



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107121992 A

(43)申请公布日 2017.09.01

(21)申请号 201710190026.0

(22)申请日 2017.03.28

(71)申请人 华南理工大学

地址 510640 广东省广州市天河区五山路
381号

(72)发明人 夏琴香 朱宁远 程秀全 肖刚锋

(74)专利代理机构 广州市华学知识产权代理有
限公司 44245

代理人 蔡克永

(51)Int.Cl.

G05D 23/30(2006.01)

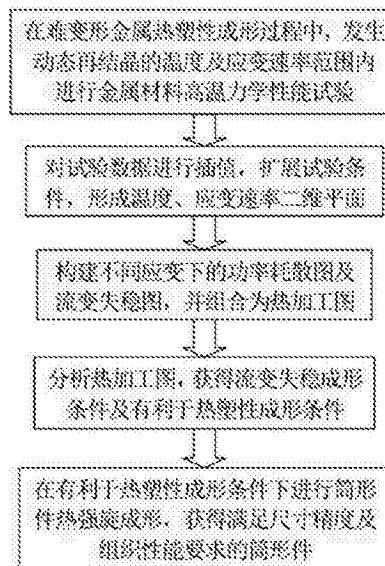
权利要求书3页 说明书8页 附图8页

(54)发明名称

一种基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法,在难变形金属热塑性成形过程中,发生动态再结晶的温度及应变速率范围内进行金属材料高温力学性能试验;基于热塑性成形过程中功率的耗散及流变失稳判断准则,在高温力学性能试验获得流变应力应变关系的基础上,分别构建不同应变下的功率耗散图和流变失稳图;将功率耗散图与流变失稳图进行组合,获得材料热加工图;根据功率耗散率因子 η 的分布及流变失稳判据,分析获得满足流变失稳准则的潜在危险成形条件及安全成形条件下、功率耗散率因子 η 较大的有利于热塑性成形的成形条件;最后根据热加工图获得的材料有利于热塑性成形的温度及应变速率,进行筒形件热强旋成形。



1. 一种基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法,其特征在于包括如下步骤:

步骤(1):根据不同金属材料热塑性成形过程中发生动态再结晶的温度、应变速率及应变的不同,在发生动态再结晶的温度、应变速率及应变条件下进行金属材料高温力学性能试验;

步骤(2):对有限的试验温度、应变速率样本点数下获得的流变应力应变关系进行插值计算;

步骤(3):基于热塑性成形过程中功率的耗散及流变失稳判断准则,在扩展的高温力学性能试验获得流变应力应变关系的基础上,分别构建不同应变下的功率耗散图和流变失稳图;

步骤(4):将功率耗散图与流变失稳图进行组合,获得材料的热加工图;根据功率耗散率因子 η 的分布及流变失稳判据,分析获得满足流变失稳准则的潜在危险成形条件及安全成形条件下、功率耗散率因子 η 的有利于热塑性成形的成形条件;

步骤(5):最后根据热加工图获得的材料有利于热塑性成形的温度及应变速率,确定热强旋成形工艺参数,进行筒形件热强旋成形,获得满足尺寸精度及组织性能要求的筒形件。

2. 根据权利要求1所述基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法,其特征在于:步骤(1)所述金属材料为在热塑性成形过程中易发生动态再结晶的中低层错能金属或合金;步骤(1)所述高温力学性能试验温度在材料动态再结晶温度以下 50°C 与至热塑性成形温度以上 50°C 范围内。

3. 根据权利要求1所述基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法,其特征在于:步骤(5)所述热加工图为基于动态材料模型的热加工图。

4. 根据权利要求1所述基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法,其特征在于:步骤(1)所述高温力学性能试验应变速率按筒形件强力旋压应变速率分布范围取 $0.01/\text{s}$ - $10/\text{s}$;步骤(1)所述高温力学性能试验保证应变量为 0.6 以上。

5. 根据权利要求1所述基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法,其特征在于:步骤(2)所述插值计算为对温度及应变速率试验样本数进行扩展。

6. 根据权利要求1所述基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法,其特征在于:步骤(3)所述流变失稳准则中应变速率敏感系数 m 为流变应力 σ 对应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的偏导,其决定塑性变形所耗散的能量 G 与微观组织演变所耗散的能量 J 的分配;

材料在加工过程中单位时间内外力对单位体积材料所做的功 P ,即材料所获得的总能量,可由应力 σ 与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 相乘获得,其将转变为材料发生塑性变形所消耗的能量 G 及微观组织演变所消耗的能量 J ;

$$\begin{cases} P = \sigma \cdot \dot{\epsilon} = G + J \\ G = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} \\ J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \end{cases}$$

理想能量耗散系统认为塑性变形与微观组织演变所消耗的能量相等,但通常材料处于

非线性能量耗散状态;为描述能量分配关系,采用流变应力 σ 对应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的偏导,即应变速率敏感系数 m 描述其分配比:

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \Big|_{\epsilon, T} = \frac{\dot{\epsilon} \partial \sigma}{\sigma \partial \dot{\epsilon}} \Big|_{\epsilon, T} = \frac{\partial J}{\partial G}。$$

7. 根据权利要求1所述基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法,其特征在于:步骤(4)所述危险成形条件是满足由应变速率敏感系数 m 描述的基于大塑性变形不可逆热力学极值原理的流变失稳准则的条件;

基于大塑性变形不可逆热力学极值原理,采用变速率敏感系数 m 及应变速率的函数构建流变失稳准则:

$$\frac{\partial \left[\ln \left(\frac{m}{m+1} \right) \right]}{\partial (\ln \dot{\epsilon})} + m < 0$$

有利于热塑性成形的条件是描述微观组织演变所耗散的能量 J 占比的功率耗散率因子 η 较大的成形条件;处于理想线性能量耗散系统时微观组织演变耗散的能量最大, $J_{\max} = P/2$,因此根据材料获得的总能量 P 与耗散能的关系,可采用应变速率敏感系数 m 的函数描述功率耗散率因子 η ,以描述微观组织演变所耗散能量 J 的占比:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2J}{P} = \frac{2m}{m+1}。$$

8. 根据权利要求1所述基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法,其特征在于:步骤(5)所述热强旋成形温度应控制在热加工图所得有利于热塑性成形温度 $\pm 25^\circ\text{C}$ 范围。

9. 根据权利要求1所述基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法,其特征在于:步骤(5)所述热强旋成形应变速率是通过控制旋轮成形角、旋轮进给比、主轴转速、减薄率和/或坯料壁厚实现;

