

锆合金条带成形机理及冲制工艺优化研究

权继锋

西安西部新锆科技股份有限公司, 中国·陕西 西安 710299

摘要: 锆合金由于耐蚀性良好、高温下较为稳定, 现已成为核燃料组件定位格架条带生产的重要材料, 但其物理结构特性导致塑性变形的滑移系数数量受限, 成形出现显著的各向异性, 实际冲制生产时也面临许多挑战, 比如常出现圆角开裂, 局部过度减薄的缺陷, 降低了产品合格率, 影响到可靠服役, 为保证锆合金条带的顺利成形和生产, 本文通过分析其冲制成形机理与相关工艺参数影响规律, 进一步探究了基于智能算法的锆合金条带冲制工艺多目标优化路径, 相关研究内容希望可以为实际工作提供参考。

关键词: 冲制工艺; 成形机理; 锆合金

Research on the Forming Mechanism of Zirconium Alloy Strips and Optimization of Punching Processes

Quan Jifeng

Xi'an Western Energy Material Technologies Co., Ltd., China Shaanxi Xi'an 710299

Abstract: Zirconium alloy has become a crucial material for the production of positioning grid strips in nuclear fuel assemblies due to its excellent corrosion resistance and stability at high temperatures. However, its physical structural characteristics limit the number of slip systems for plastic deformation, resulting in significant anisotropy during forming. This leads to numerous challenges in actual punching production, such as frequent corner cracking and localized excessive thinning defects, which reduce product yield rates and compromise reliable service performance. To ensure the smooth forming and production of zirconium alloy strips, this paper analyzes the punching forming mechanism and the influence patterns of related process parameters, further exploring a multi-objective optimization path for the punching process of zirconium alloy strips based on intelligent algorithms. The related research findings aim to provide practical references for real-world applications.

Keywords: Stamping process; Forming mechanism; Zirconium alloy

0 引言

核燃料组件是反应堆的核心部件, 其中, 定位格架直接影响堆芯内热工水力特性与燃料棒的振动磨损行为, 锆合金条带是定位格架的基本构成单元, 集成了刚凸、弹簧、混流翼等多种精密成形特征, 其成形质量直接决定格架的装配精度与服役寿命, 因此要加强控制。

1 锆合金条带冲制成形的机理分析

1.1 晶体塑性变形机制

锆合金本身结构是密排分布的六方晶体, 因此其塑性变形通过滑移、孪生两类机制协同完成。滑移机制是指位错在特定晶面沿着设定方向做运动, 锆合金的滑移有 3 类, 即柱面滑移、基面滑移以及锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移, 柱面滑移具有较低的临界分切应力, 容易在室温下顺利启动, 基本滑移临界分切应力则略高些, 锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移临界分切应力值最高, 只能在高温或应变较大情况下启动。型滑移

的特点是仅会产生基面内变形, 很难协调法向应变, 若变形与厚度方向有关, 就需借助锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移或孪生机制来补充协调。孪生机制是晶面均匀切变的一个过程, 锆合金中最为常见的拉伸孪晶能够使晶体 c 轴出现 85° 左右的偏转, 能迅速改变晶粒原本取向, 对法向变形进行协调控制, 该机制的方向性特点显著, 且启动条件为拉应力与 c 轴垂直, 也存在一定的临界切应力阈值, 孪生机制不仅本身作用于塑性应变, 还能通过取向偏转对滑移系 Schmid 因子进行调整, 即可以间接作用于滑移变形, 影响其难易程度, 使得锆合金成形受到各向异性的微观作用。条带冲制时, 材料不同位置应力状态、应变路径也存在差异, 因此其各区域启动变形机制的组合有所不同, 比如凹模圆角和斜壁区域受到单向拉伸的影响, 主导机制为柱面滑移, 也存在少量拉伸孪晶、锥面滑移的作用辅助, 而凸模圆角由于区域多为平面应变状态, 会大幅提升基本滑移的作用占

比, 孪生机制的表现较微弱, 这种差异影响到冲制件各位置织构演化和成形的规律^[1]。

1.2 冲制过程应变路径空间分布机制

铝合金条带冲制属于典型的薄板局部成形工艺, 以刚凸特征为例, 其成形过程包含弯曲、胀形与拉伸的复合作用。根据有限元模拟结果, 冲制过程中材料可划分为三个典型变形区域, 分别为凹模圆角区、斜壁区与凸模圆角区, 各区具有截然不同的应变路径特征。

