

304 不锈钢极薄带微流道气胀成形材料流动行为及微观组织

张鹏^{1,3,4,5*} 朱学卫^{2,3,4} 于保洋^{1,3,4} 武天枫^{1,3,4} 朱锦州^{1,3,4}

1.太原理工大学材料科学与工程学院,太原,030024

2.太原理工大学机械工程学院,太原,030024

3.太原理工大学金属成形技术与重型装备全国重点实验室,太原,030024

4.太原理工大学先进金属复合材料成形技术与装备教育部工程研究中心,太原,030024

5.海安太原理工大学先进制造与智能装备产业研究院,海安,226601

摘要:针对304不锈钢极薄带开展了微流道气胀成形实验及数值模拟,研究了成形过程中坯料应力、应变的分布及不同位置的厚度变化规律,分析了气胀成形试样典型位置微观组织的演变机制。实验与模拟的成形流道轮廓对比验证了数值模拟结果的可靠性。研究结果表明,在25 MPa的成形压力和常温条件下,上圆角处的厚度由100 μm 减小至84.05 μm ,是成形易破裂区域;模拟流道深度为619.67 μm ,实验流道深度为556.34 μm 。成形后,试样晶粒减小且位错密度增大,小角度晶界占比由58.04%提升至62.61%,加工硬化现象明显。

关键词:304 不锈钢极薄带;气胀成形;微流道;材料流动行为;有限元数值模拟

中图分类号:TG39

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.07.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Flow Behavior and Microstructure of 304 Stainless Steel Ultra-thin Strips in Microchannel Gas Forming

ZHANG Peng^{1,3,4,5*} ZHU Xuewei^{2,3,4} YU Baoyang^{1,3,4} WU Tianfeng^{1,3,4} ZHU Jinzhou^{1,3,4}

1.College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024

2.College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024

3.National Key Laboratory of Metal Forming Technology and Heavy Equipment, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024

4.Engineering Research Center of Advanced Metal Composites Forming Technology and Equipment, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024

5.Haian Industry Institute of Advanced Manufacturing and Intelligent Equipment, Taiyuan University of Technology, Hai'an, Jiangsu, 226601

Abstract: Microchannel gas forming experiments and numerical simulations on 304 stainless steel ultra-thin strips were conducted. Stress distribution, strain distribution, and thickness variation patterns at different locations of the blanks in forming processes were investigated. The evolution mechanism of the microstructure at typical positions of the gas formed specimens was analyzed. The comparison between experimental and simulated channel profiles was performed to validate the reliability of the numerical simulation results. The results show that under 25 MPa and room temperature conditions, the thickness at the upper fillet decreases from 100 μm to 84.05 μm , identifying the region is easy to rupture in forming. The simulated channel depth was as 619.67 μm , while the experimental depth was as 556.34 μm . Post-forming analyses reveal that grain size reduces, dislocation density increases, and low-angle grain boundaries raised from 58.04% to 62.61%, which demonstrate the significant work hardening effects.

Key words: 304 stainless steel ultra-thin strip; gas forming; micro-channel; material flow behavior; finite element numerical simulation

收稿日期:2024-08-29

基金项目:中央引导地方科技发展资金(YDZJSX2022A023);海安太原理工大学先进制造与智能装备产业研究院开放研发项目(2023HA-TYUTKFYF018);第二十七届中国科协年会学术论文

0 引言

器件微型化和功率密度最大化已成为光电子器件及新能源行业的发展趋势,微型金属零部件的需求爆发式增长^[1-2]。微型零部件对尺寸精度

要求极高,且其成形制造存在显著的尺寸效应,对模具的加工精度要求极为苛刻,模具制造成本及难度显著增加^[3]。微冲压、微挤压和微模锻等传统的微成形工艺需要凹凸模具具有很高的加工和配合精度,这类模具磨损严重,服役寿命较短。

气胀成形是一种在封闭空间内利用高压惰性气体对金属板料施加压力,使其发生塑性变形的成形工艺,与传统成形方法相比,成形无需凸模,模具加工和配合的精度要求低。高压气体提供成形压力,避免了模具之间、模具与坯料的碰撞冲击,可有效消除坯料在成形过程中的局部开裂问题,坯料可成形深度显著增大^[4]。

