



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109840337 A

(43)申请公布日 2019.06.04

(21)申请号 201711205994.0

(22)申请日 2017.11.27

(71)申请人 上海交通大学

地址 200240 上海市闵行区东川路800号

申请人 上海航天精密机械研究所

(72)发明人 陈明 陈杰 李中权 明伟伟

安庆龙 郭国强

(74)专利代理机构 上海交达专利事务所 31201

代理人 王毓理 王锡麟

(51) Int. Cl.

G06F 17/50(2006.01)

B23C 3/02(2006.01)

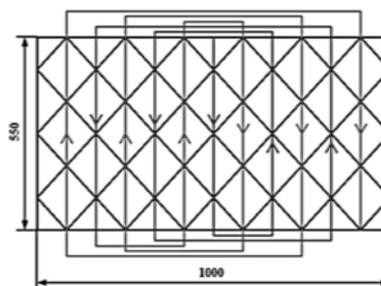
权利要求书1页 说明书3页 附图2页

## (54)发明名称

薄壁结构件的壁厚均匀性控制铣削加工方法

## (57)摘要

一种薄壁结构件的壁厚均匀性控制铣削加工方法,通过在ABAQUS有限元分析软件中导入工件模型以及J-C本构模型,以通过高速铣削试验确定的最优铣削加工工艺参数进行铣削路径仿真,根据仿真结果制定不同整体走刀方式和型腔内部走刀路径的组合方案,最后通过壁板铣削试验,确定最优走刀路径方案,使得工件变形最利于保持铣削过程中的壁厚均匀性,实现壁厚均匀性控制。本发明整体走刀路径左右对称,单个型腔内部采用螺旋走刀和摆线走刀结合的复合走刀方式,加工时间短,提高加工过程稳定性;使壁板结构件加工变形减少40%,且提高了加工效率,提高了刀具寿命,降低了加工成本。



1. 一种薄壁结构件的壁厚均匀性控制铣削加工方法,其特征在于,通过在ABAQUS有限元分析软件中导入工件模型以及J-C本构模型,以通过高速铣削试验确定的最优铣削加工工艺参数进行铣削路径仿真,根据仿真结果制定不同整体走刀方式和型腔内部走刀路径的组合方案,最后通过壁板铣削试验,确定最优走刀路径方案,使得工件变形最利于保持铣削过程中的壁厚均匀性,实现壁厚均匀性控制;

所述的最优走刀路径方案,通过壁板铣削试验确定得到,即装夹工件后,根据仿真结果确定的不同的整体走刀路径和型腔内部走刀路径,制定对不同组合的加工路径方案,以最优切削参数进行铣削试验,试验结束后使用超声测厚仪测量加工壁板的壁厚,最后对比壁板变形程度和壁厚均匀性确定最优的整体走刀路径和型腔内部走刀路径。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征是,所述的导入,将工件模型导入ABAQUS有限元分析软件,设置工件模型的初始残余应力,并对工件模型进行模拟真实装夹的约束。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征是,所述的最优铣削加工工艺参数,通过高速铣削试验,测量试验过程中的切削力、切削温度和已加工表面粗糙度,然后根据测量结果确定最优的切削参数。

4. 根据权利要求1或3所述的方法,其特征是,所述的最优铣削加工工艺参数具体包括:主轴转速的选择范围为16000r/min~20000r/min,每齿进给量的选择范围为0.15mm/z~0.25mm/z,轴向切深的选择范围为3mm~5mm,根据加工壁板网格的尺寸灵活选择刀具直径,从而确定径向切宽。

5. 根据权利要求1所述的方法,其特征是,所述的整体走刀路径包括:先从薄壁壁板网格状型腔的中间一列开始加工,然后间隔一列依次向两边加工,最后再回到中间,依次间隔一列加工剩下的各列型腔,充分利用未加工区域对正在加工区域提供刚性支撑,减小加工弱刚性区域导致的变形,达到型腔铣削时的壁厚控制;铣削完成一层后再从中间一列开始下一层的铣削,依次循环,逐层铣削,避免一次性铣削完一个型腔后刚性过弱导致在相邻型腔铣削时发生大变形,提高壁厚可控性;整体型腔铣削顺序左右对称。

6. 根据权利要求1所述的方法,其特征是,所述的型腔内部走刀路径包括:采用螺旋下刀的方式切入工件,单个型腔内部采用螺旋走刀和摆线走刀结合的复合走刀方式,具体为:在型腔中间部分采用螺旋走刀,以型腔中心点为铣削起点,沿着阿基米德螺旋线轨迹进行走刀;在型腔四个角的位置采用摆线走刀,刀具在自转的同时也在公转,且公转轨迹的包络线为螺旋线。

