

PEMFC 金属双极板冲压成形数值模拟与实验

张丽丽, 王开坤

(北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: **目的** 研究金属双极板冲压成形过程中各工艺参数和模具结构参数对成形质量的影响。**方法** 采用Dynaform有限元分析软件对SS304双通道蛇形流道双极板冲压成形过程进行模拟。研究模具圆角半径、模具锥度、压边力、拉延筋等因素对双极板成形质量的影响。**结果** 增加模具圆角半径和模具锥度可防止双极板破裂。适当增大压边力能有效消除起皱缺陷, 设置拉延筋能有效改善坯料流动情况, 必要时需设置多重拉延筋使零件成形完全。当模具圆角半径为0.25 mm, 模具锥度为0°, 拉伸深度为0.5 mm, 压边力大小为60 kN, 并采用双重拉延筋的情况下, 所成形的金属双极板质量良好, 无破裂、起皱、成形不足等缺陷。**结论** 模拟结果与实验结果一致, 验证了模拟结果的正确性, 可见采用冲压工艺成形金属双极板是可行的。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 金属双极板; 冲压成形; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.028

中图分类号: TG386.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)06-0163-07

Numerical Simulation and Experimental Study on Stamping Process of Metallic Bipolar Plate for PEMFC

ZHANG Li-li, WANG Kai-kun

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to study influences of process parameters and mold structure parameters on quality of metal bipolar plate during stamping forming, the stamping forming process of 304 bipolar plate with double channel serpentine flow fields was simulated by Dynaform. The effects of fillet radius, die taper, blank holder force, draw bead, etc. on the forming quality of the bipolar plate were studied. Increasing the fillet radius and mold taper could prevent the bipolar plate from cracking. Increasing the blank holder force appropriately could eliminate the wrinkle defects effectively. Provision of draw bead could improve the flow situation of billet. If necessary, more multiple draw beads might be set to make parts formed completely. With die radius of 0.25 mm, mold taper of 0°, the drawing depth of 0.5 mm, the blank holder force of 60 kN, and double drawbeads, the quality of the metal bipolar plate was good. It was free from rupture, wrinkling, lack of forming and other defects. The results of simulation and experiment are well coincident. It proves the validity of the numerical simulation. It can be seen that the use of stamping process in forming metal bipolar plate is feasible.

KEY WORDS: PEMFC; metal bipolar plate; stamping forming; numerical simulation

质子交换膜燃料电池(PEMFC)是一种利用清洁能源发电的装置, 能将氢气和氧气直接化合。作为一

收稿日期: 2017-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(51174028; 51541406)

作者简介: 张丽丽(1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为板料冲压工艺及模具设计。

通讯作者: 王开坤(1968—), 男, 博士后, 教授, 主要研究方向为先进颗粒增强金属基(铝合金/铜合金)复合材料制备与半固态成形加工技术。

种环保型电池,PEFMC 具有能量转化效率高、功率范围大、启动速度快、工作温度低、运行噪声低、维护方便等优点,现已应用于车载电源、便携电源、备用电源等多个领域。特别是在汽车领域,燃料电池车型以其良好的环境亲和性、能源补给(加氢)时间短以及超长续航里程等特点,远远优于其他新能源汽车,现已成为国内外相关行业研究的主要方向。

双极板作为电池堆重要组成部件之一,其质量对电池堆的性能和寿命有直接影响。目前,PEMFC 双极板大多为石墨板,其重量占整个电池堆重量的60%~80%,制造成本占总成本的30%~45%,这严重阻碍了PEFMC的商品化^[1-2],因此急需研发重量轻、制造成本低新型双极板,以加快PEFMC的发展步伐。金属材料机械性能好、延展性好、成形方法丰富,是目前新型双极板的首选材料^[3]。

