

磨粒加工金属材料的去除机理及试验研究

张成光^{1,2}, 张勇², 张飞虎²

¹周口师范学院; ²哈尔滨工业大学

摘要: 结合固体量子力学和金属材料学理论探讨了低速磨粒加工金属材料的去除机理, 单个磨粒颗粒的动能必须大于金属材料的结合能, 其表层原子才可能被去除; 磨粒加工中金属材料发生塑性变形以及形成位错塞积群, 导致材料去除率降低。研制出新型磨粒射流加工装置, 该加工装置能够形成稳定和可调的磨粒射流, 可实现磨粒充分均匀混合和磨粒浓度的精确调节。通过磨粒射流加工模具钢、磁流变加工模具钢和液流悬浮超光滑加工金属铝等不同加工方法进行试验验证, 试验结果表明: 当磨粒速度低于去除金属表层原子所需的最小速度时, 磨粒不能实现对金属材料的有效去除; 当磨粒速度大于去除金属表层原子所需的最小速度时, 磨粒才能实现对金属材料的加工, 磨粒速度越大, 材料去除率越高; 磨粒冲击金属表面使得材料发生塑性变形和形成位错塞积群, 形成更大的阻力, 降低了磨粒加工材料去除率, 使得材料去除率初始较高, 随后逐渐下降并最终趋于稳定。

关键词: 磨粒加工; 结合能; 磨粒速度; 最小速度

中图分类号: TG580; TH140.7

文献标志码: A

Study on Removal Mechanism and Experiment of Abrasive Machining Metal Materials

Zhang Chengguang, Zhang Yong, Zhang Feihu

Abstract: The solid quantum mechanics and metal materials theory are applied to the analysis of the nanoparticles impact metal surface micro asperities model. The removal mechanism of metal materials under the nanoparticles impact is studied. The kinetic energy of a single nanoparticle of abrasive particles must be greater than the binding energy of metal materials, so that the surface atoms of metal can be removed. The plastic deformation and dislocation groups could reduce the processing speed in the process of abrasive machining. A new type of abrasive jet machining device is developed, which can form a stable and adjustable abrasive jet, achieve the grinding grain of fully mixing, and realize the precise regulation of abrasive particle concentration. The abrasive water jet machining (AWJ) and magneto rheological finishing (MRF) for die steel and hydrodynamic suspension ultra-smooth machining for aluminum are tested. The experimental results showed that when the abrasive velocity is lower than the minimum removal speed of the metal surface atoms, the abrasive cannot effectively remove metal materials. When the abrasive velocity is greater than the minimum speed of the removal metal surface atomic, the abrasive can remove the metal material. When the abrasive velocity is higher, the material removal rate is higher. The abrasives occurred on the metal surface and the metal surface forms plastic deformation and dislocation groups, which could form a larger resistance and reduce the material removal rate, the material removal rate is higher then gradually reduced and eventually became stability.

Keywords: abrasive machining; binding energy; abrasive velocity; minimum speed

1 引言

磨粒加工技术通过磨粒的自由滑动、滚动和冲击, 实现切削极薄的表面材料层或去除表面原子层。其本质是依靠高速运动磨粒的碰撞, 使磨粒的机械能转化为工件表面材料的结合能, 进而去除工件表面材料或表层原子, 提高工件表面质量^[1]。

近年来, 在这些传统工艺的基础上出现了许多

新的磨粒加工方法, 如弹性发射加工、离心磁力研磨、液体动压抛光、磁流变抛光、化学机械抛光、液流悬浮超光滑加工、纳米颗粒胶体射流加工、化学机械抛光和超声波抛光等, 这些加工方法主要针对硬脆材料加工^[2-4]。采用磨粒加工技术对金属材料进行加工, 如磨料流加工、液流悬浮超光滑加工、磨粒射流加工等加工方法, 也取得了较好的效果, 但其加工机理还尚有待进一步研究, 尤其是低速磨粒加工金属材料的去除机理还需深入研究^[5,6]。本文结合固体量子力学和金属材料学理论, 探讨了低速磨粒加工金属材料的去除机理。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2011CB013200); 国家自然科学基金(51275116); 航空科学基金(2012EE77010); 黑龙江省博士后启动基金资助项目(LBH-Q11090)

