



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108176884 B

(45)授权公告日 2019.01.11

(21)申请号 201810133341.4

(22)申请日 2018.02.09

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 108176884 A

(43)申请公布日 2018.06.19

(73)专利权人 西北工业大学
地址 710072 陕西省西安市碑林区友谊西路127号

(72)发明人 任军学 李祥宇 周于轲 梁永收
田荣鑫 杨吉星 张晗 刘聪乐

(74)专利代理机构 陕西增瑞律师事务所 61219
代理人 刘春

(51)Int.Cl.
B23C 3/18(2006.01)
B23Q 3/06(2006.01)

(56)对比文件

CN 105436819 A,2016.03.30,
CN 103990840 A,2014.08.20,
CN 104227103 A,2014.12.24,
CN 108345744 A,2018.07.31,
JP H09184032 A,1997.07.15,全文.

审查员 仓公林

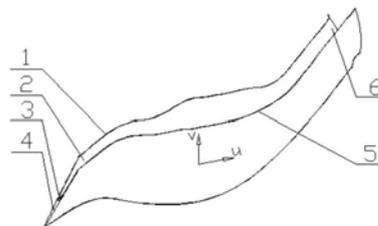
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54)发明名称

复材叶片前缘钛合金加强边内外同步对称铣加工方法

(57)摘要

本发明公开了一种复材叶片前缘钛合金加强边内外同步对称铣加工方法,步骤一、根据待加工加强边的大小选择适当尺寸的方形毛坯或模锻毛坯,在三坐标数控铣床上快速铣削得到加强边的外轮廓;步骤二、根据加强边内腔的尺寸,筛选出n种不同的刀具,根据n种刀具的球头半径,将加强边中能进行对称铣加工的区域划分为n个加工子区域;步骤三、对加工子区域交替完成粗铣、半精铣和精铣,实现对加强边压气面与吸气面重叠区域内外同步加工。解决了现有技术中发动机前缘钛合金加强边精密加工的变形控制问题。



1. 复材叶片前缘钛合金加强边内外同步对称铣加工方法, 其特征在于, 所述复材叶片前缘钛合金加强边是发动机的复材叶片前缘钛合金加强边, 按照以下步骤实施:

步骤一、根据待加工加强边的大小选择适当尺寸的方形毛坯或模锻毛坯, 在三坐标数控铣床上快速铣削得到加强边的外轮廓;

步骤二、根据加强边内腔的尺寸, 筛选出n种不同的刀具, 根据n种刀具的球头半径, 将加强边中能进行对称铣加工的区域划分为n个加工子区域;

具体方法为:

将加强边的曲面加工区域划分为吸气面区域 S_{STOL} 、压气面区域低边区域 S_{PTOL} 和内槽底部圆弧区域 S_B , 吸气面区域简称高边区域, 压气面区域简称低边区域,

适用进行同步对称铣加工的区域是高于内槽底部圆弧区域的高边内外侧 S_S 与低边曲面内外侧 S_P ; 设定 S_S 中和 S_P 相比高出的部分区域为高边单独区域 S_S^2 , 重叠的部分区域为高边重叠区域 S_S^1 , 加工 S_S^1 与 S_P 区域时, 将它们划分加工子区域的步骤为:

步骤1、根据叶尖处内腔尺寸, 筛选出n种球头半径不同的球头刀或锥形刀;

步骤2、假设内腔精加工所用球头刀按球头部分直径依次减小分为n类, 分别为 $\{d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_n\}$ ($1 \leq i \leq n$), 则 S_S^1 与 S_P 可分别被分为n个区域;

步骤3、设定沿叶尖到叶根方向为u向, $0 \leq u \leq 1$, 即叶尖为 $u=0$, 叶根为 $u=1$; 内腔开口方向为v向, $0 \leq v \leq 1$, 即内腔底部为 $v=0$, 内腔开口处为 $v=1$;

对于给定加工刀具直径为 d_1 , 在给定 $u=u_0$ 可得到等 u_0 参数线为 $B^S(u_0, v)$ 和 $B^P(u_0, v)$, 进而可分别得到内腔中到两侧距离为 $d_1/2$ 的等距曲线 $B_{d_1}^S(u_0, v)$ 和 $B_{d_1}^P(u_0, v)$;

$$B_{d_1}^S(u_0, v) = B^S(u_0, v) + \frac{d_1}{2} * n_S \quad (1),$$

$$B_{d_1}^P(u_0, v) = B^P(u_0, v) + \frac{d_1}{2} * n_P \quad (2),$$

其中: u_0 表示给定的任意u向参数;

d_1 表示给定刀具直径;

$B^S(u_0, v)$ 表示高边重叠区域 S_S^1 上在 $u=u_0$ 等 u_0 参曲线;

$B^P(u_0, v)$ 表示低边曲面内外侧 S_P 上在 $u=u_0$ 等 u_0 参曲线;

n_S 表示 $B^S(u_0, v)$ 上任意一点法向矢量, 方向为指向内腔方向;

n_P 表示 $B^P(u_0, v)$ 上任意一点法向矢量, 方向为指向内腔方向;

步骤4、求取等距曲线 $B_{d_1}^S(u_0, v)$ 和 $B_{d_1}^P(u_0, v)$ 的交点 P_{d_1} ;