7. 根据权利要求1所述的方法,其特征是,所述的J-C本构模型是指:通过Hopkinson压杆实验分析结构件材料的动态力学行为,建立得到的2219航空铝合金的J-C本构模型,具体

为:
$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n)(1 + C \cdot \ln(1000 \times \dot{\varepsilon})) \left( 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right)$$
 其中:A=376;B=230;C=0.0011;m=

2.86;n=0.10;T<sub>m</sub>=816K。

## 薄壁结构件的壁厚均匀性控制铣削加工方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及的是一种航天器制造领域的技术,具体是一种薄壁结构件的壁厚均匀性控制铣削加工方法。

### 背景技术

[0002] 航天器燃料筒弧形壁板,外壁光滑,内壁有菱形网格状型腔,目的是减轻航天器的重量。弧形壁板型腔加工过程中需要控制壁厚均匀。弧形壁板的复杂结构使其在铣削过程中容易产生加工变形,导致材料过切或欠切,造成壁厚不均。高速切削对刀具走刀轨迹的设置提出了更高的要求,在高速切削中由于切削速度和进给速度都很快,如果走刀方式不合理,在切削过程中就极易引起切削负荷的突变,从而给加工带来冲击,影响加工精度,损伤刀具甚至设备,这种损害要比在普通切削时严重的多。高速切削过程中应根据不同的加工对象以及形状特征而选择相应的走刀路径。因此,在航天器壁板零件的铣削加工中,需要合理规划各个型腔的加工顺序、深度或层优先及每个型腔内部的走刀路径,对航天器弧形壁板的壁厚均匀性进行有效控制。

### 发明内容

[0003] 本发明针对现有技术对弧形薄壁结构件在铣削加工中不能有效控制壁厚的缺点,提出一种薄壁结构件的壁厚均匀性控制铣削加工方法,针对弧形薄壁壁板结构件的壁厚均匀性控制,采用螺旋下刀的方式切入工件,型腔内部采用螺旋走刀和摆线走刀结合的复合走刀方式,整体采用特殊的走刀方式,逐层加工,铣削薄壁壁板网格状型腔。

[0004] 本发明是通过以下技术方案实现的:

[0005] 本发明涉及一种薄壁结构件的壁厚均匀性控制铣削加工方法,通过在ABAQUS有限元分析软件中导入工件模型以及J-C本构模型,以通过高速铣削试验确定的最优铣削加工工艺参数进行铣削路径仿真,根据仿真结果制定不同整体走刀方式和型腔内部走刀路径的组合方案,最后通过壁板铣削试验,确定最优走刀路径方案,使得工件变形最利于保持铣削过程中的壁厚均匀性,实现壁厚均匀性控制。

[0006] 所述的导入是指:将工件模型导入ABAQUS有限元分析软件,设置工件模型的初始残余应力,并对工件模型进行模拟真实装夹的约束。

[0007] 所述的最优铣削加工工艺参数,通过高速铣削试验,测量试验过程中的切削力、切削温度和已加工表面粗糙度,然后根据测量结果确定最优的切削参数。

[0008] 所述的铣削路径仿真是指:模拟不同走刀路径对薄壁结构件铣削变形影响程度的过程,具体为:结合已有工艺,提出不同的型腔铣削顺序和型腔内部走刀路径方案,通过ABAQUS进行铣削仿真,然后去除施加于工件模型上的装夹约束,让工件彻底释放应力,分析不同走刀路径方案的工件变形过程。

[0009] 所述的最优走刀路径方案,通过壁板铣削试验确定得到,即装夹工件后,根据仿真结果确定的不同的整体走刀路径和型腔内部走刀路径,制定对不同组合的加工路径方案,

以最优切削参数进行铣削试验,试验结束后使用超声测厚仪测量加工壁板的壁厚,最后对比壁板变形程度和壁厚均匀性确定最优的整体走刀路径和型腔内部走刀路径。

[0010] 所述的整体走刀路径包括:先从薄壁壁板网格状型腔的中间一列开始加工,然后间隔一列依次向两边加工,最后再回到中间,依次间隔一列加工剩下的各列型腔,充分利用未加工区域对正在加工区域提供刚性支撑,减小加工弱刚性区域导致的变形,达到型腔铣削时的壁厚控制;铣削完成一层后再从中间一列开始下一层的铣削,依次循环,逐层铣削,避免一次性铣削完一个型腔后刚性过弱导致在相邻型腔铣削时发生大变形,提高壁厚可控性;整体型腔铣削顺序左右对称。