热气胀工艺多用于薄板的自由胀形。YU等^[4]在二维电场作用下,对纳米晶 Ni 箔进行高温气胀实验,发现电致塑性效应可明显提高 Ni 箔的成形性能。张锡栋^[5]采用热态气胀成形方法研究了温度、模具形状和进气速率对热塑性纤维金属层板成形效果的影响,发现该层板的最佳成形温度为 230~250 °C,模具形状改变了树脂堆积的位置及程度,进气速率对成形效果无明显影响。ESMAEILI 等^[6]研究了影响厚度 0.2 mm 的燃料电池铝合金双极板气胀成形的关键参数,通过改变气体压力、流道宽度、模具外上圆角半径来评估成形状态,发现增大气体压力和外上圆角半径、减小长径比对成形有利,可消除板料减薄,增大填充率。KARGAR-PISHBIJARI 等^[7]采用厚度 0.1 mm 的 AA1070 铝板进行燃料电池双极板热气胀成形,发现随着流道深宽比的减小,板料的成形性能提高,板料在温度 400 °C、气压 4 MPa、深宽比 0.5、侧壁夹角 15°时成形性最好。上述研究均针对变形抗力较小的铝合金板,缺少对钢、钛等变形抗力较大材料薄板的微结构成形研究。

许多学者在气胀成形数值模拟领域开展了广泛而深入的研究。周凌华等^[8]采用有限元分析方法模拟了板件在超塑性状态下的成形过程,并通过分析成形构件的壁厚分布来调整并确定指导工艺试验的气胀压力-时间曲线。张宇翔等^[9]建立了 Ti-55 合金管电辅助加热气压胀形过程的电-热-力多场耦合有限元模型,发现提高电流密度后,管壁最大减薄处由过渡区转移至上圆角,提高了圆管直角部分的贴模程度。陈楠楠等^[10]对不同氢质量分数的置氢 Ti-55 合金进行恒压超塑气胀成形数值模拟,并根据数值模拟结果选取 4 MPa 胀形压力进行超塑气胀成形试验。试验与模拟的胀形高度误差在 9%以内。

现有研究多集中于自由胀形或管坯的胀形工

艺数值模拟,针对微流道气胀成形数值模拟的研究鲜有报道。因此,笔者以 0.1 mm 厚 304 不锈钢极薄带为研究对象,采用自行设计的流道模具,在 25 MPa 成形压力下,进行微流道气胀成形实验及数值模拟。本文重点研究成形流道典型位置的厚度变化,分析了成形过程中应力、应变的分布规律,阐述了板料厚度与流道深度的关系,对比相同成形参数条件下仿真与实验的流道深度,验证了模拟结果的有效性。

1 实验及模型构建

1.1 实验材料及测试

选用轧制并退火处理的 304 不锈钢极薄带作为实验材料。坯料尺寸为 96 mm×81 mm×0.1 mm。参考金属材料拉伸试验方法 GB228.1—2010,设计了单轴拉伸试样。拉伸应变速率分别为 10^{-3} s^{-1} 、 10^{-2} s^{-1} 和 10^{-1} s^{-1} 。图 1 为实验材料在室温下的真实应力-应变曲线,图 2 为实验用板料及拉伸样品的形状尺寸示意图。

