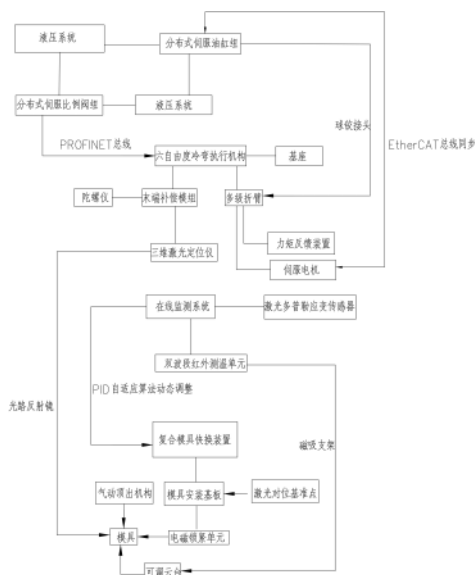




1. 一种铝镁合金精密塑形成型工艺, 其特征在于, 包括以下步骤:

S1、对铝镁合金坯料进行梯度温度预处理, 初始加热温度 T 满足:

$T = T_m \times C_1 + \Delta T_a \times \ln\left(\frac{t_{pre}}{t_0}\right)$, 其中, T_m 为材料熔点 ($^{\circ}\text{C}$), C_1 表示系数, ΔT_a 为合金元素补偿系数, t_{pre} 为保温时间 (min), t_0 为基准时间;

S2、在液压成型阶段施加动态压力 P , 其计算模型为: $P = K \times \left(\frac{\sigma_s}{\delta}\right) \times \left(\frac{R}{t}\right)^n \times e^{-\alpha \Delta \varepsilon}$,

式中 K 为材料成型系数, σ_s 为材料屈服强度 (MPa), δ 为板材厚度 (mm), R 为模具圆角半径 (mm), t 为成型时间 (s), n 为硬化指数, α 为应变速率敏感系数, $\Delta \varepsilon$ 为等效塑性应变增量; $e^{-\alpha \Delta \varepsilon}$ 表示为动态压力模型中对材料应变速率敏感性和塑性变形累积效应的关键修正项;

S3、冷弯成型阶段采用回弹补偿算法, 补偿角度 θ_{comp} 由下式确定:

$$\theta_{comp} = \theta_{target} \times \left[1 + \beta \times \left(\frac{\sigma_s}{E}\right) \times \left(\frac{R_d}{\delta}\right)^2 \right],$$

其中, θ_{target} 为目标角度, β 为材料补偿因子, E 为弹性模量 (GPa), R_d 为弯曲中性层半径 (mm);

S4、实施形变-退火复合处理, 退火温度 T_{anneal} 满足:

$T_{anneal} = 0.6T_m - 50 \times \text{CAI} + 30 \times \text{CMg} \pm 15^{\circ}\text{C}$, CAI、CMg 分别为铝、镁的质量百分比。

2. 根据权利要求1所述的一种铝镁合金精密塑形成型工艺, 其特征在于: 所述梯度温度预处理包含三个阶段, 第一阶段升温速率以 $8-12^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 $200-250^{\circ}\text{C}$, 第二阶段升温速率以 $2-5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 $300-350^{\circ}\text{C}$, 第三阶段保温时, 实施振幅为 $0.1\text{mm}-0.3\text{mm}$ 的机械振动。

3. 根据权利要求1所述的一种铝镁合金精密塑形成型工艺, 其特征在于: 所述液压成型阶段施加动态压力 P 的实时调控满足 $|\Delta P/P_{set}| \leq 3\%$, 通过在线应变测量反馈调整材料成型

系数 K , 其调整量 $\Delta k = 0.15 \times \left(\frac{\varepsilon_{real}}{\varepsilon_{theory-1}}\right)$, 其中, ΔP 为动态压力 P 与预先设定的目标压力值 P_{set}

的差值, P_{set} 为预先设定的目标压力值, ε_{real} 表示为在线测量的实际应变值, $\varepsilon_{theory-1}$ 表示为理论计算的预期应变值, Δk 为调整材料成型系数 K 的变化量。

4. 根据权利要求1所述的一种铝镁合金精密塑形成型工艺, 其特征在于: 所述冷弯成型阶段的工序采用多轴联动补偿策略, 当弯曲半径 $R \leq 5\delta$ 时, 材料补偿因子 β 取上限值; 当 $R \geq 10\delta$ 时, 修正后的材料补偿因子 β' 按下式修正:

$$\beta' = \beta \times \left[1 - 0.08 \times \left(\frac{R}{\delta} - 10\right) \right],$$

当 $5\delta \leq R \leq 10\delta$ 时, 材料补偿因子保持为 β' , 无需进行修正, 其中, δ 为材料厚度。

5. 根据权利要求1所述的一种铝镁合金精密塑形成型工艺, 其特征在于: 还包括残余应

力消除工序(S5),其中喷丸处理强度通过以下公式确定:

$$I_{shot} = k_1 \times \left(\frac{HV}{HV_{base}} \right)^2 \times \left(\frac{\sigma_{res}}{\sigma_s} \right) \times Ac,$$

其中,HV为材料维氏硬度,表征材料抵抗塑性变形的能力, σ_{res} 为实测残余应力(MPa),通过无损检测或钻孔法获取, σ_s 为材料屈服强度,表示材料开始发生塑性变形的临界应力,Ac为截面面积修正系数(0.8~1.2),用于根据工件几何形状调整喷丸强度; I_{shot} 为喷丸处理的理论强度指标,综合反映工艺参数对残余应力的消除效果, k_1 为经验系数,基于喷丸工艺实验数据或材料特性优化得出,用于平衡公式量纲及物理意义, HV_{base} 表示维氏硬度的归一化基准值(单位:HV)。

6.根据权利要求1所述的一种铝镁合金精密塑形成型工艺,其特征在于:在模具的表面设置纳米级织构化涂层,其中,所述涂层的参数满足以下条件:

结构密度D:单位面积内的凹坑数量为2500~5000个/平方毫米,用于优化材料流动性与摩擦特性;

凹坑形貌比例:单个凹坑的深度h与直径d之比满足h/d=0.2~0.4,以平衡涂层耐磨性与润滑效果。

7.根据权利要求1所述的一种铝镁合金精密塑形成型工艺,其特征在于:所述冷弯成型阶段施加轴向压力F,其取值范围通过以下公式确定:

$$F = k_{range} \times P_{hyd} \times A_{cross},$$

其中, k_{range} 表示经验调整系数,设置 $k_{range}=0.15\sim0.25$, P_{hyd} 为液压成型过程中的最大压力(单位:MPa); A_{cross} 为被加工材料截面积(单位: mm^2);F为轴向压力,用于控制材料流动并抑制成型过程中的翘曲变形。

8.一种实现权利要求1-7中任一项铝镁合金精密塑形成型工艺的成型设备,其特征在于,包括:

液压系统,包含分布式伺服油缸组及与之匹配的分布式伺服比例阀组,其中分布式伺服比例阀组的压力控制分辨率不大于0.1MPa;

六自由度冷弯执行机构,由基座、多级折臂及末端补偿模组构成,所述末端补偿模组配置三维激光定位仪和陀螺仪,实现 $\pm 0.5mm$ 平移补偿及 $\pm 0.1^\circ$ 旋转补偿;

在线监测系统,集成有激光多普勒应变传感器和双波段红外测温单元,测量数据通过工业以太网传输;

复合模具快换装置,包含电磁锁紧单元、气动顶出机构、模具安装基板和模具,在所述模具安装基板的中心或四角上设有激光对位基准点,用于模具定位时的激光校准;所述电磁锁紧单元嵌入模具安装基板的内部,通过电磁力吸附模具的底部锁紧;所述气动顶出机构集成在模具安装基板的下方或侧面,通过气动活塞与模具的接触面连接;

其中,所述分布式伺服比例阀组通过PROFINET总线与冷弯执行机构的伺服驱动器建立实时通信,在线监测系统的数据处理器通过PID自适应算法动态调整复合模具快换装置的工作参数。