步骤5、寻找 P_{d_1} 到等参线 $B^S(u_0, v)$ 上的垂足点 $P_1^S(u_0, v_1^S)$, 以及到等参线 $B^P(u_0, v)$ 上的垂足点 $P_1^P(u_0, v_1^P)$, 两个垂足点即为侧壁上的切触点;

$$P_1^S(u_0, v_1^S) = P_{d_1} - \frac{d_1}{2} * n_{d_1}^S \quad (3),$$

$$P_1^P(u_0, v_1^P) = P_{d1} - \frac{d_1}{2} * n_{d1}^P \quad (4),$$

其中, n_{d1}^S 代表 P_1^S 点在 $B^S(u_0, v)$ 上指向 P_{d1} 的法向矢量;

n_{d1}^P 代表 P_{d1} 点在 $B^P(u_0, v)$ 上指向 P_{d1} 的法向矢量;

步骤6、由于 $P_1^S(u_0, v_1^S)$ 与 $P_1^P(u_0, v_1^P)$ 已求得, 而 u_0 已知, 故可分别得到 $P_1^S(u_0, v_1^S)$ 与 $P_1^P(u_0, v_1^P)$ 在 v 向参数 v_1^S 和 v_1^P ;

步骤7、对 n 类刀具, 逐个重复上述步骤3至步骤6, 分别得到 S_S^1 和 S_P 的一系列 v 向参数 $\{v_1^S, \dots, v_i^S, \dots, v_n^S\}$ 和 $\{v_1^P, \dots, v_i^P, \dots, v_n^P\}$;

步骤8、分别按照 $\{v_1^S, \dots, v_i^S, \dots, v_n^S\}$ 和 $\{v_1^P, \dots, v_i^P, \dots, v_n^P\}$ 取 S_S^1 和 S_P 上的 u 向等参线, 至此, S_S^1 和 S_P 将被 n 条等 v 参线划为 n 个区域, 并对划分区域沿内腔开口至内腔底端方向即 $-v$ 方向进行编号即为 $\{1, 2, \dots, i, \dots, n\}$;

步骤三、对加工子区域交替完成粗铣、半精铣和精铣, 实现对加强边压气面与吸气面重叠区域内外同步加工, 具体方法为:

当对称区域位于高边区域 S_S^2 时, 其交替对称粗加工、半精加工、精加工的过程是:

$$\begin{aligned} & \text{粗加工 } G_{e,i+1}^2 \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{粗加工 } G_{i,i+1}^2 \longrightarrow \text{半精加工 } G_{e,i}^2 \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{半精加工 } G_{i,i}^2 \\ & \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{精加工 } G_{e,i}^2 \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{精加工 } G_{i,i}^2 \end{aligned} ;$$

当对称区域位于 S_S^1 与 S_P 重叠区域上时, 其交替对称粗加工、半精加工、精加工的过程是:

$$\begin{aligned} & \text{粗加工 } G_{i,i+1}^1 \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{粗加工 } D_{i,i+1} \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{粗加工 } D_{e,i+1} \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{粗加工 } G_{e,i+1}^1 \\ & \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{精加工 } G_{i,i}^1 \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{精加工 } D_{i,i} \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{半精加工、精加工 } D_{e,i} \\ & \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{半精加工、精加工 } G_{e,i}^1 \end{aligned} .$$

2. 如权利要求1所述的复材叶片前缘钛合金加强边内外同步对称铣加工方法, 其特征在于, 对所述步骤8中划分出的子区域进行编号: 高低两边区域沿 v 方向进行编号, 对于高边 S_S^2 外侧区域外侧划分为 $G_{e,1}^2, \dots, G_{e,i}^2, \dots, G_{e,n}^2$; 内侧为 $G_{i,1}^2, \dots, G_{i,i}^2, \dots, G_{i,n}^2$ 。对于高边为 S_S^1 外侧区域划分为 $G_{e,1}^1, \dots, G_{e,i}^1, \dots, G_{e,n}^1$, 内侧为 $G_{i,1}^1, \dots, G_{i,i}^1, \dots, G_{i,n}^1$ 。对于低边 S_P 外侧区域划分为 $D_{e,1}, \dots, D_{e,i}, \dots, D_{e,n}$, 内侧为 $D_{i,1}, \dots, D_{i,i}, \dots, D_{i,n}$, 在粗加工到第 $i+1$ 层对称区域时, 接着半精、精加工第 i 层对称区域。

3. 如权利要求1所述的复材叶片前缘钛合金加强边内外同步对称铣加工方法, 其特征在于, 步骤二中快速铣的加工余量为 $5\text{mm} \sim 7\text{mm}$; 步骤三中粗铣加工时余量为 $3\text{mm} \sim 5\text{mm}$, 半精加工时余量为 0.7mm 和精加工时余量为 0.3mm 。

复材叶片前缘钛合金加强边内外同步对称铣加工方法

【技术领域】

[0001] 本发明属于精密、超精密切削加工技术领域，具体涉及一种复材叶片前缘钛合金加强边内外同步对称铣加工方法。

【背景技术】

[0002] 前缘钛合金加强边的内腔槽呈现深、窄、狭长、扭曲度大等特点，截面大致呈V型，是大扭度超薄壁特征与深窄狭长V型腔槽特征的深度融合，整体呈复杂薄壁深窄V型长槽特征，工程应用中对其加工成型提出了较高的要求。利用传统数控加工走刀方式（先加工外形再加工内腔）加工时，可以发现，由于加强边的特征，在加工过程中暴露出的切削稳定性差、残余应力引起的变形大等问题，出现明显的扭转变形现象，严重地影响了加强边的加工精度；而利用阶梯对称铣时，由于内腔特征问题会产生大量的抬刀、换刀，空走刀，极大影响了零件整体的加工效率。