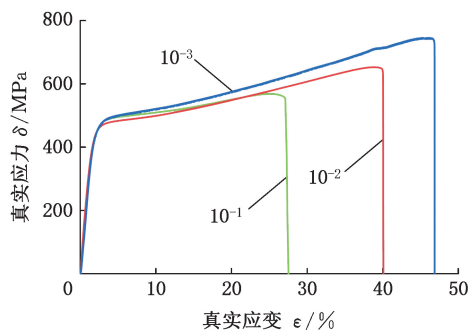


图 1 室温下的真实应力-应变曲线

Fig.1 Real stress-strain curves at room temperature

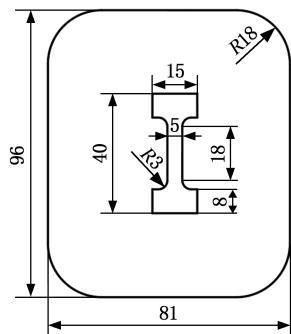


图 2 实验板料与拉伸试样尺寸

Fig.2 Dimensions of test plate and tensile specimens

1.2 实验装置及实验方法

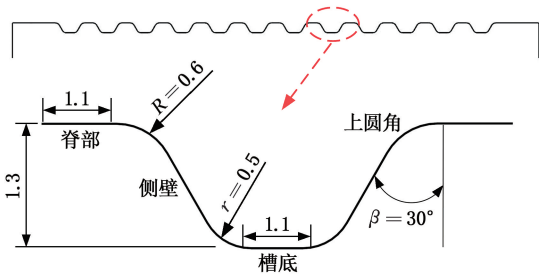
304 极薄带的微流道气胀成形实验用模芯如图 3a 所示。实验时,首先将板料置于凹模表面,然后闭合上下模具并施加 20 MPa 压力,并通过密封圈密封板料成形区域。然后通入压力 25 MPa 的氮气进行气胀成形并保压 1 min。成形完成后,先释放高压气体,再打开上模具,取出成形

后的板料。

为降低气胀成形的难度,实验用模芯的深度、宽度和上圆角半径等流道尺寸均为商用双极板常用尺寸的较大值,如图 3b 所示。



(a) 实验模芯实物图



(b) 模芯流道尺寸

图 3 实验模芯与流道尺寸

Fig.3 Experimental mold core size

1.3 有限元模型构建

在三维建模软件 UG 中按照实际尺寸建立板料与模具的三维模型,将压边圈、板料、下模框、模芯的接触面导入有限元模拟软件 ABAQUS,如图 4 所示。模拟的压力设为 20 MPa,对气胀成形部分施加始终垂直于板料变形面的 25 MPa 均布面载荷。压边圈与板料之间的摩擦因数设为 0.2。将板料离散为厚度 0.1 mm 的壳单元(单元类型为 S4R),将压边圈、下模框、模芯设为刚体。成形时,下模框采用六自由度固定约束使其完全固定。整个成形过程包含 4 个分析步:①压边圈下压与坯料接触;②压边圈施加压边力;③气胀成形;④气压卸载。气胀成形工步时长为 50 s,气胀压力从 0 线性增加到 25 MPa,到达指定压力 25 MPa 后保压 60 s,之后卸载成形气压。

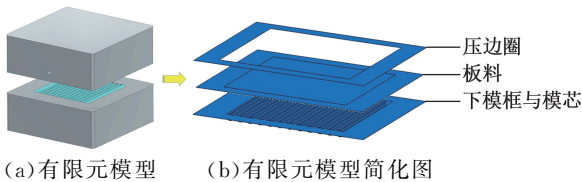


图 4 三维有限元模型

Fig.4 3D finite element model

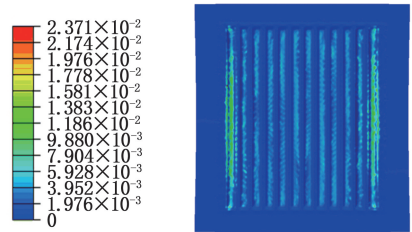
2 结果和讨论

2.1 数值模拟结果

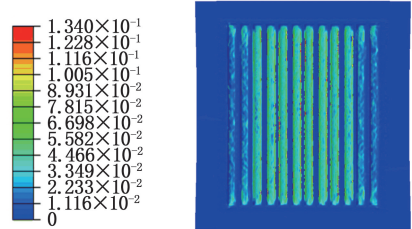
成形初期、成形中期和气压后卸荷的成形气

胀压力分别为 6.25 MPa、18.75 MPa 和 0。基于模拟结果,分析上述 3 个阶段的等效塑性应变、等效应力、板料厚度分布、流道深度。

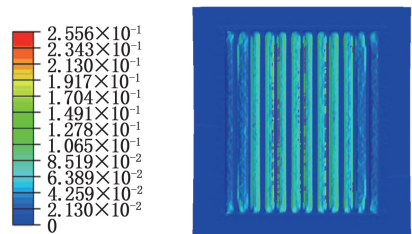
图 5 为等效塑性应变云图。成形初期,板料两侧的等效应变较大,均值达到 0.0104,中间区域的等效应变均值只有 0.0042。随着气压的升高,板料中间区域的应变逐渐增大,并逐渐超过板料两侧区域的应变。成形中期,中间区域的等效应变均值达到 0.0294,两侧的应变均值为 0.0202,中间流道上圆角区域的塑性应变最大,等效应变均值达到 0.1047。成形压力卸载后,部分应力释放,中间区域上圆角处的塑性应变最大,应力奇异现象、严重减薄可能导致坯料破裂,造成局部等效应变偏大。