收稿日期: 2017年5月

2 磨粒冲击金属材料的原子去除机理

如图 1 所示,在低速磨粒加工过程中,纳米磨粒颗粒连续不断冲击金属材料表面,金属材料的表层原子首先受到冲击^[6]。从图 1 磨粒冲击金属材料模型来看,磨粒对加工表面的作用首先发生在表层原子。体相内部原子受四周邻近相同原子的作用力是对称的,使原子所受到的外界作用力相互抵消;但表层原子受到体相内同物质原子的作用和另一相物质原子的作用,使得原子所受到的外界作用力不能完全抵消。位于被加工表面表层原子的结合键少,其结合能也比体相内原子的结合能低,尤其是凸起表面表层原子的结合键键能更低,表层原子处于一种高能不稳定状态。纳米磨粒颗粒连续不断地机械冲击表层原子,使表面原子动能增加,原子能量升高。要将表层原子从基体上分离,就必须克服表层原子与其周围原子的结合能。

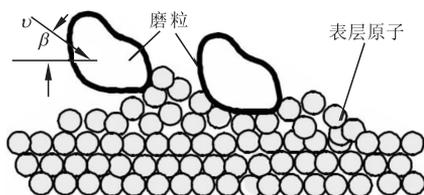


图 1 磨粒冲击金属材料模型

刘薇娜^[7]对金属原子的结合能进行了理论估算,依据金属结合能在数值上等于将晶态拆散为等量的中性原子状态所需要吸收的能量,则金属结合能 E_j 为^[8,9]

$$E_j = \left(\frac{1}{3} \sim \frac{2}{3}\right) \frac{\hbar^2}{2m_e} (3\pi^2)^{2/3} n^{2/3} \quad (1)$$

式中, m_e 为电子的质量; n 为单位体积金属内的自由电子数(自由电子密度); \hbar 为约化普朗克常数(Max Planck), $\hbar = 1.055 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 。

由上式可知,费米能仅取决于金属内部的自由电子密度,电子的能量(最高能级)变化将导致金属表层原子的能量变化。

金属铝和钢分别为面心立方晶体和体心立方晶体结构,其原子间均为金属键结合,由于晶胞结构的不同,每个原子与周围原子的结合键数和结合键能也不相同。铝和钢的自由电子密度分别为 0.0584×10^{30} 和 0.0846×10^{30} , 电子的质量为 $9.11 \times 10^{-31} \text{ g}$ ^[7], 则铝的原子结合能为

$$E_j = (2.932 \sim 5.863) \times 10^{-19} \text{ J} \quad (2)$$

钢的原子结合能为

$$E_j = (3.753 \sim 7.506) \times 10^{-19} \text{ J} \quad (3)$$

在磨粒加工过程中,如果不考虑金属表层原子缺陷的影响,只考虑金属结合能对磨粒去除金属表层原子的影响,单个纳米磨粒的动能必须大于等于金属材料的结合能,其表层原子才可能被去除。假设加工中采用纳米磨粒为 30-40nm 的 SiC 磨粒,加工过程中纳米磨粒的冲击作用使原子移动的距离为原子直径,铝和钢的原子直径分别为 $2.9 \times 10^{-10} \text{ m}$ 和 $2.48 \times 10^{-10} \text{ m}$, 单个纳米磨粒具备的动能 E_p 必须大于金属材料表层原子的结合能 E_j , 有

$$E_p = \frac{1}{2} m_p v_p^2 \geq E_j \quad (4)$$

由式(4)可得铝的纳米磨粒所需的最小速度为

$$v_p \geq \sqrt{\frac{2E_j}{m_p}} = \sqrt{\frac{6 \times 2E_j}{\pi d^3 \rho_p}} = 3.31 \text{ m/s} \quad (5)$$

钢纳米磨粒所需的最小速度为

$$v_p \geq \sqrt{\frac{2E_j}{m_p}} = \sqrt{\frac{6 \times 2E_j}{\pi d^3 \rho_p}} = 3.74 \text{ m/s} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可知,当纳米磨粒的速度分别大于最小速度 3.31m/s 和 3.74m/s 时,可以去除铝和钢金属表面表层的单个原子,实现原子级去除。

