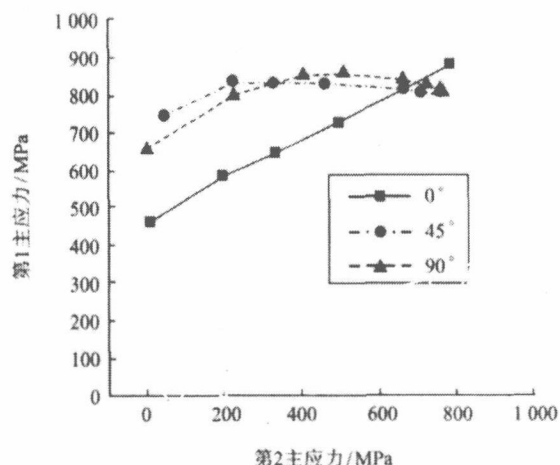


图6 不同角度的FLD转换得到的FLSD

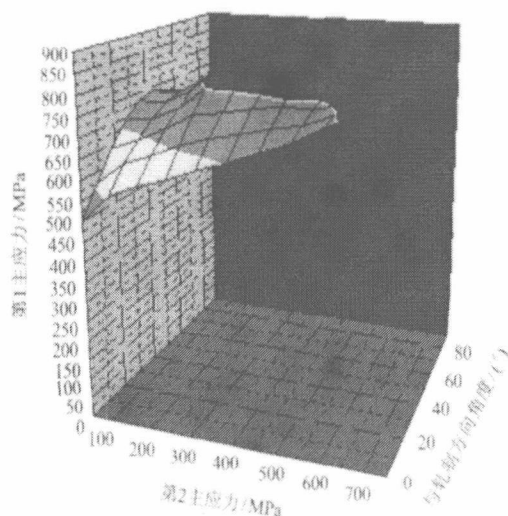


图7 材料的应力成形极限面

4 结束语

本文通过试验研究了板料面内各向异性对FLD

的影响, 研究表明在进行板料成形极限试验时, 试件截取的方向不同, 最后得到的FLD也不同。用单一的从某一方向截取的试件得出的FLD曲线来表示整个面内的成形极限会产生较大误差。为了更准确地评价整个板料面内的成形极限, 本文提出了用应变和应力成形极限面来代替FLD作为板料成形过程中判断材料失稳与否的判据, 虽然要得到一个这样的成形极限面需要做的试验量比单独做一条FLD大, 但是在有限元分析中应用这个判据毫无疑问要比单独的一条FLD或者FLSD更为准确可靠。

参考文献:

- [1] Keeler S P. Understanding sheet metal formability [J]. Journal of Machinery Industry, 1968, 53 (2): 556-667.
- [2] Goodwin G M. Application of strain analysis on sheet metal forming problems in the press shop [R]. SAE Paper, 680093. New York: Society of Automotive Engineers, 1972.
- [3] Kleemola H J, Pelkkikangas M T. Effect of predeformation and strain path on the forming limits of steel copper and brass [J]. Sheet Metal Industry, 1977, 67 (7): 591-599.
- [4] Arrieux R. Determination and use of the forming limit stress diagrams in sheet metal forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 53 (1): 47-56.
- [5] Stoughton T B. Review of theoretical models of the strain-based FLD and their relevance to the stress based FLD [J]. International Journal of Plasticity, 2004, 20 (8): 1-23.
- [6] 陈明和, 高霖, 王辉. 板料成形极限应力图及其应用研究进展 [J]. 中国机械工程, 2005, 16 (17): 1593-1597.
- [7] Hecker S S. A simple technique for determine forming limit curves [J]. Sheet Metal Industry, 1975, 11 (1): 671-676.
- [8] Graf A, Hosford W. Effect of changing strain paths on forming limit diagram of AL 2008-T4 [J]. Metallurgical Transactions A, 1993, 24 (1): 2053-2512.
- [9] Hill R. The mathematical theory of plasticity [M]. Oxford: Clarendon Press, 1983: 319-339.