凹模圆角区域材料在压边力作用下向凹模腔内流动, 主要承受沿轧制方向的单向拉伸作用, 第一主应变显著大于第二主应变, 应变路径接近单向拉伸状态。该区域材料流动相对充分, 应变水平中等, 是材料补充的主要来源。斜壁区域连接凹模圆角与凸模圆角, 材料沿冲制深度方向逐渐延伸, 同样以单向拉伸变形为主, 但应变变量级略低于凹模圆角区域。由于变形程度有限, 该区域的晶粒取向与初始织构差异较小, 织构演化不显著。

凸模圆角区域是整个冲制过程中应力应变最为集中的部位。该区域材料一方面随凸模下行发生弯曲, 另一方面受到周边材料的约束, 宽度方向的变形受到显著限制, 呈现出平面应变特征: 第一主应变沿冲制深度方向发展, 第二主应变接近于零, 厚向应变则对应明显的减薄。平面应变状态下, 材料的变形自由度最低, 应力三轴度最高, 是冲制破裂的高发位置。实验观测表明, Zr-4 合金带材在凸模圆角 $R=0.15\text{mm}$ 条件下, 当变形深度达到 1.16mm 时, 破裂即首先出现在凸模圆角处, 与应变路径分析结果完全一致。

2 铝合金条带冲制工艺典型缺陷与参数影响规律

2.1 典型成形缺陷

铝合金条带冲制成形工艺中的典型缺陷包括局部过度减薄、圆角开裂以及尺寸回弹等, 其中前两种被看作是最主要的产品失效形式。局部过度减薄常出现在圆角材料双向拉伸作用中, 其厚度的减薄超出标准值, 虽尚未开裂, 但也会导致结构强度不足, 抗腐蚀性下降。圆角开裂是减薄进一步发展的状态, 其受到材料本征塑性、模具质量、应变率效应等多种因素影响, 会严重影响成形质量。尺寸回弹则直接影响条带产品精度, 其与材料屈服强度、弹性模量以及生产工艺参数等因素息息相关, 在出现后会导致铝合金格架夹持力特性发生变化。

2.2 工艺参数对成形质量的影响

铝合金条带冲制工艺的核心参数包括 4 种, 即冲压速

度、压边力、摩擦系数以及模具间隙, 不同工艺参数对成形质量会产生差异化影响, 其所占权重也有不同。

冲压速度的惯性效应、应变率效应对材料变形行为产生影响, 铝合金本身对应变率颇为敏感, 在冲压速度加快后, 其应变速率也会变大, 导致流变应力提升, 塑性变形效果会有所下降, 造成最终成形极限偏低、减薄率增加。同时, 冲压速度较快也会带动增强材料惯性效应, 如填充到凹模入口的材料速度较快时, 可以在一定程度上减轻凸模圆角位置材料供给不足的影响, 综合来看, 冲压速度越快, 最大减薄率也会越高, 二者存在明显的正相关联系^[9]。

压边力对于控制材料流动起到关键作用, 比如法兰区压边力过小时可能会出现起皱情况, 材料也会过多流入造成特征侧壁堆料严重, 反之压边力过大时材料流动会增加阻力, 凸模圆角位置材料补充不足, 也会提升减薄、开裂的风险发生率。铝合金薄带冲孔过程中, 需保证压边力控制在合理区间, 既要确保法兰区不起皱, 也要保证材料可以顺利流入圆角处实现减薄补偿。同时, 成形高度偏差也会受到压边力影响, 如压边力过小会导致其高度偏大, 也不利于一致性效果增强, 过大则高度不足。

摩擦系数反映了模具接触面和材料之间的相对滑动阻力, 该系数较大时, 材料流向凸模、凹模的圆角时面临阻力也会较大, 会增强拉伸并导致减薄加剧。摩擦不均匀也会引发壁厚不一、特征偏斜等问题, 适当降低摩擦系数并改善润滑条件, 可以降低减薄的程度, 促进铝合金条带成形极限的提升, 但铝合金本身对表面清洁度具有极高要求, 在选择润滑剂时也要充分考虑后续能否彻底清除, 不能一味追求润滑效果而应用难清除介质, 实际工作中常选用轻润滑、干冲的做法。