现今国内外对金属双极板的成形方法进行了大量研究,主要有采用辊压、冲压等塑性变形方法,采用激光、化学刻蚀、电化学腐蚀等微成形方法,采用电火花、电磁等特种加工方法等^[4]。其中冲压工艺生产效率高、成本低、便于实现自动化,特别适合大批量生产,但在成形过程中容易出现拉裂和起皱等缺陷。关于金属双极板的冲压成形方法,国内外已有很多研究。Sasawat M^[5]等人研究发现,采用冲压成形工艺和液压成形工艺可以加工阵列形微沟槽。Kwon 等^[6]以铝为成形基材,研究了冲压速度、模具温度对双极板成形的影响,实验结果表明,可以用冲压方法制造铝质双极板。武汉理工大学刘艳雄^[7]研究了采用橡胶垫软模成形双极板的过程中各参数对零件质量的影响,但只取了部分微沟槽进行了研究,不能准确反映整个双极板的成形特点。Lim 等^[8]也研究了软模成形的方法,并取得了较好的成形效果,但是能否成形尺寸微小、结构复杂的微沟槽还未可知。张金营等^[9]采用先成形再整形的方法,有效解决双极板流道局部变薄严重的问题,并采用拉延筋降低压边力。李茂春^[10]等人对蛇形流道微沟槽金属板的成形过程进行了模拟,但只取其中一部分微沟槽作了模拟,不能反映整个双极板的成形特点。

文中以SS304为基板,进行了双通道蛇形流道双极板的设计,并采用Dynaform有限元分析软件对所设计的双极板冲压成形过程进行了模拟,研究了模具圆角半径、模具锥度等结构参数和压边力、拉延筋等工艺参数对金属双极板成形质量的影响。

1 成形工艺分析

通过参考陈涛等^[11]对流场结构对燃料电池性能影响的研究,设计双通道蛇形流道双极板,见图1。其中材料为SS304,板厚为0.1 mm,零件尺寸为260

mm×65 mm,流道有效尺寸为239.7 mm×44.6 mm。流道截面为圆角矩形,流道宽度为2.3 mm,脊宽为1.8 mm,深度为0.5 mm,圆角半径为0.15 mm。流道的成形质量是评定金属双极板成形性的最主要参数,因为流场结构直接影响到燃料电池的输出效率,因此流道的尺寸精度要求较高,同时其复杂的结构导致软膜成形很难实现。此双极板流道较长,零件的长宽比较大,成形过程中保证流道的截面形状符合要求是成形工艺的难点之一。

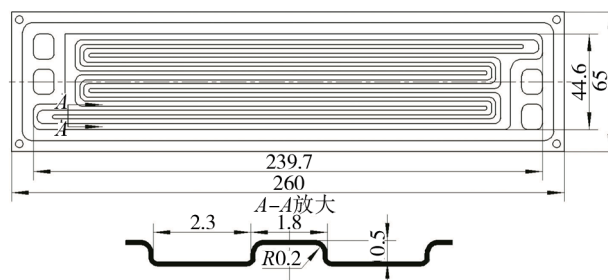


图1 双通道蛇形流道双极板

Fig.1 Double channel serpentine runner bipolar plate

2 数值模拟分析

2.1 有限元模型的建立

采用Pro/E软件创建冲压模具和原始板料的实体模型,导入到Dynaform软件中进行后续的成形模拟。在成形过程中,冲压模具定义为刚体,坯料定义为厚向异性弹塑性材料。

坯料采用精细的四边形单元,以使模拟结果与实际情况更加接近。与长度方向相比,零件宽度方向的结构更加复杂,是主要的变形方向,因此采用更小、更密集的单元以反映零件的变形特点。模具同时采用细密的三角形单元与四边形单元,这样不仅能精确描述模具表面的几何形状,还能与坯料单元尺寸相适应,使接触力的分布更加精确。模具和坯料的单元划分结果见表1。本次模拟中,凹模固定不动,压边圈下降直至与凹模接触,并开始施以压边力,然后凸模下移直至与凹模合模,完成整个冲压过程。定义压边圈的速度为500 mm/s,压边力为30 kN,凸模速度为200 mm/s。

表1 模型单元划分结果
Tab.1 Meshing results of model

名称	单元总数	四边形单元个数	三角形单元个数	最大单元尺寸/mm	最小单元尺寸/mm
坯料	500 000	500 000	0	0.55	0.078
凹模	115 514	109 996	5518	3.23	0.027
凸模	114 100	108 764	5336	1.94	0.010
压边圈	1222	1088	134	3.23	0.622