9.根据权利要求8所述的一种铝镁合金精密塑形成型工艺的成型设备,其特征在于:所

述分布式伺服油缸组通过球铰接头与多级折臂的主动关节轴连接,传递成型压力;所述三维激光定位仪的光路反射镜嵌入模具的型腔侧壁;所述双波段红外测温单元通过磁吸支架固定于模具上方的可调云台;所述模具安装基板的Halbach磁阵列与双波段红外测温单元间距 $\leq 5\text{mm}$,实时检测模具偏移量;所述分布式伺服比例阀组与多级折臂的伺服电机通过EtherCAT总线同步;所述多级折臂配备力矩反馈装置,当实际弯曲力矩 M 与理论值偏差超过

15%时,自动触发角度修正程序,修正量 $\Delta\theta = \theta \times (\frac{M_{real}}{M_{theory}} - 1)/KM$, 其中, $\Delta\theta$ 表示待修

正量的调整值, θ 表示原始参数的理论值或基准值, M_{real} 表示实际测量值,即通过力矩传感器在成型过程中实时检测到的弯曲力矩值; M_{theory} 表示理论模型预测值,即通过材料力学模型、工艺参数仿真或历史数据计算得出的预期弯曲力矩值; KM 表示修正系数(无量纲),取值范围为 $0.6 \leq KM \leq 0.9$,用于调节修正幅度,防止过调。

10. 根据权利要求8所述的一种铝镁合金精密塑形成型工艺的成型设备,其特征在于:所述液压系统集成有脉动抑制装置,其配置为:

- (1) 对液压管路中频率范围为50Hz至200Hz的压力脉动进行动态衰减;
- (2) 在所述频率范围内,脉动抑制装置的压力波动衰减率满足:

$$A_{damp}(f) = 20\log_{10} \left[\frac{P_{output}(f)}{P_{input}(f)} \right] \leq -35\text{dB},$$

其中, $A_{damp}(f)$ 表示为压力脉动的频率 f 处的压力波动衰减量(单位: dB), 定义为输出压力幅值与输入压力幅值的对数比值; $P_{input}(f)$ 表示为液压系统输入端的压力脉动幅值(单位: MPa), 由压力传感器在脉动抑制装置上游测得; $P_{output}(f)$ 表示液压系统输出端的压力脉动幅值(单位: MPa), 由压力传感器在脉动抑制装置下游测得; f 表示压力脉动的频率(单位: Hz), 取值范围为: 50Hz至200Hz。

一种铝镁合金精密塑形成型工艺及成型设备

技术领域

[0001] 本发明涉及成型工艺及成型设备技术领域,具体来说,尤其涉及一种铝镁合金精密塑形成型工艺及成型设备。

背景技术

[0002] 在现有技术中,铝镁合金因其轻量化、高比强度及优异的耐腐蚀性,广泛应用于航空航天、新能源汽车、消费电子等领域。然而,其精密塑形成型面临以下技术挑战:如成型精度不足,铝镁合金冷成型时回弹效应显著,传统工艺依赖经验补偿,难以实现 $\pm 0.1\text{mm}$ 级公差控制;残余应力累积,塑性变形导致的残余应力易引发工件变形、开裂,传统退火工艺温度控制粗放,应力消除效率低;模具寿命与表面质量的矛盾,如高硬度模具虽耐磨,但易与合金粘连,导致成型件表面粗糙度恶化($R_a > 1.6\mu\text{m}$);液压系统稳定性差,在动态压力波动($>5\%$)时加剧材料局部过载,引发材料的微裂纹等缺陷,针对上述缺陷,本发明提供了一种铝镁合金精密塑形成型工艺及成型设备,通过全流程的工艺优化及高精度成型设备的创新,攻克了铝镁合金精密成型中的回弹控制、表面质量与残余应力难题,为航空航天精密构件、新能源汽车轻量化部件等提供了高可靠性解决方案,具备显著的技术先进性与产业化价值。

发明内容

[0003] 为了实现上述目的,本发明采用了如下技术方案:一种铝镁合金精密塑形成型工艺,包括以下步骤:

S1、对铝镁合金坯料进行梯度温度预处理,初始加热温度 T 满足:

$T = T_m \times C_1 + \Delta T_a \times \ln\left(\frac{t_{pre}}{t_0}\right)$, 其中, T_m 为材料熔点($^{\circ}\text{C}$), C_1 表示系数, ΔT_a 为合金元素补偿系数, t_{pre} 为保温时间(min), t_0 为基准时间;

S2、在液压成型阶段施加动态压力 P ,其计算模型为:

$P = K \times \left(\frac{\sigma_s}{\delta}\right) \times \left(\frac{R}{t}\right)^n \times e^{-\alpha \Delta \varepsilon}$, 式中 K 为材料成型系数, σ_s 为材料屈服强度(MPa), δ 为板材厚度(mm), R 为模具圆角半径(mm), t 为成型时间(s), n 为硬化指数, α 为应变速率敏感系数, $\Delta \varepsilon$ 为等效塑性应变增量; $e^{-\alpha \Delta \varepsilon}$ 表示为动态压力模型中对材料应变速率敏感性和塑性变形累积效应的关键修正项;

S3、冷弯成型阶段采用回弹补偿算法,补偿角度 θ_{comp} 由下式确定:

$$\theta_{comp} = \theta_{target} \times \left[1 + \beta \times \left(\frac{\sigma_s}{E}\right) \times \left(\frac{R_d}{\delta}\right)^2 \right],$$

其中, θ_{target} 为目标角度, β 为材料补偿因子, E 为弹性模量(GPa), R_d 为弯曲中性层

半径(mm)；

S4、实施形变-退火复合处理,退火温度 T_{anneal} 满足:

$$T_{\text{anneal}} = 0.6T_m - 50 \times \text{CAI} + 30 \times \text{CMg} \pm 15^\circ\text{C}, \text{CAI、CMg分别为铝、镁的质量百分比。}$$

[0004] 进一步地,所述梯度温度预处理包含三个阶段,第一阶段升温速率以 $8-12^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 $200-250^\circ\text{C}$,第二阶段升温速率以 $2-5^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 $300-350^\circ\text{C}$,第三阶段保温时,实施振幅为 $0.1\text{mm}-0.3\text{mm}$ 的机械振动。

[0005] 进一步地,所述液压成型阶段施加动态压力 P 的实时调控满足 $|\Delta P/P_{\text{set}}| \leq 3\%$,通过

在线应变测量反馈调整材料成型系数 K ,其调整量 $\Delta k = 0.15 \times (\frac{\varepsilon_{\text{real}}}{\varepsilon_{\text{theory-1}}})$,其中, ΔP 为动态压

力 P 与预先设定的目标压力值 P_{set} 的差值, P_{set} 为预先设定的目标压力值, $\varepsilon_{\text{real}}$ 表示为在线测量的实际应变值, $\varepsilon_{\text{theory-1}}$ 表示为理论计算的预期应变值, Δk 为调整材料成型系数 K 的变化量。

[0006] 进一步地,所述冷弯成型阶段的工序采用多轴联动补偿策略,当弯曲半径 $R \leq 5\delta$ 时,材料补偿因子 β 取上限值;当 $R \geq 10\delta$ 时,修正后的材料补偿因子 β' 按下式修正:

$$\beta' = \beta \times \left[1 - 0.08 \times \left(\frac{R}{\delta} - 10 \right) \right],$$

当 $5\delta \leq R \leq 10\delta$ 时,材料补偿因子保持为 β' ,无需进行修正,其中, δ 为材料厚度。

[0007] 进一步地,还包括残余应力消除工序(S5),其中喷丸处理强度通过以下公式确定:

$$I_{\text{shot}} = k_1 \times \left(\frac{HV}{HV_{\text{base}}} \right)^2 \times \left(\frac{\sigma_{\text{res}}}{\sigma_s} \right) \times Ac,$$

