(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 116475508 A
(43)申请公布日 2023.07.25

(21)申请号 202310367019.9

(22)申请日 2023.04.07

(71)申请人 贵州大学
地址 550025 贵州省贵阳市花溪区

(72)发明人 吴頔

(74)专利代理机构 大连东方专利代理有限责任公司 21212
专利代理师 陈丽 李洪福

(51)Int.Cl.
B23H 5/08(2006.01)

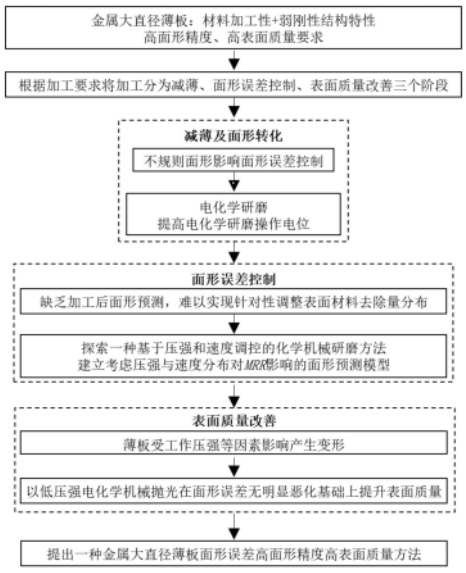
权利要求书2页 说明书11页 附图16页

(54)发明名称

一种金属大直径薄板零件加工方法

(57)摘要

本发明公开了一种金属大直径薄板零件加工方法，涉及研磨抛光技术领域，该方法通过对薄板进行电化学研磨以实现高效低应力减薄，并使工件不规则面形转化为中心对称面形。然后通过具有面形预测能力的化学机械研磨方法进行面形误差控制，以降低薄板面形误差，避免过度加工，节省资源；此外，仅需要一般的单面研磨抛光机且工作盘直径d_1、薄板直径d_2满足$d_2<d_1\leq 2d_2$，使大直径薄板零件获得微米级面形精度，降低设备成本。最后以电化学机械抛光实现薄板高表面质量加工，在面形精度无明显恶化基础上实现加工表面质量的大幅改善。本发明克服了金属大直径薄板对力、热载荷敏感问题，实现了金属大直径薄板的高面形精度高表面质量加工。



CN 116475508 A

1.一种金属大直径薄板零件加工方法,其特征在于,所述方法包括:

按照高电位低压强电化学研磨加工参数对待加工金属板进行电化学研磨,得到减薄及面形转化后的金属大直径薄板工件;

基于压强和速度调控的化学机械研磨方法对所述工件进行面形误差控制,针对性调整表面材料去除量分布;

对经过面形误差控制后的金属大直径薄板进行低压强电化学机械抛光。

2.根据权利要求1所述的一种金属大直径薄板零件加工方法,其特征在于,按照高电位低压强电化学研磨加工参数对待加工金属板进行电化学研磨,包括:

采用羟基乙叉二膦酸基电解液在高于钝化区的极限电流平阶电位下,生成缓蚀膜替代钝化膜保护金属表面,并耦合金刚石固结磨料垫的磨粒摩擦作用,在低研磨压强下进行电化学研磨。

3.根据权利要求2所述的一种金属大直径薄板零件加工方法,其特征在于,所述羟基乙叉二膦酸基电解液的成分包括:质量分数5～10wt%的羟基乙叉二膦酸、0.1～0.5wt%甲基苯并三唑、1～5wt%柠檬酸铵、3～6wt%氢氧化钾和去离子水;所述羟基乙叉二膦酸基电解液的pH为8～9。

4.根据权利要求1所述的一种金属大直径薄板零件加工方法,其特征在于,基于压强和速度调控的化学机械研磨方法对所述工件进行面形误差控制,包括:

对所述工件的初始面形进行处理,得到中心对称凸起面形或中心对称凹陷面形;

针对工件处理后面形,建立考虑压强与速度分布对材料去除量影响的大直径薄板面形预测模型;

确定化学机械研磨运动参数,所述运动参数包括:偏心距、工件自转速度和研磨垫公转速度;在面对凸起面形时,调节偏心距至$e>r_1-r_2$范围进行化学机械研磨;在面对凹陷面形时,调节偏心距至$e<r_2$范围进行化学机械研磨,当e低于工件半径r_2并向零趋近时,金属薄板的边缘相对速度高于中心处进而使边缘材料去除量高于中心处材料去除量;其中,e表示偏心距,r_1表示研磨垫半径,r_2表示工件半径;

基于所述面形预测模型和所述运动参数得到预测面形误差随加工时间变化关系,基于预测面形误差随加工时间变化关系,确定所述工件的加工时间;

按照所述加工时间和所述运动参数和所述加工时间对工件进行加工。

5.根据权利要求4所述的一种金属大直径薄板零件加工方法,其特征在于,对所述工件的初始面形进行处理,得到中心对称凸起面形或中心对称凹陷面形,包括:

若所述工件的初始面形为中心对称的凸起面形或凹陷面形,则不做处理;

若所述工件的初始面形为非中心对称面形,则根据面形总体凹凸情况选择化学机械研磨运动参数,对于总体面形为凸起面形的工件,采用$e>r_1-r_2$进行化学机械研磨,将其转变为中心对称的凹陷面形;对于总体面形为凹陷面形的工件,采用$e<r_2$进行化学机械研磨,将其转变为中心对称的凹陷面形。

6.根据权利要求1所述的一种金属大直径薄板零件加工方法,其特征在于,建立考虑压强与速度分布对材料去除量影响的大直径薄板面形预测模型,包括:

通过材料去除率与加工时间T乘积获得加工表面任意处的材料去除量,所述材料去除率为Preston系数k、工件与磨具间的压强P与相对速度绝对值V的乘积;

通过工件与磨具间全区域的压强分布、相对速度绝对值V分布、Preston系数k与加工时间T乘积获得全区域材料去除量分布；

计算工件与磨具间全区域压强分布；

计算工件与研磨垫接触区域任意点的相对速度绝对值，得到工件与磨具间全区域相对速度绝对值分布；

假定Preston系数k为一恒值，得到瞬时材料去除量分布，然后结合标定试验中实际面形结果，通过一维搜索试探法标定Preston系数k；

通过Preston系数k、工件与磨具间全区域压强分布、工件与磨具间全区域相对速度绝对值分布相乘获得工件的瞬时材料去除量分布后，根据工件自转转速得到工件自转周期内的全区域材料去除量；

通过工件的初始面形减去全区域材料去除量获得工件的预测面形。

7.根据权利要求1所述的一种金属大直径薄板零件加工方法，其特征在于，对经过面形误差控制后的金属大直径薄板进行低压强电化学机械抛光，包括：

根据初始表面粗糙度选择电解液，对于粗糙度R_a>350nm的加工表面首先采用硫代水杨酸基电解液在工作压强P≤0.3psi下对薄板零件进行电化学机械抛光，以变异系数法选择加工参数，将工件粗糙度降低至R_a≤30nm，随后采用甘氨酸-苯丙三氮唑基电解液在低抛光压强P≤0.3psi下对薄板零件进行电化学机械抛光，以变异系数法选择加工参数，将粗糙度降低至R_a≤5nm；对于粗糙度R_a≤350nm的加工表面直接采用甘氨酸-苯丙三氮唑基电解液抛光；