2.2 初步模拟结果

双极板成形极限见图2, 双极板厚度分布见图3。从图2可以看出, 双极板大部分部位成形效果良好, 微沟槽轮廓精确, 据统计, 微沟槽顶部圆角半径为 (0.181 ± 0.002) mm, 底部圆角半径为 (0.127 ± 0.002) mm, 但存在部分成形缺陷: ① 有很小的部分存在破裂危险, 如图2中微沟槽侧壁和圆角处, 有些部位甚至已经发生破裂, 由图3可知, 微沟槽侧壁厚度减薄严重, 最大减薄率达到36%, 远远超过安全范围; ② 法兰部分和圆角过渡部分有起皱现象, 这部分厚度微量增加, 最大增厚率为9%; ③ 双极板四周和燃气进气口周围成形不足, 见图2。

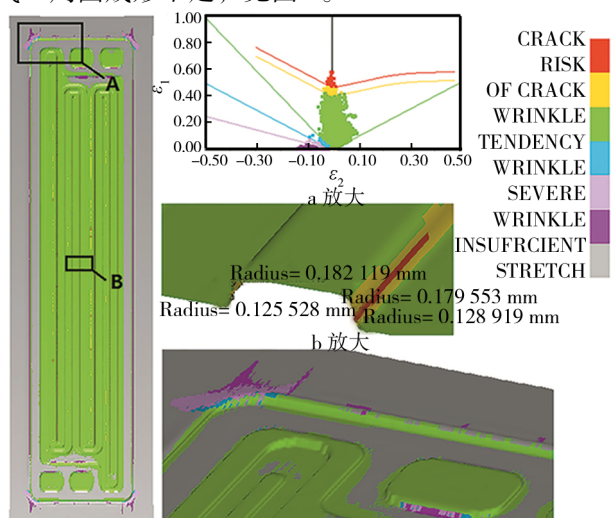


图2 双极板成形极限

Fig.2 FLD of bipolar plate

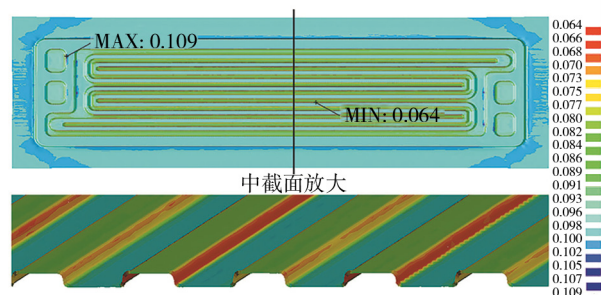


图3 双极板厚度分布(mm)

Fig.3 Thickness distribution of bipolar plate

综上所述, 给定的模具几何参数和冲压工艺参数不合理, 拟通过修改模具圆角半径、采用锥形模具、修改压边力、设置拉延筋等措施予以消除上述缺陷。

2.3 模具和工艺参数的调整与优化

2.3.1 模具圆角半径的调整

保持凸模行程、压边力、冲压速度等其他模拟参数完全一致, 在模具圆角半径分别为0.15, 0.20, 0.25, 0.30 mm的条件下进行模拟, 研究圆角半径对成形的影响。不同圆角半径下的成形极限见图4。可知, 随着圆角半径的增大, 破裂区和破裂危险区逐渐减小直至完全消失, 双极板绝大部分、特别是流道部位成形完全。不同圆角半径下的中截面中间微沟槽的厚度减薄情况见图5, 也能明确地看出, 随着圆角半径的增大, 双极板的最大减薄率逐渐减小, 最大减薄率由36%降至17%, 达到安全区。并且微沟槽底部圆角部位相比顶部圆角部位减薄更加严重。这是由于零件在圆角处不仅受到径向的拉应力和切向的压应力, 同时