[0003] 故现有的加工工艺无法满足加强边的加工技术要求，很有必要提出一种新的更加适合的加工工艺方法，实现对加强边加工变形的有效控制，提高加工精度与效率，以满足对具有薄壁、深槽等特征零件的精密切削加工的迫切需求。

【发明内容】

[0004] 本发明的目的是提供一种复材叶片前缘钛合金加强边内外同步对称铣加工方法，以解决现有技术中发动机前缘钛合金加强边精密加工的变形控制问题。

[0005] 本发明采用以下技术方案：复材叶片前缘钛合金加强边内外同步对称铣加工方法，按照以下步骤实施：

[0006] 步骤一、根据待加工加强边的大小选择适当尺寸的方形毛坯或模锻毛坯，在三坐标数控铣床上快速铣削得到加强边的外轮廓；

[0007] 步骤二、根据加强边内腔的尺寸，筛选出n种不同的刀具，根据n种刀具的球头半径，将加强边中能进行对称铣加工的区域划分为n个加工子区域；

[0008] 步骤三、对加工子区域交替完成粗铣、半精铣和精铣，实现对加强边压气面与吸气面重叠区域内外同步加工。

[0009] 进一步的，将加强边的曲面加工区域划分为吸气面区域 S_{STOL} 、压气面区域低边区域 S_{PTOL} 和内槽底部圆弧区域 S_B ，吸气面区域简称高边区域，压气面区域简称低边区域；

[0010] 加强边中适用进行同步对称铣加工的区域是高于内槽底部圆弧区域的高边内外侧 S_S 与低边曲面内外侧 S_P ；设定 S_S 中和 S_P 相比高出的部分区域为高边单独区域 S_S^2 ，重叠的部分区域为高边重叠区域 S_S^1 ；设定沿叶尖到叶根方向为u向， $0 \leq u \leq 1$ ，即叶尖为 $u=0$ ，叶根为 $u=1$ ；内腔开口方向为v向， $0 \leq v \leq 1$ ，即内腔底部为 $v=0$ ，内腔开口处为 $v=1$ ；

[0011] 步骤二中加工 S_S^1 与 S_P 区域时，将它们划分加工子区域的具体步骤如下：

[0012] 步骤1、根据叶尖处内腔尺寸，筛选出n种球头半径不同的球头刀或锥形刀；

[0013] 步骤2、假设内腔精加工所用球头刀按球头部分直径依次减小分为n类,分别为 $\{d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_n\}$ ($1 \leq i \leq n$), 则 S_S^1 与 S_P 可分别被分为n个区域;

[0014] 步骤3、对于给定加工刀具直径为 d_1 , 在给定 $u = u_0$ 可得到等 u_0 参数线为 $B^S(u_0, v)$ 和 $B^P(u_0, v)$, 进而可分别得到内腔中到两侧距离为 $d_1/2$ 的等距曲线 $B_{d_1}^S(u_0, v)$ 和 $B_{d_1}^P(u_0, v)$;

$$[0015] \quad B_{d_1}^S(u_0, v) = B^S(u_0, v) + \frac{d_1}{2} * n_S \quad (1),$$

$$[0016] \quad B_{d_1}^P(u_0, v) = B^P(u_0, v) + \frac{d_1}{2} * n_P \quad (2),$$

[0017] 其中: u_0 表示给定的任意 u 向参数;

[0018] d_1 表示给定刀具直径;

[0019] $B^S(u_0, v)$ 表示高边重叠区域 S_S^1 上在 $u = u_0$ 等 u_0 参曲线;

[0020] $B^P(u_0, v)$ 表示低边曲面内外侧 S_P 上在 $u = u_0$ 等 u_0 参曲线;

[0021] n_S 表示 $B^S(u_0, v)$ 上任意一点法向矢量, 方向为指向内腔方向;

[0022] n_P 表示 $B^P(u_0, v)$ 上任意一点法向矢量, 方向为指向内腔方向;

[0023] 步骤4、求取等距曲线 $B_{d_1}^S(u_0, v)$ 和 $B_{d_1}^P(u_0, v)$ 的交点 P_{d_1} ;

[0024] 步骤5、寻找 P_{d_1} 到等参线 $B^S(u_0, v)$ 上的垂足点 $P_1^S(u_0, v_1^S)$, 以及到等参线 $B^P(u_0, v)$ 上的垂足点 $P_1^P(u_0, v_1^P)$, 两个垂足点即为侧壁上的切触点;

$$[0025] \quad P_1^S(u_0, v_1^S) = P_{d_1} - \frac{d_1}{2} * n_{d_1}^S \quad (3),$$

$$[0026] \quad P_1^P(u_0, v_1^P) = P_{d_1} - \frac{d_1}{2} * n_{d_1}^P \quad (4),$$

[0027] 其中, $n_{d_1}^S$ 代表 P_{d_1} 点在 $B^S(u_0, v)$ 上指向 P_{d_1} 的法向矢量;

[0028] $n_{d_1}^P$ 代表 P_{d_1} 点在 $B^P(u_0, v)$ 上指向 P_{d_1} 的法向矢量;

[0029] 步骤6、由于 $P_1^S(u_0, v_1^S)$ 与 $P_1^P(u_0, v_1^P)$ 已求得, 而 u_0 已知, 故可分别得到 $P_1^S(u_0, v_1^S)$ 与 $P_1^P(u_0, v_1^P)$ 在 v 向参数 v_1^S 和 v_1^P ;