模具间隙是指凹模、凸模之间存在的单边间隙, 其对于材料变形空间产生约束作用, 比如间隙过小时会增强材料的挤压效果, 导致侧壁严重减薄, 还可能发生刮削问题, 间隙过大时则增强材料弯曲效应, 回弹量进一步增大, 尺寸的精度下滑。以厚度为 0.457mm 的铝合金带材为例, 在冲制刚凸特征过程中, 其单边间隙通常控制为略大于料厚, 既能够确保材料顺利通过, 也能对回弹加以控制。为有效量化分析各工艺参数对刚凸特征减薄率的影响, 此次开展了 4 因素的 3 水平正交试验, 核心评价指标设定为最大减薄率, 借助极差分析方式来明晰不同参数实际影响权重, 相关结果见表 1, 由数据可知, 对铝合金条带成形减薄影响程度最大的为冲压速度, 其极差值达到了 5.3, 最小为模具间隙。

表1 工艺参数对刚凸最大减薄率的极差分析结果

工艺参数	水平1	水平2	水平3	极差R	影响排序
冲压速度/ (mm·s ⁻¹)	15.2	17.8	20.5	5.3	1
压边力/N	16.1	17.5	19.9	3.8	2
摩擦系数	17.0	17.8	18.7	1.7	3
模具间隙/mm	17.3	17.8	18.3	1.0	4

注：水平1-3对应各参数取值区间的低、中、高三个特征值，减薄率为对应水平下的均值。

3 基于智能算法的锆合金条带冲制工艺多目标优化

3.1 建立有限元模型并验证

基于 Dynaform 软件建立起锆合金条带冲刺的有限元模型，模型要纳入弹簧、刚凸的关键特征，板料为 Belytschko-Tsay 壳单元，尺寸标准为 0.1mm，计算时考虑效率、精度，其压边圈、凹模以及凸模均为刚性体，接触问题处理采用罚函数法，材料模型选用 3 参数 Barlat 屈服准则，能够对锆合金各向异性屈服行为有效描述，通过 Swift 幂律硬化方程设置硬化模型，材料参数可进行单向拉伸试验拟合确定。开展物理试验验证模型模拟结果的可靠性。设置工艺条件一致的冲刺试验，分别采用三坐标测量仪、超声测厚仪以及扫描电镜对特征成形高度、关键位置壁厚、破裂形貌进行检测，最后对比有限元模拟结果与试验结果，结果发现，最大减薄率的试验值和模拟值之间的偏差不足 5%，成形高度偏差不足 8%，破裂位置预测结果也基本与实际吻合，表明此次建立的有限元模型预测精度较高，能支持工艺优化的深入分析。

3.2 优化目标及相关试验

冲压操作中的锆合金条带弹簧、刚凸等特征冲刺处于同一工位下完成，因此其压边力、冲压速度以及摩擦系数等关键参数完全相同，但这两个位置特征减薄行为对工艺参数敏感程度不一，若仅针对某一特征优化，可能导致另一特征性能出现恶化，因此，要采用多目标协同优化做法。如设定刚凸、弹簧两项关键特征的最大减薄率优化目标分别为 Y_1 和 Y_2 ，其均为最小特性，即数值越小越为有利，设计变量则选择压边力 F 、冲压速度 v 以及摩擦系数 μ 三种，基于工程经验确定变量的具体取值范围，比如压边力取值范围为 $F \in [3000,12000]N$ ，冲压速度取值范围为 $v \in [50,200]mm/s$ ，摩擦系数取值范围为 $\mu \in [0.1,0.3]$ ，试验设计以分层拉丁超立方抽样方法为主，其可以在有限样本量下确保均匀覆盖参数空间，与传统正交试验相比，在高精度代理模型中的应用适应性较强，此次试验的抽样样本设计为 40 组，借助有限元仿真处理开展对应目标值的