以上推导过程中,假设是纳米磨粒去除金属表面的一个表层原子。实际上,金属表面并不均匀,即使从宏观上看似乎很光滑,但从原子水平上看是凹凸不平的,表面有许多微观粗糙峰。在实际加工中,主要是去除微观粗糙峰,使其表面粗糙度下降。假设一个表面微观粗糙峰内有 N 个原子,则铝的一个表面微观粗糙峰内的原子结合能为

$$E'_j = NE_j = N(2.932 \sim 5.863) \times 10^{-19} \text{ J} \quad (7)$$

钢的一个表面微观粗糙峰内的原子结合能为

$$E'_j = NE_j = N(3.753 \sim 7.506) \times 10^{-19} \text{ J} \quad (8)$$

当金属材料表面粗糙度较大时,意味着表面微观粗糙峰的高度差相对较大,即一个微观粗糙峰包含的原子个数少,而且整个金属材料表面上的原子结合能较少。当纳米磨粒颗粒的速度一定时,微观粗糙峰顶部周围比较容易受冲击,从而产生裂纹,直至部分断裂,因此,这个微观粗糙峰就容易去除。

当金属材料表面粗糙度较小时,则情况相反,表面微观粗糙峰高度降低,这时一个微观粗糙峰所包含的原子个数多,也就是整个金属材料表面上原子结合能较多,微观粗糙峰不容易去除,即当磨粒的速度或者动能保持不变时,金属材料表面的去除速度都将减小甚至变为零。

当纳米磨粒不足以使金属表层原子被去除时,由于发生塑性变形(位错)所需的能量远小于被去

除所需的能量,故金属原子在磨粒的作用下会发生弹性变形和塑性变形,凸峰上的金属原子发生向凹谷的位错运动,形成交互位错和位错塞积群^[10]。由于位错运动引起了晶体结构的变化,在晶体内部产生内应力,阻止滑移继续进行。泰勒(Taylor)认为,除最初的位错外,增殖的位错不能穿过晶体,在晶体内部被互相牵制住,而这些被牵制的位错产生的内应力牵制了其它位错运动。

由文献[10]可知,两个位错相互越过所需的应力更大。如果达不到所施加的应力,位错就被牵制住而不能运动。高度硬化状态所对应的 $|y|$ 值是 10^{-6}cm ,这时的位错密度约为 10^{12}cm^{-2} 。由此可以看出,在变化过程中,由于位错密度的增加, τ_m 值也增加,故克服 τ_m 时,位错移动的外应力也要增加。

当发生塑性形变时,位错密度逐渐增加,从而形成了更大的阻力,不断提高晶体的屈服强度。当纳米磨粒的速度或动能不变时,就不容易去除金属材料,表面粗糙度变化也很小,直至不发生变化。当外力达到位错运动所需的临界值时,位错运动将形成裂缝而发生断裂。

图2a表示当一系列位错在一个滑移面上受阻于晶界或其它障碍物时,若外加应力达到了临界值,则这些位错将合并而成为断裂核心。图2b表示由垂直于滑移面排列的一组刃型位错所组成的位错墙,在某种应力条件下,部分位错墙进行侧向移动,从而引起滑移面的弯折,形成断裂核心。因此,只有增加磨粒的动能和纳米磨粒的冲击力,才能移动这些位错,使位错运动形成新的断裂,从而去除金属材料;否则,无法移动这些位错,故金属材料很难被去除。

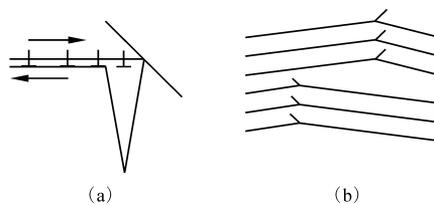


图2 不同断裂核心的形成方式

3 低速磨粒加工金属材料的试验验证

3.1 磨粒射流加工金属材料试验

研制的新型磨粒喷射系统如图3所示。在该喷射系统中,一个磨粒进口与大气相通,一个磨粒进口与磨粒浆体溶液相连接。

图4为在喷射压力4MPa下喷射系统沿轴线方向磨粒浆体溶液的流场和速度仿真。由图4a可知,浆体溶液磨粒进口处和砂管出口处的溶液浓度高,

说明磨粒进口有大量溶液,并且浆体溶液挤满了整个砂管的喷嘴出口。试验发现,在砂管与工件之间施加电压时会有电流产生,这是由于浆体溶液接触到了砂管壁面,形成了电流通路。因此,该新型喷射系统(一个磨粒进口与大气相通、一个磨粒进口与浆体溶液相连)使得浆体溶液在砂管喷嘴出口处获得了较高的速度,是可行的。由图4b可知,在该喷射系统中,砂管喷嘴出口处的浆体溶液沿轴线方向的速度约12.5m/s。