(a) 气胀成形初期



(b) 气胀成形中期

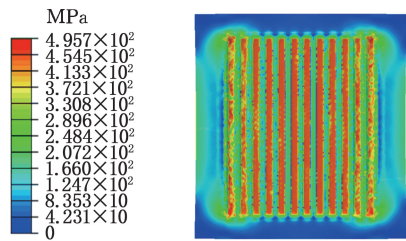


(c) 成形气压卸载后

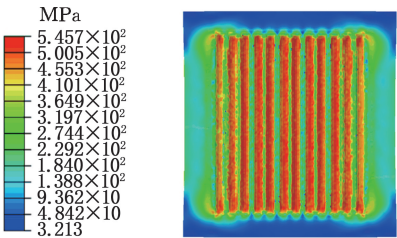
图 5 等效塑性应变云图

Fig.5 Effective plastic strain maps

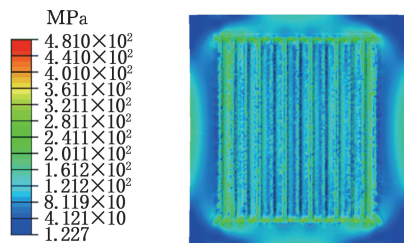
图 6 为等效应力分布云图。开始阶段,中间流道受到的应力大于板料两侧。随着气胀压力的升高,成形区应力逐渐增大。实验中期的中间流道应力最大值达到 524.63 MPa,两侧流道最大应力为 486.48 MPa,均超过不锈钢的屈服应力 425~430 MPa。气压卸载后,坯料应力明显释放,成形区域的应力释放程度更大。与冲压成形不同,气胀成形的非成形区与成形区过渡处的应力较小,可有效避免两处发生失效破裂。



(a)气胀成形初期



(b)气胀成形中期

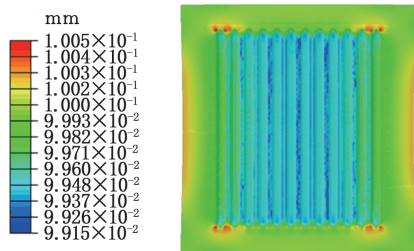


(c)成形气压卸载后

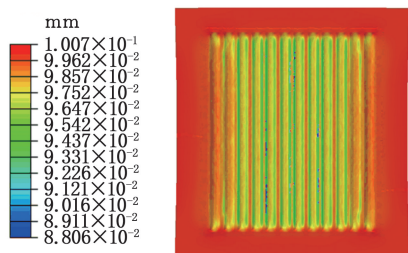
图 6 等效应力云图

Fig.6 Equivalent force maps

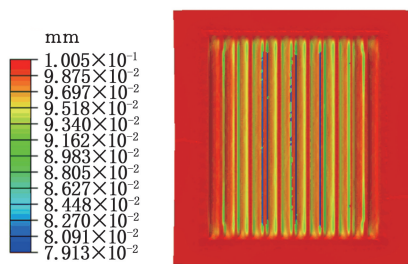
图 7 为板料厚度分布云图。从实验开始到气压卸载,中间流道的厚度始终小于两侧流道。气胀成形初期,板料中部上圆角区域的厚度最小,为 $99.15 \mu\text{m}$;成形中期的最小厚度变为 $88.06 \mu\text{m}$;气压卸载后的板料最小厚度仅为 $79.13 \mu\text{m}$ 。气压卸载后的模拟板料厚度较实验测试偏小的主要原因在于,成形压力达到最大值后,板料中部上圆角区域网格过度拉伸,可能导致坯料破裂,造成厚度误差较大。最小厚度均出现在中间区域流道上圆角区域,这与等效塑性应变的分布结果基本一致。气胀成形过程中,边部流道可得到非成形区域即压边圈附近材料的补充;中间区域流道密集,材料流入凹模时,相互制约,没有非成形区域材料的补充。两侧流道有非成形区域材料的补充且成形阻力较小,因此该位置的等效应力较小、成形深度较大且相对减薄量较小。此外,脊部受到高压气体的正压力作用,与模具表面的摩擦力较大,导致脊部材料流动困难,难以流入模具凹槽。与脊部相连的上圆角区域难以补充材料,且上圆角区域与模具存在间隙,摩擦力小,材料在高压气体作用下拉伸严重、易发生颈缩现象,是成形过程中最容易破裂的区域。压力卸载后,板料两侧的成形深度较大,发生的弹性变形程度较大,回弹量也更大。