[0030] 步骤7、对n类刀具, 逐个重复上述步骤3至步骤6, 分别得到 S_S^1 和 S_P 的一系列 v 向参数 $\{v_1^S, \dots, v_i^S, \dots, v_n^S\}$ 和 $\{v_1^P, \dots, v_i^P, \dots, v_n^P\}$;

[0031] 步骤8、分别按照 $\{v_1^S, \dots, v_i^S, \dots, v_n^S\}$ 和 $\{v_1^P, \dots, v_i^P, \dots, v_n^P\}$ 取 S_S^1 和 S_P 上的 u 向等参线, 至此, S_S^1 和 S_P 将被n条等 v 参线划为n个区域, 并对划分区域沿内腔开口至内腔底端方向(即 $-v$ 方向)进行编号即为 $\{1, 2, \dots, i, \dots, n\}$ 。

[0032] 进一步的, 对步骤8中划分出的子区域进行编号: 高低两边区域沿 v 方向进行编号, 对于高边 S_S^2 外侧区域外侧划分为 $G_{e,1}^2, \dots, G_{e,i}^2, \dots, G_{e,n}^2$; 内侧为 $G_{i,1}^2, \dots, G_{i,i}^2, \dots, G_{i,n}^2$ 。对于高

边为 S_S^1 外侧区域划分为 $G_{e,1}^1, \dots, G_{e,i}^1, \dots, G_{e,n}^1$, 内侧为 $G_{i,1}^1, \dots, G_{i,i}^1, \dots, G_{i,n}^1$ 。对于低边 S_P 外侧区域划分为 $D_{e,1}, \dots, D_{e,i}, \dots, D_{e,n}$, 内侧为 $D_{i,1}, \dots, D_{i,i}, \dots, D_{i,n}$, 在粗加工到第 $i+1$ 层对称区域时, 接着半精、精加工第 i 层对称区域。

[0033] 进一步的, 步骤三中, 当对称区域位于高边区域 S_S^2 时, 其交替对称粗加工、半精加工、精加工的过程是:

[0034]
$$\begin{array}{c} \text{粗加工 } G_{e,i+1}^2 \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{粗加工 } G_{i,i+1}^2 \longrightarrow \text{半精加工 } G_{e,i}^2 \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{半精加工 } G_{i,i}^2 \\ \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{精加工 } G_{e,i}^2 \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{精加工 } G_{i,i}^2 \end{array}$$

[0035] 进一步的, 步骤三中, 当对称区域位于 S_S^1 与 S_P 重叠区域上时, 其交替对称粗加工、半精加工、精加工的过程是:

[0036]
$$\begin{array}{c} \text{粗加工 } G_{i,i+1}^1 \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{粗加工 } D_{i,i+1} \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{粗加工 } D_{e,i+1} \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{粗加工 } G_{e,i+1}^1 \\ \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{精加工 } G_{i,i}^1 \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{精加工 } D_{i,i} \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{半精加工、精加工 } D_{e,i} \\ \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{半精加工、精加工 } G_{e,i}^1 \end{array}$$

[0037] 进一步的, 步骤二中快速铣的加工余量为 $5\text{mm} \sim 7\text{mm}$; 步骤三中粗铣加工时余量为 $3\text{mm} \sim 5\text{mm}$, 半精加工时余量为 0.7mm 和精加工时余量为 0.3mm 。

[0038] 本发明的有益效果是:

[0039] 1) 一次装夹同时完成加强边内腔材料去除、两边内外表面切削加工, 可提高定位精度和整体加工效率。

[0040] 2) 交替对称完成加强边子区域的粗加工、半精加工、精加工, 保证超薄侧壁两侧的加工残余应力同步生成及衰减, 可有效抑制加工过程中的扭曲变形, 提高加工精度。

[0041] 3) 本发明针对前缘钛合金加强边的特点, 设计了内外同步对称铣加工方案, 该方案对压、吸气面内外同步粗铣、半精铣、精铣, 随后铣断支撑将前缘金属加强边从毛坯底座上取下来, 从而达到抑制钛合金加强边精加工扭曲变形、保证加工精度的目的。

【附图说明】

[0042] 图1是本发明复材叶片前缘钛合金加强边内外同步对称铣加工方法的加强边结构示意图。

[0043] 图2是本发明复材叶片前缘钛合金加强边内外同步对称铣加工方法的对称铣加工区域划分;

[0044] 图3是本发明复材叶片前缘钛合金加强边内外同步对称铣加工方法某截面下加强边对称铣的加工示意图;

[0045] 图4是本发明复材叶片前缘钛合金加强边内外同步对称铣加工方法中对称加工区域某刀具半径下切触点表示示意图;

[0046] 图5是复材叶片前缘钛合金加强边专用夹具;

[0047] 图6(a)代表低边加工区域划分, 16、17、18、19是子区域编号;

[0048] 图6(b)代表高边加工区域划分, 15、16、17、18、19是子区域编号, 15是高边上沿对称铣区域, 16、17、18、19是高低两边重叠对称铣区域;

[0049] 图6(c)代表在某截面下区域划分示意图。

[0050] 其中,1.加强边高边区域 S_{STOL} ,2.叶尖,3.加强边底部圆弧区域 S_B ,4.加强边鼻锥,5.加强边低边区域 S_{PTOL} ,6.叶根,7.高边重叠区域 S_S^1 ,8.高边单独区域 S_S^2 ,9.低边曲面内外侧 S_P ,10.专用夹具,11.螺栓,12.挡板,13.顶紧螺栓,14.毛坯,面1.夹具内槽底面,面2.夹具内槽侧面。