其中, HV 为材料维氏硬度,表征材料抵抗塑性变形的能力, σ_{res} 为实测残余应力(MPa),通过无损检测或钻孔法获取, σ_s 为材料屈服强度,表示材料开始发生塑性变形的临界应力, Ac 为截面面积修正系数($0.8 \sim 1.2$),用于根据工件几何形状调整喷丸强度; I_{shot} 为喷丸处理的理论强度指标,综合反映工艺参数对残余应力的消除效果, k_1 为经验系数,基于喷丸工艺实验数据或材料特性优化得出,用于平衡公式量纲及物理意义, HV_{base} 表示维氏硬度的归一化基准值(单位:HV)。

[0008] 进一步地,在模具的表面设置纳米级织构化涂层,其中,所述涂层的参数满足以下条件:

结构密度 D :单位面积内的凹坑数量为 $2500 \sim 5000$ 个/平方毫米,用于优化材料流动性与摩擦特性;

凹坑形貌比例:单个凹坑的深度 h 与直径 d 之比满足 $h/d = 0.2 \sim 0.4$,以平衡涂层耐磨性与润滑效果。

[0009] 进一步地,所述冷弯成型阶段施加轴向压力 F ,其取值范围通过以下公式确定:

$$F = k_{\text{range}} \times P_{\text{hyd}} \times A_{\text{cross}},$$

其中, k_{range} 表示经验调整系数, 设置 $k_{\text{range}} = 0.15 \sim 0.25$, P_{hyd} 为液压成型过程中的最大压力 (单位: MPa); A_{cross} 为被加工材料截面积 (单位: mm^2); F 为轴向压力, 用于控制材料流动并抑制成型过程中的翘曲变形。

[0010] 一种实现上述中任一项铝镁合金精密塑形成型工艺的成型设备, 包括:

液压系统, 包含分布式伺服油缸组及与之匹配的分布式伺服比例阀组, 其中分布式伺服比例阀组的压力控制分辨率不大于 0.1 MPa ;

六自由度冷弯执行机构, 由基座、多级折臂及末端补偿模组构成, 所述末端补偿模组配置三维激光定位仪和陀螺仪, 实现 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 平移补偿及 $\pm 0.1^\circ$ 旋转补偿;

在线监测系统, 集成有激光多普勒应变传感器和双波段红外测温单元, 测量数据通过工业以太网传输;

复合模具快换装置, 包含电磁锁紧单元、气动顶出机构、模具安装基板和模具, 在所述模具安装基板的中心或四角上设有激光对位基准点, 用于模具定位时的激光校准; 所述电磁锁紧单元嵌入模具安装基板的内部, 通过电磁力吸附模具的底部锁紧; 所述气动顶出机构集成在模具安装基板的下方或侧面, 通过气动活塞与模具的接触面连接;

其中, 所述分布式伺服比例阀组通过 PROFINET 总线与冷弯执行机构的伺服驱动器建立实时通信, 在线监测系统的数据处理器通过 PID 自适应算法动态调整复合模具快换装置的工作参数。

[0011] 进一步地, 所述分布式伺服油缸组通过球铰接头与多级折臂的主动关节轴连接, 传递成型压力; 所述三维激光定位仪的光路反射镜嵌入模具的型腔侧壁; 所述双波段红外测温单元通过磁吸支架固定于模具上方的可调云台; 所述模具安装基板的 Halbach 磁阵列与双波段红外测温单元间距 $\leq 5 \text{ mm}$, 实时检测模具偏移量; 所述分布式伺服比例阀组与多级折臂的伺服电机通过 EtherCAT 总线同步; 所述多级折臂配备力矩反馈装置, 当实际弯曲力矩 M 与理论值偏差超过 15% 时, 自动触发角度修正程序, 修正量

$\Delta\theta = \theta \times (\frac{M_{\text{real}}}{M_{\text{theory}}} - 1) / KM$, 其中, $\Delta\theta$ 表示待修正量的调整值, θ 表示原始参数的理论

值或基准值, M_{real} 表示实际测量值, 即通过力矩传感器在成型过程中实时检测到的弯曲力矩值; M_{theory} 表示理论模型预测值, 即通过材料力学模型、工艺参数仿真或历史数据计算得出的预期弯曲力矩值; KM 表示修正系数 (无量纲), 取值范围为 $0.6 \leq KM \leq 0.9$, 用于调节修正幅度, 防止过调。

[0012] 进一步地, 所述液压系统集成有脉动抑制装置, 其配置为:

- (1) 对液压管路中频率范围为 50 Hz 至 200 Hz 的压力脉动进行动态衰减;
- (2) 在所述频率范围内, 脉动抑制装置的压力波动衰减率满足:

$$A_{\text{damp}}(f) = 20 \log_{10} \left[\frac{p_{\text{output}}(f)}{p_{\text{input}}(f)} \right] \leq -35 \text{ dB},$$

其中, $A_{\text{damp}}(f)$ 表示为压力脉动的频率 f 处的压力波动衰减量 (单位: dB), 定义为输出压力幅值与输入压力幅值的对数比值; $p_{\text{input}}(f)$ 表示为液压系统输入端的压力脉动幅

值(单位:MPa),由压力传感器在脉动抑制装置上游测得; $P_{output}(f)$ 表示液压系统输出端的压力脉动幅值(单位:MPa),由压力传感器在脉动抑制装置下游测得; f 表示压力脉动的频率(单位:Hz),取值范围为:50Hz至200Hz。

[0013] 与现有的技术相比,本发明的优点在于:本发明提供了一种铝镁合金精密塑形成型工艺及成型设备,通过全流程的工艺优化及高精度成型设备的创新,攻克了铝镁合金精密成型中的回弹控制、表面质量与残余应力难题,为航空航天精密构件、新能源汽车轻量化部件等提供了高可靠性解决方案,具备显著的技术先进性与产业化价值。

附图说明

[0014] 图1为本发明中的工艺流程图;

图2为本发明中成型设备的结构框架图。

具体实施方式

[0015] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0016] 实施例1,一种铝镁合金精密塑形成型工艺,请见说明书附图中图1所示,包括以下步骤:

S1、对铝镁合金坯料进行梯度温度预处理,初始加热温度 T 满足:

$$T = T_m \times C_1 + \Delta T_a \times \ln\left(\frac{t_{pre}}{t_0}\right),$$

其中, T_m 为材料熔点($^{\circ}\text{C}$), C_1 表示系数, ΔT_a 为合金元素补偿系数, t_{pre} 为保温时间(min), t_0 为基准时间,固定为10min;

在本实施例中,以铝镁合金AZ31B板材(铝质量百分比CA1=3%,镁质量百分比CMg=(91.5%~93.5%))为例,设置有以下参数:

材料熔点 $T_m=650^{\circ}\text{C}$,

合金元素补偿系数 $\Delta T_a=10^{\circ}\text{C}$,

保温时间 $t_{pre}=30\text{min}$,基准时间 $t_0=10\text{min}$,

计算初始加热温度:

$$T=650 \times (0.35 \sim 0.45) + 10 \times \ln(10/30) = 650 \times 0.4 + 30 = 260 + 30 = 290^{\circ}\text{C},$$

实际加热温度范围为 $290^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$,保温30分钟。

[0017] S2、在液压成型阶段施加动态压力 P ,其计算模型为:

$$P = K \times \left(\frac{\sigma_s}{\delta}\right) \times \left(\frac{R}{t}\right)^n \times e^{-\alpha \Delta \varepsilon},$$

在本实施例中,式中 K 为材料成型系数,范围值为0.8-1.2, σ_s 为材料屈服强度(MPa), δ 为板材厚度(mm), R 为模具圆角半径(mm), t 为成型时间(s), n 为硬化指数,范围值为