所述硫代水杨酸基电解液的成分包括：1～10wt％甘氨酸、1.1～1.5wt％硫代水杨酸、1～5wt％聚乙二醇、1～9wt％硅溶胶、1～5wt％氢氧化钾和去离子水，所述硫代水杨酸基电解液的pH为8.5；

所述甘氨酸-苯丙三氮唑基电解液的成分包括：3.5～4wt％甘氨酸、1～1.5wt％苯丙三氮唑、2～2.5wt％氢氧化钾、2～3wt％粒径50nm硅溶胶和去离子水，所述甘氨酸-苯丙三氮唑基电解液的pH为8.5。

8.根据权利要求4所述的一种金属大直径薄板零件加工方法，其特征在于：在e>r_1-r_2下，所述工件与磨具间压强分布特征在于全区域沿工件出边方向呈线性分布，压强分布函数的斜率随出边距离增大而增大。

9.根据权利要求4所述的一种金属大直径薄板零件加工方法，其特征在于：所述研磨垫为固结磨料垫，研磨液为以过硫酸盐为基础成分的酸性研磨液。

10.根据权利要求1～9任一项所述的一种金属大直径薄板零件加工方法，其特征在于：所述大直径薄板零件的零件直径为Φ50～Φ220mm，厚度为1.5～4mm，径厚比≥20。

一种金属大直径薄板零件加工方法

技术领域

[0001] 本发明涉及研磨抛光技术领域，具体涉及一种金属大直径薄板零件高面形精度高表面质量加工方法。

背景技术

[0002] 金属薄板零件作为常见的工程产品，在电子信息、航空航天、国防军工、能源交通和材料工程等领域得到广泛应用。面对相关领域对薄板零件服役性能的需求，往往需要对其进行精密或超精密加工以达到所要求的加工质量。一些精密物理实验如爆轰波对碰实验、飞层撞靶实验需要金属薄板满足直径Φ100～Φ200mm，厚度2.2～3mm，平面度PV≤2μm，表面粗糙度R_a≤5nm的高要求。然而在对不同材料薄板零件进行机械加工时，零件的加工方式和零件表面材料去除的非均匀性等会影响零件的加工质量；此外，金属薄板零件普遍刚性差，由于受到毛坯内应力、工装夹紧力、加工过程中切削力和切削热以及加工表面残余应力等多种因素影响，薄板零件常常会出现翘曲、弯曲和扭曲等形式的加工变形，具有复杂性和多样性，严重影响零件的加工精度。因此在机械制造领域，薄板零件高面形精度高表面质量加工始终是一个难题。

[0003] 目前金属薄板高面形精度高表面质量加工主要采用机械加工方法，其加工工艺路线主要采用切削工艺，采用如车削、超精密飞切等工艺。可由于薄板结构的弱刚性，薄板零件对力作用极为敏感，对薄板零件采用上述传统机械加工方法加工后，工件容易出现产生翘曲、塌边等变形，难以保证面形精度。通过机械研磨、磨削等其它机械加工方法加工纯铜薄板，磨具容易受切屑粘附堵塞磨粒导致磨具加工状态不稳定，难以保持恒定的材料去除率(Materialremoval rate，MRR)。而且随着加工时间推移，磨具堵塞程度越发严重，造成MRR逐渐下降，最终导致磨具失效。

[0004] 其它基于化学、电化学等多场作用的特种复合加工技术如化学机械抛光、电化学抛光、电致化学抛光、电化学机械抛光，因利用化学、电化学与机械的协同作用，可大幅弱化或抑制加工过程中力作用的负面影响，但由于工艺自身瓶颈，难以同时达到高面形精度、高表面质量指标。化学机械抛光，通过在工件表面进行化学反应生成易去除物质，然后通过抛光垫或磨粒擦除该物质，可使纯铜表面能取得亚纳米级粗糙度，但由于材料去除过程中抛光垫变形，可能引起纯铜薄板面形误差上升。电化学抛光可使纯铜能获得纳米级粗糙度，且具备无应力加工的优点，但因杂散电流腐蚀易增加面形误差。电致化学抛光由于金属零件加工表面局部高点接触到刻蚀剂浓度更高，电致化学抛光去除率更高，实现了工件局部高点的无应力优先去除，进而实现了加工表面平整化，但MRR有限，对纯铜薄板静态加工时(工件相对电极静止)MRR＝0.107μm/h，在动态加工时(工件相对电极旋转)MRR＝0.618～0.756μm/h。电化学机械抛光通过电化学反应在金属零件表面生成一层钝化膜抑制电解，再利用磨具的摩擦作用将钝化膜高点擦除，避免工件表层与磨粒直接接触。但目前偏大的抛光压强P≥0.8psi可能使磨粒划擦薄壁金属表面时引入应力，引起面形误差上升，难以达到加工质量要求。

[0005] 综上可知,目前针对金属大直径薄板零件的高面形精度高表面质量加工的研究仍然存在以下问题:

[0006] 1.金属大直径薄板因薄板结构对力作用敏感,采用机械加工工艺加工容易因薄板表层引入应力诱发变形,增大面形误差。

[0007] 2.现有特种加工工艺难以直接满足金属大直径薄板的加工质量要求。

发明内容

[0008] 有鉴于此,本发明提供了一种金属大直径薄板零件加工工艺。该工艺通过化学/电化学与机械作用的复合加工,分三个阶段依次实现金属大直径薄板的高效低应力减薄、面形误差控制、表面质量改善。为大直径薄板的高面形精度高表面质量加工提供了新技术。

[0009] 为此,本发明提供了以下技术方案:

[0010] 本发明提供了一种金属大直径薄板零件加工方法,所述方法包括:按照高电位低压强电化学研磨加工参数对待加工金属板进行电化学研磨,得到减薄及面形转化后的金属大直径薄板工件;

[0011] 基于压强和速度调控的化学机械研磨方法对所述工件进行面形误差控制,针对性调整表面材料去除量分布;

[0012] 对经过面形误差控制后的金属大直径薄板进行低压强电化学机械抛光。

[0013] 进一步地,按照高电位低压强电化学研磨加工参数对待加工金属板进行电化学研磨,包括:

[0014] 采用羟基乙叉二膦酸基电解液在高于钝化区的极限电流平阶电位下,生成缓蚀膜替代钝化膜保护金属表面,并耦合金刚石固结磨料垫的磨粒摩擦作用,在低研磨压强下进行电化学研磨。

[0015] 进一步地,所述羟基乙叉二膦酸基电解液的成分包括:质量分数5～10wt%的羟基乙叉二膦酸、0.1～0.5wt%甲基苯并三唑、1～5wt%柠檬酸铵、3～6wt%氢氧化钾和去离子水;所述羟基乙叉二膦酸基电解液的pH为8～9。

[0016] 进一步地,基于压强和速度调控的化学机械研磨方法对所述工件进行面形误差控制,包括:

[0017] 对所述工件的初始面形进行处理,得到中心对称凸起面形或中心对称凹陷面形;

[0018] 针对工件处理后面形,建立考虑压强与速度分布对材料去除量影响的大直径薄板面形预测模型;

[0019] 确定化学机械研磨运动参数,所述运动参数包括:偏心距、工件自转速度和研磨垫公转速度;在面对凸起面形时,调节偏心距至$e>r_1-r_2$范围进行化学机械研磨;在面对凹陷面形时,调节偏心距至$e<r_2$范围进行化学机械研磨,当e低于工件半径r_2并向零趋近时,金属薄板的边缘相对速度高于中心处进而使边缘材料去除量高于中心处材料去除量;其中,e表示偏心距,r_1表示研磨垫半径,r_2表示工件半径;