[0011] 所述的型腔内部走刀路径包括:采用螺旋下刀的方式切入工件,单个型腔内部采用螺旋走刀和摆线走刀结合的复合走刀方式,具体为:在型腔中间部分采用螺旋走刀,以型腔中心点为铣削起点,沿着阿基米德螺旋线轨迹进行走刀;在型腔四个角的位置采用摆线走刀,刀具在自转的同时也在公转,且公转轨迹的包络线为螺旋线。

#### 技术效果

[0012] 与现有技术相比,本发明的技术效果包括:

[0013] 本发明提出的整体走刀路径为先从薄壁壁板网格状型腔的中间一列开始加工,然后间隔一列逐渐向两边加工,最后再回到中间,依次间隔一列加工剩下的各列型腔,且整体型腔加工顺序左右对称。

[0014] 本发明提出的薄壁壁板结构件网格状型腔的加工方式为分层铣削,逐层进行材料去除,,每一层铣削的切削深度不宜过大,有效避免一个型腔一次性铣削完成造成的刚性过弱,使变形可控,壁厚可控。

[0015] 本发明提出网格状型腔内部采用螺旋走刀和摆线走刀结合的复合走刀方式,加工时间短,走刀平稳,冲击小,提高加工过程稳定性。

[0016] 本发明提供的上述加工工艺,从弧形薄壁壁板结构件的弱刚性区域开始加工,充分利用未加工区域对弱刚性区域提供刚性支撑,减小弱刚性区域的变形,减小弱刚性区域由于变形导致的过切,有效控制壁厚,使薄壁壁板结构件加工变形减少40%,提高了壁厚均匀性,且提高了加工效率,提高了刀具寿命,降低了加工成本。

#### 附图说明

[0017] 图1为薄壁壁板结构件高速铣削加工试验现场图;

[0018] 图2为薄壁壁板结构件高速铣削仿真结果工件变形云图;

[0019] 图3为薄壁壁板结构件铣削加工整体走刀路径示意图;

[0020] 图4为薄壁壁板结构件单个网格状型腔内部复合走刀路径示意图。

#### 具体实施方式

[0021] 本实施例旨在对如图1所示的弧形薄壁壁板结构件在铣削加工中的壁厚均匀性进行控制,即采用螺旋下刀的方式切入工件,型腔内部采用螺旋走刀和摆线走刀结合的复合走刀方式,整体采用特殊的走刀方式,逐层加工,铣削薄壁壁板网格状型腔。

[0022] 本实施例具体通过以下步骤实现:

[0023] 第一步,通过Hopkinson压杆实验分析结构件材料的动态力学行为,建立2219航空

铝合金的J-C本构模型为：
$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n) (1 + C \cdot \ln(1000 \times \dot{\varepsilon})) \left( 1 - \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right)$$
，其中： $A=376$ ； $B=230$ ； $C=0.0011$ ； $m=2.86$ ； $n=0.10$ ； $T_m=816K$ 。

[0024] 第二步，通过高速铣削试验确定最优铣削加工工艺参数：进行高速铣削加工试验，测量试验过程中的切削力、切削温度和已加工表面粗糙度，根据测量结果确定的最优铣削加工工艺参数包括：主轴转速的选择范围为16000r/min~20000r/min，每齿进给量的选择范围为0.15mm/z~0.25mm/z，轴向切深的选择范围为3mm~5mm，根据加工壁板网格的尺寸灵活选择刀具直径，从而确定径向切宽；

[0025] 第三步，基于ABAQUS物理仿真分析结构件铣削加工变形的发展过程：在ABAQUS中导入工件模型，即通过UG (Unigraphics NX) 系统中建立的长方体毛坯模型，赋予第一步确定的J-C本构模型，设置工件初始残余应力，并对工件进行装夹约束，以第二步确定的最优切削参数进行仿真，仿真结束后去除装夹约束使工件彻底释放应力，仿真结果如图2所示，分析加工过程中工件的变形过程。针对此类结构件的加工变形方式，制定不同整体走刀路径和型腔内部走刀路径方案。

[0026] 第四步，通过壁板铣削试验确定最优走刀路径：装夹工件，根据第三步制定的不同的整体走刀路径和型腔内部走刀路径，制定对不同组合的加工路径方案，以第二步确定的最优切削参数进行壁板铣削试验，试验结束后使用超声波测厚仪测量加工壁板的壁厚。对比壁板变形程度和壁厚均匀性确定最优的整体走刀路径和型腔内部走刀路径。

[0027] 如图3所示，铣削加工时整体走刀路径为先从薄壁壁板网格状型腔的中间一列开始加工，然后间隔一列逐渐向两边加工，最后再回到中间，依次间隔一列加工剩下的各列型腔，充分利用未加工区域对正在加工区域提供刚性支撑，减小加工弱刚性区域造成的变形；且整体型腔铣削顺序左右对称。