【具体实施方式】

[0051] 下面通过附图和实施例,对本发明的技术方案做进一步的详细描述。

[0052] 本发明提供了一种复材叶片前缘钛合金加强边内外同步对称铣加工方法,其中,如图1所示,该复材叶片前缘金属加强边为大扭转长条状结构,加强边上沿加强边的走向开设有深V型槽,该加强边被深V型槽分割出两个侧壁,其中一个侧壁高于另一个侧壁,较高的侧壁称作加强边高边区域1,深V型槽的底部被称作加强边底部圆弧区域3,较低的侧壁称作加强边低边区域5。加强边7上深V型槽开口角度较大的一端被称作叶根6,深V型槽开口角度较小的一端为叶尖2,深V型槽以下实体部分称作加强边鼻锥4。

[0053] 内外同步对称铣加工方法按照以下步骤实施:

[0054] 步骤一、根据待加工加强边的大小选择适当尺寸的方形毛坯或模锻毛坯,在三坐标数控铣床上快速铣削得到加强边的外轮廓。根据所加工零件的大小选择适当尺寸的毛坯,可采用方形毛坯直接数控加工,这种毛坯构建方式材料去除量大,后期批量生产时可采用模锻毛坯,减少加工时间及加工成本。用三坐标机床快速铣削得到加强边的大致形状,去除毛坯上大量的余量。一般三坐标机床快速铣的加工余量为5mm~7mm。

[0055] 步骤二、根据加强边内腔的尺寸,筛选出n种不同的刀具,根据n种刀具的球头半径,将加强边中能进行对称铣加工的区域划分为n个加工子区域。加工前根据加强边的实际形状、尺寸大小及精度要求,考虑刀具刀杆干涉及球头局部干涉问题后,对其进行划分区域,这样才能实现本发明提出的分区域对称精密切削方法。

[0056] 步骤三、在五轴机床上对加工子区域交替完成粗铣、半精铣和精铣,实现对加强边压气面与吸气面重叠区域内同步加工。其中,加强边五坐标粗铣的加工时,粗铣加工余量一般为3mm~5mm,半精加工时余量为0.7mm和精加工时余量为0.3mm。

[0057] 首先对加强边的各个区域进行预定义:将加强边的曲面加工区域划分为高边区域 S_{STOL} 、低边区域 S_{PTOL} 和内槽底部圆弧区域 S_B ;加强边中适用进行同步对称铣加工的区域是高于内槽底部圆弧区域的高边内外侧 S_S 与低边曲面内外侧 S_P ;设定 S_S 中和 S_P 相比高出的部分区域为高边单独区域 S_S^2 ,重叠的部分区域为高边重叠区域 S_S^1 ;设定沿叶尖到叶根方向为u向, $0 \leq u \leq 1$,即叶尖为 $u=0$,叶根为 $u=1$;内腔开口方向为v向, $0 \leq v \leq 1$,即内腔底部为 $v=0$,内腔开口处为 $v=1$ 。

[0058] 尽管内腔宽度沿u向和v向变化均很大,加工区域可以根据内腔宽度沿两个方向精细划分,但为了避免精加工表面出现较多接刀痕,则进退刀均位于空处,即需保证沿u向刀具路径的完整性。因此,要想进一步对加工区域 S_S 、 S_P 沿v向细分为若干区域。如图2所示, S_S 和 S_P 相比高出的部分区域 S_S^2 ,其开敞性好,因此可将 S_S^2 划分为单独区域。而在加工 S_S^1 与 S_P

区域时,由高低边形成的窄深槽零件特征,使得在加工该区域时需考虑两边走刀顺序和刀具最大球头半径问题,故在v向根据加工所用刀具尺寸进行细分若干区域,且每个加工区域所选刀具的直径仅受叶尖处开口尺寸约束。

[0059] 在步骤二中加工 S_S^1 与 S_P 区域时,将 S_S^1 与 S_P 区域划分为n个加工子区域的具体如下步骤1-步骤8:

[0060] 步骤1、根据叶尖处内腔尺寸,筛选出n种球头半径不同的球头刀或锥形刀。由于叶尖处内腔尺寸为加强边最窄,可以分析出加工到内腔底部与顶部的最大刀具球头半径。在筛选刀具时,除了根据常用刀具尺寸外,还应注意刀具长径比,可筛选出n种球头半径不同的球头刀(或锥形刀)。

[0061] 步骤2、假设内腔精加工所用球头刀按球头部分直径依次减小分为n类,分别为 $\{d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_n\}$ ($1 \leq i \leq n$),则 S_S^1 与 S_P 可分别被分为n个区域;

[0062] 步骤3、如图4所示,对于给定加工刀具直径为 d_1 ,在给定 $u=u_0$ 可得到等 u_0 参数线为 $B^S(u_0, v)$ 和 $B^P(u_0, v)$,进而可分别得到内腔中到两侧距离为 $d_1/2$ 的等距曲线 $B_{d_1}^S(u_0, v)$ 和 $B_{d_1}^P(u_0, v)$;

$$[0063] \quad B_{d_1}^S(u_0, v) = B^S(u_0, v) + \frac{d_1}{2} * n_S \quad (1),$$

$$[0064] \quad B_{d_1}^P(u_0, v) = B^P(u_0, v) + \frac{d_1}{2} * n_P \quad (2),$$

[0065] 其中: u_0 表示给定的任意u向参数;

[0066] d_1 表示给定刀具直径;

[0067] $B^S(u_0, v)$ 表示高边重叠区域 S_S^1 上在 $u=u_0$ 等 u_0 参曲线;