[0020] 基于所述面形预测模型和所述运动参数得到预测面形误差随加工时间变化关系,基于预测面形误差随加工时间变化关系,确定所述工件的加工时间;

[0021] 按照所述运动参数和所述加工时间对工件进行加工。

[0022] 进一步地,对所述工件的初始面形进行处理,得到中心对称凸起面形或中心对称

凹陷面形，包括：

[0023] 若所述工件的初始面形为中心对称的凸起面形或凹陷面形，则不做处理；

[0024] 若所述工件的初始面形为非中心对称面形，则根据面形总体凹凸情况选择化学机械研磨运动参数，对于总体面形为凸起面形的工件，采用$e>r_1-r_2$进行化学机械研磨，将其转变为中心对称的凹陷面形；对于总体面形为凹陷面形的工件，采用$e<r_2$进行化学机械研磨，将其转变为中心对称的凹陷面形。

[0025] 进一步地，建立考虑压强与速度分布对材料去除量影响的大直径薄板面形预测模型，包括：

[0026] 通过材料去除率与加工时间T乘积获得加工表面任意处的材料去除量，所述材料去除率为Preston系数k、工件与磨具间的压强P与相对速度绝对值V的乘积；

[0027] 通过工件与磨具间全区域的压强分布、相对速度绝对值V分布、Preston系数k与加工时间T乘积获得全区域材料去除量分布；

[0028] 计算工件与磨具间全区域压强分布；

[0029] 计算工件与研磨垫接触区域任意点的相对速度绝对值，得到工件与磨具间全区域相对速度绝对值分布；

[0030] 假定Preston系数k为一恒值，得到瞬时材料去除量分布，然后结合标定试验中实际面形结果，通过一维搜索试探法标定Preston系数k；

[0031] 通过Preston系数k、工件与磨具间全区域压强分布、工件与磨具间全区域相对速度绝对值分布相乘获得工件的瞬时材料去除量分布后，根据工件自转转速得到工件自转周期内的全区域材料去除量；

[0032] 通过工件的初始面形减去全区域材料去除量获得工件的预测面形。

[0033] 进一步地，对经过面形误差控制后的金属大直径薄板进行低压强电化学机械抛光，包括：

[0034] 根据初始表面粗糙度选择电解液，对于粗糙度$R_a>350nm$的加工表面首先采用硫代水杨酸基电解液在工作压强P≤0.3psi下对薄板零件进行电化学机械抛光，以变异系数法选择加工参数，将工件粗糙度降低至$R_a\leq30nm$，随后采用甘氨酸-苯丙三氮唑基电解液在低抛光压强P≤0.3psi下对薄板零件进行电化学机械抛光，以变异系数法选择加工参数，将粗糙度降低$R_a\leq5nm$；对于粗糙度$R_a\leq350nm$的加工表面直接采用甘氨酸-苯丙三氮唑基电解液抛光；

[0035] 所述硫代水杨酸基电解液的成分包括：1～10wt％甘氨酸、1.1～1.5wt％硫代水杨酸、1～5wt％聚乙二醇、1～9wt％硅溶胶、1～5wt％氢氧化钾和去离子，所述硫代水杨酸基电解液的pH为8.5；

[0036] 所述甘氨酸-苯丙三氮唑基电解液的成分包括：3.5～4wt％甘氨酸、1～1.5wt％苯丙三氮唑、2～2.5wt％氢氧化钾、2～3wt％粒径50nm硅溶胶和去离子水，所述甘氨酸-苯丙三氮唑基电解液的pH＝8.5。

[0037] 进一步地，在$e>r_1-r_2$下，所述工件与磨具间压强分布特征在于全区域沿工件出边方向呈线性分布，压强分布函数的斜率随出边距离增大而增大。

[0038] 进一步地，所述研磨垫为固结磨料垫，研磨液为以过硫酸盐为基础成分的酸性研磨液。

[0039] 进一步地，所述大直径薄板零件的零件直径为Φ50～Φ220mm，厚度为1.5～4mm，径厚比≥20。

[0040] 本发明的优点和积极效果：

[0041] 1.实现金属大直径薄板的高面形精度高表面质量加工，克服了平面弱刚性构件对力、热载荷敏感问题。

[0042] 2.在高于钝化区电位的极限电流平阶电位下，电化学研磨可以更高的材料去除率减薄工件，降低粗糙度，提高加工效率。

[0043] 3.在电化学研磨中，工件边缘受尖锐处尖端效应影响处于高电势，相较其它部位去除率高，再加上工件与对电极间极间距与材料去除率的负相关作用，可使工件不规则面形转化为中心对称面形。此外，如果工件初始面形为中心对称面形，可使工件在减薄过程中面形精度无明显恶化。

[0044] 4.降低设备成本，本发明中化学机械研磨方法不需要研磨抛光机工作盘直径≥2倍薄板直径，而且不需要配备高精度研磨机，只需要一般的单面研磨机即可使大直径薄板零件达到微米级面形精度，极大地降低了设备成本。

[0045] 5.在面形误差控制过程中指导性强，有利于提高加工效率。输入工件初始面形数据后，5min内即可得到工件面形误差随加工时间变化关系，可得到对应最低面形误差的最佳加工时间，避免过度加工，节省资源。

[0046] 6.在电化学机械抛光加工中，在面形精度无明显恶化基础上实现表面质量的大幅改善。

附图说明

[0047] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图做以简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动性的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0048] 图1为本发明实施例中电化学研磨/电化学机械抛光原理图；

[0049] 图2为本发明实施例中针对中心对称凸起、凹陷面形的基于化学机械研磨的面形误差控制策略图；

[0050] 图3为本发明实施例中面形预测模型计算原理图；

[0051] 图4为本发明实施例中出边工件与研磨垫间压强分布计算示意图；

[0052] 其中，O_1、研磨垫中心；O_2、工件中心；C、研磨垫边缘与工件表面重合点；A、C沿x_1轴负向与工件边缘交点；B、AC与y_2轴交点；D、C沿x_1轴正向与工件边缘交点；w_1、研磨垫公转转速；w_2、工件自转转速；

[0053] 图5为本发明实施例中面形预测模型计算流程图；

[0054] 图6为本发明实施例中面形误差控制流程图；

[0055] 图7为本发明实施例中金属大直径薄板零件加工方法的流程图；

[0056] 图8为本发明实施例中电化学研磨前R_a607.0nm示意图；

[0057] 图9为本发明实施例中电化学研磨10min后R_a162.4nm示意图；

[0058] 图10为本发明实施例中工件平面度随电化学研磨加工时间变化关系示意图；

[0059] 图11为本发明实施例中初始PV49.6μm示意图；

[0060] 图12为本发明实施例中电化学研磨加工90min后PV49.2μm示意图；

[0061] 图13为本发明实施例中电化学研磨加工150min后PV48.5μm示意图；

[0062] 图14为本发明实施例中工件表面径向轮廓随加工次序变化过程示意图；

[0063] 图15为本发明实施例中第1次化学机械研磨预测平面度随加工时间变化关系示意图(Φ100mm×3mm,r_1=110mm,e=70mm,w_1=30rpm,w_2=39rpm)；