热强旋成形工艺参数的确定是根据筒形件强力旋压变形区应变速率 $\dot{\epsilon}$ 与旋轮成形角 α_ρ 、旋压前坯料壁厚 t_0 、旋压后的工件壁厚 t_f 、壁厚减薄率 φ_t 、进给速度 v_0 的关系计算获得:

$$\dot{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{v_0 \sin \alpha_\rho}{t_0 (1 - \varphi_t)^2} \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{t_{\theta f}}{t_f} \right) \sin^2 \alpha_\rho}$$

其中 α_ρ 为旋轮成形角; t_0 为旋压前坯料壁厚; t_f 为旋压后的工件壁厚; $t_{\theta f}$ 为旋压前坯料外表面与旋压后工件外表面之间不同 θ 层至工件内表面的距离; φ_t 为壁厚减薄率; v_0 为旋轮前为成形区质点的流动速度(相对于旋轮),在反旋成形中, v_0 等于进给速度,其与进给比 f 和主轴转速 n 的关系为 $v_0 = f \cdot n$ 。

10. 根据权利要求1所述基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法,其特征在于:步骤(1)的动态再结晶条件是指:在步骤(1)所述的中低层错能金属材料中,在热塑性成形过程中易因位错密度达到临界值而在晶界及高位错密度的应力集中处形成位错密度极低的再结晶晶核并长大,为区别在热处理过程中的再结晶,将这种组织演变过程称为动

态再结晶。

一种基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及热加工图,属于金属材料的热塑性成形领域。尤其涉及一种基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法。

背景技术

[0002] 在传统塑性成形对尺寸精度要求的基础上,提出实现成形零件优越的组织性能,是当前塑性成形技术的特点及发展趋势。随着航空航天、国防军工、舰船等高精尖技术的发展,对同时具有较高尺寸精度和良好高温性能的筒形件的应用越来越广泛。但该类合金在室温下变形抗力大、塑性差,常温下进行塑性成形极为困难。具有点加载连续局部成形特点的热强旋成形是目前获得该类难变形金属筒形件的最有效方法之一。在热强旋过程中,由于热力学耦合作用,其成形机理复杂,如何控制成形温度及各工艺参数之间的配合,是获得同时具有较高尺寸精度和良好高温性能筒形件的关键。

[0003] 除材料化学组成外,微观组织形态是材料性能的决定因素。因此,在热强旋过程中微观组织的演变是决定产品性能的关键。为研究热强旋成形过程中微观组织的演变机制,常规方法采用金相显微镜(OM)、X射线衍射(XRD)、背散射电子衍射(EBSD)等对组织及织构进行实验研究。但由于实验手段的局限性,无法实现微观组织的动态观察,凭经验又很难进行预测以及控制,具有一定的盲目性、耗时费力。

[0004] 形/性一体化控制是塑性成形技术的一个重要的发展方向。在旋压成形方面,目前主要关注于对宏观成形质量、旋压缺陷控制方面的工艺参数优化研究,对于微观组织演变机理的研究也均是采用上述实验方法,仅停留在对成形后的微观组织进行分析,没有将宏观的成形质量与微观的组织演变进行协同研究,且没有在组织演变物理机制的基础上提出具体的形/性一体化控制方法。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于克服上述现有技术的缺点和不足,提供一种基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法。避免了盲目地试验和材料的浪费,充分挖掘了材料的性能潜力。本发明技术方案中,既考虑加工过程中材料的宏观流动,又考虑材料变形时微观的组织演变,获得同时具有较高尺寸精度和良好组织性能的筒形件。

[0006] 本发明通过下述技术方案实现:

[0007] 一种基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法,包括如下步骤:

[0008] 步骤(1):根据不同金属材料热塑性成形过程中发生动态再结晶的温度、应变速率及应变的不同,在发生动态再结晶的温度、应变速率及应变条件下进行金属材料高温力学性能试验;

[0009] 步骤(2):对有限的试验温度、应变速率样本点数下获得的流变应力应变关系进行插值计算;

[0010] 步骤(3):基于热塑性成形过程中功率的耗散及流变失稳判断准则,在扩展的高温

力学性能试验获得流变应力应变关系的基础上,分别构建不同应变下的功率耗散图和流变失稳图;

[0011] 步骤(4):将功率耗散图与流变失稳图进行组合,获得材料的热加工图;根据功率耗散率因子 η 的分布及流变失稳判据,分析获得满足流变失稳准则的潜在危险成形条件及安全成形条件下、功率耗散率因子 η 的有利于热塑性成形的成形条件;

[0012] 步骤(5):最后根据热加工图获得的材料有利于热塑性成形的温度及应变速率,确定热强旋成形工艺参数,进行筒形件热强旋成形,获得满足尺寸精度及组织性能要求的筒形件。

[0013] 上述步骤(1)所述金属材料为在热塑性成形过程中易发生动态再结晶的中低层错能金属或合金;步骤(1)所述高温力学性能试验温度在材料动态再结晶温度以下 50°C 与至热塑性成形温度以上 50°C 范围内。

[0014] 上述步骤(5)所述热加工图为基于动态材料模型的热加工图。

[0015] 上述步骤(1)所述高温力学性能试验应变速率按筒形件强力旋压应变速率分布范围取 $0.01/\text{s}$ - $10/\text{s}$;步骤(1)所述高温力学性能试验保证应变量为 0.6 以上。

[0016] 上述步骤(2)所述插值计算为对温度及应变速率试验样本数进行扩展。

[0017] 上述步骤(3)所述流变失稳准则中应变速率敏感系数 m 为流变应力 σ 对应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的偏导,其决定塑性变形所耗散的能量 G 与微观组织演变所耗散的能量 J 的分配;

[0018] 材料在加工过程中单位时间内外力对单位体积材料所做的功 P ,即材料所获得的总能量,可由应力 σ 与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 相乘获得,其将转变为材料发生塑性变形所消耗的能量 G 及微观组织演变所消耗的能量 J ;

$$[0019] \quad \begin{cases} P = \sigma \cdot \dot{\epsilon} = G + J \\ G = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} \\ J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \end{cases}$$