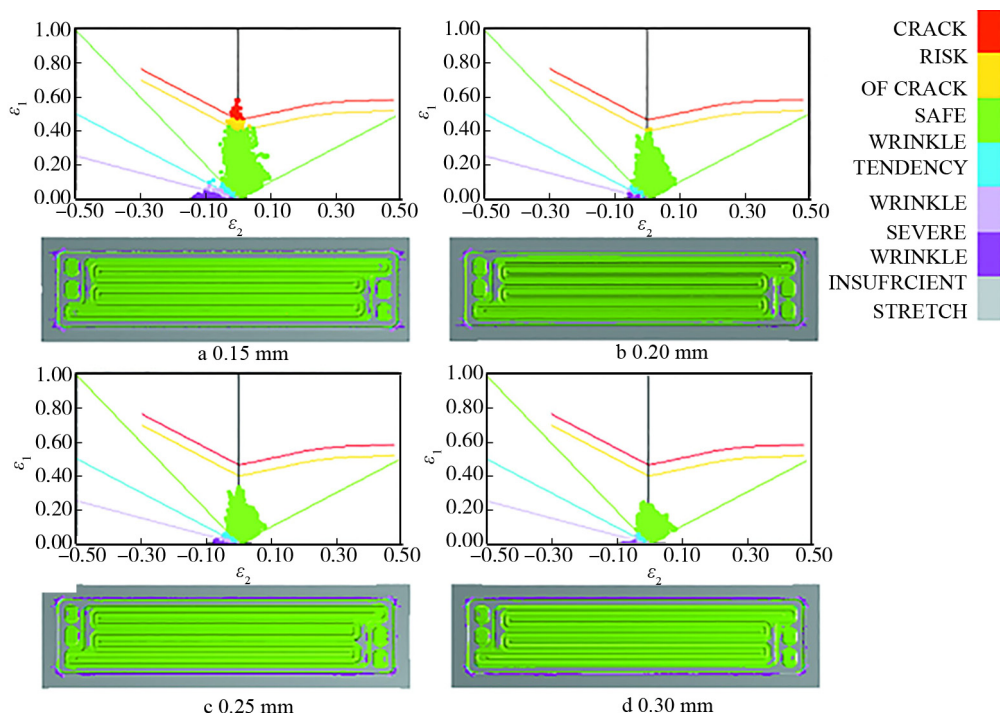


图4 不同圆角半径下的成形极限

Fig.4 FLD with different fillet radius

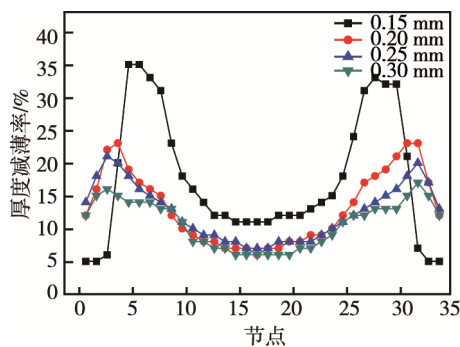


图5 不同圆角半径下中截面中间微沟槽的厚度减薄率
Fig.5 Thickness reduction rate of micro channel in intermediate cross section with different fillet radius

由于凸模的作用,还受到弯曲应力^[12]。圆角半径越小,坯料在成形过程中所受的弯曲应力越大,材料充型越困难,当超过许用应力时,坯料就会失稳,导致减薄严重甚至破裂。由上可知,增大圆角半径能有效防止零件破裂。

2.3.2 模具锥度的调整

保持其他模拟参数相同,模具锥度分别为 0°, 5°, 10°, 15°, 20°进行模拟,研究模具锥度对成形的影响。绘制不同锥度下零件中截面中间微沟槽厚度的减薄率,见图 6。可知,随着锥度的增加,零件厚度减薄率逐渐减小,最大减薄率由 36%降到 23%,与圆角半径具有相同的影响趋势,但随着锥度的增加,微沟槽顶部圆角部位减薄率同比逐渐增大,与微沟槽底部圆角影响效果逐渐相当。由此看出,增大模具锥度也能

防止破裂,但优化效果比较小,这主要是由于双极板拉伸深度较小,锥度的变化对模具结构影响不大所致。

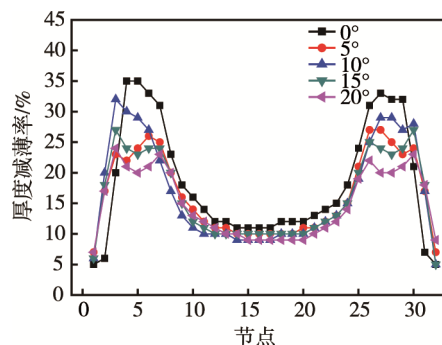


图6 不同锥度下的厚度减薄率
Fig.6 Thickness reduction rate of micro channel in intermediate cross section with different die taper

2.3.3 压边力的优化

由以上研究可知,适当增大圆角半径对成形更有利,因此,确定圆角半径为 0.25 mm,由于锥度对成形的影响很小,还增加模具的加工成本,决定采用无锥度模具。以上研究表明,单纯的增加圆角半径,不能得到合理的加工工艺,因此需要找到合适的压边力来解决起皱和成形不完全的问题。保持其他模拟参数相同,压边力为 30~60 kN 进行模拟研究,以找到大小合适的压边力。模拟结果见图 7。