(a)气胀成形初期



(b)气胀成形中期



(c)成形气压卸载后

图 7 厚度分布云图

Fig.7 Thickness distribution contour maps

图 8 为板料从成形初期到高压气体卸载后的不同成形阶段与模具的轮廓对比图,图中彩色区域表示成形板料的截面形状,下方灰色表示下模具的截面形状。随着压力的增大,流道成形深度逐渐增大,两侧流道的深度较中间流道更大,中间区域流道填充程度约为凹槽轮廓的 $1/3$,若要进一步增大成形深度,需要提高胀形压力和成形温度。

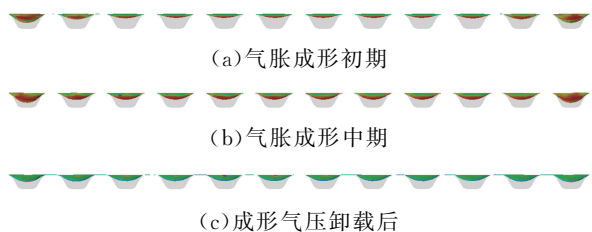


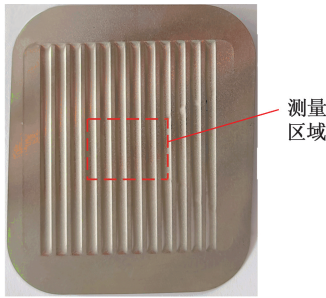
图 8 成形板料与模具不同成形阶段轮廓对比图

Fig.8 Contour comparison diagram of forming sheet and die at different forming stages

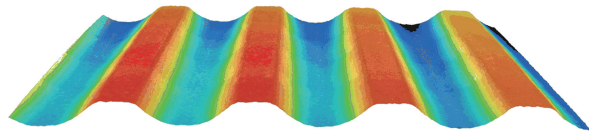
2.2 工艺实验结果

图 9a 为成形后的板料实物图,图 9b、图 9c 分别为板料三维轮廓的高度分布图和纹理图。板料成形区域经线切割和砂纸打磨后,使用 KEYENCE VX-X3000 形状测量激光显微系统测量气

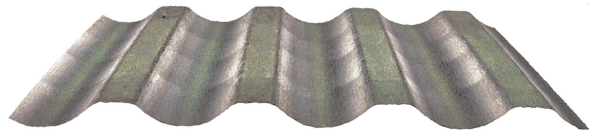
胀成形后的板料轮廓,并提取截面轮廓形状。流动脊部区域的减薄率最小,仅有 8.23%;侧壁与槽底的减薄率接近,约为 9.5%;上圆角区域的减薄率最大,达到 15.95%。



(a) 实物图



(b) 三维轮廓高度分布图



(c) 三维轮廓纹理图

图 9 微流道成形实物图及三维轮廓测试结果

Fig.9 Physical drawing of microfluidic forming and 3D profile test results

成形过程中,温度和压力较低,且板料存在一定的回弹效应,成形试样离模芯底部较远,导致下圆角未能形成。成形流道底部呈弧形,各段的轮廓形状、壁厚分布和成形深度的一致性均较好,因此选择中间流道测量深度及典型位置厚度。

流道厚度的测量结果与 ESMAEILI 等^[6]的研究结果相似。如图 10 所示,各位置均发生了不同程度的减薄。脊部的厚度最大,为 91.77 μm ,且该区域内的压力分布较为均匀,板料的塑性流动较少,减薄率为 8.23%。上圆角区域是板材厚

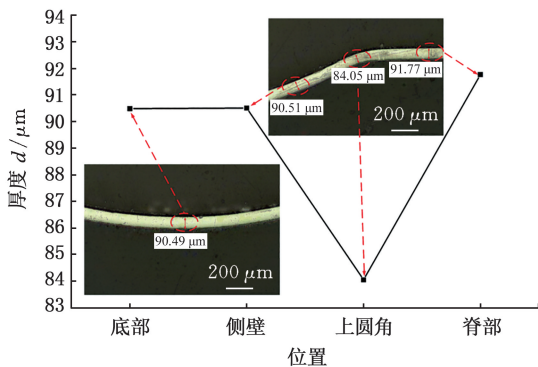


图 10 成形后板料典型位置厚度

Fig.10 Typical thickness of the sheet in position after forming

度最小的部位。在高压气体作用下,该处材料被拉入模具凹槽;同时,模具几何形状的突变导致该区域产生应力集中效应,使其承受最大的拉应力。因此,材料极易发生颈缩,其厚度可减薄至仅 84.05 μm ,从而极易发生破裂。侧壁、槽底的厚度分别为 90.51 μm 和 90.49 μm ,两处减薄率均约为 10%。此区域的材料流动充分且均匀,板料厚度分布也较为均匀。