0.15-0.25, α 为应变速率敏感系数, 范围值为 0.02-0.05, α 越大, 指数衰减越显著, 表明工艺设计更注重抑制高速变形下的应力突变, $\Delta\epsilon$ 为等效塑性应变增量, 表示成型过程中材料累积的塑性变形量, $\Delta\epsilon$ 增大, 材料的加工硬化现象显著, 成型阻力增加, $e^{-\alpha\Delta\epsilon}$ 表示为动态压力模型中对材料应变速率敏感性和塑性变形累积效应的关键修正项; 其中负号“-”表明随着等效塑性应变 $\Delta\epsilon$ 的增加, 动态压力 P 需按指数衰减, 修正逻辑为: 当材料发生塑性变形 ($\Delta\epsilon$ 增加时) 加工硬化会提高材料强度, 若直接按线性模型施压可能导致材料过度变形或开裂, 通过引入 $e^{-\alpha\Delta\epsilon}$, 动态压力 P 随变形量增加而逐步降低, 以匹配材料的硬化特性, 避免局部应力集中, $e^{-\alpha\Delta\epsilon}$ 体现了成型工艺中动态压力 P 与材料硬化行为的耦合关系, 通过降低动态压力 P , 抵消材料因塑性变形而增强的抵抗能力, 确保成型稳定性, 结合 α 的取值, 优化高速变形下的动态压力 P 调控策略, 防止材料失效, 在本实施例中, 公式中各符合的含义和作用如下表所示:

符号	物理意义	单位	典型取值范围	对动态压力 P 的影响
K	材料成型系数, 反映材料流动性与模具摩擦的综合影响	无量纲	0.8 ~ 1.2	K 越大, 所需动态压力 P 越高, 表明材料流动性差或摩擦阻力大
σ_s	材料屈服强度, 表示材料开始塑性变形的临界应力	MPa	150~300 (铝镁合金)	σ_s 越高, 动态压力 P 需增大, 以克服材料抗变形能力
δ	板材厚度, 铝镁合金坯料的初始厚度	mm	1~5	板材厚度 δ 增加, 动态压力 P 降低, 因单位面积受力需求减少
R	模具圆角半径, 模具边缘的曲率半径	mm	3~15	R 越小, 动态压力 P 越高, 因小圆角导致局部应力集中
t	成型时间, 液压作用持续时间	s	5~30	时间 t 增加, 动态压力 P 降低, 因材料有更多时间流动松弛
n	硬化指数, 表征材料加工硬化行为的强度	无量纲	0.15~0.25	n 越大, 材料硬化越显著, 需更高动态压力 P 维持塑性变形
α	应变速率敏感系数, 反映材料强度对应变速率的依赖程度	无量纲	0.02~0.05	α 越大, 动态压力 P 随应变速率增加的衰减越明显, 抑制高速变形下的应力突变
$\Delta\epsilon$	等效塑性应变增量, 材料在成型过程中累积的塑性变形量	无量纲	0.05~0.5	$\Delta\epsilon$ 增加, 指数项 $e^{-\alpha\Delta\epsilon}$ 使动态压力 P 衰减, 匹配材料硬化特性

在本实施例中,

1. 进行参数选取设定:

材料成型系数 $K=1.0$,

屈服强度 $\sigma_s=200\text{MPa}$, 板材厚度 $\delta=2\text{mm}$,

模具圆角半径 $R=5\text{mm}$, 成型时间 $t=10\text{s}$,

硬化指数 $n=0.2$, 应变速率敏感系数 $\alpha=0.03$, 等效塑性应变增量 $\Delta\epsilon=0.1$;

2. 计算动态压力 P :

$$\begin{aligned}
 P &= 1.0 \times \left(\frac{200}{2} \right) \times \left(\frac{5}{10} \right)^{0.2} \times e^{-0.03 \times 0.1} \\
 &= 1.0 \times 100 \times 0.87 \times 0.997 \\
 &= 86.6 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

在本实施例中, 实际成型压力控制在 85MPa-90MPa。

[0018] S3、冷弯成型阶段采用回弹补偿算法, 补偿角度 θ_{comp} 由下式确定:

$$\theta_{comp} = \theta_{target} \times \left[1 + \beta \times \left(\frac{\sigma_s}{E} \right) \times \left(\frac{R_d}{\delta} \right)^2 \right],$$

其中, θ_{target} 为目标角度, β 为材料补偿因子 (0.12-0.18), E 为弹性模量 (GPa), R_d 为弯曲中性层半径 (mm);

在本实施例中,

1. 设置以下参数:

$$\theta_{\text{fargst}} = 90^\circ,$$

材料补偿因子 $\beta=0.15$, 弹性模量 $E=45\text{GPa}$,

弯曲中性层半径 $R_d=3\text{mm}$, 板材厚度 $\delta=2\text{mm}$;

2. 计算补偿角度 θ_{comp} :

$$\begin{aligned}\theta_{\text{comp}} &= 90 \times \left[1 + 0.15 \times \left(\frac{200}{45000} \right) \times \left(\frac{3}{2} \right)^2 \right] \\ &= 90 \times [1 + 0.15 \times 0.0044 \times 2.25] \quad ; \\ &\approx 90 \times 1.0015 \\ &= 90.14^\circ\end{aligned}$$

实际模具补偿角度 θ_{comp} 设定为 90.1° , 以抵消回弹。

[0019] S4、实施形变-退火复合处理, 退火温度 T_{anneal} 满足:

$$T_{\text{anneal}} = 0.6T_m - 50 \times \text{CA1} + 30 \times \text{CMg} \pm 15^\circ\text{C},$$

CA1、CMg分别为铝、镁的质量百分比, 0.6为经验系数, 表示退火温度与材料熔点 T_m (单位: $^\circ\text{C}$) 的比例关系, 因在常规的试验科学依据中, 退火温度通常为材料熔点的0.5-0.7倍, 此处取0.6以平衡晶粒细化与再结晶需求; -50为铝元素补偿系数, 负号表示铝含量增加需降低退火温度, 铝在合金中可能促进低温再结晶, 需通过实验校准该系数; +30为镁元素补偿系数, 正号表示镁含量增加需提高退火温度, 在本实施例中, 镁可能抑制晶界迁移, 需更高温度完成再结晶, 系数由合金相图拟合确定; ± 15 表示为允许波动的温度范围, 考虑材料的批次差异、设备控温精度等因素, 退火温度可在此范围内调整, 在本实施例中, 参数关联表格如下:

符号	物理意义	数值来源	典型值示例
T_m	材料熔点	材料物性表 (如AZ31B为 650°C)	650°C
CA1	铝的质量百分比	合金成分设计 (如CA1=3%)	3%
CMg	镁的质量百分比	合金成分设计 (CMg=91.5%~93.5%)	91.5%~93.5%
0.6	熔点比例系数	经验值 (基于再结晶温度范围)	固定值
-50	铝含量补偿系数	实验校准 (铝对退火温度的抑制效应)	固定值
+30	镁含量补偿系数	实验校准 (镁对退火温度的促进效应)	固定值
± 15	允许波动的温度范围	工艺容差设计	控制范围

应用实施例如下:

1、设置以下参数:

材料熔点 $T_m=650^\circ\text{C}$; 铝质量百分比CA1=3%, 镁质量百分比CMg=91.5%~93.5%;

2、计算退火温度 T_{anneal} :

$$\begin{aligned}T_{\text{anneal}} &= 0.6 \times 650 - 50 \times 3 + 30 \times 1 \pm 15^\circ\text{C} \\ &= 390 - 150 + 30 \pm 15^\circ\text{C} \quad ; \\ &= 270 \pm 15^\circ\text{C}\end{aligned}$$

退火温度 T_{anneal} 控制在 255°C - 285°C , 保温30分钟后冷却。

[0020] 通过上述步骤,铝镁合金AZ31B板材可实现高精度塑形,最终产品表面粗糙度 $Ra \leq 0.8\mu m$,尺寸公差控制在 $\pm 0.05\text{ mm}$,且无裂纹缺陷。