[0028] 薄壁壁板结构件网格状型腔的加工方式为分层铣削，铣削完成一层后再从中间一列开始下一层的铣削，依次循环，逐层铣削，避免一次性铣削完一个型腔后刚性过弱导致在相邻型腔铣削时发生大变形；每一层铣削的切削深度不宜过大。

[0029] 如图4所示，网格状型腔内部采用螺旋走刀和摆线走刀结合的复合走刀方式，具体为：在型腔中间部分采用螺旋走刀，以型腔中心点为铣削起点，沿着阿基米德螺旋线轨迹进行走刀；在型腔四个角的位置采用摆线走刀，刀具在自转的同时也在公转，且公转轨迹的包络线为螺旋线，这种走刀方式加工时间短，走刀平稳，冲击小，提高加工过程稳定性。

[0030] 本发明提供的上述加工工艺，从弧形薄壁壁板结构件的弱刚性区域开始加工，充分利用未加工区域对弱刚性区域提供刚性支撑，减小弱刚性区域的变形，减小弱刚性区域由于变形导致的过切，有效控制壁厚，使薄壁壁板结构件加工变形减少40%，提高了壁厚均匀性，且提高了加工效率，提高了刀具寿命，降低了加工成本。

[0031] 上述具体实施可由本领域技术人员在不背离本发明原理和宗旨的前提下以不同的方式对其进行局部调整，本发明的保护范围以权利要求书为准且不由上述具体实施所限，在其范围内的各个实现方案均受本发明之约束。

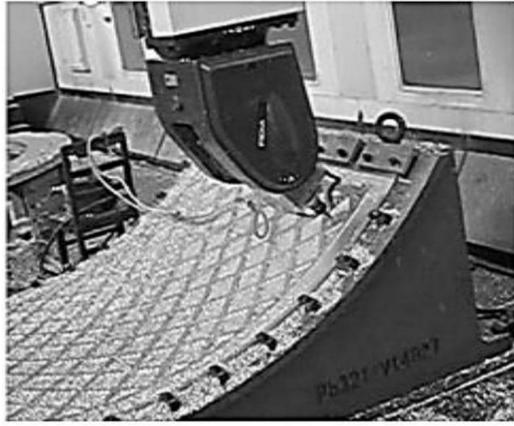


图1

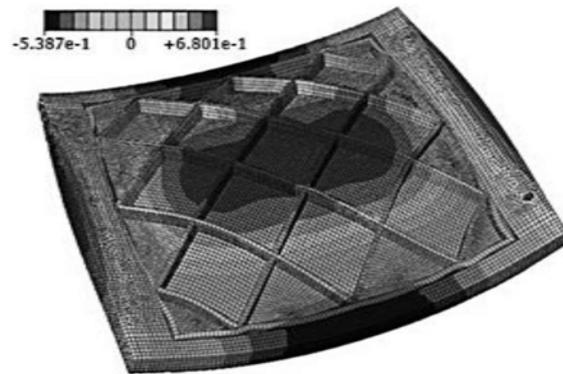


图2

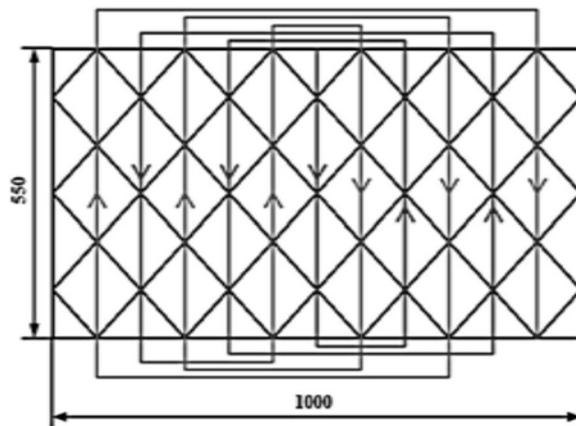


图3

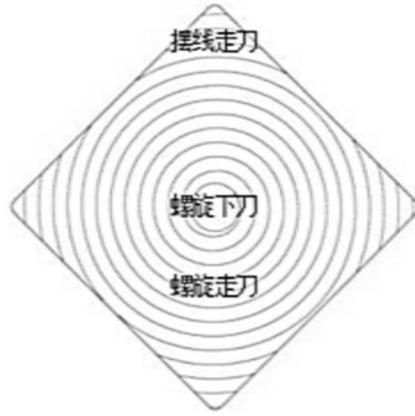


图4