[0020] 理想能量耗散系统认为塑性变形与微观组织演变所消耗的能量相等,但通常材料处于非线性能量耗散状态;为描述能量分配关系,采用流变应力 σ 对应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的偏导,即应变速率敏感系数 m 描述其分配比:

$$[0021] \quad m = \left. \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right|_{\epsilon, T} = \frac{\dot{\epsilon} \partial \sigma}{\sigma \partial \dot{\epsilon}} \bigg|_{\epsilon, T} = \frac{\partial J}{\partial G}。$$

[0022] 上述步骤(4)所述危险成形条件是满足由应变速率敏感系数 m 描述的基于大塑性变形不可逆热力学极值原理的流变失稳准则的条件;

[0023] 基于大塑性变形不可逆热力学极值原理,采用变速率敏感系数 m 及应变速率的函数构建流变失稳准则:

$$[0024] \quad \frac{\partial \left[\ln \left(\frac{m}{m+1} \right) \right]}{\partial (\ln \dot{\epsilon})} + m < 0$$

[0025] 有利于热塑性成形的条件是描述微观组织演变所耗散的能量J占比的功率耗散率因子 η 较大的成形条件;处于理想线性能量耗散系统时微观组织演变耗散的能量最大, $J_{\max}=P/2$,因此根据材料获得的总能量P与耗散能的关系,可采用应变速率敏感系数m的函数描述功率耗散率因子 η ,以描述微观组织演变所耗散能量J的占比:

$$[0026] \quad \eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2J}{P} = \frac{2m}{m+1}$$

[0027] 上述步骤(5)所述热强旋成形温度应控制在热加工图所得有利于热塑性成形温度 $\pm 25^{\circ}\text{C}$ 范围。

[0028] 上述步骤(5)所述热强旋成形应变速率是通过控制旋轮成形角、旋轮进给比、主轴转速、减薄率和/或坯料壁厚实现;

[0029] 热强旋成形工艺参数的确定是根据筒形件强力旋压变形区应变速率 $\dot{\epsilon}$ 与旋轮成形角 α_{ρ} 、旋压前坯料壁厚 t_0 、旋压后的工件壁厚 t_f 、壁厚减薄率 φ_t 、进给速度 v_0 的关系计算获得;

$$[0030] \quad \dot{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{v_0 \sin \alpha_{\rho}}{t_0 (1 - \varphi_t)^2} \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{t_{\theta f}}{t_f} \right) \sin^2 \alpha_{\rho}}$$

[0031] 其中 α_{ρ} 为旋轮成形角; t_0 为旋压前坯料壁厚; t_f 为旋压后的工件壁厚; $t_{\theta f}$ 为旋压前坯料外表面与旋压后工件外表面之间不同 θ 层至工件内表面的距离; φ_t 为壁厚减薄率; v_0 为旋轮前为成形区质点的流动速度(相对于旋轮),在反旋成形中, v_0 等于进给速度,其与进给比f和主轴转速n的关系为 $v_0 = f \cdot n$ 。

[0032] 上述步骤(1)的动态再结晶条件是指:在步骤(1)所述的中低层错能金属材料中,在热塑性成形过程中易因位错密度达到临界值而在晶界及高位错密度的应力集中处形成位错密度极低的再结晶晶核并长大,为区别在热处理过程中的再结晶,将这种组织演变过程称为动态再结晶。

[0033] 金属材料动态再结晶温度和应变速率的确定主要受材料的组织状态、化学组成、成形方式等诸多因素影响。对于应变速率一般考虑成形方式,本发明中为热强旋成形,其应变速率一般在 $0.01/\text{s} \sim 10/\text{s}$ 范围内,而在不同应变速率下的动态再结晶温度可参考热处理过程中的再结晶温度,但准确的再结晶温度主要依靠试验获得。

[0034] 本发明相对于现有技术,具有如下的优点及效果:

[0035] 1、本发明所采用技术方案,可以从物理机制层面实现热强旋成形的形/性一体化控制;

[0036] 2、本发明所采用技术方案,可以得到同时具有较高尺寸精度和良好组织性能的筒形件;

[0037] 3、本发明所采用技术方案,可以得到金属材料热塑性成形的危险成形条件,避免成形缺陷及减小。

[0038] 可见,本发明针对难变形金属薄壁筒形零件不仅具有高精度外形尺寸,还具有细小均匀、无流变失稳现象的微观晶粒组织,使其具有良好的机械性能,实现难变形金属筒形件的尺寸精度与组织性能的一体化控制。

附图说明

- [0039] 图1是筒形件强力旋压变形区应变速率计算公式。
- [0040] 图2是热塑性成形过程中能量组成。
- [0041] 图3是应变速率敏感系数表达式。
- [0042] 图4是理想线性与非线性能量耗散分配。
- [0043] 图5是功率耗散率因子表达式。
- [0044] 图6是基于大塑性变形不可逆热力学极值原理的流变失稳判断准则。
- [0045] 图7是本发明实施的流程图。
- [0046] 图8是本发明热强旋所得筒形件零件示意图。
- [0047] 图9是本发明高温平面应变压缩试验试样图。
- [0048] 图10是本发明高温平面应变压缩试验加载示意图。
- [0049] 图11是本发明高温力学性能试验热加载曲线图。
- [0050] 图12是本发明高温平面应变压缩流变应力应变计算公式。
- [0051] 图13是本发明高温平面应变压缩所得流变应力应变关系。
- [0052] 图14是本发明所得功率耗散图。
- [0053] 图15是本发明所得流变失稳图。
- [0054] 图16是本发明所得基于动态材料模型热加工图。
- [0055] 图17是本发明Haynes230镍基高温合金应变为1时热加工图及金相;其中:图17a是本发明Haynes230镍基高温合金应变为1时热加工图;图17b是本发明Haynes230镍基高温合金应变为1时金相之一;图17c是本发明Haynes230镍基高温合金应变为1时金相之二;图17d是本发明Haynes230镍基高温合金应变为1时金相之三。
- [0056] 图18是本发明热强旋成形筒形件坯料示意图。
- [0057] 图19是本发明三旋轮反旋错距旋压成形示意图。
- [0058] 图20是本发明Haynes230镍基高温合金热强旋金相组织。
- [0059] 图21是本发明高温单向拉伸试样图。