[0064] 图16为本发明实施例中第1次化学机械研磨预测加工180min后PV33.9μm示意图；

[0065] 图17为本发明实施例中第1次化学机械研磨实测加工180min后PV30.9μm示意图；

[0066] 图18为本发明实施例中第1次化学机械研磨工件表面预测/实测径向轮廓对比示意图；

[0067] 图19为本发明实施例中第4次化学机械研磨初始PV12.9μm示意图；

[0068] 图20为本发明实施例中预测平面度随加工时间变化关系示意图(Φ100mm×3mm,r_1=110mm,e=70mm,w_1=30rpm,w_2=39rpm)；

[0069] 图21为本发明实施例中第4次化学机械研磨预测加工60min后PV8.3μm示意图；

[0070] 图22为本发明实施例中第4次化学机械研磨实测加工60min后PV8.5μm示意图；

[0071] 图23为本发明实施例中第4次化学机械研磨工件表面预测/实测径向轮廓对比示意图；

[0072] 图24为本发明实施例中第7次化学机械研磨初始PV4.2μm示意图；

[0073] 图25为本发明实施例中第7次化学机械研磨预测平面度随加工时间变化关系示意图(Φ100mm×3mm,r_1=110mm,e=70mm,w_1=30rpm,w_2=39rpm)；

[0074] 图26为本发明实施例中第7次化学机械研磨预测加工30min后PV2.1μm示意图；

[0075] 图27为本发明实施例中第7次化学机械研磨实测加工30min后PV2.0μm示意图；

[0076] 图28为本发明实施例中第7次化学机械研磨工件表面预测/实测径向轮廓对比示意图；

[0077] 图29为本发明实施例中低压强电化学机械抛光前面形PV=2.0μm示意图；

[0078] 图30为本发明实施例中低压强电化学机械抛光前粗糙度R_a339.4nm示意图；

[0079] 图31为本发明实施例中低压强电化学机械抛光1h后面形PV=2.4μm示意图；

[0080] 图32为本发明实施例中低压强电化学机械抛光1h后粗糙度R_a177.8nm示意图；

[0081] 图33为本发明实施例中低压强电化学机械抛光2h后面形PV=2.0μm示意图；

[0082] 图34为本发明实施例中低压强电化学机械抛光2h后粗糙度R_a4.2nm示意图。

具体实施方式

[0083] 为了使本技术领域的人员更好地理解本发明方案,下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分的实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都应当属于本发明保护的范围。

[0084] 需要说明的是,本发明的说明书和权利要求书及上述附图中的术语“第一”、“第二”等是用于区别类似的对象,而不必用于描述特定的顺序或先后次序。应该理解这样使用

的数据在适当情况下可以互换，以便这里描述的本发明的实施例能够以除了在这里图示或描述的那些以外的顺序实施。此外，术语“包括”和“具有”以及他们的任何变形，意图在于覆盖不排他的包含，例如，包含了一系列步骤或单元的过程、方法、系统、产品或设备不必限于清楚地列出的那些步骤或单元，而是可包括没有清楚地列出的或对于这些过程、方法、产品或设备固有的其它步骤或单元。

[0085] 针对物理实验对金属大直径薄板的加工要求以及现有加工工艺存在的问题，本发明提出一种金属大直径薄板高面形精度高表面质量加工工艺。首先，采用高电位低压强电化学研磨方法，实现金属薄板的高效低应力减薄；然后，采用基于压强和速度调控的化学机械研磨方法，有效减小纯铜薄板面形误差；最后，采用低压强电化学机械抛光方法，在保证面形精度情况下获得高表面质量的金属薄板。

[0086] 为了便于理解，下面分别对电化学研磨方法、化学机械研磨方法和电化学机械抛光方法进行详细说明。

[0087] (1)、高电位低压强电化学研磨方法，采用羟基乙叉二膦酸(HEDP)基电解液在高于钝化区的极限电流平阶电位下，生成缓蚀膜替代钝化膜在高于钝化区电位下保护金属加工表面，并耦合金刚石磨料垫磨粒摩擦作用，在低研磨压强下(P＝0.27psi)可快速降低加工表面粗糙度，并降低表面残余应力；此外工件边缘受尖锐处尖端效应影响处于高电势，相较其它部位去除率高，再加上工件与对电极间极间距与材料去除率的负相关作用，可使工件不规则面形转化为中心对称面形。

[0088] HEDP基电解液成分为：质量分数5～10wt％的HEDP、0.1～0.5wt％甲基苯并三唑、1～5wt％柠檬酸铵、3～6wt％氢氧化钾和去离子水；HEDP基电解液的pH为8～9。

[0089] (2)、基于压强和速度调控的化学机械研磨方法，用于大直径薄板零件面形误差控制，具体步骤为：首先，根据工件初始面形，选择处理方式；面对中心对称的凸起面形或凹陷面形，直接进入下一步；面对非中心对称面形，则先根据面形总体凹凸情况选择化学机械研磨运动参数，对于总体面形为凸起面形的工件，采用偏心距$e>r_1-r_2$进行化学机械研磨，将其转变为中心对称的凹陷面形；对于总体面形为凹陷面形的工件，采用偏心距$e<r_2$进行化学机械研磨，将其转变为中心对称的凹陷面形；然后，针对工件处理后面形，即中心对称凸起面形或中心对称凹陷面形，建立考虑压强与速度分布对材料去除量影响的大直径薄板面形预测模型，选择化学机械研磨运动参数，确定工件的预测面形误差与加工时间关系，选择合适的加工时间，预测工件加工后面形，按预定加工参数进行加工，以此降低工件的面形误差。

[0090] 其中，偏心距为e，研磨垫半径为r_1，工件半径为r_2；在面对凸起面形时，调节偏心距至$e>r_1-r_2$范围进行化学机械研磨；在此条件下，工件在研磨垫上露出边缘，以增大工件中心区域与磨具间的压强、工件中心区域相对研磨垫的速度，减少工件边缘与磨具接触时间，进而使得工件中心区域材料去除量增大，快速降低面形误差；在面对凹陷面形时，调节偏心距至$e<r_2$范围进行化学机械研磨。当偏心距e低于工件半径r_2并向零趋近时，纯铜薄板的边缘相对速度高于中心处进而使边缘材料去除量高于中心处材料去除量，工件全区域材料去除量径向分布特征在于其分布近似抛物线，中心低，边缘高，以此降低工件的面形误差。

[0091] 运动参数包括偏心距、工件自转速度、研磨垫公转速度。

[0092] 通过工件初始面形减去全区域材料去除量获得预测面形，加工表面任意处材料去

除量计算基于Preston方程，通过MRR与加工时间T乘积获得，而MRR为Preston系数k、工件与磨具间的压强P与相对速度绝对值V的乘积；接下来，全区域材料去除量分布则通过工件与磨具间全区域的压强分布、相对速度绝对值V分布、Preston系数k与加工时间T乘积获得。

[0093] 在偏心距e>r_1-r_2下，工件与磨具间压强分布特征在于全区域沿工件出边方向呈线性分布，压强分布函数的斜率随出边距离增大而增大。

[0094] 研磨垫为固结磨料垫，研磨液为过硫酸盐为基础成分的酸性研磨液。

[0095] 大直径薄板零件，零件直径Φ50～Φ220mm，厚度1.5～4mm，径厚比≥20。

[0096] 上述化学机械研磨方法中具有面形预测能力，压强、相对速度绝对值分布是材料去除量分布的决定性因素，因此应率先确定工件压强分布、相对速度绝对值分布。

[0097] 在偏心距e>r_1-r_2下，本发明对圆形工件在圆弧边界出边状态下压强分布进行计算，如图4所示。图4中主要参数如下：$O_1C=r_1$，研磨垫半径；$O_2D=r_2$，工件半径；$O_2B=y$，工件上出边范围纵坐标；CD=l，出边距离；AD=s，梁全长；f(x)，工件AC段与研磨垫间压强分布；a,b，压强分布函数相应系数；$O_1O_2=e$，偏心距；w_1，研磨垫公转转速；w_2，工件自转转速。