从图 7 可以看出,随着压边力的增大,零件法兰部位和圆角过渡部位的起皱现象逐步缓解,起皱区域

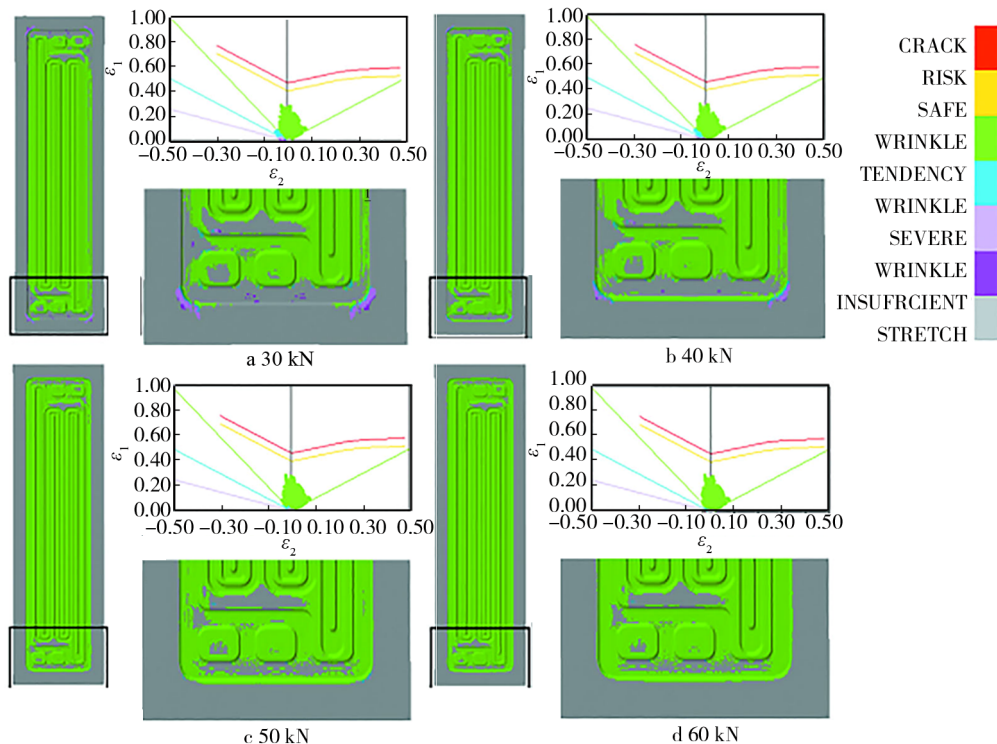


图7 不同压边力下的成形极限
Fig.7 FLD with different blank holder force

逐步减小,直至完全消失,可见增大压边力能有效消除零件的起皱缺陷。随着压边力的增大,成形不足现象虽然得以缓解,但直到压边力为 60 kN 时,零件两端依然部分区域成形不完全。为消除这一缺陷,继续增大压边力到 1000 kN,得到如图 8 所示的成形极限。可见,继续增大压边力将导致零件发生破裂,而成形不足缺陷没有进一步消除,因此需要考虑设置拉伸筋来改善坯料流动状况,以获得合格产品。