具体实施方式

[0060] 下面结合附图和实施例对本发明作进一步的说明,但是本发明要求保护的范围并不局限于实施例表述的范围。

[0061] 根据如图1所示筒形件强力旋压变形区应变速率 $\dot{\epsilon}$ 计算公式确定高温力学性能试验中应变速率的范围。根据旋压成形中旋轮成形角 α_p 、旋压前坯料壁厚 t_0 、旋压后的工件壁厚 t_f 、旋压前坯料外表面与旋压后工件外表面之间不同 θ 层至工件内表面的距离 $t_{\theta f}$ 、为壁厚减薄率 φ_f 、进给速度 v_0 ,其中进给速度 v_0 与进给比 f 和主轴转速 n 的关系为 $v_0=f \cdot n$,确定筒形件强力旋压变形区应变速率 $\dot{\epsilon}$ 在0.01/s-10/s范围内,通常在0.05/s-5/s内。因此,可确定高温力学性能试验的应变速率可在0.01/s-10/s范围内选取。

[0062] 本发明采用基于动态材料模型热加工图。材料在加工过程中单位时间内外力对单位体积材料所做的功 P ,即材料所获得的总能量。按照基于动态材料模型热加工图所述外力所做的功(能量)与材料发生塑性变形所消耗的能量之间的关系如图2所示。材料所获得的

总能量 P ,可表示为应力 σ 与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的乘积,包括耗散量 G ,即塑性变形所消耗的能量和耗散协量 J ,即微观组织演变时所消耗的能量两部分组成,其中耗散量 G 与耗散协量 J 的分配由如图3所示的应变速率敏感系数 m 决定。

[0063] 当材料处于理想线性能量耗散状态时,应变速率敏感系数 $m=1$,如图4(a)所示,此时耗散协量为最大值 $J_{\max}=P/2$ 。通常材料处于如图4(b)所示非线性能量耗散状态。因此采用如图5所示的功率耗散率因子 η 描述热塑性成形过程中,微观组织演变耗散能量所占比例。

[0064] 热塑性成形过程中,材料变形失稳现象主要有:局部塑性流动、绝热剪切带形成、硬质点周围空洞形核、晶界楔形开裂等。在基于动态材料模型热加工图中采用如图6所示的基于大塑性变形不可逆热力学极值原理的流变失稳判断准则对其进行判定。当如图6所示的包含应变速率敏感系数 m 及应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的稳判断准则成立,即表明在此温度 T 及应变速率 $\dot{\epsilon}$ 的条件下存在失稳的危险。

[0065] 本发明基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法实施的流程图如图7所示。

[0066] 实施例1

[0067] 材料为牌号Haynes230的镍基高温合金,其为Ni-Cr-W-Mo固溶强化型低层错能高温合金。其中热强旋所得筒形件(如图8所示)内腔直径 $d=54\text{mm}$,壁厚 $\delta=2\text{mm}$,长度 $l=500\text{mm}$ 。

[0068] 1、本实施例采用高温平面应变压缩试验进行高温力学性能试验。试样采用线切割的方式加工为如图9所示的 $10\times 15\times 20\text{mm}^3$ 长方体试样,试验过程中加载方式如图10所示。

[0069] 2、结合文献及试验确定Haynes230镍基高温合金为 1000°C 左右,因此确定高温力学性能的温度为 $950^\circ\text{C}-1200^\circ\text{C}$,每隔 50°C 选取一个水平,共六个水平;如图1所示筒形件强力旋压变形区应变速率 $\dot{\epsilon}$ 计算公式,获得应变速率范围为 $0.01/\text{s}-10/\text{s}$,因此设计试验的应变速率为 $0.01/\text{s}$ 、 $0.1/\text{s}$ 、 $1/\text{s}$ 、 $10/\text{s}$ 共四个水平。

[0070] 3、试验采用单因素试验设计方法,在Gleeble-3500热模拟试验机上共进行24组试验,试验过程中首先以 $10^\circ\text{C}/\text{s}$ 将试样加热到大于试验所需温度 50°C ,保温 3min 以使试样均匀受热,再以 $5^\circ\text{C}/\text{s}$ 降温至试验温度、保温 5min ,然后进行平面应变高温压缩,压缩过程中试验机对试样温度进行控制,以保证等温压缩,压缩到真实应变量为1后采用水冷的方式对试样进行淬火,以尽量保留变形组织,便于对试样进行微观组织研究,热加载曲线如图11所示。

[0071] 4、按照试验方案进行高温平面应变压缩试验,压缩过程中的真实应变 ϵ 按照压缩前后试样的厚度 h 与 $h-\Delta h$ 之比的自然对数求取,真实应力 σ 为砧头加载的力 F 比砧头宽 w 与试样长 b 之积,即加载力 F 与砧头与试样接触面积 $w\cdot b$ 之比,计算公式如图12所示,应变系数 A 与应力系数 B 取 0.866 。获得的流变应力应变关系如图13所示。

[0072] 5、对试验数据进行插值计算,将有限的24组试验条件扩展为精度合理的温度与应变速率的二维平面。按照图5所示公式计算所得的功率耗散率因子 η 在变形温度 T 与应变速率 $\dot{\epsilon}$ 构成的二维平面内的分布,并以等值线形式进行表达,即可获如图14所示的一定应变时功率耗散图;按照图6所示公式计算流变失稳判定准则的值在在温度与应变速率二维平面内的分布,获得如图15所示的一定应变时流变失稳图。并将图14、图15合并,并将满足图6

所示流变失稳判定准则的区域用灰色表示,即可简洁直观地获得如图16所示Haynes230合金在该应变时的热加工图。图中灰色区域即为流变失稳区,为塑性成形危险区;功率耗散率因子 η 的值较大的区域即为有利于热塑性成形的安全区。

[0073] 6、根据上述步骤5,获得本实施例力学性能试验中最大应变时(应变 $\varepsilon=1$)的热加工图(如图17所示),并对流变失稳区的试样进行金相组织观测,即可确定导致流变失稳的原因。获得Haynes230镍基高温合金的塑性成形危险区为: $\dot{\varepsilon} > 0.03$ 、 $T < 1025^\circ\text{C}$ 及 $\dot{\varepsilon} > 0.4$ 、 $1050^\circ\text{C} < T < 1200^\circ\text{C}$,有利于塑性成形的安全区为 $\dot{\varepsilon} < 0.295$ 、 $T > 1050^\circ\text{C}$ 。