2.3 结果对比分析

为验证有限元模型的可靠性,比较实验结果与有限元模拟结果。图 11 为相同参数下,有限元模拟和实验的中间流道截面轮廓图,可以看出,轮廓形状较为接近,模拟流道的深度 619.67 μm 比实验流道的深度 556.34 μm 略大,相对误差为 11.38%,说明所构建的有限元模型可靠性较高。

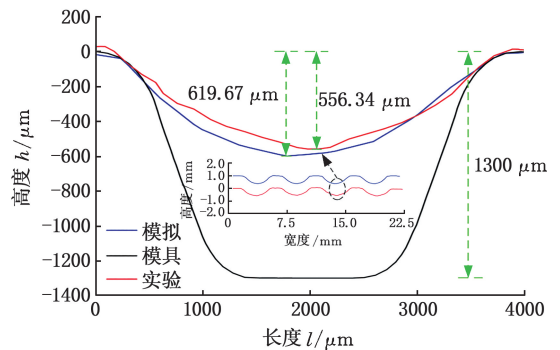


图 11 流道轮廓及成形深度测试结果

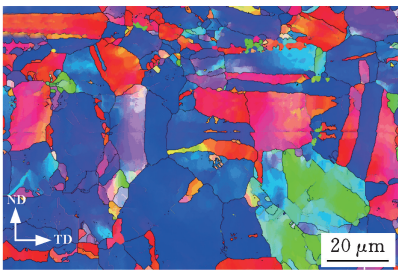
Fig.11 Runner Profile and forming depth test results

2.4 微观组织形貌

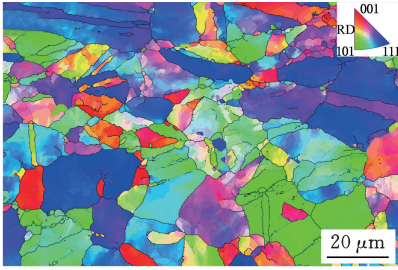
为进一步研究气胀成形前后,不锈钢极薄带微观组织的演变规律,对原始坯料和成形后的试样开展电子背散射衍射 (EBSD) 分析,观测面均为 ND-TD 面。

图 12 为原始极薄带和成形后试样侧壁位置的反极图 (inverse pole figure, IPF)。原始样由较粗大的等轴奥氏体晶粒和夹杂于大尺寸晶粒间的小尺寸晶粒组成,奥氏体晶粒内部有少量的孪晶,具有 $\langle 111 \rangle // \text{RD}$ 取向的晶粒较多。成形后,试样侧壁受拉应力作用而伸长,但其伸长程度上圆角处相小很多,所以晶粒仍以等轴晶为主,且晶粒尺寸、差异减小,晶粒取向较随机,仍存在少量孪晶组织。

图 13 为变形前后试样的核平均取向差 (kernel average misorientation, KAM) 图。KAM 图通过测量点与周围点之间的取向偏差来表示材料的局部位错密度和内部应变分布。由图 13 可以看出原始坯料有 $\langle 111 \rangle // \text{RD}$ 取向的晶粒,位错主要分布于晶粒边缘、靠近晶界的位置;具有 $\langle 101 \rangle // \text{RD}$ 取向的晶粒,位错主要分布在晶粒内