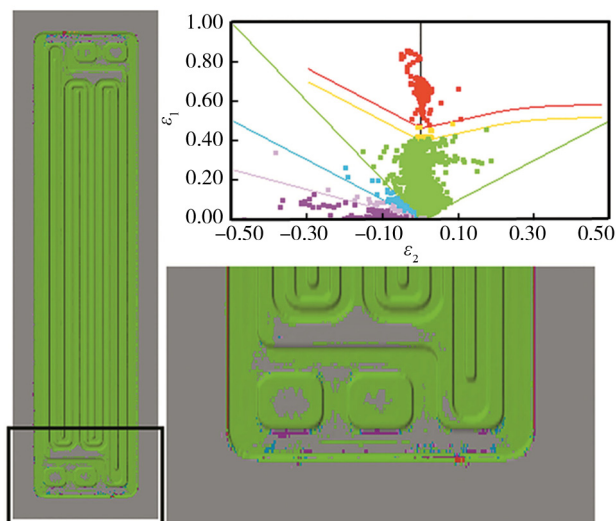


图8 压边力为 1000 kN 时的成形极限
Fig.8 FLD with blank holder force of 1000 kN

2.3.4 拉伸筋的设置

因为成形不足区域主要集中在零件两端,因此在两端设置局部拉伸筋,增大进料阻力。Dynaform 软件提供了真实拉伸筋和等效拉伸筋两种拉伸筋设置形式。数值模拟中,真实拉伸筋能更好地反映实际生产中拉伸筋部位的材料流动阻力状态^[13],因此本例采用真实拉伸筋进行模拟,拉伸筋的布置情况见图 9。压边力选择 60 kN。从模拟结果(图 9)可看出,设置拉伸筋后,相比无拉伸筋(图 7d),成形不足得到很大改善,除少数区域依旧存在成形不充分缺陷外,其他部位均成形完全。虽然有部分区域出现拉裂和起皱的现象,但都在零件有效部位以外,通过后续切边工序将其切除。由上可知,拉伸筋的设置能有效改善成形不足,但通过布置一条拉伸筋,不足以完全消除缺陷,两端依然有小部分区域成形不完全,因此考虑在原有拉伸筋的基础上,再增设一条拉伸筋(见图 10),以更好地改善两端材料的流动状况。

从设置双重拉伸筋的成形极限图(图 10)可看出,整个零件有效部分均成形完全,没有出现破裂或起皱缺陷。在拉伸筋外侧板料虽然有起皱和拉裂的缺陷,但后续切边工序将完全切除,获得合格产品。这说明模具几何尺寸和所设置的成形参数是合理的。

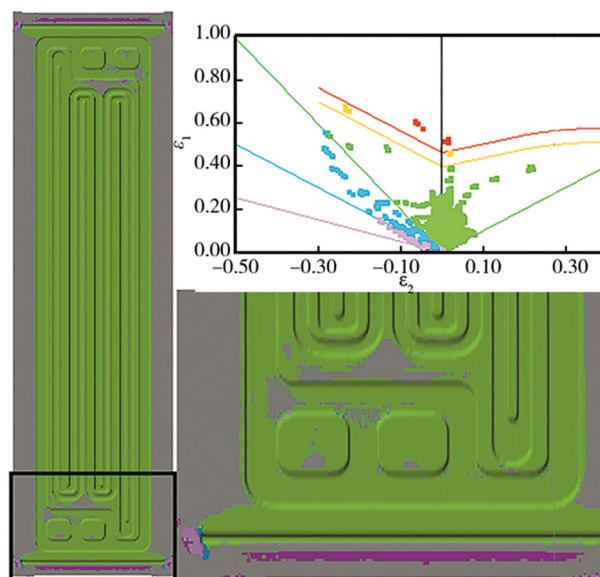


图9 设置拉伸筋的成形极限
Fig.9 FLD with draw bead

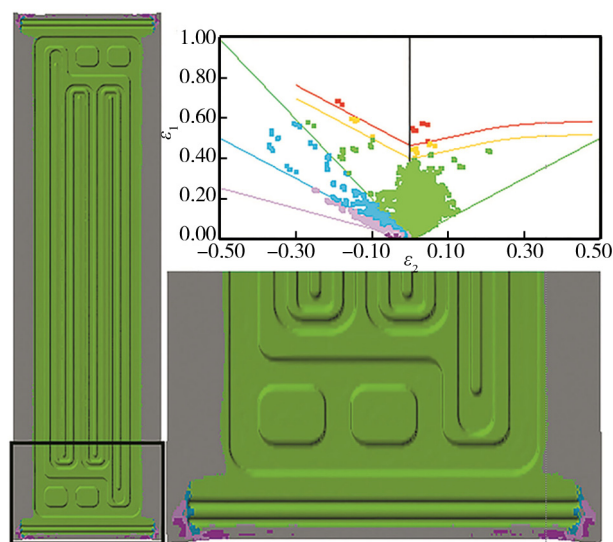


图10 设置双重拉伸筋的成形极限
Fig.10 FLD with double draw beads

3 实验验证

为了进一步直观、准确地研究采用冲压的方法成形 SS304 双极板的可能性,并且验证有限元模拟的准确性与可靠性,以有限元模拟结果为依据,通过实验进一步研究压边力的大小对零件质量的影响。设计加工直壁模具,模具圆角半径为 0.25 mm,微沟槽深度为 0.5 mm。实验与有限元模拟相对应,依次改变压边力大小为 30, 40, 50, 60 kN,得到的成形结果见图 11,分析可知,实验结果与有限元模拟结果一致。随着压边力的增加,法兰与圆角处的起皱程度减缓,直至压边力达到 60 kN,起皱缺陷完全消除,获得成形质量合格的零件,可知有限元的模