[0074] 7、根据热加工图确定的有利于塑性成形的安全区,进行热强旋成形。由于Haynes230镍基高温合金是由美国Haynes公司生产,无法获得如图18所示所需的内腔直径 $d=54\text{mm}$ 、壁厚 $\Delta=5\text{mm}$ 的筒形件坯料。采用线切割加工的方式获得热强旋坯料,旋压过程中壁厚应由 5mm 减薄至 2mm ,减薄率为 60% 。将零件加长 30mm 作为修边余量,按体积不变原理确定筒形件坯料的长度为 $L=200\text{mm}$ (即 $\frac{[(54+2\times 2)^2-68^2]\times(500+30)}{(54+2\times 5)^2-54^2} \approx 200$)。设计一个直径

54mm ,长度 600mm 的旋压芯模,安装在热强旋立式旋压机主轴上,将规格为 $\text{O}54*5$ 、长度为 $L=200\text{mm}$ 的筒形件坯料套在芯模上。采用三旋轮反旋错距旋压成形(如图19所示),轴向错距量为 $a_{12}=a_{23}=2.5\text{mm}$ 。

[0075] 8、热强旋温度为 1100°C 、主轴转速为 $100\text{r}/\text{min}$ 、旋轮成形角为 20° 、进给比为 $0.6\text{mm}/\text{r}$,进行减薄率分别为 26% 、 28% 、 25% 的三道次旋压成形,由图1所示筒形件强力旋压变形区应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 计算公式可知,应变速率为 $0.13/\text{s}$ – $0.165/\text{s}$,在Haynes230镍基高温合金塑性成形的安全区内。旋压过程中采用高效节能的电磁感应加热,并通过红外测温仪及温度控制系统进行实时反馈调控,保证旋压区坯料温度在 1075°C – 1125°C 。

[0076] 9、旋压成形后测量旋压件的壁厚偏差 ψ_t 、直线度 $e_{\text{直}}$ 、椭圆度 $e_{\text{椭}}$ 作为评价其尺寸精度的指标。其中,壁厚偏差 ψ_t 为筒形件稳定旋压阶段壁厚最大值与最小值之差;直线度 $e_{\text{直}}$ 为被测筒形件固定长度范围内任意素线位于距离最小的两平行平面之间的距离;椭圆度 $e_{\text{椭}}$ 为筒形件稳定旋压阶段横截面的外径最大值与最小值之差。测量旋压件的壁厚偏差 ψ_t 为 0.107mm 、直线度 $e_{\text{直}}$ 为 0.17mm 、椭圆度 $e_{\text{椭}}$ 为 0.20mm ,满足零件要求。

[0077] 10、旋压成形后进行金相组织观测、力学性能检测及显微硬度测量,作为评价旋压件组织性能的指标。在旋压件的稳旋阶段(离口部 15mm)切取试验,通过镶嵌、磨、抛光后采用 $\text{HCl}:\text{HNO}_3$ 为 $3:1$ 的溶液腐蚀 3 分钟,在 $\text{MJ}-42$ 光学显微镜上进行金相组织观测,获得如图20所示细小均匀的等轴状完全再结晶组织,平均晶粒直径由旋压前的 $19.2\mu\text{m}$,细化至 $4.23\mu\text{m}$ 。利用金相组织观测后的试样在 $\text{HVS}-1000\text{Z}$ 型显微硬度计上进行显微硬度测量,旋前坯料的平均硬度为 191.14HV ,旋压后平均硬度增大至 315.74HV 。对旋压件进行单向拉伸力学性能试验,其屈服强度由坯料时的 480MPa 增加至 1110MPa ,抗拉强度基本不变,保持在 1200MPa 左右。

[0078] 由此可知,通过本发明的基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法,获得了良好的尺寸精度,且组织性能优异的Haynes230镍基合金筒形件。

[0079] 实施例2

[0080] 材料为304不锈钢,其为一种最常用的Cr–Ni不锈钢。其中热强旋所得筒形件(如图8所示)内腔直径 $d=50\text{mm}$,壁厚 $\delta=2\text{mm}$,长度 $l=500\text{mm}$ 。

[0081] 1、本实施例采用高温单向拉伸试验进行高温力学性能试验。试样采用线切割的方式加工为如图21所示的高温单向拉伸试样。

[0082] 2、结合文献及试验确定304不锈钢动态再结晶温度为950℃左右,因此确定高温力学性能的温度为900℃-1100℃,每隔50℃选取一个水平,共五个水平;同样设计试验的应变速率为0.01/s、0.1/s、1/s、10/s共四个水平。

[0083] 3、试验采用单因素试验设计方法,在Gleeble-3500热模拟试验机上共进行20组试验,试验过程中采用电阻加热的方式,热加载曲线如图11所示,首先以10℃/s将拉伸变形段加热到大于试验所需温度50℃,保温3min以使试样均匀受热,再以5℃/s降温至试验温度、保温5min,然后进行单向拉伸试验,直至试样断裂后采用水冷的方式对试样进行淬火。

[0084] 4、对试验数据进行插值计算,将有限的20组试验条件扩展为精度合理的温度与应变速率的二维平面。按照图5所示公式计算所得的功率耗散率因子 η ,以等值线形式进行表达,获得类似如图14所示的一定应变时功率耗散图;按照图6所示公式计算流变失稳判定准则的值在温度与应变速率二维平面内的分布,获得类似如图15所示的一定应变时流变失稳图。并功率耗散图、流变失稳图合并,并将满足图6所示流变失稳判定准则的区域用灰色表示,即可简洁直观地获得类似如图16所示的热加工图。图中灰色区域即为流变失稳区,为塑性成形危险区;功率耗散率因子 η 的值较大的区域即为有利于热塑性成形的安全区。获得304不锈钢塑性成形危险区为: $0.1 < \dot{\epsilon} < 1$ 、 $900^{\circ}\text{C} < T < 1000^{\circ}\text{C}$ 及 $\dot{\epsilon} > 1$ 、 $1000^{\circ}\text{C} < T < 1100^{\circ}\text{C}$,有利于塑性成形的安全区为 $\dot{\epsilon} < 0.5$ 、 $1000^{\circ}\text{C} < T < 1100^{\circ}\text{C}$ 。

[0085] 5、根据热加工图确定的有利于塑性成形的安全区,进行热强旋成形。由于内腔直径 $d=50\text{mm}$ 、壁厚 $\Delta=5\text{mm}$ 的304不锈钢管坯可以在市场上进行购买,因此,直接购买相关尺寸的管坯进行热强旋成形。将零件加长30mm作为修边余量,按体积不变原理确定筒形件坯料的长度为 $L=200\text{mm}$ (即 $\frac{[(54+2\times 2)^2-68^2]\times(500+30)}{(54+2\times 5)^2-54^2}\approx 200$)。设计一个直径50mm,长度