图3 新型喷射系统试验

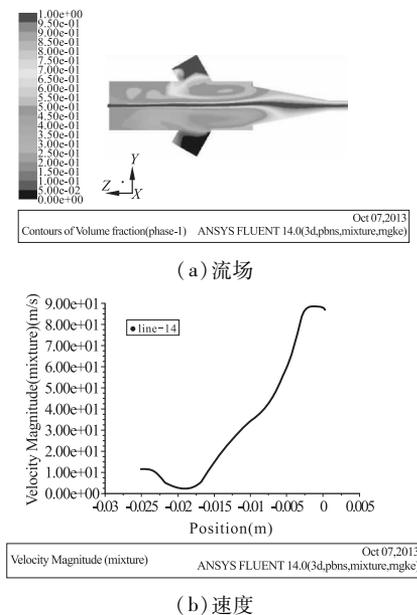


图4 沿轴线方向磨粒浆体溶液的流场和速度仿真

该新型磨粒射流系统能够形成稳定、可调的磨粒射流,磨粒在任意时刻都能充分均匀混合,实现磨粒浓度的精确调节。

采用所研制的新型磨粒射流加工装置对模具钢进行试验,其试验条件为:喷射距离2mm,砂管喷嘴直径0.76mm,纳米磨粒为碳化硅,磨粒浓度20g/L,喷射压力4MPa;宝石喷嘴直径0.33mm,喷射角度 90° ,加工时间10min,加工工件为SKD11模具钢。

磨粒射流加工后工件表面形貌见图5。可以看出,射流中心处的去除量最大。这是由于射流中心区域磨粒主要以 90° 角(或接近于 90° 角)入射工件,磨粒速度约为12.5m/s,远大于去除钢表层一个单原子所需的最小速度3.74m/s,可以实现去除 N 个

原子组成的微观粗糙峰。

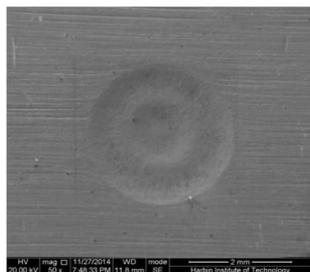


图5 磨粒射流加工后工件表面形貌

图6为磨粒射流加工材料去除量。可见,材料的去除量沿着径向方向先逐渐下降,降低到一定值后再增加一点,然后迅速降低。这是由于磨粒的水平速度和垂直速度的大小和方向发生变化,使磨粒水平速度剪切去除材料表层原子,并以垂直速度冲击去除材料表层原子而发生变化,影响了材料去除轮廓的形状。因此,材料去除轮廓取决于磨粒速度的大小及方向,这与文献[11]的磨粒射流加工材料去除模型一致。

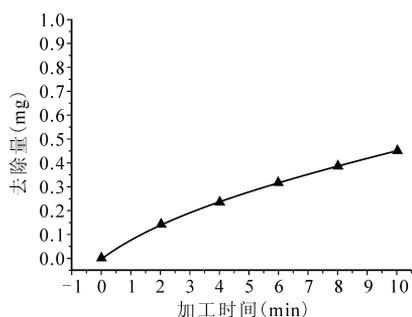


图6 磨粒射流加工材料去除量

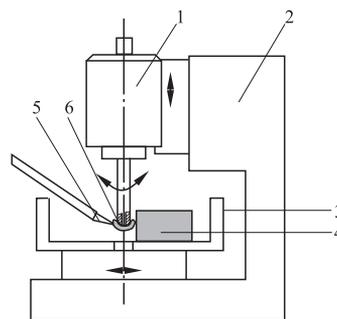
由图6可以看出,在4MPa工作压力下,磨粒射流加工材料去除率仅为0.045mg/min,10min内材料的总去除量为0.45mg。在同一压力下,随着磨粒射流加工时间的持续,其单位时间内的材料去除量(材料去除率)逐渐下降,并最终趋于稳定。前2min内,磨粒射流加工SKD11模具钢的去除量约为0.15mg;前4min内,SKD11模具钢的去除量约为0.24mg,其材料去除增加量仅为0.09mg。