文章编号:1672-3961(2007)02-0016-05

基于三角形膜单元的钣金成形有限元逆算法

唐于芳, 高霖

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:以三角形膜单元为基础,推导了精度较高的有限元逆算法.算法中考虑了摩擦、压边力、拉延筋等实际工艺条件,并实现了计算机程序.利用此程序可以计算出与冲压件相对应的毛坯的展开形状,冲压件最终的应力、应变分布和厚度变化率等信息.以锥形盆为例,验证了根据有限元逆算法设计的毛料展开程序在毛料展开中的有效性和精确性.实例分析表明在工程允许精度范围内,有限元逆算法可对板料成形工艺方案进行快速评价,优化冲压工艺参数,是一种有效的钣金展开算法.

关键词:三角形膜单元;毛料展开;有限元逆算法;钣金成形模拟

中图分类号:TG86; TH123

文献标识码:A

The finite element inverse approach for sheet metal forming based on the triangular membrane element

TANG Yufang, GAO Lin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the triangular membrane element model, a high precision inverse approach with finite element is deduced. The process parameters, such as friction, holding force and draw bead force are considered. The blank shape, the final distributions of stress and strain, and the thickness change corresponding to the stamping parts can be calculated by this program. The effectiveness and accuracy of the inverse approach method in blank design are validated by a typical example of a cone-shaped basin. The results show that the inverse approach is an effective approach for blank design, which can be used to quickly evaluate the sheet metal forming process and to optimize the stamping technological parameters.

Key words: triangle membrane element; blank design; finite element inverse approach; sheet metal forming simulation

0 引言

钣金成形是一种生产效率高、成形质量好的金属加工方法,被广泛地应用于航空航天、汽车、轻工工业等领域.在钣金成形加工中,合理的毛料形状和尺寸能够改善材料流动和应力分布状态,使钣金件厚

度分布比较均匀,提高成形极限;还能降低突耳高度,减少后续工序的切边余量,提高材料的利用率.目前毛料展开算法主要有经验法、势场模拟法、几何映射法、有限元增量法和有限元逆算法^[1].钣金展开有限元逆算法的基本思想是:采用形变理论即全量理论,通过最小化塑性能函数建立毛料形状与零件形状之间的关系,求出毛料形状和零件最终构形

收稿日期:2006-10-09

作者简介:唐于芳(1980-),女,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为钣金成形加工.

E-mail: yftang717@163.com

的厚度分布.在零件的最终构形上采用三角形膜单元进行离散,三角形膜单元具有处理简单,计算量少,计算速度快的优点,适合逆算法快速高效的要求^[2].主要研究了基于三角形膜单元的有限元逆算法,并用商用软件 PAM-STAMP 模拟验证了逆算法的准确性和可行性.

1 有限元逆算法

在板料展开有限元逆算法中采用了以下假设:

①只考虑板料变形过程中的薄膜应变效应,不考虑板料的弯曲效应;②材料不可压缩;③变形过程是比例加载,基于形变理论即全量理论来分析变形;④凸模、拉延筋、压边圈对板料的接触作用简化为法向作用力和切向摩擦力;⑤采用对数应变来描述变形.

1.1 几何方程

逆算法只考虑冲压件的初始形态和最终形态,忽略中间变形过程,应变由两种构形间的几何差别定义.如图1所示,当物质点从 C^0 运动到 C 时,有:

$$\{dx^0\} = \left\{ \begin{matrix} x^0(x) \\ [I] - \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right] \end{matrix} \right\} \{dx\} = [F]^{-1} \{dx\}. \quad (1)$$

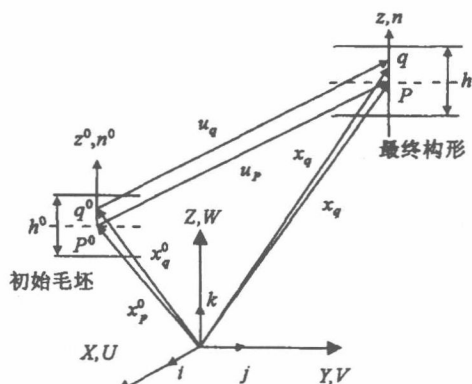


图1 变形中的几何关系

Fig. 1 Geometrical relationship in the deformation

式(1)中 $[F]^{-1}$ 为:

$$[F]^{-1} = [I] - \left[\frac{\partial u}{\partial x} \right] = \begin{bmatrix} 1 - u_{,x} & -u_{,y} & n^0/\lambda_3 \\ -v_{,x} & 1 - v_{,x} & n^0_y/\lambda_3 \\ -w_{,x} & -w_{,x} & n^0_z/\lambda_3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式(2)中 u, v, w 是三角形膜单元的位移函数, $[I]$ 是单位矩阵. $[F]$ 为线性变换梯度矩阵,描述了质点从初始构形映射到现时构形中的变形.