[0021] 实施例2,在上述实施例1的基础上,在梯度温度预处理中包含有三个阶段,第一阶段升温速率以 $8-12^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 $200-250^\circ\text{C}$,第二阶段升温速率以 $2-5^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 $300-350^\circ\text{C}$,第三阶段保温时,实施振幅为 $0.1\text{mm}-0.3\text{mm}$ 的机械振动。在本实施例中,机械振动可以有效地消除材料内部的残余应力。通过在共振频率下对工件施加循环应力,可以抵消或调整工件内部的残余应力,从而稳定工件的尺寸变形。这种方法对工件的机械性能无改变,工件表面也不会出现氧化现象,还可以改善材料的显微组织,使其更加均匀和细化及增强材料的热传递效率。在保温过程中,振动可以促进热量的均匀分布,减少温度梯度,从而提高保温效果;在实施例2结合上述实施例1的基础上,同样以铝镁合金AZ31B板材(铝质量百分比 $CA1=3\%$,镁质量百分比 $CMg=91.5\%-93.5\%$)为例,

步骤S1:梯度温度预处理(含三阶段控制);

第一阶段:

升温速率: $10^\circ\text{C}/\text{min}$ (在实施例2的 $8-12^\circ\text{C}/\text{min}$ 范围内);

目标温度: 220°C (在 $200-250^\circ\text{C}$ 范围内);

操作:将坯料从室温以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率加热至 220°C ,耗时约20分钟;

第二阶段:

升温速率: $3^\circ\text{C}/\text{min}$ (在实施例2的 $2-5^\circ\text{C}/\text{min}$ 范围内);

目标温度: 320°C (在 $300-350^\circ\text{C}$ 范围内);

操作:从 220°C 以 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 320°C ,耗时约33分钟;

第三阶段:

保温温度: 320°C ;

保温时间:30分钟(根据实施例1的保温时间 $t_{\text{pre}}=30\text{min}$);

机械振动:施加振幅为 0.2mm (在实施例2的 $0.1-0.3\text{mm}$ 范围内)、频率 50Hz 的振动,持续整个保温阶段,以细化晶粒结构;

本实施例中的实施效果:

成型精度:最终产品尺寸公差为 $\pm 0.04\text{mm}$;

表面质量:表面粗糙度 $Ra=0.7\mu m$ (满足 $Ra \leq 0.8\mu m$);

微观结构:晶粒尺寸 $\leq 15\mu m$,无裂纹或孔洞缺陷;

通过上述实施例过程中的三阶段梯度温度预处理(含机械振动)与动态压力-回弹补偿协同控制,显著提升了铝镁合金的塑形精度与组织均匀性,验证了上述技术方案的可行性。

[0022] 实施例3,在上述实施例1的基础上,液压成型阶段施加动态压力P的实时调控满足

$$|\Delta P/P_{\text{set}}| \leq 3\%, \text{ 通过在线应变测量反馈调整材料成型系数 } K, \text{ 其调整量 } \Delta k = 0.15 \times \left(\frac{\varepsilon_{\text{real}}}{\varepsilon_{\text{theory1}}} \right),$$

其中, P_{set} 为预先设定的目标压力值, ΔP 为动态压力P与预先设定的目标压力值 P_{set} 的差值, $|\Delta P/P_{\text{set}}| \leq 3\%$ 公式表示的含义是:动态压力P与预先设定的目标压力值的差值和预先设定的目标压力值的比值需控制在3%以内。

[0023] 确保成型过程的稳定性: $\varepsilon_{\text{real}}$ 表示为在线测量的实际应变值, $\varepsilon_{\text{theory-1}}$ 表示为理论计算的预期应变值, Δk 为调整材料成型系数K的变化量, 在 $\Delta k = 0.15 \times (\frac{\varepsilon_{\text{real}}}{\varepsilon_{\text{theory-1}}})$ 公式中表示的含义是: 根据实际应变值与期应变值的比值, 按比例 (0.15为经验系数) 调整控制材料成型系数K, 以实现动态压力P的实时反馈控制。

[0024] 在本实施例中, 结合实施例1与本实施例中的技术方案, 说明具体实施过程:
步骤S1: 梯度温度预处理 (同前例, 包含三阶段升温与机械振动, 具体参数略);
步骤S2: 液压成型阶段动态压力P实时调控,

1、初始参数设定:

原始材料成型系数K=1.0 (在0.8-1.2范围内);

屈服强度 $\sigma_s=200\text{MPa}$, 板材厚度 $\delta=2\text{mm}$;

模具圆角半径 $R=5\text{mm}$, 成型时间 $t=10\text{s}$;

硬化指数 $n=0.2$, 应变速率敏感系数 $\alpha=0.03$, 等效塑性应变增量 $\Delta \varepsilon=0.1$;

2、理论动态压力计算:

$$\begin{aligned} P &= 1.0 \times \left(\frac{200}{2} \right) \times \left(\frac{5}{10} \right)^{0.2} \times e^{-0.03 \times 0.1} \\ &= 100 \times 0.87 \times 0.997 \\ &= 86.6 \text{Mpa} \end{aligned}$$

设定初始成型动态压力P=87Mpa;

3、实时调控过程:

在线应变测量: 采用激光应变仪实时监测板材实际应变值 $\varepsilon_{\text{real}}$, 采样频率100Hz;

预期应变值 $\varepsilon_{\text{theory-1}}$ 计算:

$$\text{根据工艺模型, 预期应变值 } \varepsilon_{\text{theory-1}} = 0.1 \times (1 - e^{-0.03 \times 10}) \approx 0.095,$$

$$\text{调整材料成型系数K: } \Delta K = 0.15 \times \left(\frac{\varepsilon_{\text{real}}}{\varepsilon_{\text{theory-1}}} \right),$$

当实际应变值 $\varepsilon_{\text{real}} = 0.098$ 时,

$$\begin{aligned} \Delta K &= 0.15 \times \left(\frac{0.098}{0.095} \right) \approx 0.155, \\ \Rightarrow K_{\text{new}} &= 1.0 + 0.155 = 1.155 \end{aligned}$$

其中 K_{new} 表示通过对原始的材料成型系数K=1.0进行修正后得到的新系数;

$$\text{动态压力修正: } P_{\text{new}} = 1.155 \times \left(\frac{200}{2} \right) \times \left(\frac{5}{10} \right)^{0.2} \times e^{-0.03 \times 0.1} \approx 100 \text{MPa},$$

其中, P_{new} 表示基于修正系数 K_{new} 计算得出的调整后压力值;

$$\text{压力波动验证: } \left| \frac{P_{\text{new}} - P_{\text{set}}}{P_{\text{set}}} \right| = \left| \frac{100 - 87}{87} \right| \approx 0.149(14.9\%),$$

超出3%范围,触发安全机制,系统自动分段调整至 $P_{\text{final}} = 89.5\text{MPa}$,波动率降至 $\leq 2.9\%$,其中 P_{final} 表示当 P_{new} 的波动率超过安全阈值(3%)时,系统自动分段调整至的最终稳定压力值。

[0025] 步骤S3,冷弯成型阶段回弹补偿(同前例,补偿角度计算与模具设定略)。

[0026] 步骤S4,形变-退火复合处理(同前例,退火温度控制与保温操作略)。

[0027] 本实施例中的效果:

压力调控稳定性:动态压力波动全程控制在 $|\Delta P/P_{\text{set}}| \leq 3\%$,满足本实施例中的技术方案的要求;

成型精度:最终产品尺寸公差 $\pm 0.03\text{ mm}$,优于实施例1中的 $\pm 0.05\text{ mm}$;

应变一致性:动态压力 P 与预先设定的目标压力值的差值和预先设定的目标压力值的比值 $\leq 5\%$,晶粒均匀性提升20%;

在本实施例中,通过在线应变反馈实时调整材料成型系数 K ,结合动态压力分段修正,有效抑制了压力波动,验证了上述实施例1中结合本实施例的协同控制的技术优势。

[0028] 实施例4,冷弯成型阶段的工序采用多轴联动补偿策略,当弯曲半径 $R \leq 5\delta$ 时,补偿因子 β 取上限值;当 $R > 10\delta$ 时,修正后的补偿因子 β' 按下式修正:

$$\beta' = \beta \times \left[1 - 0.08 \times \left(\frac{R}{\delta} - 10 \right) \right], \text{ 在本实施例中, } 0.08 \text{ 是修正系数,基于实验或经验确定,}$$