由上述推导理论可知,刚开始金属表面微观粗糙峰较高,粗糙峰较“尖”,一个微观粗糙峰所包含的原子个数较少,金属材料在纳米磨粒冲击作用下容易被去除,前2min内的去除量较大;随着加工的进行,金属表面微观粗糙峰降低,粗糙峰较“钝”。一个微观粗糙峰所包含的原子个数增多,金属材料在纳米磨粒的冲击下不容易被去除,金属的去除率降低;同时,在前2min内金属表面发生了塑性变形和形成位错群,更不能去除这些微观粗糙峰,因此使

金属材料去除率迅速下降,并最终趋于稳定,这也与文献[12]的试验结果一致。

3.2 磁流变加工模具钢试验

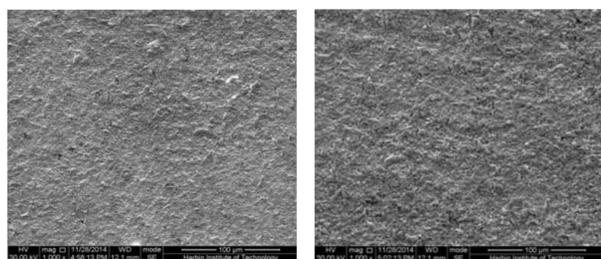
采用磁流变小磨头对模具钢进行加工试验,其试验装置如图7所示。试验采用的水基磁流变液主要成分为羰基铁粉、碳化硅纳米磨粒、去离子水和稳定剂,配制好的磁流变液外观呈灰黑色,零磁场粘度为 $0.56\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。工具头转速为600rpm,工具头直径20mm,工具头与工件之间的最小间隙0.2mm,磁感应强度1000Gs,加工时间60min。



1. 主轴电机 2. 床身 3. 加工槽 4. 工件 5. 喷嘴 6. 磁流变液

图7 磁流变加工试验装置

在试验中发现,加工60min后,磁流变小磨头加工对金属材料模具钢效果不理想,加工前后模具钢材料没有去除。这是因为磨粒速度仅为 0.94m/s ,由去除机理可知,远小于去除金属钢表层一个单原子所需的最小速度 3.74m/s ,无法实现材料的去除。同时由于SiC磨粒具有一定的动能,促使一部分表层原子从凸峰移动到凹处,但加工前后工件表面粗糙度变化非常小(见图8),说明磁流变小磨头加工技术不适用于金属材料的加工。



(a) 加工前 (b) 加工后

图8 磁流变加工前后工件的表面形貌

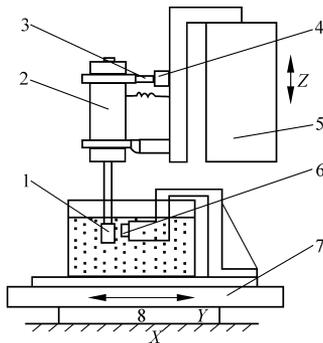
3.3 液流悬浮超光滑加工金属铝试验

如图9所示,液流悬浮超光滑加工系统由数控铣床、加工装置和加工室组成^[13]。其中,加工装置由高速电动机、测力传感器以及压电叠堆等组成,并安装于数控铣床主轴箱上。加工室放置于数控铣床的XY工作台上,整个工件浸没于盛有加工液的加工室中。高速旋转的非金属弹性工具带动含有纳米

磨粒的加工液,高速挤入加工作用微区域,对金属材料工件表面进行加工^[5]。

试验条件为:加工工具聚氨酯直径 20mm,转速 5000r/min,线速度 5.23m/s,加工液中含有氮化硅纳米磨粒,加工时间 60min。

铝合金材料表面的去除率很小,这是由于加工工具聚氨酯的线速度仅有 5.23m/s,并且液流的粘度阻力使磨粒速度进一步减小,仅稍大于去除金属铝表层一个单原子的最小速度 3.31m/s。因此,金属铝的去除率低,表面粗糙度变化较小。



