

平面研磨低损伤控性研究

陈传音 林传葛 王泽伟

国网浙江省电力有限公司紧水滩水力发电厂 浙江 杭州 323000

【摘要】游离磨料平面研磨加工是一种传统的研磨加工方式,同时也是目前使用最多的研磨加工方法。其主要特点是在研磨液中加入磨粒,通过喷雾或胶管直接将研磨液滴在磨盘上。磨盘的旋转将磨粒带到工件与磨盘之间,并通过磨粒与工件的接触来实现工件的加工。首先将要加工的工件基板安装在夹头下方。通过磨盘和夹持头的旋转,研磨液中的磨料在磨盘和工件基体之间滚动和划伤,去除工件的表面材料。这其中的平面研磨低损伤控性的研究就尤为重要,本文基于此对平面研磨低损伤原因形态进行了分析,给出了控性原则建议。

【关键词】游离磨料平面;研磨加工;控性原则

引言

高精度形状控制、低损伤可控表面研磨加工是超精密抛光加工的重要基础,也是研磨加工领域的一个重要发展趋势。表面研磨加工需要保证工件的平整度、表面粗糙度、表面和亚表面的位错缺陷,如抛光过程中的表面形貌和残余应力、桔皮、厚度不均、凹陷等与前一次抛光过程的表面状态密切相关。因此,在保证研磨加工高效率的同时,如何有效地提高工件表面的均匀性,获得低损伤的研磨表面,从而实现高效精密研磨加工,对丰富超光滑低损伤表面的磨料加工理论具有重要的理论意义和科学价值。

1 研磨损伤的主要形态及原因

脆性材料工件在游离磨料平面研磨加工方式下主要以裂纹、划痕及残余应力等损伤形式存在,而对于铝和铜等软质金属材料,工件在研磨后易留有磨粒镶嵌层等损伤,这些损伤的存在将大大降低产品的使用性能、抗磨损性能、断裂强度和疲劳特性,最终影响产品的使用寿命。

1.1 裂纹

根据磨粒的运动形式,在研磨压力的作用下,将一部分磨粒压入磨盘表面,用露出的尖端雕刻工件的加工面,实现微切削;另一部分磨粒位于工件与磨盘。在中间滚动会产生滚动效果。材料的去除主要是基于脆性开裂和破碎,而且裂纹较多。与残余应力、磨粒镶嵌等其它损伤形式相比,裂纹更易于观察和量化。

把研磨盘上的磨粒看作是一个小型压头,在压头的正下方就会出现一块塑性变形区。在这个永久变形区下开始形成两种主要的裂纹系统,如图1所示。其中平行于工件表面的横向裂纹不断延伸,导致使材料去除并形

成表面缺陷;垂直于工件表面的径向裂纹不断扩展,逐渐引发为残余应力层即为亚表面损伤层。

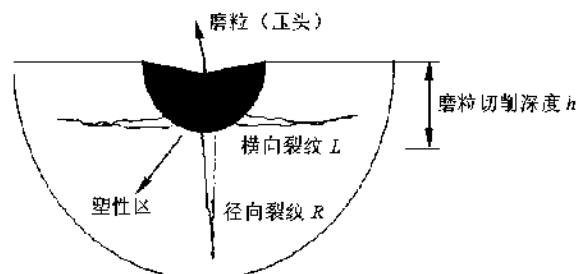


图1 材料的变形和裂纹系统示意图

1.2 划痕

大多数工件在研磨加工后表面不均匀的划痕深度主要分布在 h_1 的深度,对于抛光加工来说,接触的是磨粒与粗糙表面的波峰,局部作用力大,因此去除深度为 h_1 的表层材料所需时间较短,如图3(a)所示。当去除深度为 h_2 的表层材料时,磨粒与工件表层的接触面积改变,如图3(b)所示,作用在工件上的压力减小至 h_1 状态时的 20% 以下,但材料的去除量却增加为 h_1 状态时的 50 ~ 100 倍以上,因此导致的抛光时间将是 h_1 状态的 250 ~ 500 倍。同理,若要全部去除剩余高度为 h_3 的划痕,如图2(c)所示,则抛光时间将是 h_1 状态的 1000 倍以上。因此研磨划痕深度的均匀分布对抛光加工的时间、成本和表面质量有重要的影响,平面研磨加工过程中需要控制和减小划痕。