拟结果是真实有效的。两块双极板相对所得流道截面见图 12。可以看出, 双极板流道截面互相匹配良好, 槽部气体流道轮廓清晰、畅通, 脊部贴合良好,

能有效防止气体横向流动。从流道截面中可看出, 流道深度方向存在一定斜度, 这可能与模具加工精度或板料回弹有关。

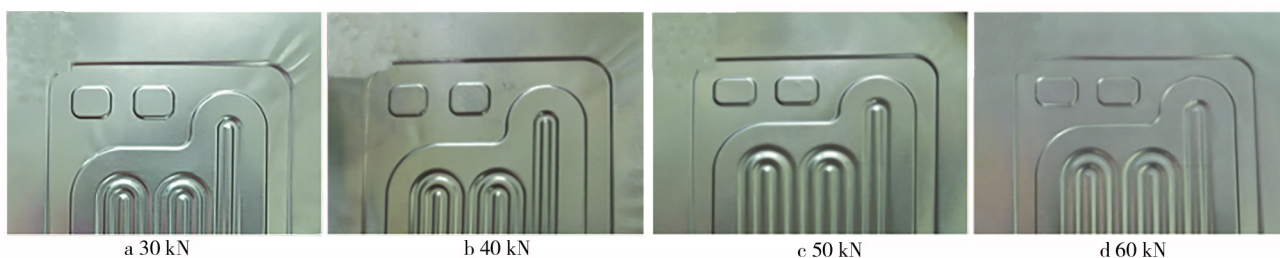


图 11 不同压边力下的实验结果

Fig.11 Experimental results with different blank holder forces

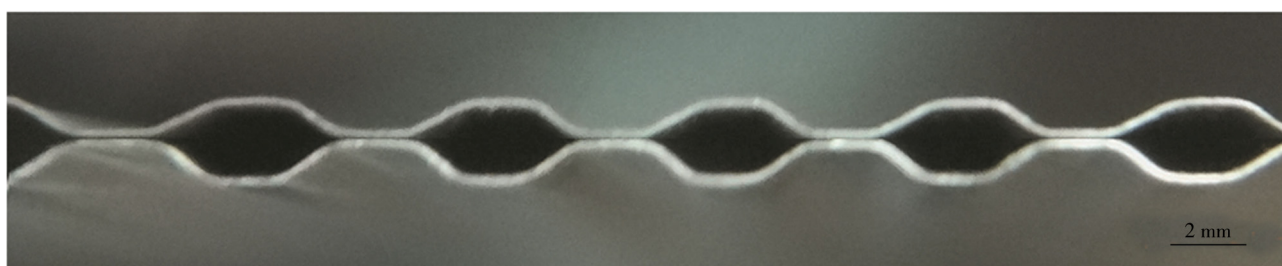


图 12 双极板流道截面

Fig.12 Cross-section of the bipolar plate

4 结论

采用数值模拟和实验研究相结合的方法, 研究了 SS304 金属双极板的冲压成形性能, 对比分析了各参数对零件成形质量的影响, 并进行了优化。主要得出以下结论。

1) 随着圆角半径的增加, 零件破裂区域和破裂危险区域逐渐减小, 厚度减薄率逐渐降低, 当圆角半径由 0.15 mm 增加到 0.30 mm 时, 最大减薄率由 36% 降到 17%, 达到安全区间。

2) 随着模具锥度的逐渐增加, 最大减薄率逐渐减小, 能降低零件的破裂危险, 但由于拉伸深度较小, 锥度的影响程度较小, 当锥度由 0° 增加到 20°, 最大减薄率从 36% 降到 23%, 优化效果比较小。

3) 适当增大压边力能有效消除起皱缺陷, 但压边力太大会导致零件破裂, 本次模拟中, 当压边力达到 60 kN 时, 起皱缺陷恰好完全消除, 获得比较好的成形结果。