1. 聚氨酯工具 2. 高速电动机 3. 压电叠堆 4. 力传感器
5. 机床主轴箱 6. 工件 7. 机床工作台

图9 液流悬浮超光滑加工系统

随着加工过程中表面粗糙度的降低,单位面积上的微观粗糙峰数目增多。如图 10 所示,原来高的微观峰发生变形后形成了多个低的微观峰,使金属表面微观粗糙峰降低。由于纳米磨粒冲击金属表面,使得这些微观粗糙峰较“钝”,一个微观粗糙峰所包含的原子个数较多,因此金属材料在纳米磨粒的冲击下不容易被去除,金属的去除率下降。高速运动的磨粒促使微观粗糙峰上的原子从凸峰移动到凹处,一定程度上改善了工件表面质量,加工前工件的表面粗糙度 $R_a = 0.080\mu\text{m}$,加工后 $R_a = 0.077\mu\text{m}$,但其表面粗糙度值的变化量较小(见图 11)。

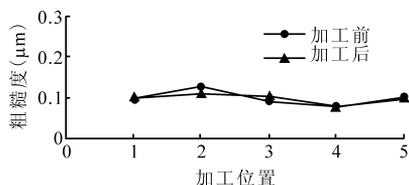
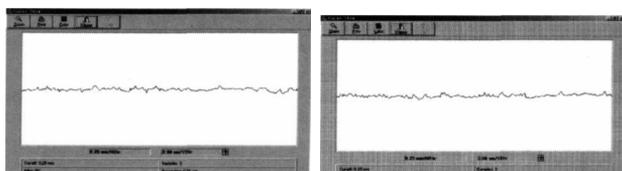


图10 加工前后各点粗糙度值



(a) 位置点3加工前 $R_a = 0.080\mu\text{m}$ (b) 位置点3加工后 $R_a = 0.077\mu\text{m}$

图11 加工位置点3在加工前后的表面粗糙度值对比

综上所述,当磨粒速度低于去除金属表层原子所需的最小速度时,磨粒不能实现对金属材料的有效去除;当磨粒速度大于去除金属表层原子所需的最小速度时,磨粒才能实现对金属材料的加工,并且磨粒速度越大,材料去除率越高。磨粒冲击金属表面,使得材料发生塑性变形,并形成位错塞积群,形成了更大的阻力,降低了磨粒加工材料去除率,使得材料去除率刚开始较高,随后逐渐下降,并最终趋于稳定。这也与低速磨粒加工金属材料的去除机理一致,为进一步研究低速磨粒加工金属材料提供了理论依据。

4 结语

(1) 单个纳米磨粒的动能必须大于金属材料的结合能时才能实现去除金属表层材料或表层原子;磨粒加工过程中,金属材料发生塑性变形以及形成位错塞积群,导致材料去除率降低。

(2) 采用磁流变小磨头进行了模具钢试验,试验结果表明,磁流变小磨头加工技术不能实现对模具钢的有效去除,其表面质量也几乎没有变化。

(3) 新型磨粒射流加工装置能够形成稳定、可调的磨粒射流,在任意时刻磨粒都能充分均匀混合,实现磨粒浓度的精确调节,并进行了磨粒射流加工 SKD11 模具钢试验。试验结果表明,新型磨粒射流加工系统中磨粒的速度 12.5m/s 远大于去除钢表层一个单原子所需的最小速度 3.74m/s,能够有效实现对 SKD11 模具钢的加工,且射流中心区域材料去除率最高,随着加工时间的持续,其材料去除率逐渐下降,并最终趋于稳定。

(4) 在液流悬浮超光滑加工中,由于磨粒的速度只是稍微大于去除金属铝表层原子所需的最小速度,其材料去除率较低,表面粗糙度变化较小。

参考文献

- [1] 邹雄,梁益龙,吴泽丽,等. 磨料水射流喷丸对渗碳 GDL-1 钢表面完整性及疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程,2017,30(2):41-47.
- [2] 李长河,丁玉成,卢秉恒. 硬脆材料高效精密磨粒加工技术[J]. 精密制造与自动化,2008(2):14-17.
- [3] 袁巨龙,王志伟,文东辉,等. 超精密加工现状综述[J]. 机械工程学报,2007,43(1):35-48.
- [4] 刘娟,许洪元,罗先武,等. 固液冲蚀材料表面冲击波纹的形成机理[J]. 清华大学学报(自然科学版),2006,46(8):1426-1429.
- [5] 曹志强,赵继,詹建明,等. 液流悬浮超光滑纳米加工试验[J]. 农业机械学报,2007,38(3):153-155.