在钣金成形加工中,板料要经历较大的弹性、塑性变形,所以采用左 Cauchy-Green 应变张量 $[B]$ 来

描述板料的相对变形. $[B]$ 可由变形梯度矩阵求得:

$$[B] = [F][F]^T,$$

板料上一点的变形可以用该点的三个方向的主伸长 λ_i 来表示.各点的面内主伸长分量 λ_1, λ_2 可由该点

$[B]^{-1}$ 的特征值得:

$$\begin{cases} \lambda_1 = [(B_{11} + B_{22})/2 + ((B_{11} - B_{22})^2 + 4B_{12}^2)^{1/2}/2]^{1/2} \\ \lambda_2 = [(B_{11} + B_{22})/2 - ((B_{11} - B_{22})^2 + 4B_{12}^2)^{1/2}/2]^{1/2} \\ \theta = \tan^{-1}[(\lambda_1^{-2} - B_{11})/B_{12}] \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中的 θ 是面内主伸长 λ 与最终构形的局部坐标系 X 轴之间的夹角, B_{ij} 为 B^{-1} 的分量.根据塑性变形中体积不变的假设,板料上各点的厚向主伸长 λ_3 可由式(4)得,由式(5)可求得对数应变 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_{xy}$.

$$\lambda_3 = -(\lambda_1 + \lambda_2), \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln \lambda_1 \cos^2 \theta + \ln \lambda_2 \sin^2 \theta \\ \ln \lambda_1 \sin^2 \theta + \ln \lambda_2 \cos^2 \theta \\ (\ln \lambda_1 - \ln \lambda_2) \cos \theta \sin \theta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

1.2 单元类型

在零件的最终构形上采用三角形膜单元进行离散,典型的三节点三角形单元如图2所示,节点编码为 i, j, m 以逆时针方向为正.每个节点有2个位移分量 u, v .

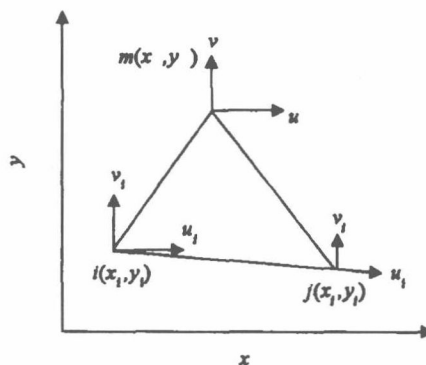


图2 三节点三角形单元

Fig. 2 Three node triangle element

三角形单元的位移函数取一次多项式,由三个节点的位移分量表示为:

$$\begin{cases} u = N_i u_i + N_j u_j + N_m u_m \\ v = N_i v_i + N_j v_j + N_m v_m \end{cases} \quad (6)$$

式中 N_i 为形函数, A 为三角形膜单元的面积.

1.3 屈服准则和本构方程

在平面应力状态下,采用 Hill 各项异性屈服准则和全量理论,得比例加载条件下的弹塑性板材的本构方程为:

$$\{\sigma\} = E s [P]^{-1} \{\epsilon\}, \quad (7)$$

$$E\bar{\varepsilon} = \frac{\bar{\sigma}}{\varepsilon},$$

式(7)中 $\{\sigma\}$ 为Cauchy应力张量, $\{\varepsilon\}$ 为应变矩阵; $\bar{\sigma}$ 和 $\bar{\varepsilon}$ 分别为等效应力和等效应变, E_s 为等效应力应变的割线模量,矩阵 $[P]$ 可由式(8)求得.其中 R_0 , R_{45} , R_{90} 分别为板料的各项异性参数:

$$[P] = \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_0}{(1+R_0)} & 0 \\ \frac{R_0}{(1+R_0)} & \frac{R_0(1+R_{90})}{R_{90}(1+R_0)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1+2R_{45})(R_0+R_{90})}{R_{90}(1+R_0)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.4 有限元控制方程及求解