[0098] 假设工件上任意一条沿x_1方向的梁AD与边缘交界处为C，则出边距离l与偏心距e、研磨垫半径r_1及工件半径r_2的关系为：

[0099] $$l = e - \sqrt{r_1^2 - y^2} + \sqrt{r_2^2 - y^2} \tag{1}$$

[0100] 梁全长s与工件半径r_2、梁所在纵坐标y的关系为：

[0101] $$s = 2 \cdot \sqrt{r_2^2 - y^2} \tag{2}$$

[0102] 根据前文推论，当工件中所有伸出梁的形心均未超出支撑边缘时，未露出边缘的伸出梁与露出边缘的伸出梁间不存在剪力与弯矩，即当工件上沿O_2B所在直径未露出研磨垫时，工件上任意两条沿x_1方向的梁间不存在剪力和弯矩。若沿O_2B所在直径皆位于研磨垫上，则工件与O_2B所在直径交点(e,r_2)必位于研磨垫上，偏心距e、研磨垫半径r_1、工件半径r_2必满足：

[0103] $$e^2 + r_2^2 \le r_1^2 \tag{3}$$

[0104] 设m为工件质量、g为重力加速度，若偏心距e、研磨垫半径r_1、工件半径r_2满足式(3)条件，以线性模型为基础模型计算压强分布函数f(x)，得

[0105] $$\begin{cases} a = \dfrac{6mgsl}{2\pi r_2^2 (s-l)^3} \\ b = \dfrac{mgs(s-4l)}{2\pi r_2^2 (s-l)^2} \\ f(x) = 2a \cdot [x - (e - \dfrac{s}{2})] + 2b \end{cases} \tag{4}$$

[0106] 通过式(4)进而可以得到偏心距e>r_1-r_2下工件与磨具间全区域压强分布。在偏心距e<r_2下，通过式(4)得出工件与磨具间全区域压强分布为匀强分布，由于此时工件已完全位于研磨垫上，符合近似匀强分布假设。

[0107] 随后对工件与研磨垫的相对速度绝对值分布进行计算，以图4中C点为例，设C点坐标为(x,y)，设研磨垫上与C点重合处速度V_1，工件上C点处速度V_2，则V_1沿x_1轴分解速度为：

[0108] $V_{1x}=-w_1 \cdot y$ (5)

[0109] V_1沿y_1轴分解速度为：

[0110] $V_{1y}=w_1 \cdot x$ (6)

[0111] 同理，V_2沿x_1轴分解速度为：

[0112] $V_{2x}=-w_2 \cdot y$ (7)

[0113] V_2沿y_1轴分解速度为：

[0114] $V_{2y}=w_2 \cdot (x-e)$ (8)

[0115] 结合式(5)至式(8)可得C点相对速度绝对值为：

[0116] $$\left|V_{相对}\right|=\sqrt{(V_{1x}-V_{2x})^2+(V_{1y}-V_{2y})^2} \quad (9)$$

[0117] 即：

[0118] $$\left|V_{相对}\right|=\sqrt{(w_2-w_1)^2 \cdot y^2+(w_1x-w_2x+w_2e)^2} \quad (10)$$

[0119] 以此类推，通过式(10)可得到工件与研磨垫接触区域任意点的相对速度绝对值，在偏心距$e>r_1-r_2$与$e<r_2$下相对速度绝对值均符合式(10)。然后计算瞬时材料去除量。但Preston系数k尚未标定，可以先设定k为一恒值进行计算，检验工件材料去除量分布趋势是否符合预期，后期结合标定试验中实际面形结果，通过计算，获得工件的瞬时材料去除量分布后，根据工件自转转速可得工件自转周期内的材料去除量分布结果。之后以工件初始面形减去全区域材料去除量即可得到预测面形，进而可以得到工件预测面形误差随加工时间变化关系，最后对工件进行面形误差控制。

[0120] 面形预测模型的计算流程如图5所示，先将工件初始面形导入面形预测模型，然后根据工件初始面形，选择运动参数以针对性调整铜板表面材料去除量分布，接着计算工件平面度随加工时间变化关系，进而根据工件平面度随加工时间变化关系选择加工时间，最后获取工件在所选加工参数下的预测面形。

[0121] 面形误差控制建立在面形预测模型上，其加工流程如图6所示，首先测量工件待加工面形并将其导入面形预测模型，然后选择加工参数(选择运动参数，计算平面度随加工时间变化关系，根据上述变化关系，在平面度下降至最低点前，结合实际工况选择使平面度降低的有效时间)，接着当预测平面度下降后，按面形预测模型中选择参数进行加工工件，若工件实测平面度下降，则达到面形误差控制目的。

[0122] (3)、电化学机械抛光方法，根据初始表面粗糙度选择电解液，对于粗糙度$R_a>350nm$的加工表面首先采用硫代水杨酸基电解液在工作压强(P≤0.3psi)下对薄板零件进行电化学机械抛光，以变异系数法选择加工参数，将工件粗糙度降低至$R_a\leqslant30nm$，随后采用甘氨酸-苯丙三氮唑基电解液在低抛光压强(P≤0.3psi)下对薄板零件进行电化学机械抛光，以变异系数法选择加工参数，将粗糙度降低至$R_a\leqslant5nm$。对于粗糙度$R_a\leqslant350nm$的加工表面直接采用甘氨酸-苯丙三氮唑基电解液抛光。

[0123] 硫代水杨酸基电解液成分为1～10wt％甘氨酸、1.1～1.5wt％硫代水杨酸、1～5wt％聚乙二醇、1～9wt％硅溶胶、1～5wt％氢氧化钾(KOH)和去离子水，pH为8.5。

[0124] 甘氨酸-苯丙三氮唑基电解液，其成分为3.5～4wt％甘氨酸、1～1.5wt％苯丙三氮唑、2～2.5wt％KOH、2～3wt％粒径50nm硅溶胶和去离子水，pH＝8.5。

[0125] 下面以加工纯铜大直径薄板零件的具体实例对上述金属大直径薄板零件高面形

精度高表面质量加工方法进行详细说明。如图7所示，该加工方法包括电化学研磨(减薄及面形转化)、面形误差控制和电化学机械抛光(表面质量改善)三个阶段。

[0126] 在电化学研磨阶段，按高电位低压强电化学研磨加工参数对纯铜薄板(Φ100mm×3mm)加工10min，通过Taylor轮廓仪检测粗糙度，加工前后的表面粗糙度如图8、图9所示。经电化学研磨后，铜片的表面粗糙度由R_a607.0nm降至R_a162.4nm，下降了73.2%。

[0127] 紧接着，为检验高电位低压强电化学研磨方法对纯铜薄板平面度的保持能力，对纯铜薄板Φ100mm×3mm进行加工，连续加工5次，每次加工30min，加工后纯铜薄板通过平面度仪检测加工面形，记录下其面形及平面度值。