600mm的旋压芯模,安装在立式热强旋成形机主轴上,将规格为 $\text{O}50*5$ 、长度为 $L=200\text{mm}$ 的筒形件坯料套在芯模上。采用三旋轮反旋错距旋压成形(如图19所示),轴向错距量为 $a_{12}=a_{23}=2.5\text{mm}$ 。

[0086] 6、热强旋成形中坯料壁厚由5mm减薄至2mm,减薄率为60%。热强旋温度为1050℃、主轴转速为100r/min、旋轮成形角为20°、进给比为0.4mm/r,进行减薄率分别为26%、28%、25%的三道次旋压成形,由图1所示筒形件强力旋压变形区应变速率 $\dot{\epsilon}$ 计算公式可知,应变速率为0.088/s-0.11/s,在304不锈钢塑性成形的安全区内。旋压过程中采用高效节能的电磁感应加热,并通过红外测温仪及温度控制系统进行实时反馈调控,保证旋压区坯料温度在1025℃-1075℃。

[0087] 7、旋压成形后测量旋压件的壁厚偏差 ψ_t 、直线度 $e_{直}$ 、椭圆度 $e_{椭}$ 作为评价其尺寸精度的指标。测量旋压件的壁厚偏差 ψ_t 为0.102mm、直线度 $e_{直}$ 为0.11mm、椭圆度 $e_{椭}$ 为0.13mm,满足零件要求。

[0088] 8、旋压成形后进行金相组织观测、力学性能检测,作为评价旋压件组织性能的指标。在旋压件的稳旋阶段(离口部15mm)切取试验,通过镶嵌、磨、抛光后采用HCl:HNO₃为3:1的溶液腐蚀3分钟,在MJ-42光学显微镜上进行金相组织观测,获得细小均匀、呈一定纤维状的组织,其平均晶粒直径由旋压前的13.03 μm ,细化至2.26 μm 。对旋压件进行单向拉伸力学

性能试验,其屈服强度由坯料时的269MPa增加至560MPa,抗拉强度由705MPa增加至846MPa,伸长率保持在40%左右。

[0089] 由此可知,通过本发明的基于热加工图的筒形件热强旋形/性一体化控制方法,获得了良好的尺寸精度,且组织性能优异的筒形件。

[0090] 如上所述,便可较好地实现本发明。

[0091] 本发明的实施方式并不受上述实施例的限制,其他任何未背离本发明的精神实质与原理下所作的改变、修饰、替代、组合、简化,均应为等效的置换方式,都包含在本发明的保护范围之内。

$$\dot{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{v_0 \sin \alpha_p}{t_0 (1 - \phi_t)^2} \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{t_{\theta f}}{t_f} \right) \sin^2 \alpha_p}$$

图1

$$\begin{cases} P = \sigma \cdot \dot{\epsilon} = G + J \\ G = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} \\ J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \end{cases}$$

图2

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \Big|_{\epsilon, T} = \frac{\dot{\epsilon} \partial \sigma}{\sigma \partial \dot{\epsilon}} \Big|_{\epsilon, T} = \frac{\partial J}{\partial G}$$

图3

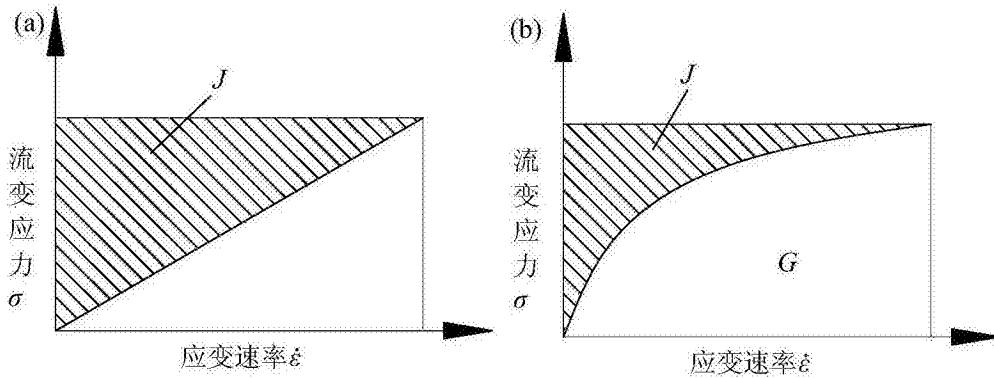


图4

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2J}{P} = \frac{2m}{m+1}$$

图5

$$\frac{\partial \left[\ln\left(\frac{m}{m+1}\right) \right]}{\partial(\ln \dot{\varepsilon})} + m < 0$$