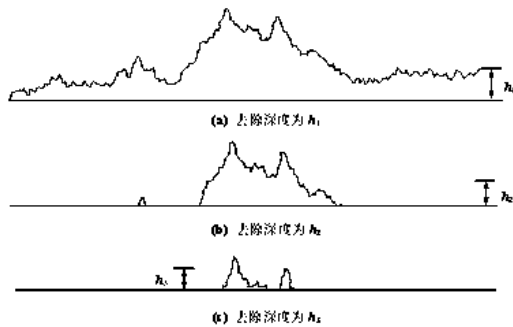


图 2 抛光加工划痕去除过程

1.3 残余应力

残余应力是一种内应力，内应力是指产生应力的各种因素不复存在时，由于形变、体积变化不均匀而存留在工件内部并自身保持平衡的应力。一般情况下，研磨加工后工件表面残余应力的大小及分布取决于造成工件表面的弹塑性变形、加工热应力及组织应力三者综合作用的效果。由压痕断裂学理论可知，裂纹前端具有奇异性，会因为发生塑性形变而造成屈服，产生残余应力层。其深度 R 预测模型为：

$$R = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_1}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

式中， K_1 为应力强度因子； σ_{ys} 为裂纹前端有效屈服应力。

1.4 磨粒镶嵌

金属材料工件研磨时，不会产生裂纹和破碎，只在表面产生塑性变形的压坑，磨粒的研磨作用相当于普通研磨和微量切削的状态，由于磨粒处于游离状态，切削也是不连续的。当研磨铝和铜等软质材料时，工件加工表面容易留有磨粒镶嵌层，很难将嵌入的磨粒全部去除，由于嵌入的磨粒将引起更大的亚表面损伤，最终降低工件的表面质量。

2 磨粒粒径与损伤的关系

磨料粒度的选择必须取决于三个方面：表面粗糙度、划痕尺寸和亚表面损伤层深度。对于表面研磨过程中的自由磨料，一方面要使磨粒尽可能均匀，使磨粒在工件上的切削力尽可能相等，以保证工件表面划痕的深度均匀分布；另一方面也要做到为了进一步保持工件表面划伤深度的均匀性，需要努力提高加工环境的清洁度，防止较大的硬质磨料颗粒等杂质进入研磨加工区，对工件造成表面损伤。磨料颗粒的大小从几十微米到几十纳米不等。当研磨压力一定时，随着磨粒尺寸的减小，磨粒对工件表面的力分布均匀，磨粒大小影响工件表面。

降低了地下损伤层的深度。当磨粒的粒径较大时，与工件接触的磨粒减小，单个磨粒对工件的微切削作用增强，容易产生较深的划痕。因此，研磨过程中通常采用逐渐改变磨粒大小的方法。并控制其它加工参数的加工方法，以获得更高的表面质量。一般粗磨时，为了提高生产率，通常采用较粗的粒度，而细磨时采用较细的磨粒，如表 1 所示。