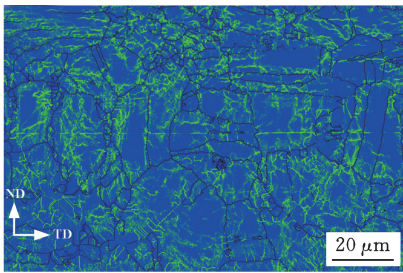
(a) 原始极薄带



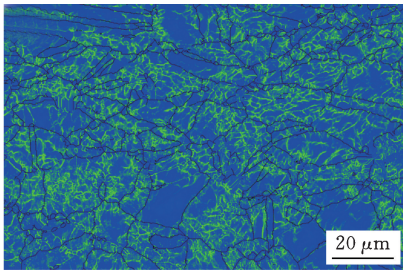
(b) 成形后试样

图 12 反极图

Fig.12 Inverse pole figure(IPF) diagram



(a) 原始极薄带



(b) 成形后试样

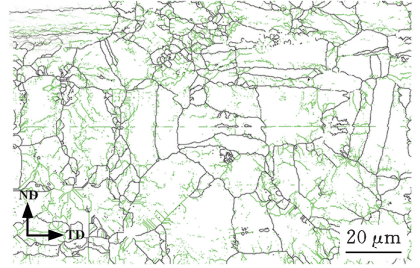
图 13 核平均取向差图

Fig.13 Kernel average misorientation(KAM) diagram

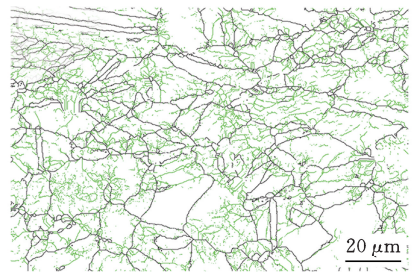
部但分布不均匀。成形后,极薄带的位错密度更高且分布更均匀,位错主要分布在晶粒内部,这说明材料发生较明显的加工硬化。304 不锈钢具有面心立方晶体结构,其在成形过程中可激活更多滑移系,使各晶粒变形均匀性显著提高,从而有效抑制局部应力集中引发的破裂缺陷。此外,部分具有 $\langle 101 \rangle // RD$ 取向的较大晶粒内部的位错密度很低,可能是因为该部分晶粒的滑移系未处于易开动的状态,导致内部位错密度和变形程度均较小。

图 14 中,绿线表示 $2^\circ \sim 15^\circ$ 的小角度晶界 (low-angle grain boundaries, LAGBs),黑线表示

超过 15° 的大角度晶界 (high-angle grain boundaries, HAGBs)。LAGBs 是一系列位错规则排列而成的位错墙,LAGBs 的比例越大,位错运动时受到的缠结程度越高。结合图 15 可知,LAGBs 的比例由变形前的 58.04% 提高到变形后的 62.61%。小角度晶界占比提高是由于气胀变形时位错的大量增殖。交错滑移过程中,位错相互缠结而逐渐形成位错墙。位错墙通过位错滑移与攀移的协同作用持续累积位错,最终演化为 LAGBs,使 LAGBs 的占比提升,这与 KAM 图分析结



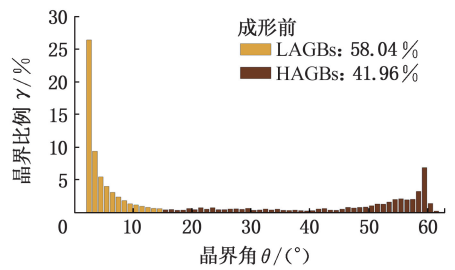
(a) 原始极薄带晶界



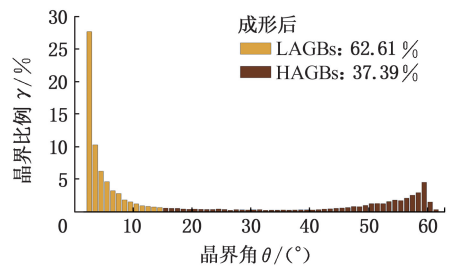
(b) 成形后试样晶界

图 14 晶界图

Fig.14 Grain boundary(GB) map



(a) 原始极薄带



(b) 成形后试样

图 15 晶界取向差角统计图

Fig.15 Grain boundary misorientation angle distribution(GMAD)

果一致,部分具有<101>//RD取向的较大晶粒内部的小角度晶界占比较低。

3 结论

1)对厚度 0.1 mm 的 304 不锈钢极薄带进行气胀成形实验,发现薄带在 25 MPa 的压力下出现不同程度的减薄,其中,上圆角处的减薄最严重,减薄率达 15.95%;脊部的减薄最小,减薄率仅为 8.23%。

2)数值模拟的流道深度为 619.67 μm ,实验的流道深度为 556.34 μm 。这表明模拟结果可靠性较高,可为金属微流道气胀成形提供可靠的预测。

3)数值模拟与实验结果表明,流道脊部受高压气体的正压力作用,与模具之间的摩擦力较大,该部分材料难以流入模具凹槽;上圆角区域易发生颈缩现象,减薄程度较大;两侧流道得到压边圈附近材料的补充,可在较小的应力和应变下,获得更大的成形深度和更均匀的壁厚。