[0128] 结果显示，经5次高电位低压强电化学研磨后，纯铜薄板平面度保持在约PV49.0μm，无进一步上升，如图10所示。加工后，纯铜薄板的面形仍保持中心对称的凸起面形，如图11～13所示，这有利于下一阶段通过基于压强和速度调控的化学机械研磨方法减小其面形误差。MRR经称重法计算约1μm/min，符合预期。综上，高电位低压强电化学研磨可在0.27psi下获得MRR≈1μm/min，使纯铜薄板加工表面取得粗糙度约R_a150nm并避免面形误差明显上升。

[0129] 接下来，对纯铜薄板(Φ100mm×3mm)进行面形误差控制，面形误差控制过程中采用的加工参数及面形误差结果如表1所示，工件表面径向轮廓随加工次序变化过程如图14所示。结果显示工件的面形误差随加工次序有效减小，工件表面径向轮廓趋于平整。

[0130] 表1

[0131]

加工次序	初始PV (μm)	研磨垫半径 r_1(mm)	偏心距 e(mm)	公转转速 w_1(rpm)	自转转速 w_2(rpm)	加工时间 (min)	预测PV (μm)	实测PV (μm)
No.1	48.5	110	70	30	39	180	33.9	30.9
No.2	30.9	110	70	30	39	120	18.7	17.8
No.3	17.8	110	70	30	39	60	12.8	12.9
No.4	12.9	110	70	30	39	60	8.3	8.5
No.5	8.5	110	70	30	39	20	7.0	6.9
No.6	6.9	110	70	30	39	40	3.9	4.2
No.7	4.2	110	70	30	39	30	2.1	2.0

[0132] 在第1次加工中，根据图13所示，经减薄后，纯铜薄板面形呈现中心对称的凸起面形(PV＝48.5μm)，由于面形无明显台阶凸起，应使出边距离不大于工件半径的20%。因此选择偏心距e＝70mm，公转转速w_1＝30rpm、自转转速w_2＝39rpm导入面形预测模型(研磨垫半径r_1＝110mm)。通过计算，得到预测平面度(PV)随加工时间变化关系，如图15所示，平面度随加工时间推移呈线性下降趋势。但是亲水性金刚石固结磨料垫需要定时清理修整，因此加工时长不宜过长，先选择加工时间t＝180min。根据预测，纯铜薄板经180min加工后，平面度由PV48.5μm降为PV33.9μm，工件面形仍为中心对称的凸起面形，如图16所示。

[0133] 以e＝70mm、w_1＝30rpm、w_2＝39rpm、T＝180min对纯铜薄板进行化学机械研磨，加工

后，通过平面度仪测量工件面形，工件实测平面度为PV30.9μm，如图17所示，平面度预测误差率低于10％。预测、实测表面径向轮廓基本相似，如图18所示。

[0134] 在第4次加工中，工件初始面形为PV12.9μm，如图19所示。由于工件初始面形为中心对称的凸起面形且无明显台阶，沿用第1次运动参数(偏心距e＝70mm、公转转速w_1＝30rpm、自转转速为w_2＝39rpm)。将运动参数导入面形预测模型，通过计算，得到预测平面度随加工时间变化关系，如图20所示，平面度先随加工时间推移而下降，但在100min后会出现迟滞，在140min后平面度随加工时间推移而上升。由于预测纯铜薄板平面度在加工120min后出现上升，加工时间应满足T≤120min。选择加工时间t＝60min，根据预测，经60min加工后，纯铜薄板预测平面度由PV12.9μm降为PV8.3μm，仍是中心对称的凸起面形，如图21所示。

[0135] 以e＝70mm、w_1＝30rpm、w_2＝39rpm、T＝60min对纯铜薄板加工后，通过FlatMaster200型平面度仪测量工件，工件实测平面度为PV8.5μm，如图22所示，平面度预测误差率低于10％。预测、实测表面径向轮廓吻合良好，如图23所示。

[0136] 在第7次加工中，如图24所示。虽然工件初始平面度已低于PV5μm，但在Φ80mm内出现明显台阶，应采用偏心距e＝70mm使材料去除量集中于Φ80mm以内的区域，沿用公转转速w_1＝30rpm、自转转速为w_2＝39rpm的参数组合导入面形预测模型。通过计算，得到预测平面度(PV)随加工时间变化关系，如图25所示，平面度先随加工时间推移而下降，在30min后随加工时间推移而上升，因此选择加工时间t＝30min。根据预测，纯铜薄板经30min加工后，平面度由PV4.2μm降为PV2.1μm，仍是中心对称的凸起面形，如图26所示。

[0137] 以e＝70mm、w_1＝30rpm、w_2＝39rpm、T＝30min对纯铜薄板进行化学机械研磨，加工后，通过平面度仪测量工件面形，工件实测平面度为PV2.0μm，如图27所示。平面度预测误差率低于10％。预测表面径向轮廓与实测表面径向轮廓基本吻合。综上所述，经7次基于压强和速度调控的化学机械研磨后，纯铜薄板平面度由PV48.5μm降为PV2.0μm，其中平面度预测误差率低于10％，预测表面径向轮廓与实测表面径向轮廓基本吻合，有效减小纯铜薄板面形误差，如图28所示。

[0138] 经面形误差控制后，本发明使用B_2电解液对纯铜薄板进行低压强电化学机械抛光，加工参数为抛光压强P＝0.27psi，抛光垫公转转速为w_1＝40rpm，工件自转转速w_2＝45rpm，电解液流量为25ml/min。抛光前纯铜薄板的平面度及粗糙度如图29、图30所示，平面度为PV2.0μm，粗糙度为R_a339.4nm，粗糙度测量范围(0.36mm×0.27mm)，粗糙度较大，这是由于研磨液中过硫酸盐的强氧化作用恶化表面质量。为提升表面质量，对纯铜薄板电化学机械抛光1h后，纯铜薄板的平面度上升至PV2.4μm，粗糙度降低至R_a177.8nm，较抛光前有明显改善，表面划痕数量明显减少，如图31、图32所示。该结果初步证明了B_2电解液在低抛光压强下对纯铜薄板的表面质量的提升效果。

[0139] 再经电化学机械抛光1h后，纯铜薄板的平面度降至PV2μm；粗糙度降低至R_a4.2nm，较抛光前有明显改善，表面均匀，如图33、图34所示。综上所述，根据纯铜大直径薄板高面形精度高质量加工方案对纯铜薄板(Φ100mm×3mm)进行加工，经过减薄、面形误差控制、表面质量改善后，纯铜薄板最终达到平面度PV≤2μm，粗糙度R_a≤5nm。

[0140] 上述实施例中的加工方法，通过对薄板进行电化学研磨以实现高效低应力减薄，然后通过具有面形预测能力的化学机械研磨以降低薄板面形误差，最后以电化学机械抛光实现薄板高表面质量加工。在高于钝化区电位的极限电流平阶电位下，电化学研磨可以更

高的材料去除率减薄工件，降低粗糙度，提高加工效率，并凭借工件边缘尖端效应以及极间距与材料去除率的负相关作用，使工件不规则面形转化为中心对称面形。在面形误差控制过程中，只需向面形预测模型提供工件初始面形数据，输入后5min内即可得到所选加工参数对应的工件预测面形，输入工件初始面形数据后，5min内即可得到工件面形误差随加工时间变化关系，可得到对应最低面形误差的最佳加工时间，避免过度加工，节省资源；此外仅需要一般的单面研磨抛光机且工作盘直径d_1、薄板直径d_2满足$d_2<d_1\leqslant 2d_2$，使大直径薄板零件获得微米级面形精度，降低设备成本。在电化学机械抛光加工中，在面形精度无明显恶化基础上实现加工表面质量的大幅改善。本发明克服了金属大直径薄板对力、热载荷敏感问题，实现了金属大直径薄板的高面形精度高表面质量加工。