根据Hill假设,变形体在平衡状态下塑性势能最小^[3,4],由于板料成形可以看作是准静力问题,体力影响可以忽略.塑性势能可以表示为:

$$\min \phi = \int_V \bar{\sigma} d\Omega - \int_V \mathbf{v} d\Gamma, \quad (9)$$

式(9)中右边第一项为塑性变形能的变化率,第二项为外力的功率.可近似的表示为变形能与等效外力功的差值.根据虚功原理和力平衡方程可算出等效外力功,所以近似的塑性势能表示为:

$$W(x) = W_p(x) - W_f(x) - W_d(x) - W_b(x). \quad (10)$$

式(10)中 $W_p(x)$ 为板料的塑性变形能, $W_f(x)$ 为模具与板料间的摩擦功, $W_d(x)$ 为压边圈与板料间的摩擦功, $W_b(x)$ 为拉延筋与板料间的摩擦功,这些量都是毛料初始位置 x 的函数.

用共轭梯度法方法求解时,需要给出一个初始猜测值 x^0 ,如果猜测值比较合理,可以大大提高收敛的速度.一般采用线性映射法^[5]来获得板料的初始猜测值,其基本思想是假设两种构形之间的变形是弹性变形,给定一个毛料形状的猜测值,由该猜测值跟最终构形之间的弹性变形来求得初始猜测值.

2 有限元逆算法的模拟验证

基于以上算法,研究开发了毛料展开设计程序.钣金件的数值建模可在CAD造型软件中完成,用三角形单元将该模型离散后,导入到毛料展开程序中,就可以得到由上述算法计算得到的零件的毛料轮廓、应力、应变和厚度变化率等信息.

2.1 锥形盆的展开和厚度变薄率

根据不可展曲面近似展开方法的合理性判断标

准^[6],由有限元逆算法展开的平面板料通过PAM-STAMP加工仿真、逆向建模得到的零件的表面积与原零件的表面积比较,相对误差在10%以内,且重建零件的变薄率小于40%,最大应变值不超过成形极限时,就说明展开的平面图形的工艺性好^[6,7].图3(a)所示的是一个半径为50 mm,深度为20 mm,侧壁倾角为90°,各处倒角半径为10 mm的一个锥形盆的CAD模型.锥形盆的厚度为1 mm,表面积为15 707.96 mm².在I-Deas中采用三角形膜单元均匀离散CAD模型,网格大小为10 mm,离散后的模型如图3(b)所示.本例计算是在Windows XP上完成的,CPU是Intel P4/1.7 GHz,内存512 MB.

盆的材料为AlMg₃,板料的各项异性指数为1.87,材料的硬化曲线如下式所示:

$$\bar{\sigma} = 401.3(0.005727 + \bar{\varepsilon})^{0.246}.$$

经逆算法98 s运算得到的锥形盆的毛料展开轮廓如图3(b)所示.

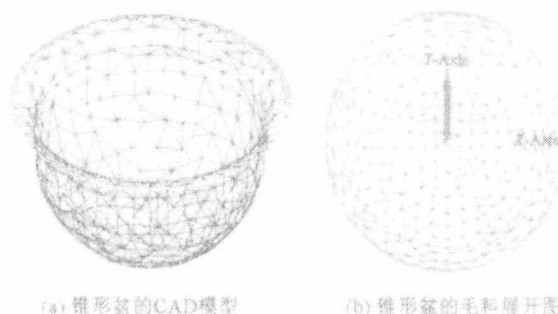


图3 锥形盆的离散模型和毛料展开图

图3 The CAD model and blank design of cone basin

把展开后的网格文件,导入到PAMSTAMP中并提取网格节点坐标信息.利用提取的信息和CATIA造型软件的逆向建模功能重建平面展开图形,测量展开后的表面积为24 132.855 mm².计算展开前和展开后表面积的相对误差为1.08%,小于10%,可以近似的认为展开前后两者的表面积是一致的.