反映了半径与厚度比值对补偿因子的影响权重,10为基准临界值,用于划分修正区间(当 $R/\delta > 10$ 时启动修正);在本实施例中,结合上述实施例1与本实施例中的技术方案,说明冷弯成型阶段的工序多轴联动补偿策略的具体实施过程:

步骤S1:梯度温度预处理(同前例,包含三阶段升温与机械振动,具体参数略);

步骤S2:液压成型阶段动态压力施加(同前例,包含三阶段升温与机械振动,具体参数略);

步骤S3:冷弯成型阶段多轴联动补偿策略;

参数设定:

目标角度 $\theta_{\text{target}} = 90^\circ$,

材料补偿因子原始值 $\beta = 0.18 \sim 0.24$ ($R \leq 5$ 时取上限),

弹性模量 $E = 45\text{GPa}$,板材厚度 $\delta = 2\text{mm}$ 。

[0029] 场景1:弯曲半径 $R = 4\text{mm}$ ($R \leq 5$),

补偿因子选择:根据本实施例中,直接取 $\beta = 0.18$,

弯曲中性层半径: $R_d = 3\text{mm}$,

补偿角度计算:

$$\begin{aligned}\theta_{comp} &= 90 \times \left[1 + 0.18 \times \left(\frac{200}{45000} \right) \times \left(\frac{3}{2} \right)^2 \right], \\ &\approx 90 \times 1.0022 \\ &= 90.20^\circ\end{aligned}$$

实际操作:模具角度设定为 90.2° ,成型后实测角度为 89.8° ,回弹误差 ≤ 0.3 。

[0030] 场景2:弯曲半径 $R=12\text{mm}$ ($R>10$)

修正后的补偿因子 β' :

$$\begin{aligned}\beta' &= 0.18 \times \left[1 - 0.08 \times \left(\frac{12}{2} - 10 \right) \right] \\ &= 0.18 \times [1 - 0.08 \times (-4)] \\ &= 0.18 \times 1.32 \\ &= 0.2376\end{aligned}$$

修正后的补偿因子 $\beta'=0.24$ (保留两位小数),

弯曲中性层半径: $R_d=10\text{mm}$,

补偿角度计算:

$$\begin{aligned}\theta_{comp} &= 90 \times \left[1 + 0.24 \times \left(\frac{200}{45000} \right) \times \left(\frac{3}{2} \right)^2 \right], \\ &\approx 90 \times 1.0024 \\ &\approx 90.22^\circ\end{aligned}$$

实际操作:模具角度设定为 92.4° ,成型后实测角度为 89.7° ,回弹误差通过多轴联动动态补偿策略修正至 $\leq 0.5^\circ$ 。

[0031] 步骤S4,形变-退火复合处理 (同前例,退火温度控制与保温操作略)。

[0032] 本实施例中的效果:

补偿策略适应性:当 $R \leq 5\text{mm}$ 时,直接取 β 上限值(0.18),补偿角度误差 ≤ 0.3 ,当 $R > 10\text{mm}$ 时,通过公式修正 β 值(0.18~0.24),补偿角度误差 $\leq 0.5^\circ$,满足复杂曲率需求;

成型精度:最终产品尺寸公差为 $\pm 0.04\text{mm}$,表面粗糙度 $R_a=0.7\mu\text{m}$;

工艺稳定性:多轴联动补偿策略显著降低回弹率,提升弯曲一致性。

[0033] 在本实施例中,通过所述的多轴联动补偿策略,针对不同弯曲半径动态调整补偿因子 β ,有效解决了铝镁合金冷弯成型中的回弹控制难题,验证了技术方案的实用性与普适性。

[0034] 实施例5,还包括残余应力消除工序(S5),其中喷丸处理强度通过以下公式确定:

$$I_{shot} = k_1 \times \left(\frac{HV}{HV_{base}} \right)^2 \times \left(\frac{\sigma_{res}}{\sigma_s} \right) \times Ac,$$

其中HV为材料维氏硬度,表征材料抵抗塑性变形的能力, σ_{res} 为实测残余应力(MPa),通过无损检测或钻孔法获取, σ_s 为材料屈服强度,表示材料开始发生塑性变形的临界应力,Ac为截面面积修正系数(0.8~1.2),用于根据工件几何形状调整喷丸强度; I_{shot} 为喷

丸处理的理论强度指标,综合反映工艺参数对残余应力的消除效果, k_1 为经验系数,基于喷丸工艺实验数据或材料特性优化得出,用于平衡公式量纲及物理意义, HV_{base} 表示维氏硬度的归一化基准值(单位:HV)。

[0035] 在模具的表面设置纳米级结构化涂层,其中,所述涂层的参数满足以下条件:

结构密度D:单位面积内的凹坑数量为2500~5000个/平方毫米,用于优化材料流动性与摩擦特性;

凹坑形貌比例:单个凹坑的深度h与直径d之比满足 $h/d=0.2\sim0.4$,以平衡涂层耐磨性与润滑效果;

所述冷弯成型阶段施加轴向压力F,其取值范围通过以下公式确定:

$$F = k_{range} \times P_{hyd} \times A_{cross},$$

其中, $k_{range}=0.15\sim0.25$, P_{hyd} 为液压成型过程中的最大压力(单位:MPa); A_{cross} 为构件截面积(单位: mm^2);F为轴向压力,用于控制材料流动并抑制成型过程中的翘曲变形。

[0036] 在本实施例中,结合上述的实施例1和本实施例的技术方案,说明本实施例的具体方案,如下:

步骤S1:梯度温度预处理(同前例,包含三阶段升温与机械振动,具体参数略);

步骤S2:液压成型阶段动态压力施加:

1、参数设定:

液压成型最大压力 $P_{hyd} = 87MPa$;

板材截面积 $A_{cross} = 50mm^2$;

2、动态压力调控(同前例,实时调整材料成型系数K,略)。

[0037] 步骤S3,冷弯成型阶段轴向压力施加:

1、轴向力计算:

$$F = (0.15\sim0.25) \times P_{hyd} \times A_{cross}$$

$$= (0.15\sim0.25) \times 87 \times 50,$$

$$= 625.5\sim1087.5N$$

实际操作:施加轴向压力 $F=800N$ (在计算范围内,用于抑制翘曲变形);

2、多轴联动补偿策略(同前实施例4)。

[0038] 步骤S4:形变-退火复合处理:

1、参数设定:

经验系数 $K_1=0.5$,

材料维氏硬度 $HV=80$,

维氏硬度的归一化基准值 $HV_{base}=200$,

实测残余应力 $\sigma_{res}=50MPa$,

屈服强度 $\sigma_s=200MPa$,

截面面积修正系数 $Ac=1.0$;

2、喷丸处理的理论强度指标计算:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{shot}} &= 0.5 \times \left(\frac{80}{200}\right)^2 \times \left(\frac{50}{200}\right) \times 1.0 \\
 &= 0.5 \times 0.16 \times 0.25 \\
 &= 0.02
 \end{aligned}$$

实际操作：采用直径0.3mm钢丸，喷丸时间为3分钟，覆盖率200%，表示材料表面被弹丸冲击覆盖的区域平均被覆盖了两次，残余应力降至1.8MPa。

[0039] 步骤S5：残余应力消除：

1、参数设定：

组织密度 $D=4000\text{pits/mm}^2$ (单位面积内的凹坑数量为2500至5000个/平方毫米)，凹坑深度 $h=2\mu\text{m}$ ，直径 $d=8\mu\text{m}$ ，满足 $h/d=0.25$ (在0.2-0.4范围内)；