[0141] 最后应说明的是：以上各实施例仅用以说明本发明的技术方案，而非对其限制；尽管参照前述各实施例对本发明进行了详细的说明，本领域的普通技术人员应当理解：其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改，或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换；而这些修改或者替换，并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的范围。

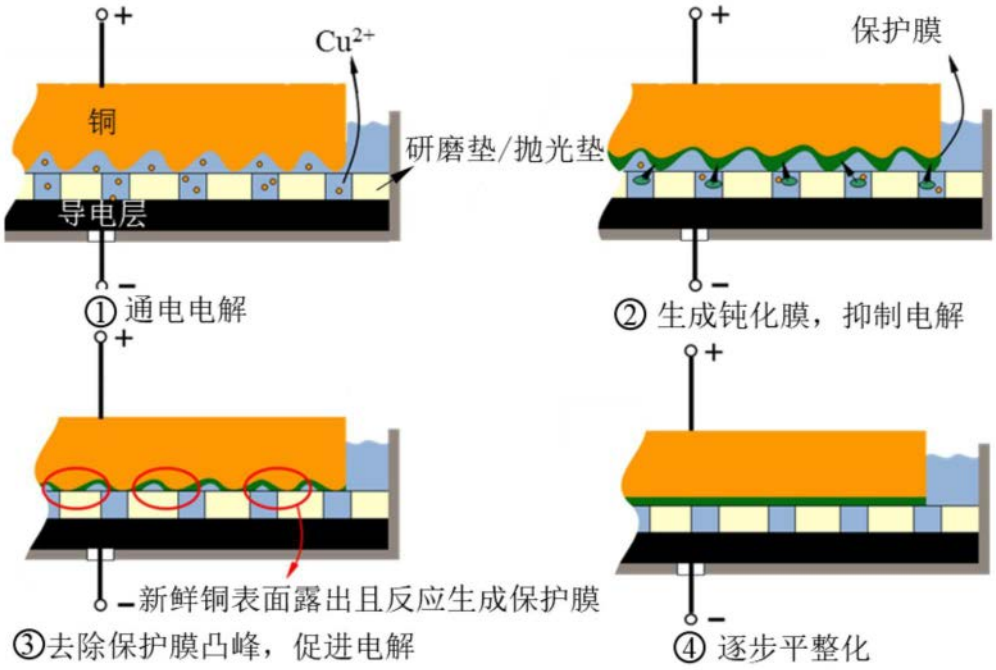

铜
Cu^{2+}
研磨垫/抛光垫
导电层
①通电电解
保护膜
②生成钝化膜，抑制电解
新鲜铜表面露出且反应生成保护膜
③去除保护膜凸峰，促进电解
④逐步平整化

图1

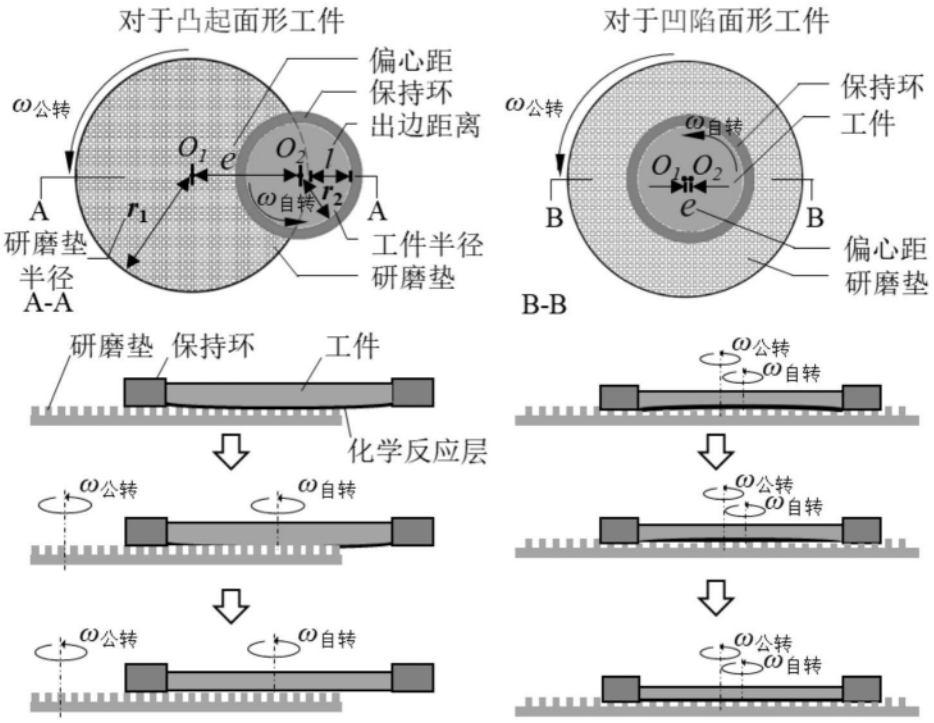

对于凸起面形工件
偏心距
保持环
出边距离
$\omega_{公转}$
O_1
e
O_2
l
r_2
$\omega_{自转}$
A
A
r_1
研磨垫
半径
A-A
工件半径
研磨垫
对于凹陷面形工件
保持环
工件
$\omega_{公转}$
$\omega_{自转}$
O_1 O_2
B
B
e
偏心距
研磨垫
B-B
研磨垫
保持环
工件
化学反应层

图2

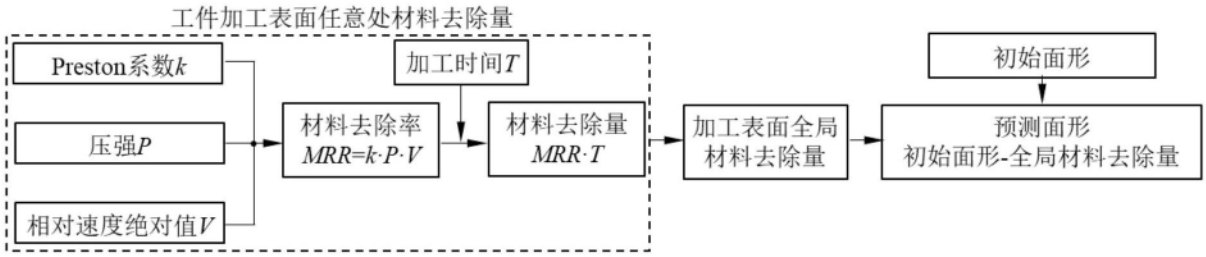

工件加工表面任意处材料去除量
Preston系数k
压强P
相对速度绝对值V
加工时间T
材料去除率
MRR=k·P·V
材料去除量
MRR·T
加工表面全局
材料去除量
初始面形
预测面形
初始面形-全局材料去除量