[0068] $B^P(u_0, v)$ 表示低边曲面内外侧 S_P 上在 $u=u_0$ 等 u_0 参曲线;

[0069] n_S 表示 $B^S(u_0, v)$ 上任意一点法向矢量,方向为指向内腔方向;

[0070] n_P 表示 $B^P(u_0, v)$ 上任意一点法向矢量,方向为指向内腔方向;

[0071] 步骤4、求取等距曲线 $B_{d_1}^S(u_0, v)$ 和 $B_{d_1}^P(u_0, v)$ 的交点 P_{d_1} 。

[0072] 步骤5、寻找 P_{d_1} 到等参线 $B^S(u_0, v)$ 上的垂足点 $P_1^S(u_0, v_1^S)$,以及到等参线 $B^P(u_0, v)$ 上的垂足点 $P_1^P(u_0, v_1^P)$,两个垂足点即为侧壁上的切触点。

$$[0073] \quad P_1^S(u_0, v_1^S) = P_{d_1} - \frac{d_1}{2} * n_{d_1}^S \quad (3),$$

$$[0074] \quad P_1^P(u_0, v_1^P) = P_{d_1} - \frac{d_1}{2} * n_{d_1}^P \quad (4),$$

[0075] 其中, $n_{d_1}^S$ 代表 P_1^S 点在 $B^S(u_0, v)$ 上指向 P_{d_1} 的法向矢量;

[0076] $n_{d_1}^P$ 代表 P_{d_1} 点在 $B^P(u_0, v)$ 上指向 P_{d_1} 的法向矢量。

[0077] 步骤6、由于 $P_1^S(u_0, v_1^S)$ 与 $P_1^P(u_0, v_1^P)$ 已求得,而 u_0 已知,故可分别得到 $P_1^S(u_0, v_1^S)$ 与 $P_1^P(u_0, v_1^P)$ 在v向参数 v_1^S 和 v_1^P 。

[0078] 步骤7:对n类刀具,逐个重复上述步骤3至步骤6,分别得到 S_S^1 和 S_P 的一系列v向参数 $\{v_1^S, \dots, v_i^S, \dots, v_n^S\}$ 和 $\{v_1^P, \dots, v_i^P, \dots, v_n^P\}$ 。

[0079] 步骤8、分别按照 $\{v_1^S, \dots, v_i^S, \dots, v_n^S\}$ 和 $\{v_1^P, \dots, v_i^P, \dots, v_n^P\}$ 取 S_S^1 和 S_P 上的u向等参线,至此, S_S^1 和 S_P 将被n条等v参线划为n个区域。如图6a-6c所示, S_S^1 和 S_P 上的区域一一对应,用同一把球头刀进行加工,对应的加工行距、切削参数也一致。按照上述方法,确定出对称加工区域的划分结果。

[0080] 对划分区域沿内腔开口至内腔底端方向,即-v方向进行编号即为 $\{1, 2, \dots, i, \dots, n\}$ 。对所述步骤8中划分出的子区域进行编号的结果为:高低两边区域沿v方向进行编号,对于高边 S_S^2 外侧区域外侧划分为 $G_{e,1}^2, \dots, G_{e,i}^2, \dots, G_{e,n}^2$,内侧为 $G_{i,1}^2, \dots, G_{i,i}^2, \dots, G_{i,n}^2$ 。对于高边为 S_S^1 外侧区域划分为 $G_{e,1}^1, \dots, G_{e,i}^1, \dots, G_{e,n}^1$,内侧为 $G_{i,1}^1, \dots, G_{i,i}^1, \dots, G_{i,n}^1$ 。对于低边 S_P 外侧区域划分为 $D_{e,1}, \dots, D_{e,i}, \dots, D_{e,n}$,内侧为 $D_{i,1}, \dots, D_{i,i}, \dots, D_{i,n}$,在粗加工到第i+1层对称区域时,接着半精、精加工第i层对称区域。

[0081] 对加工子区域划分完成后,开始对加工子区域交替进行粗铣、半精铣和精铣,即可实现复材叶片前缘钛合金加强边分区域对称精密数控加工。

[0082] 如图3所示,在对加强边按照上述划分区域进行对称同步铣削加工时,考虑到高低两侧壁超薄结构特征,为防止在加工时发生严重变形,在粗加工到第i+1层对称区域时,接着半精、精加工第i层对称区域。应用该方法即可实现复材叶片前缘钛合金加强边分区域对称精密数控加工。

[0083] 具体加工方法如下:

[0084] 当对称区域位于高边区域 S_S^2 时,其交替对称粗加工、半精加工、精加工的过程是:

[0085]
$$\begin{array}{l} \text{粗加工 } G_{e,i+1}^2 \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{粗加工 } G_{i,i+1}^2 \longrightarrow \text{半精加工 } G_{e,i}^2 \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{半精加工 } G_{i,i}^2 \\ \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{精加工 } G_{e,i}^2 \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{精加工 } G_{i,i}^2 \end{array} \quad \text{此区域}$$

交替对称加工减少换刀次数,有效抑制薄壁加工变形,有效提高加工效率。

[0086] 当对称区域位于 S_S^1 与 S_P 重叠区域上时,其交替对称粗加工、半精加工、精加工的过程是:

[0087]
$$\begin{array}{l} \text{粗加工 } G_{i,i+1}^1 \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{粗加工 } D_{i,i+1} \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{粗加工 } D_{e,i+1} \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{粗加工 } G_{e,i+1}^1 \\ \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{精加工 } G_{i,i}^1 \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{精加工 } D_{i,i} \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{半精加工、精加工 } D_{e,i} \\ \xrightarrow{\text{抬刀}} \text{半精加工、精加工 } G_{e,i}^1 \end{array} \quad \text{在此}$$

区域进行交替对称加工,极大的减少了两边薄壁在传统加工时残余应力释放不均匀,抑制薄壁精加工变形,提高了加工精度。

[0088] 以图1所示的某型航空发动机复材叶片前缘金属加强边,详细说明本发明的具体实施方式。

[0089] 在三坐标数控铣床上进行快速铣削,其余量为5-7mm,既满足加工要求又为半精

铣、精铣节约了加工时间。应用现有的CAM软件如UG、Cimatron等可以方便地生成粗加工刀具轨迹。

[0090] 为了在五坐标数控加工中心上实现本发明提出的薄壁叶片分区域对称精密切削加工方法,设计了如图5中所示的专用夹具装置。挡板12与顶紧螺栓13将毛坯14固定在夹具内槽中并保证其加工基准。夹具通过压板槽20与机床固联随工作台运动。用螺栓11将挡板12固定于专用夹具10上。将加强边毛坯底座三个端面贴紧于夹具内平面和挡板,然后拧紧顶紧螺栓13使底座夹紧固定在夹具上。工件在加强边加工专用夹具上安装定位如图5所示。挡板12可以限制加强边的1个自由度(1个平移自由度 \bar{X}),专用夹具的内表面可以限制5个自由度(2个平移自由度 \bar{Y} 、 \bar{Z} ,3个转动自由度 \bar{X} 、 \bar{Y} 、 \bar{Z})。因此,用本加强边专用夹具可以实现加强边的完全定位。

[0091] 对加强边进行加工时,由于加强边高边单独区域 S_5^2 开敞性良好,在此区域可直接完成对称铣加工,在加工高、低边重叠对称区域时,对称铣加工所选取的刀具,除考虑刀具种类、刀具长径比、刀杆干涉问题外,还应考虑提高较大半径尺寸刀具切削区域,在本次加工中所选取适用刀具为BR1.0, BR1.2, BR1.5, BR2.0,这4种类型的刀具将加工区域划分为4个区域,通过技术方案可计算出各个刀具加工区域面积:沿-v向, BR2.0球头刀加工面积区域大约为0-40%, BR1.5球头刀加工区域大约为40-70%, BR1.2球头刀加工区域大约为70-90%, BR1.0球头刀加工区域大约为90-100%。(图6c所示子区域16, 17, 18, 19, 分别表示加工区域0-40%, 40-70%, 70-90%, 90-100%)将这些区域分别作为生成数控加工刀具轨迹时的驱动面,完成对称铣高低边重叠区域加工。

[0092] 按两两对称的方式,所有子区域的加工顺序沿-v方向进行加工,即首先加工高边对称铣的区域15,然后加工高、低边重叠区域(8, 9),对于划分的子区域16、17、18、19加工,按照技术方案进行过程如下所示(以子区域16加工为例):

[0093]

$$\begin{array}{ccccccc} \text{粗加工 } G_{i,16+17}^1 & \xrightarrow{\text{抬刀}} & \text{粗加工 } D_{i,16+17} & \xrightarrow{\text{抬刀}} & \text{粗加工 } D_{e,16+17} & \xrightarrow{\text{抬刀}} & \text{粗加工 } G_{e,16+17}^1 \\ \text{抬刀} & & & & & & \\ \text{换刀} & \rightarrow & \text{精加工 } G_{i,16}^1 & \xrightarrow{\text{抬刀}} & \text{精加工 } D_{i,16} & \xrightarrow{\text{抬刀}} & \text{半精加工、精加工 } D_{e,16} & \xrightarrow{\text{抬刀}} \\ \text{换刀} & & & & & & & \\ & & \text{半精加工、精加工 } G_{e,16}^1 & & & & & \end{array}$$