图6



图7

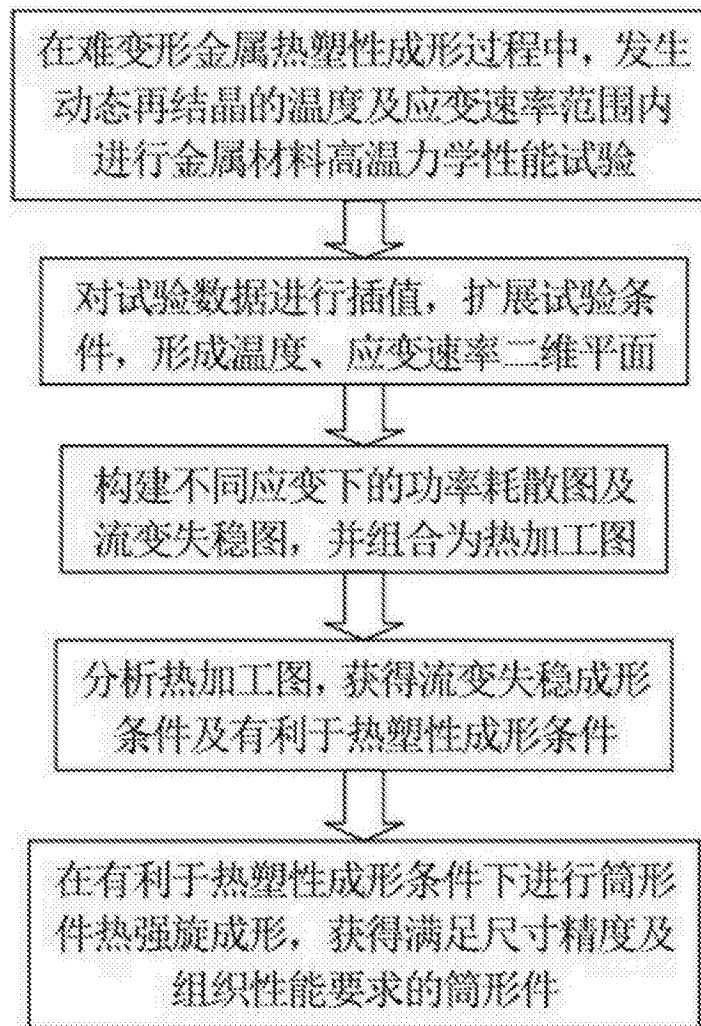


图8

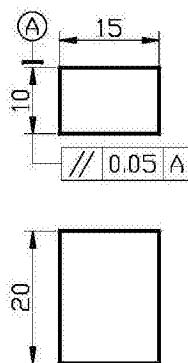


图9

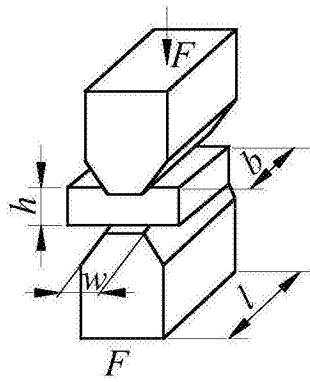


图10

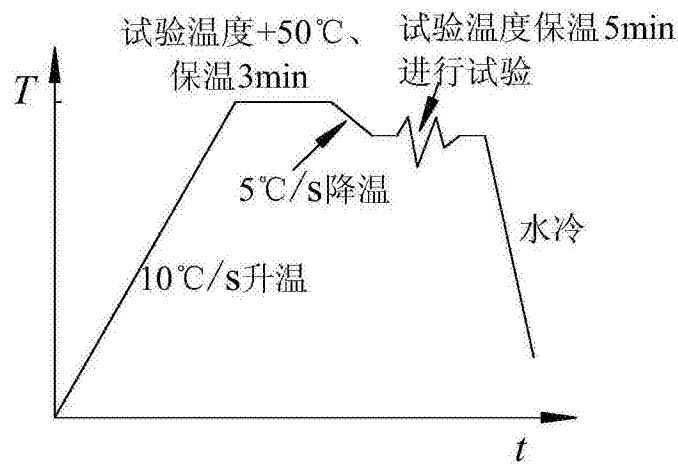


图11

$$\varepsilon = \frac{1}{A} \ln \left(\frac{h}{h - \Delta h} \right) \quad \sigma = B \frac{F}{w \cdot b}$$