17-4PH 汽轮机叶片叶根磨削及铣削表面质量对比

李兴东¹,姜男²,周新灵¹,黄亮¹,岳彩旭²

¹哈尔滨汽轮机厂有限责任公司;²哈尔滨理工大学

摘要: 针对磨削和铣削生产的汽轮机叶片叶根,采用体式显微镜、金相显微镜、电子扫描显微镜和 X 射线应力仪等设备对比分析了加工叶根表面形貌、微观组织、残余应力等表面质量的差异。分析结果表明:宏观上磨削、铣削加工叶根表面都很平滑,微观下磨削加工叶根表面完整性较差,存在一定的毛刺、凹坑等现象;磨削加工叶根表面微观组织中影响层及剧烈塑性变形层深度比铣削小;磨削、铣削加工叶根表面残余应力均为压应力,铣削加工叶根表面残余应力数值及深度都大于磨削加工。

关键词: 叶根;磨削;铣削;微观表征;残余应力

中图分类号: TG580.6;TG54;TH161.14

文献标志码: A

Quality Comparison of Grinding Surface and Milling Surface for 17-4PH Turbine Blade Root

Li Xingdong, Jiang Nan, Zhou Xinling, Huang Liang, Yue Caixu

Abstract: As for grinding and milling the turbine blade root, the surface morphology, microstructure and residual stress are analyzed by means of microscope, metallographic microscope, scanning electron microscope and X-ray stress meter. The results show that the surfaces after grinding and milling are macroscopically smooth. But the surface integrity after grinding is relatively poor, since there exist burrs and pits. The depths of the impact layer and the severe plastic deformation layer in microstructure after grinding are smaller than those after milling. Compressive residual stresses exist in the surface after grinding and milling, and the value and depth of the residual stress after milling are greater than those after grinding.

Keywords: blade root; grinding; milling; micro characterization; residual stress

1 引言

17-4PH 是典型的马氏体沉淀硬化不锈钢,由于具有较高的强度及良好的塑性,广泛用作汽轮机低

压叶片的主选材料。叶片作为汽轮机设备的关键零部件,对机组的经济性及安全性起着决定性的作用。叶根作为叶片与转子的连接部分,其加工质量直接决定叶片的使用寿命。叶根型线较复杂,尤其是枞树型叶根,需要加工方式具有良好表面质量、加工精度和较高效率。若加工方式选择不当,会产生较差的表面质量,降低叶片寿命,从而使整机寿命和可靠

基金项目:黑龙江省博士后资助项目(LBH-Z14061)
收稿日期:2017年3月

- [6]张富. 弹性约束游离磨料超光滑表面加工技术的研究[D]. 长春:吉林大学,2007.
- [7]刘薇娜. 冰盘纳米抛光金属材料的研究[D]. 长春:吉林大学,2004.
- [8]Li H P, Liu B, Kam C H, et al. Femtosecond Z-scan investigation of nonlinear refraction in surface modified PbS nanoparticles[J]. *Optical Materials*, 2000, 14(4):321-327.
- [9]Michael H Huang, Samuel Mao, Henning Feick, et al. Room-temperature ultraviolet nano-wire nano-lasers[J]. *Science*, 2001, 292(8):1897-1899.
- [10]汪复兴. 金属物理[M]. 北京:机械工业出版社,1980.
- [11]张成光,张勇,张飞虎,等. 磨料水射流加工去除模型研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(7):188-196.
- [12]成建联,宋国英,李福援. 磨料水射流抛光时工艺参数对工件去除量的试验研究[J]. *西安工业学院学报*,

2002(1):67-71.

- [13]曹志强,詹建明,赵继,等. 液流悬浮超光滑加工中流体动压力对加工效果的影响[J]. *光学精密工程*, 2008(6):1069-1074.

第一作者:张成光,博士研究生,讲师,周口师范学院机械与电气工程学院,466000 河南省周口市

First Author: Zhang Chengguang, Doctoral Graduate, Lecturer, College of Mechanical and Electrical Engineering, Zhoukou Normal University, Zhoukou, Henan 466000, China

通信作者:张飞虎,博士,教授,哈尔滨工业大学机电工程学院,150001 哈尔滨市

Corresponding Author: Zhang Feihu, Doctor, Professor, School of Mechanic and Electronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China