表 1 不同研磨阶段常用的磨粒粒度

研磨阶段	粗研磨	精研磨	精细研磨	超精细研磨
磨粒粒度号	W40、W28	W20、W14、W10、W7、W5	W3.5、W2.5、W1.5	W1、W0.5

3 面研磨低损伤控性原则

3.1 研磨盘材质的选择原则

研磨盘作为精密研磨工件的载体，在平面研磨过程中与工件相互修整。一方面要求有良好的表面精度，以保证工件的表面质量，即砂轮不能快速变形和磨损，并能长期保持平整度，建议使用硬质材料的砂轮；另一方面，要求提高研磨加工效率，即要求砂轮材料具有一定程度的磨粒嵌入，即“嵌砂”能力，从而增加每个磨粒参与研磨过程的次数。建议使用软材料磨盘，但太软的磨盘容易研磨。这些颗粒都是嵌入的。因此，对磨盘材料的硬度特性有一个最佳选择原则。磨盘的材质对研磨过程的均匀性、材料去除率、表面粗糙度和平整度等起着重要作用，单一材料的磨盘往往只能更好地满足某一方面的要求。在粗磨过程中，铸铁磨盘下研磨蓝宝石基体的宏观表面均匀性和平整度优于合成铜盘和合成锡盘。在精磨中，使用加工过的合成铜盘。蓝宝石衬底的宏观表面均匀性较好， $Ra < 20nm$ ，表面轮廓峰谷误差小于 $1.6 \mu m$ 。铸铁磨盘、树脂铜盘、陶瓷复合盘和聚氨酯磨布四种磨盘对蓝宝石晶体研磨效率、粗糙度和产率的影响。对比分析得出，陶瓷复合材料磨盘下的研磨效率最高，达到 $0.305 \mu m/min$ ，成品率也保持在 96.08%。用聚氨酯砂布抛光的蓝宝石表面质量最好， Ra 为 $0.058 \mu m$ ，建议使用聚氨酯砂布和金刚石研磨液来改善工件表面粗糙度，并使用 B4C 研磨液的陶瓷复合圆盘，以提高成本和研磨效率。

工业中常用的研磨盘种类及特点如表 2：

表 2 常用研磨盘种类及特点

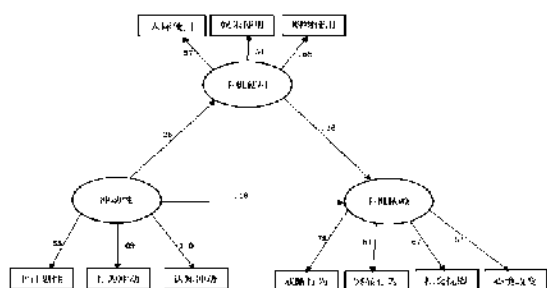
种类	应用	特点
铜研磨盘	金属、陶瓷、玻璃	硬度较低，可有效减少脆裂，常配合中等以下磨粒用于精密研磨阶段

铸铁研磨盘	金属、陶瓷	弧度硬度高, 去除效率较高, 常配合中等粒度以上磨粒用于工件的粗研磨阶段
氧化铈研磨盘	软金属(如铝、铜)	硬度低, 去除率低, 用于精密研磨阶段
锡研磨盘	陶瓷、晶体材料	去除效率低, 配合粒度较细的磨粒用于超精密研磨阶段
陶瓷研磨盘	陶瓷、应变敏感材料	硬度高, 去除效率中等, 不能掺杂金属杂质, 可使用磨粒粒度范围广泛

研磨盘材质的选择原则如下: (1) 综合考虑研磨盘的较高硬度特性和良好的“嵌砂”能力, 研磨盘一般考虑选用铸铁和纯锡材质。由于球磨铸铁盘具有硬度高、空隙多的特性, 是游离磨粒研磨加工中使用最多的研磨盘, 适合于各种金属和玻璃、陶瓷等非金属的研磨加工。(2) 可根据粗磨、半精磨和精磨不同工艺阶段和要求来选则研磨盘材质, 在粗磨和半精磨时, 一般采用铸铁材质的研磨盘, 在保证一定的研磨效率的同时兼顾加工质量, 在精研时, 一般采用铜盘、铝盘等较软材质的研磨盘, 经超精密车削修盘后, 可以获得优越的平面度和光滑表面, 精研后, 可以使工件粗糙度迅速降低。(3) 不同磨料搭配不同材质磨盘的研磨效果是不同的, 应寻求对应于不同工件的最佳磨料及研磨盘, 一般使用材质较硬的研磨盘和粒度较小的磨粒进行研磨工件, 可使工件的表面质量和平面度达到最佳效果。