[0094] 最终,可以得到符合技术要求的复材叶片前缘钛合金加强边。

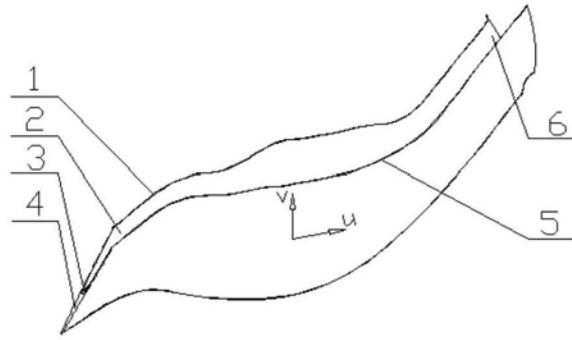


图1

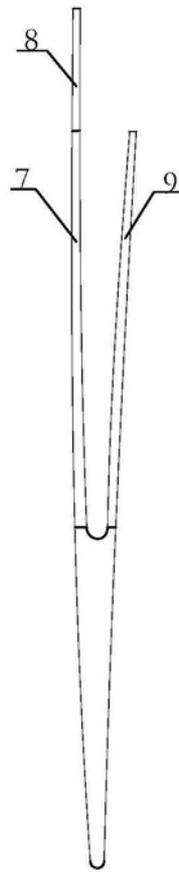


图2

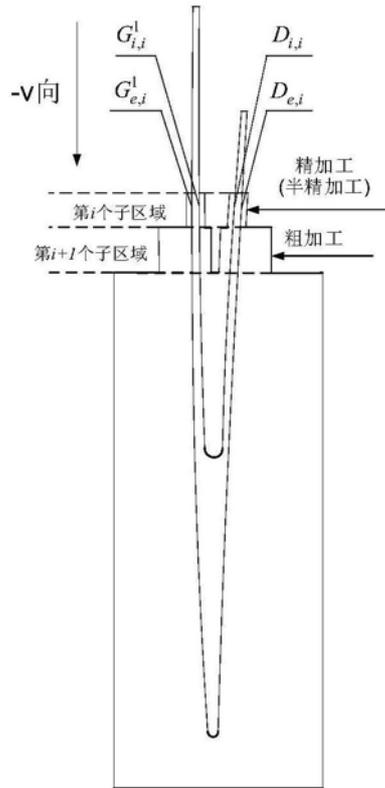


图3

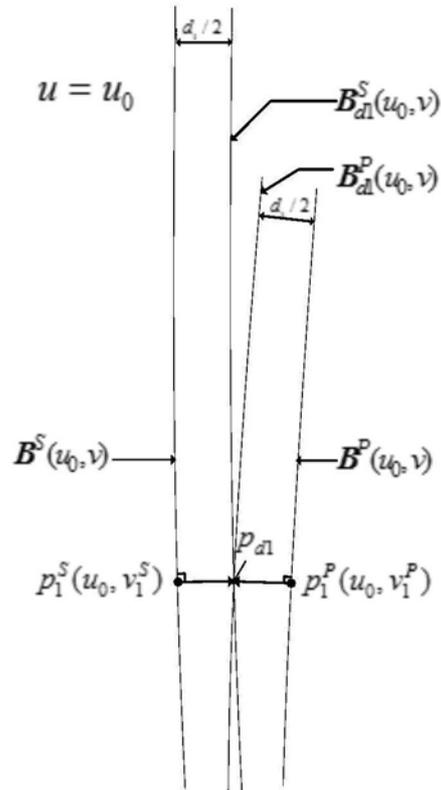


图4

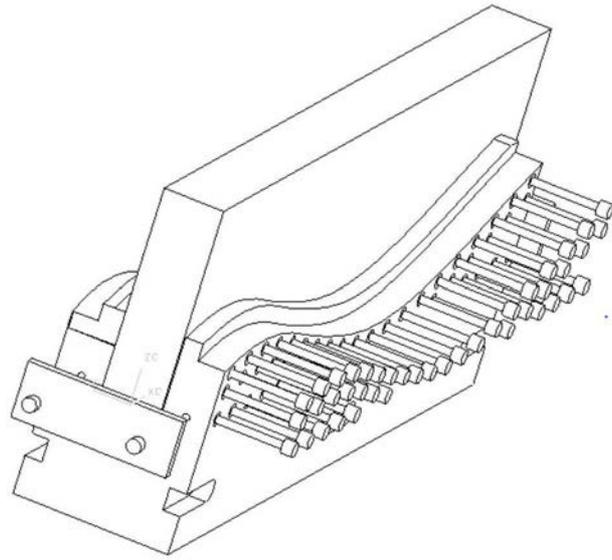


图5

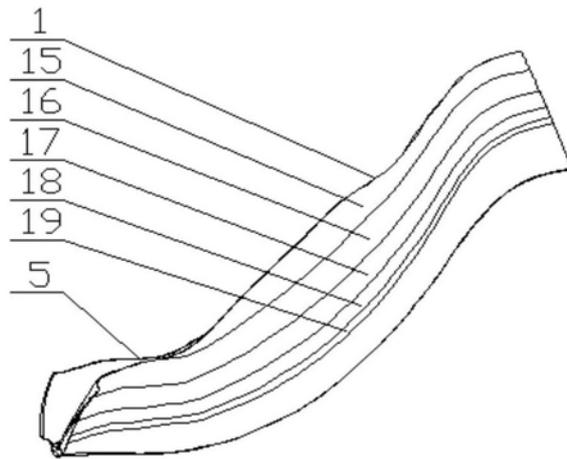


图6(a)

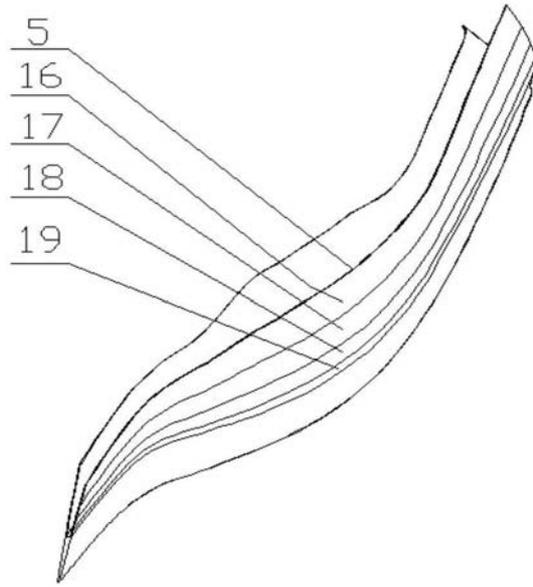


图6 (b)

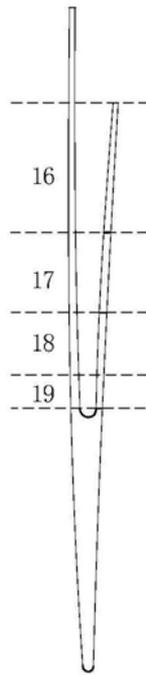


图6 (c)