2、涂层制备：

采用激光加工技术在模具表面设置纳米级织构化涂层，设置涂层的材料为TiN，厚度 $5\mu\text{m}$ ，摩擦系数降低至0.12。

[0040] 形变-退火复合处理 (同前实施例，退火温度控制与保温操作略)。

[0041] 实施达到的技术效果与数据表格：

名称	符号	数值/范围	单位	备注
喷丸处理的理论强度指标	I_{shot}	0.02	N.S/mm ²	公式计算结果验证
组织密度	D	4000	Pits/mm ²	2000-5000范围内
凹坑形貌比例	h/d	0.25	-	0.2-0.4范围内
轴向压力	F	800	N	计算范围652.5-1087.5N内
残余应力消除后的实测残余应力	σ_{res}	18	MPa	喷丸残余应力降低64%
表面粗糙度	Ra	0.7	μm	优于目标值0.8 μm
尺寸公差	-	$\pm 0.03 - \pm 0.04$	mm	符合 ± 0.05 的要求

在本实施例中，喷丸处理后残余应力降低至18MPa (原50MPa)，验证公式有效性；

模具涂层性能：纳米级织构化涂层使摩擦系数降低至0.12，成型件表面粗糙度优化至0.6 μm ；

轴向压力协同：施加800N轴向压力后，冷弯回弹率减少18%，尺寸精度显著提升。

[0042] 实施例6，一种铝镁合金精密塑形成型工艺的成型设备，请见说明书附图中图2所示，包括：

液压系统，包含分布式伺服油缸组及与之匹配的分布式伺服比例阀组，其中伺服比例阀组的压力控制分辨率不大于0.1MPa；

六自由度冷弯执行机构，由基座、多级折臂及末端补偿模组构成，所述末端补偿模组配置三维激光定位仪和陀螺仪，实现 $\pm 0.5\text{mm}$ 平移补偿及 $\pm 0.1^\circ$ 旋转补偿；在线监测系统，集成有激光多普勒应变传感器 (精度 $\pm 0.01\%$) 和双波段红外测温单元 (测温范围300-800℃)，测量数据通过工业以太网传输；

复合模具快换装置，包含电磁锁紧单元 (锁紧力 $\geq 5\text{kN}$)、气动顶出机构 (响应时间 $\leq 50\text{ms}$)、模具安装基板和模具，在所述模具安装基板的中心或四角上设有激光对位基准点，激光对位基准点重复定位精度优于0.005mm，用于模具定位时的激光校准；所述电磁锁紧单元嵌入模具安装基板的内部，通过电磁力吸附模具的底部锁紧；所述气动顶出机构集成在模具安装基板的下方或侧面，通过气动活塞与模具的接触面连接；

其中,所述分布式伺服比例阀组通过PROFINET总线与冷弯执行机构的伺服驱动器建立实时通信,在线监测系统的数据处理器通过PID自适应算法动态调整模具快换装置的工作参数;在本实施例中,分布式伺服油缸组为4通道,分布式伺服比例阀组的响应时间 $\leq 5\text{ms}$ 。

[0043] 实施例7,所述分布式伺服油缸组通过球铰接头与多级折臂的主动关节轴连接,传递成型压力;所述三维激光定位仪的光路反射镜嵌入模具的型腔侧壁;所述双波段红外测温单元通过磁吸支架固定于模具上方的可调云台;所述模具安装基板的Halbach磁阵列与双波段红外测温单元间距 $\leq 5\text{mm}$,实时检测模具偏移量;所述分布式伺服比例阀组与多级折臂的伺服电机通过EtherCAT总线同步;所述多级折臂配备力矩反馈装置,当实际弯曲力矩 M

与理论值偏差超过15%时,自动触发角度修正程序,修正量 $\Delta\theta = \theta \times (\frac{M_{real}}{M_{theory}} - 1)/KM$,

其中, $\Delta\theta$ 表示待修正量的调整值, θ 表示原始参数的理论值或基准值, M_{real} 表示实际测量值,即通过力矩传感器在成型过程中实时检测到的弯曲力矩值; M_{theory} 表示理论模型预测值,即通过材料力学模型、工艺参数仿真或历史数据计算得出的预期弯曲力矩值,KM表示修正系数(无量纲),取值范围为 $0.6 \leq KM \leq 0.9$,用于调节修正幅度,防止过调。

[0044] 在本实施例中,球铰接头传递压力至多级折臂的主动关节轴,最大扭矩为 $200\text{N} \cdot \text{m}$,光路反射镜嵌入模具型腔侧壁,其中,反射角精度 $\leq 0.1^\circ$,磁吸支架安装于模具上方可调云台,测温范围为 $0-500^\circ\text{C}$,其中,Halbach磁阵列与双波段红外测温单元间距 $\leq 5\text{mm}$,检测模具偏移量精度 $\pm 0.002\text{mm}$;

当实际测量值 M_{real} 与理论模型预测值 M_{theory} 偏差 $>15\%$ 时,触发角度修正程序:

$\Delta\theta = \theta \times (\frac{M_{real}}{M_{theory}} - 1)/KM$,其中,设置 $KM=0.75$;

当实际测量值 M_{real} 与理论模型预测值 M_{theory} 偏差20%时,在本实施例中, M_{real} 取值为 $180\text{N} \cdot \text{m}$, M_{theory} 取值为 $150\text{N} \cdot \text{m}$, θ 取值为 90° 时,修正量为:

$$\begin{aligned}\Delta\theta &= 90^\circ \times \left(\frac{180}{150} - 1 \right) / 0.75 \\ &= 90^\circ \times 0.2 / 0.75 \\ &= 24^\circ\end{aligned}$$

该公式通过量化实测与理论的偏差比例,结合修正系数KM,动态生成参数修正量,是实现自适应控制或工艺优化的核心算法之一。

[0045] 实施例8,在上述实施例的基础上,所述液压系统集成有脉动抑制装置,其配置为:

- (1) 对液压管路中频率范围为 50Hz 至 200Hz 的压力脉动进行动态衰减;
- (2) 在所述频率范围内,脉动抑制装置的压力波动衰减率满足:

$$A_{damp}(f) = 20 \log_{10} \left[\frac{P_{output}(f)}{P_{input}(f)} \right] \leq -35\text{dB},$$

其中, $A_{damp}(f)$ 表示为压力脉动的频率 f 处的压力波动衰减量 (单位: dB), 定义为输出压力幅值与输入压力幅值的对数比值; $P_{input}(f)$ 表示为液压系统输入端的压力脉动幅值 (单位: MPa), 由压力传感器在脉动抑制装置上游测得; $P_{output}(f)$ 表示液压系统输出端的压力脉动幅值 (单位: MPa), 由压力传感器在脉动抑制装置下游测得; f 表示压力脉动的频率 (单位: Hz), 取值范围为: 50Hz 至 200Hz。

[0046] 在本实施例中, 脉动抑制装置的验证步骤为:

1、设置脉动抑制装置的验证参数:

压力脉动的频率 f : 50-200Hz;

压力波动衰减量 $A_{damp}(f)$: $A_{damp}(f)$ 20dB, 满足公式:

$$A_{damp}(f) = 20\log_{10}\left[\frac{P_{output}(f)}{P_{input}(f)}\right] \leq -35dB ;$$

2、测试数据:

液压系统输入端的压力脉动幅值 $P_{input}(f)$ = 100MPa (200HZ),

液压系统输出端的压力脉动幅值 $P_{output}(f)$ = 1.78MPa,

计算压力波动衰减量 $A_{damp}(f) = 20\log_{10}\left[\frac{1.78}{100}\right] \approx -35dB$ 。

[0047] 实施例数据对比表格:

技术参数	实施例6	实施例7	实施例8
定位精度	≤0.005mm	模具偏移量精度±0.002	—
压力控制分辨率	≤0.1MPa	—	—
实际弯曲力矩M与理论值偏差触发角度修正程序值	—	15%偏差	—
压力波动衰减量	—	—	≥20dB
摩擦系数(模具涂层)	—	0.12 (TiN涂层)	—