3.2 研磨压力的选择原则

研磨压力是影响最终研磨效果的关键因素, 在使用游离磨料进行平面研磨加工时, 研磨压力要确保工件加工表面与研磨盘之间的平行度, 使工件与研磨盘表面较好的贴合。研磨压力具体选取范围与工件的材料性质、研磨工具的材料性质及外加压力等因素有关, 合理且最优的研磨压力常通过试验的方法获得。研磨压力 (MPa) 的计算公式为:



式中, F 为工件被加工表面所承受的总压力; N 为每次研磨的工件总数; A 为单个工件实际接触面积。

为了获得最佳的研磨效果, 研磨压力的选择原则如下: (1) 研磨压力的选择应根据不同的研磨阶段而定: 在粗磨阶段, 以提高材料去除效率为主要目的, 应选择较大的研磨压力; 在精磨阶段, 为降低表面粗糙度, 减少表面划痕, 减少损伤, 应适当降低研磨压力。当研磨压力降低时, 磨粒的受力也减小, 其运动形式由两体运动变为三体运动。工件的表面材料主要通过轧制去除。虽然材料去除率降低, 但工件表面有划痕。表面粗糙度越小, 表面质量越好。(2) 研磨压力的选择应在合理的数值范围内: 一般常用压力为 $0.05 \sim 0.3\text{MPa}$, 粗磨宜采用 $0.1 \sim 0.2\text{MPa}$, 细磨宜选用 $0.01 \sim 0.1\text{MPa}$, 不宜过大或过小。如果研磨压力在一定范围内继续增大, 当砂轮硬度较高时, 磨料颗粒会迅速破碎, 从而降低研磨效率, 加深工件表面的划痕, 增加表面粗糙度。特别是当砂轮硬度较低时, 砂轮表面会嵌入大量的磨粒。虽然切削能力提高了, 但由于研磨作用的强化, 工件和砂轮都会受热变形, 直接影响工件的加工质量和精度, 降低了砂轮的使用寿命。压力过小, 切削能力降低, 研磨效率降低。事实上, 在一定的研磨速度 V 和研磨压力 P 的范围内, 必须匹配 VP 的乘积。(3) 研磨压力的选择应结合实际研磨情况来实现精确控制: 对于不同类型的工件, 不同的磨料粒度和精度要求, 需要施加的研磨压力是不同的, 这就要求研磨加载系统提供的压力值是可控和可调的。特别是在获得高平整度、低损伤的超光滑表面时, 对研磨加载系统的压力要求快速、准确、稳定、多模式控制。

4 结束语

游离磨料平面研磨加工方式的加工精度与效率都很高, 但是表面质量相对较差, 特别地, 研磨加工残留的表层及亚表层损伤深度和磨粒嵌入等缺陷成为影响抛光时间和抛光质量的关键因素。因此探究游离磨料平面研磨加工方式下研磨损伤的主要形态、原因及选择合理的工艺参数包括研磨盘材质、研磨压力对平面研磨低损伤控性具有重要作用。

【参考文献】

- [1] 闫雯, 黄玉美, 林文周等. 一种被动柔顺控制的平面研磨力/位控制方法 [J]. 机械科学与技术, 2019, 38(6).
- [2] 林昱轩, 宋辞, 石峰等. 实现高效率低损伤研磨加工的磨料优化研究 [J]. 航空精密制造技术, 2017, 04(04): 15-19.
- [3] 姬孟托, 洪滔, 文东辉等. 无理数转速比下的平面研磨轨迹均匀性研究 [J]. 机电工程, 2016, 33(005): 532-536.