图4是锥形盆的厚度变薄率分布云图,图5是

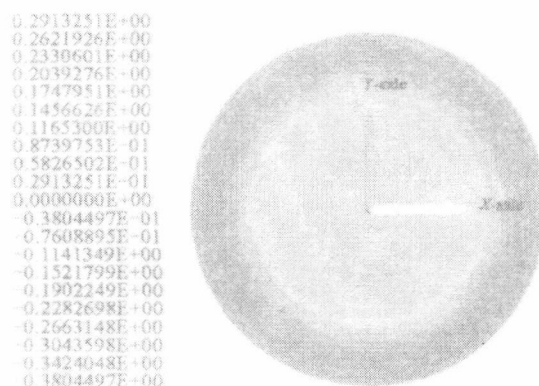


图4 锥形盆的应变分布图

Fig. 4 Strain distribution of cone basin

对称平面上的厚向变形率分布曲线.从图4中可以看出锥形盆边缘部分的材料变厚,存在起皱的危险.而盆底变薄,最大的变薄处发生在侧壁和盆底过渡底圆角部分,最大变形率为 $-0.3804E$.该处最可能被拉裂,与实际情况相符.

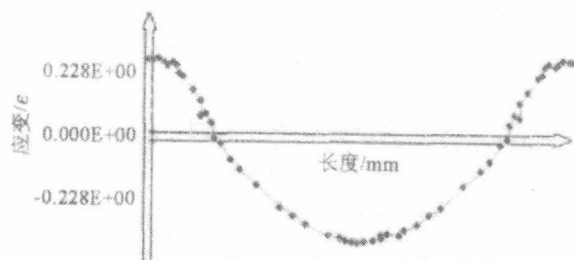


图5 锥形盆在对称平面上的厚向变形率分布曲线

Fig. 5 The curve of thickness change rate on the symmetrical plane

2.2 模拟结果的验证

将有限元逆算法数值模拟结果与增量有限元计算结果进行分析,可以验证逆算法有限元数值模拟结果的可靠性和准确性^[8].

为了验证有限元逆算法的结果准确与否,根据逆算法展开的毛料轮廓的边缘向外加一个偏移量为10 mm的加工余量,然后导入到有限元增量模拟软件 PamStamp-2G 中,并划分网格,锥形盆凸模的几何及材料参数不变.由于锥形盆是轴对称零件,为了节省计算机资源,减少计算时间,只模拟锥形盆的1/4.

经多次模拟验证得知当冲压力为3.8 kN,模型的成形性能最好.经过16 min 20 s 计算后,锥形盆的厚度变薄率如图6所示.从图中可以看出锥形盆的最大变薄处在盆底过渡底圆角部分,最大变形率为 $-0.3838E$,与有限元逆算法的模拟结果基本一致.图7是压压力为3.8 kN时,锥形盆的 FLC 曲线.从图7可以发现,所有单元的应变都在 FLC 曲线以下,根据 PAMSTAMP 的判别规则可知,所有的单元都在安全区域,都没有被拉裂.这说明冲压参数的选取是合理的,符合加工工艺的要求.

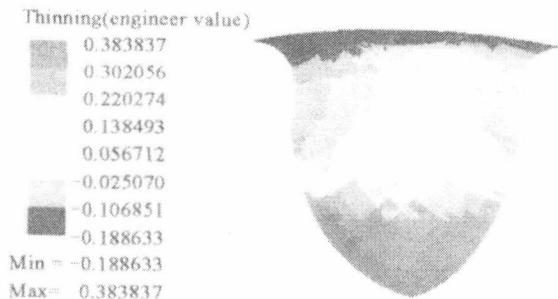


图6 压压力为3.8 kN时锥形盆的变薄率云图

Fig. 6 The nephogram of thickness change rate when holding force is 3.8 kN

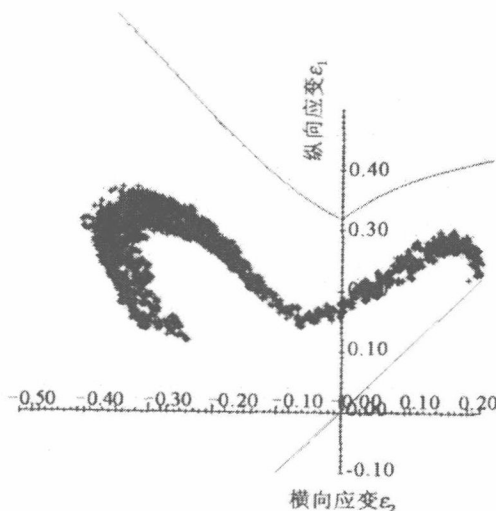


图7 压压力为3.8 kN时的锥形盆的 FLC 曲线图

Fig. 7 The FLC curve of cone basin when holding force is 3.8 kN

3 结论

根据最小化塑性能函数结合板料成形的情况开发了基于三角形膜单元的有限元逆算法钣金展开程序.利用编写的程序对锥形盆进行了展开和模拟计算,得到了毛坯形状和厚度变薄率云图.将得到的结果与增量有限元模拟软件 PAMSTAMP 进行了比较分析,得到如下结论:

(1) 使用逆算法展开后的锥形盆的表面积和展开前的面积基本一致,表明逆算法具有较高的计算精度,展开的平面图形的工艺性较好.

(2) 通过逆算法模拟还可以得到冲压工件最终构形上的厚度变化.通过比较厚度变薄率,发现逆算法的模拟结果与 PAMSTAMP 的模拟结果基本一致.说明有限元逆算法可快速预测板料在最终构形上的变化情况,从而可以分析潜在的成形缺陷,预测板料的成形性能.

(3) 有限元逆算法采用全量理论的本构关系,只考虑初始构形和最终构形,从而提高了计算速度,比使用 PAMSTAMP 速度更快,时间更短,节省了大量的计算时间.

总之,有限元逆算法是一种有效的钣金展开算法,能应用到钣金零件的早期设计阶段以及工艺参数的优化设计中,快速简单,在冲压工艺及模具设计中具有良好的发展前景.

参考文献:

- [1] 兰箭,董湘怀,陈志明,等.板料成形毛坯展开方法研究[J].锻压技术,2000,(4):21-25.

- LAN Jian, DONG Xiang-huai, CHEN Zhi-ming, et al. Research on the method of blank design of sheet metal[J]. *Forging and Stamping Technology*, 2000, (4):21-25.
- [2] 王勘成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社, 1998.
- WANG Mao-cheng, SHAO Min. Basic principle and value method of finite element method[M]. Beijing: Tsing Hua University Press, 1998.
- [3] HILL R. A general theory of stability in elastoplastic solids[J]. *J Mech Phys Solids*, 1958, (6):236.
- [4] LEE C H, HUH H. Blank design and strain estimates for sheet metal forming process by a finite element inverse approach with initial guess of linear deformation[J]. *Journal of Material Process Technology*, 1998, 82(1-3):145-155.
- [5] 谢兰生, 杨晨, 童国权, 等. 基于几何影射法钣金展开有限元逆算法[J]. *中国机械工程*, 2004, 15(9):832-835.
- XIE Lan-sheng, YANG Chen, TONG Guo-quan, et al. Blank design for sheet metal forming parts by a finite element inverse approach[J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, 15(9):832-835.
- [6] 付掌印, 林大钧. 不可展曲面近似展开方法的合理性判断标准[J]. *工程图学学报*, 2005, (6):36-40.
- FU Zhang-yin, LIN Da-jun. Some criteria for evaluating the methods of developing undevelopable curved surface[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2005, (6):36-40.
- [7] 马明旭, 毛昕, 王哲英. 提高曲面近似展开精度的方法与实现[J]. *工程图学学报*, 2002, (2):127-131.
- MA Ming-xu, MAO Xin, WANG Zhe-ying. Methods and realization about improving the precision of approximate development of curved surface[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2002, (2):127-131.
- [8] SHIM H, SON K, KIM K. Optimum blank design by sensitivity analysis[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 104:191-199.

(编辑:陈燕)

(上接第 15 页)

- WANG Wen, QIN Xing, CHEN Zhi-chen. Research on reconfigurable CNC system based on programmable logical device[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2002, 8(7):565-569.
- [6] SPERLING W, LUTZ P. Designing applications for an OSACA control[A]. *Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition*[C]. Dallas: The ASME Winter Annual Meeting, 1997. 16-21.
- [7] CHI Yong-lin. An evaluation space for open architecture controllers[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 26(4):351-358.
- [8] 云利军, 孙鹤旭, 雷兆明, 等. 运动控制网络的研究现状及发展趋势[J]. *控制工程*, 2006, 23(04):289-293.
- YUN Li-jun, SUN He-xu, LEI Zhao-ming, et al. Study status and development trends of motion control network[J]. *Control Engineering of China*, 2006, 23(04):289-293.

(编辑:陈燕)