逐一计算，最终构建起基础的优化数据集^[3]。

3.3 构建基于 PSO-SVM 的代理模型

SVM（支持向量机）以结构风险最小化为核心原理，针对非线性、小样本分析的问题拟合能力、泛化能力都比较强，因此适用于冲压成形工艺中的非线性过程建模。但需考虑的一点是，传统标准 SVM 预测精度与核函数参数、惩罚因子有关，再加上网格搜索和交叉验证方法的效率偏低，容易出现局部最优情况。故而此次研究决定借助 PSO（粒子群优化）算法辅助 SVM 实现超参数全局寻优，二者结合后形成 PSO-SVM 代理预测模型。模型训练集为抽样获得的 40 组数据，输入的核心工艺参数即压边力、冲压速度以及摩擦系数，输出参数即刚凸、弹簧的对应减薄率。PSO 算法能够在参数空间中搜索到最优核函数宽度和惩罚因子，再通过训练集交叉验证误差最小作为适应度函数，完成模型训练之后，额外开展 10 组样本数据的精度测试，检验后发现刚凸减薄率预测模型的决定系数约为 0.982，弹簧减薄率该系数约为 0.976，二者的平均相对误差均未超出 3%，能够达到工程优化的精度要求，与传统响应面模型相比，该模型具有较强的非线性关系处理优势。

3.4 多目标优化求解及结果分析

完成训练的 PSO-SVM 代理模型也当作适应度函数，结合带精英策略的非支配排序遗传算法实施多目标优化求解。该算法可快速进行非支配排序并计算拥挤度，再加上精英保留策略，就能高效生成分布均匀的 Pareto 最优前沿，种群的规模设定为 100，进化代数则为 200，交叉和变异的概率分别为 0.9 与 0.1。优化计算的工况分别为良好润滑、轻润滑以及干摩擦等，分别得到对应 Pareto 前沿解集。其每个单独解都具有非支配特点，反映了不同权衡下的刚凸和弹簧减薄率，在诸多非支配解中能综合筛选出最优方案，再利用熵权-TOPSIS 法开展多属性决策，即熵权法能明确两个目标的客观权重系数，以防主观赋权出现随意性问题，之后借助 TOPSIS 法对各方案到正理想解、负理想解的相对贴近度进行计算，取较大贴近点的组合，进一步确定工艺参数。

例如，在典型无润滑工况中，工艺参数的最优设定为：压边力 7862N，冲压速度 134.41mm/s，该参数作用下，刚凸、弹簧的特征最大减薄率分别控制为 16.2% 和 14.8%，均未超过安全裕度范围。对比初始工艺来看，刚凸最大减薄率降低 8.3% 左右，而弹簧则降低 6.7% 左右，提升了综合成形的质量。但润滑条件不同时，其最优参数也会存在差异，比如润滑条件较佳会降低摩擦系数，因此

最优压边力也可适当增加, 冲压速度则适当提高, 该项结果可以支持实际生产中结合润滑状态对工艺参数进行动态调整。

在优化结果可靠性验证方面, 基于最优工艺参数开展物理冲刺试验, 相关结果表明, 刚凸特征的实测最大减薄率达到 16.5%, 与优化预测值之间的偏差仅为 3%, 弹簧特征的实测最大减薄率达到 15.0%, 与优化预测值之间的偏差仅为 2%, 样件均未发现开裂情况, 成形高度尺寸合格率达 100%, 这一结果验证了此次提出的多目标优化方法具有实用价值。

4 结语

综上所述, 本文围绕铝合金条带冲制成形机理与工艺优化展开系统研究, 从宏微观结合角度揭示了冲制变形的内在机制。由本文分析可知, 基于智能算法的铝合金条带

冲制工艺多目标优化路径包括: 建立有限元模型并验证、确定优化目标及相关试验、构建基于 PSO-SVM 的代理模型、完成多目标优化求解。

参考文献:

[1] 张鹏贤, 何怡, 房立家. 热处理对激光选区熔化成形 GH5188 合金组织和力学性能的影响[J]. 应用激光, 2026,46 (6):10-20.

[2] 袁佳健, 毛建中, 张小民. 铝合金条带冲压成形的多目标工艺优化[J]. 锻压技术, 2023,48 (7):93-99.

[3] 刘鲜茵. 新型铝合金格架条带冲制成形及工艺优化[D]. 湖南大学, 2022.

作者简介: 权继锋 (1981.12-), 男, 汉族, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 从事铝合金材料加工与性能研究。