4) 拉伸筋的设置能有效解决成形不足的问题, 双重拉伸筋的设置使双极板两端成形不足缺陷得以消除, 经过后续切边工艺将得到成形质量良好的零件。

5) 将实际成形双极板零件与有限元模拟结果进行对比分析, 两者结论一致, 证明了模拟的正确有效性, 模拟结果可为实际生产做指导。最终得到了最佳尺寸参数和工艺参数, 其中模具圆角半径为 0.25 mm,

模具锥度为 0°, 拉伸深度为 0.5 mm, 压边力大小为 60 kN, 应设置双重拉伸筋, 所成形零件无破裂、起皱、成形不足等缺陷, 获得流道截面轮廓清晰, 贴合效果良好。

参考文献:

- [1] TOYOAKI M, MEGURNI K, MICHIO H. Study on Metallic Bipolar Plate for Proton Exchange Membrane Fuel Cell[J]. Journal of Power Sources, 2006, 161(1): 74—78.
- [2] LIU Y X, HUA L. Fabrication of Metallic Bipolar Plate for Proton Exchange Membrane Fuel Cells by Rubber Pad Forming[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(11): 3529—3535.
- [3] TSAI P S, WANG L S, CHANG F R. Modeling and Hierarchical Tracking Control of Tri-wheeled Mobile Robots[J]. IEEE Transaction on Robotics, 2006, 22(5): 1055—1062.
- [4] 许桢英, 张园园, 王匀, 等. 微型燃料电池双极板成形工艺的研究进展[J]. 电源技术, 2015(4): 861—863.
XU Zhen-ying, ZHANG Yuan-yuan, WANG Yun, et al. Research Progress of Forming Process of Bipolar Plate for Micro Fuel Cell[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015(4): 861—863.
- [5] SASAWAT M, OMER N C, MUAMMER K. Effect of Manufacturing Processes on Formability and Surface Topography of Proton Exchange Membrane Fuel Cell

- Metallic Bipolar Plates[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(16): 5269—5277.
- [6] KWON H J, JEON Y P, KANG C G. Effect of Progressive Forming Process and Processing Variables on the Formability of Aluminum Bipolar Plate with Microchannel[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 64(5): 681—694.
- [7] 刘艳雄. 燃料电池金属双极板软模成形研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- LIU Yan-xiong. Study on the Phubber Pad Forming Process of the Metal Bipolar Plate for Fuel Cell[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [8] LIM S S, KIM Y T, KANG C G. Fabrication of Aluminum 1050 Micro-channel Proton Exchange Membrane Fuel Cell Bipolar Plate Using Rubber-pad-forming Process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 65(1): 231—238.
- [9] 张金营, 宋满仓, 吕晶, 等. PEMFC 金属双极板成形工艺分析及数值模拟[J]. *模具工业*, 2010, 36(12): 18—21.
- ZHANG Jin-ying, SONG Man-cang, LYU Jing, et al. Forming Process and Numerical Simulation for Metal Bipolar Plate of PEMFC[J]. *Die & Mould Industry*, 2010, 36(12): 18—21.
- [10] 李茂春, 张连洪, 万淑敏, 等. PEMFC 薄金属流场板冲压成形有限元模拟[J]. *电源技术*, 2005, 29(8): 502—504.
- LI Mao-chun, ZHANG Lian-hong, WAN Shu-min, et al. Finite Element Simulation of Forming Process for Thin Metallic Flow Field Plate of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2005, 29(8): 502—504.
- [11] 陈涛, 乔运乾, 李昌平, 等. 蛇形流场结构质子交换膜燃料电池的性能研究[J]. *可再生能源*, 2012, 30(3): 87—91.
- CHEN Tao, QIAO Yun-qian, LI Chang-ping, et al. Research on Performance of Serpentine Flow Field in PEMFC[J]. *Renewable Energy*, 2012, 30(3): 87—91.
- [12] 柯旭贵. 冲压工艺与模具设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- KE Xu-gui. Stamping Process and Mold Design[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [13] 刘细芬. 基于 dynaform 的汽车覆盖件拉伸成形有限元模拟分析[J]. *机械研究与应用*, 2013, 26(2): 33—35.
- LIU Xi-fen. Finite Element Simulation Analysis of Drawing Process for Auto Panel Based on Dynaform[J]. *Mechanical Research & Application*, 2013, 26(2): 33—35.