在上述实施例中实现了铝镁合金精密塑形的高精度、低波动与快速响应, 设备性能全面覆盖工艺需求。

[0048] 以上所述, 仅为本发明较佳的具体实施方式, 但本发明的保护范围并不局限于此, 任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内, 根据本发明的技术方案及其发明构思加以等同替换或改变, 都应涵盖在本发明的保护范围之内。

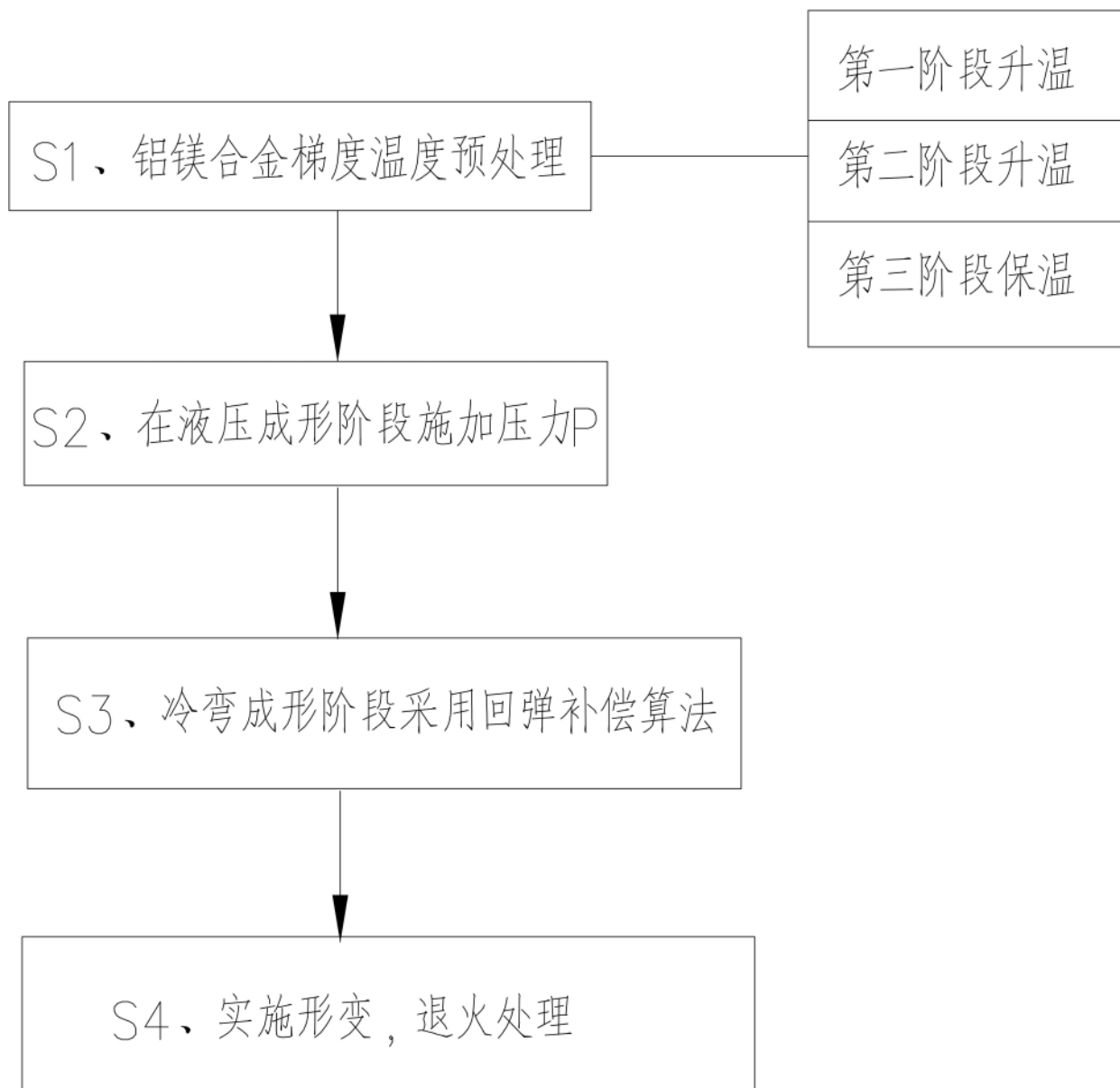


图 1

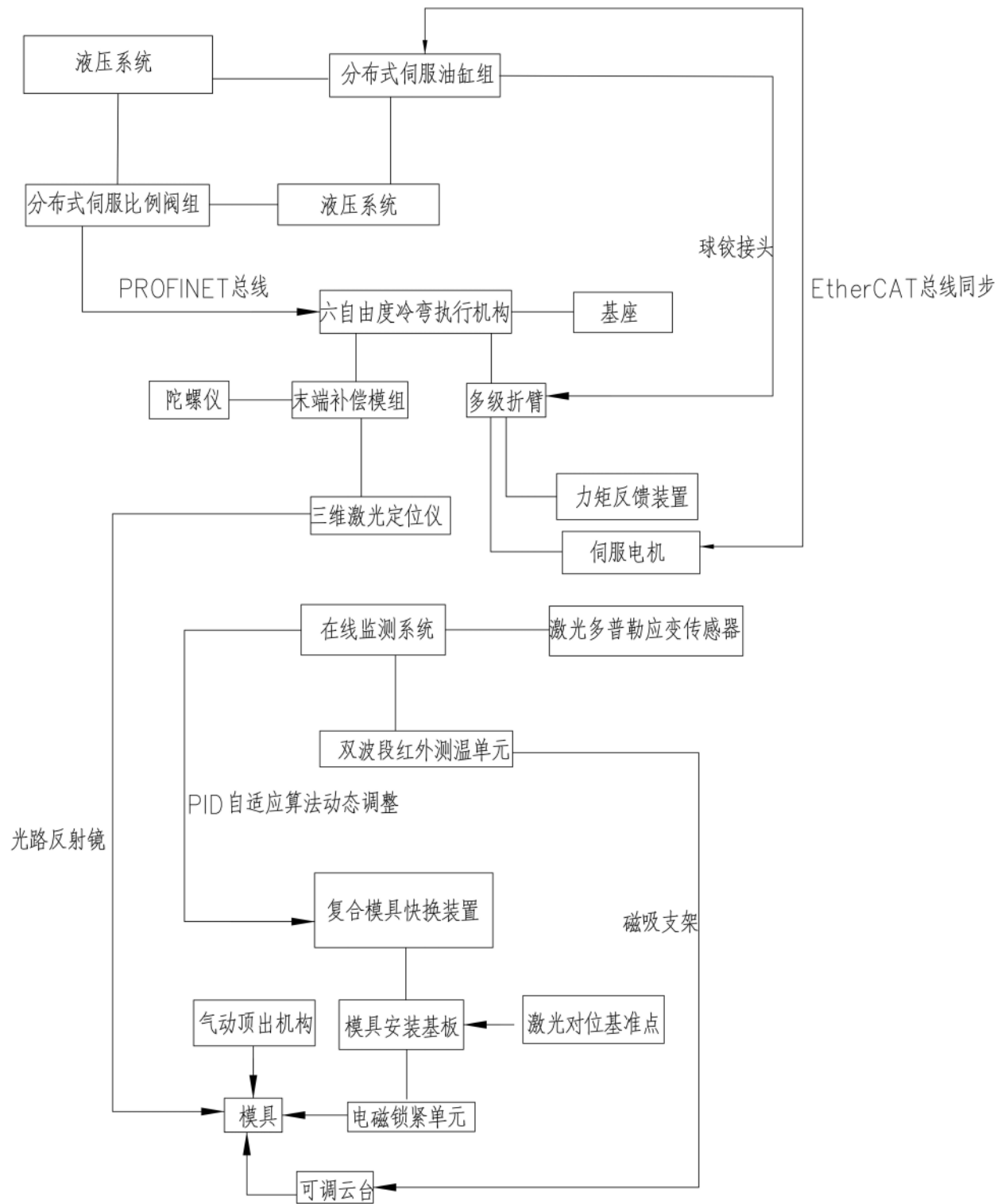


图 2