图12

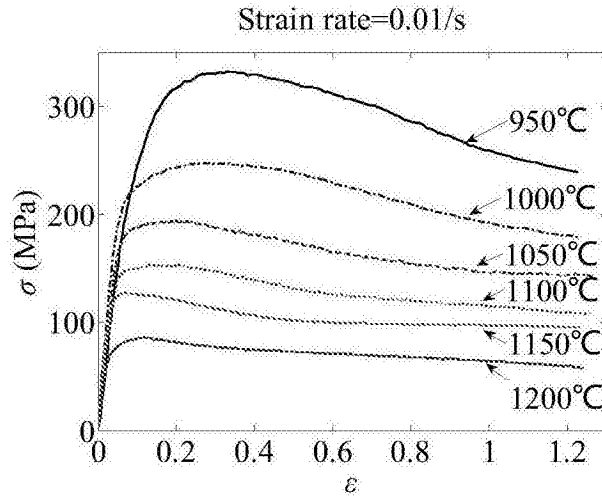


图13

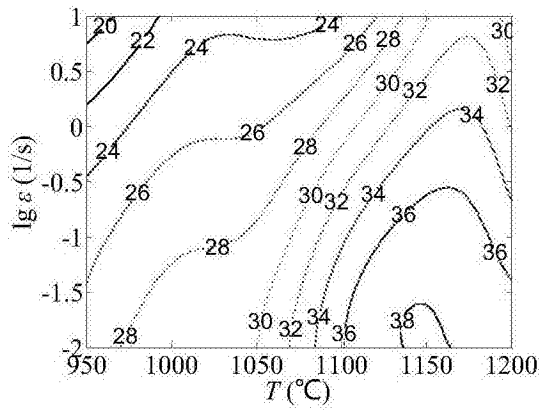


图14

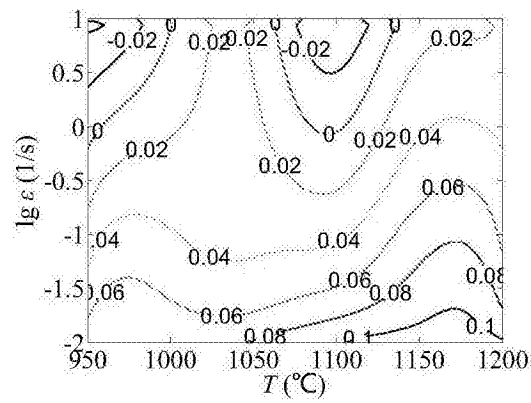


图15

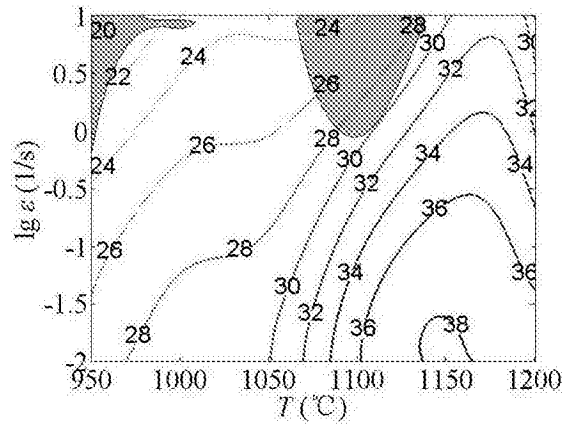


图16

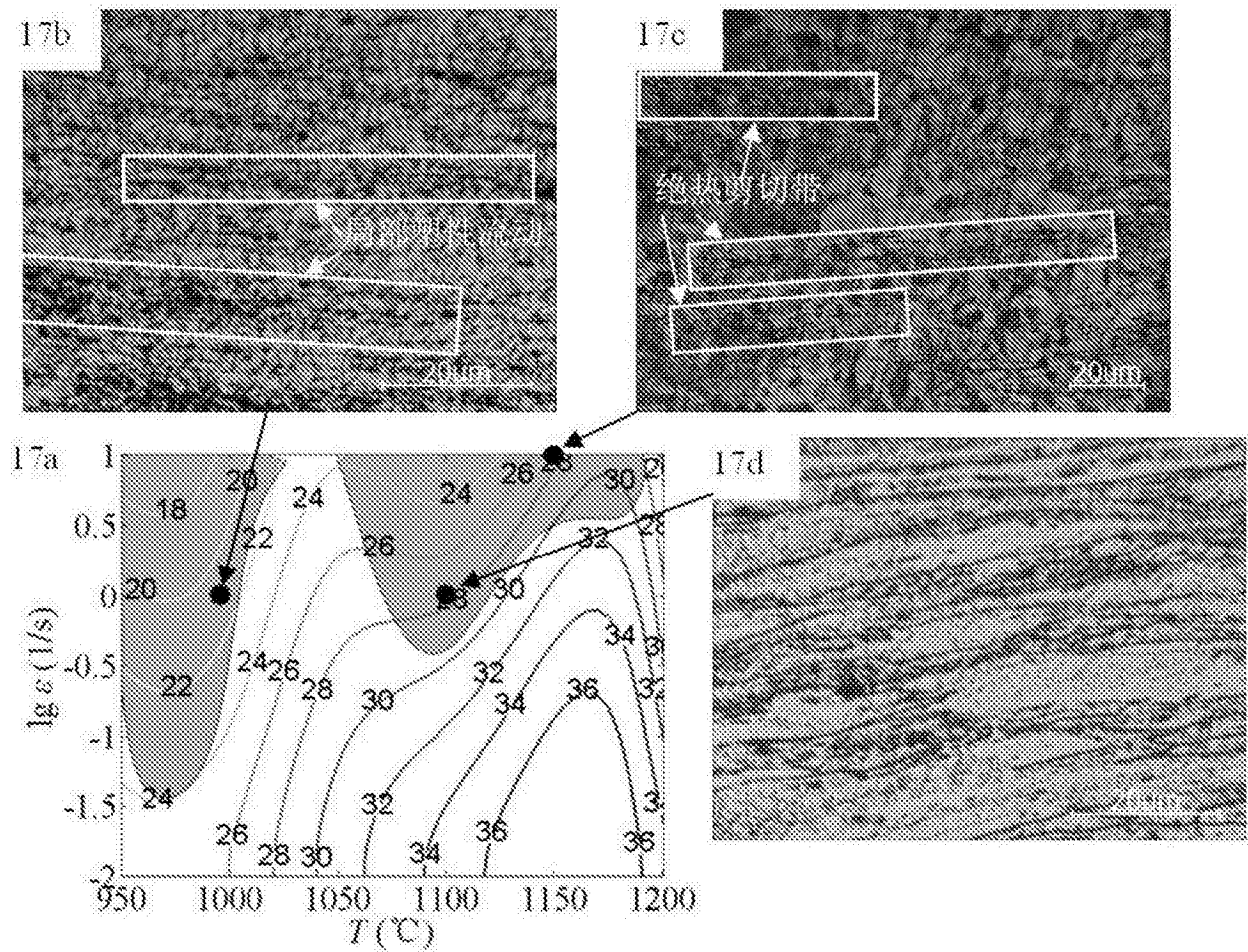


图17

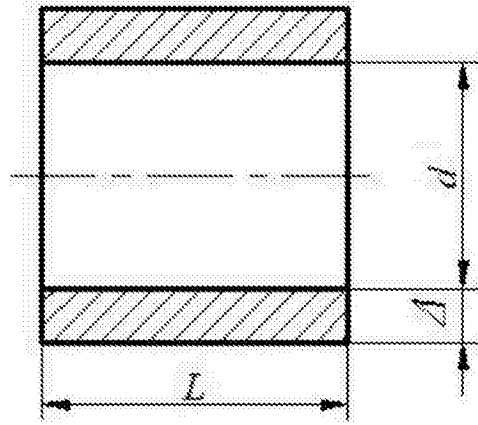


图18

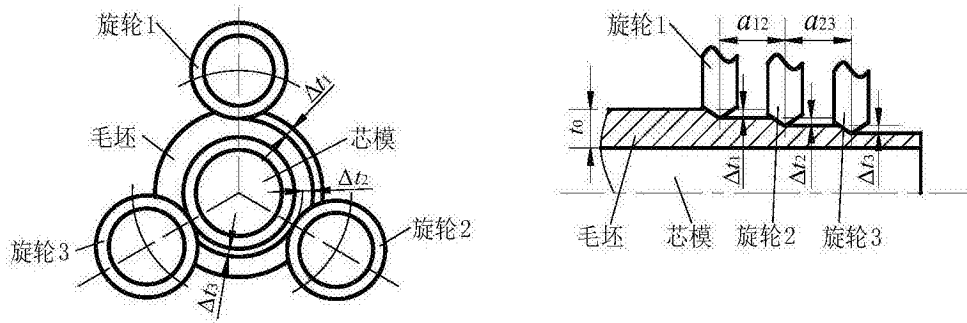


图19

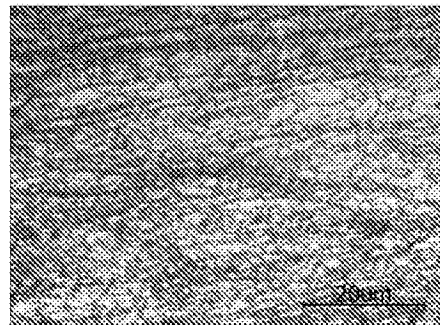


图20

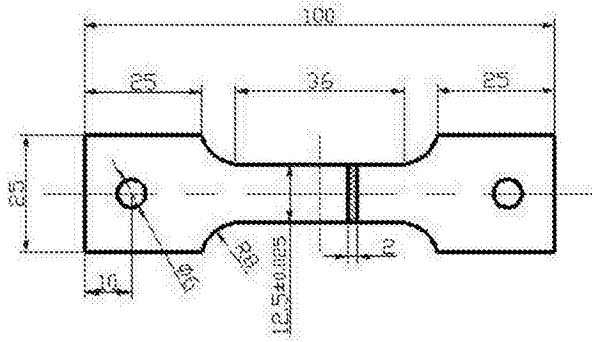


图21