4)气胀成形后,晶粒尺寸略减小,位错密度提升明显且分布较均匀,小角度晶界占比从变形前的 58.04% 提高到 62.61%;极薄带的加工硬化现象较为显著,各晶粒变形程度较均匀,可有效避免成形过程中的失效断裂问题。

参考文献:

- [1] PRADEEP RAJA C, RAMESH T. Influence of Size Effects and Its Key Issues during Microforming and Its Associated Processes—a Review[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2021, 24(2):556-570.
- [2] 王耀, 郭宏, 叶晓凯, 等. TA1/CFRP 燃料电池双极板微流道充液成形性能及尺寸效应[J]. 锻压技术, 2023, 48(5):16-24.
WANG Yao, GUO Hong, YE Xiaokai, et al. Hydro-formability and Scale Effect of TA1/CFRP Fuel Cell Bipolar Plate Microchannels[J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48(5):16-24.
- [3] QIAO Xudong, CHEN Minghe, XIE Lansheng. Deep Drawing and Gas Bulging of Precise Hot Forming Process of Complex Box Part[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(6):1582-1591.
- [4] YU Guangning, LI Chao, LI Feng, et al. Gas Blow Forming of Nanocrystalline Ni Foil Assisted by Two-dimensional Pulse Current[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31(3):2479-2486.

- [5] 张锡栋. 热塑性纤维金属层板热态气胀成形关键工艺参数研究[D]. 大连:大连理工大学, 2022.
ZHANG Xidong. Study on Key Technological Parameters of Hot Gas Bulging Forming of Thermoplastic Fiber Metal Laminates[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [6] ESMAEILI S, HOSSEINIPOUR S J. Experimental Investigation of Forming Metallic Bipolar Plates by Hot Metal Gas Forming (HMGF)[J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(2):187.
- [7] KARGAR-PISHBIJARI H, HOSSEINIPOUR S J, JAMSHIDI AVAL H. A Novel Method for Manufacturing Microchannels of Metallic Bipolar Plate Fuel Cell by the Hot Metal Gas Forming Process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 55:268-275.
- [8] 周凌华, 沈中伟, 许涛. Ti-55 钛合金双层板的超塑成形/扩散连接数值模拟及工艺试验[J]. 锻压技术, 2022, 47(8):76-82.
ZHOU Linghua, SHEN Zhongwei, XU Tao. Numerical Simulation and Process Test on Superplastic Forming/ Diffusion Bonding for Ti-55 Titanium Alloy Double-layer Plate[J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47(8):76-82.
- [9] 张宇翔, 汤泽军, 许爱军, 等. Ti55 钛合金管电辅助加热气压胀形上圆角填充成形规律及多场耦合数值模拟[J]. 锻压技术, 2021, 46(4):112-120.
ZHANG Yuxiang, TANG Zejun, XU Aijun, et al. Fillet Filling Law and Multi-field Coupling Numerical Simulation of Ti55 Titanium Alloy Pipe in Electric Assisted Heating Bulging[J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(4):112-120.
- [10] 陈楠楠, 李细锋, 孙宏宇, 等. 置氢 Ti-55 钛合金气胀成形模拟及试验研究[J]. 模具技术, 2019(1):1-5.
CHEN Nannan, LI Xifeng, SUN Hongyu, et al. Simulation and Experimental Study on Gas Bulging of Hydrogenated Ti-55 Titanium Alloy[J]. Die and Mould Technology, 2019(1):1-5.

(编辑 张洋)

作者简介:张鹏*,男,1987年生,副教授。研究方向为复合板轧制工艺及设备、轻合金材料旋压工艺、金属塑性变形多尺度数值模拟。发表论文 20 余篇。E-mail:jljuvip@sina.com。

本文引用格式:

张鹏,朱学卫,于保洋,等.304 不锈钢极薄带微流道气胀成形材料流动行为及微观组织[J]. 中国机械工程,2025,36(7):1416-1422.
ZHANG Peng, ZHU XueWei, YU BaoYang, et al. Flow Behavior and Microstructure of 304 Stainless Steel Ultra-thin Strips in Microchannel Gas Forming[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(7):1416-1422.