图3

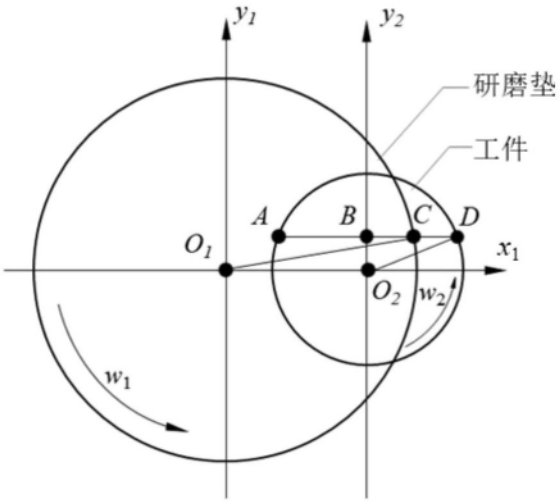

y1
y2
研磨垫
工件
A
B
C
D
O1
O2
x1
w1
w2

图4

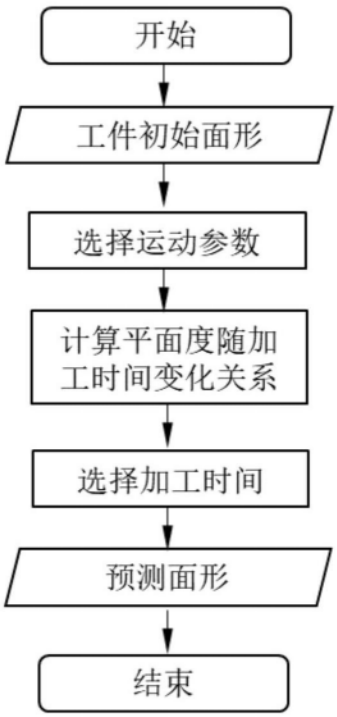


图5

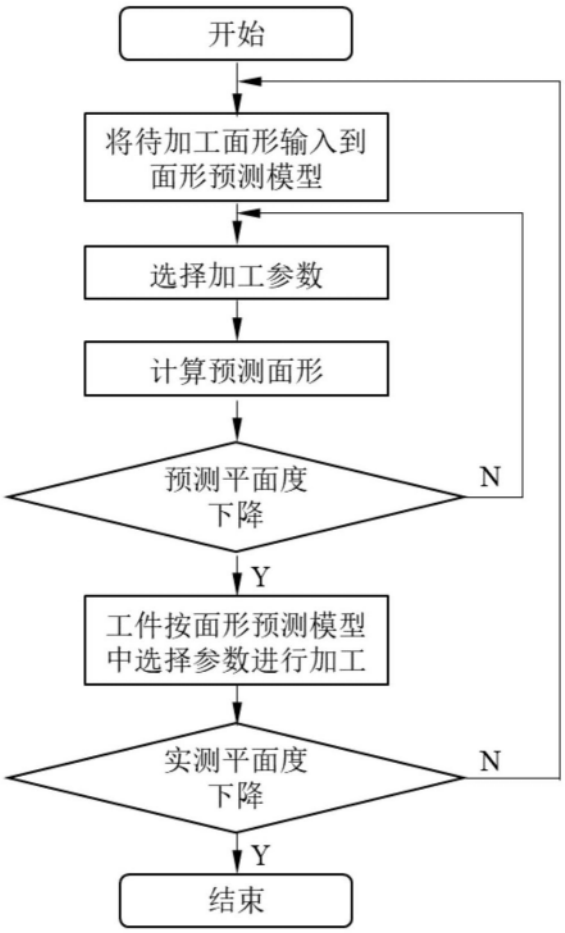

开始
将待加工面形输入到面形预测模型
选择加工参数
计算预测面形
预测平面度下降
N
Y
工件按面形预测模型中选择参数进行加工
实测平面度下降
N
Y
结束

图6

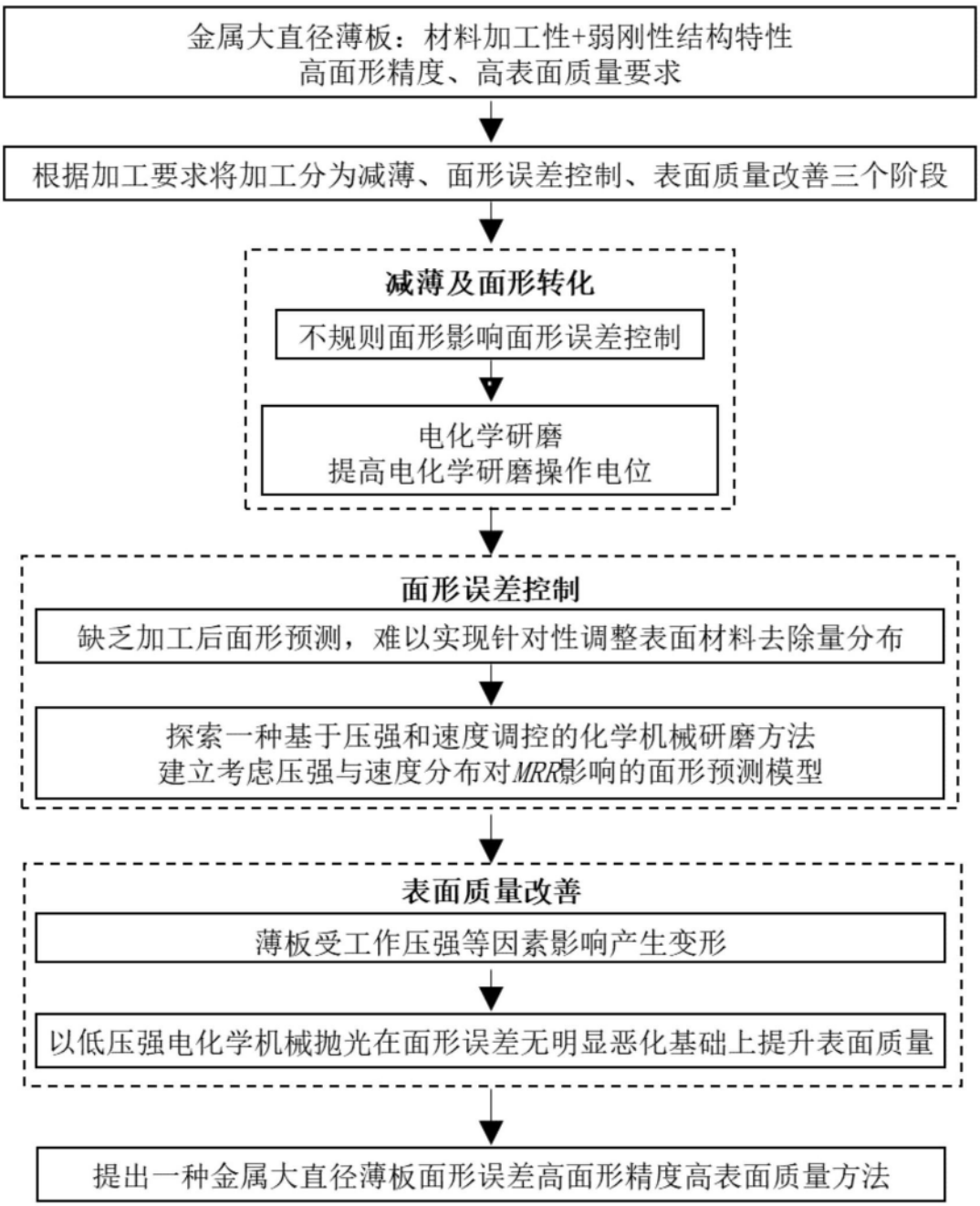

金属大直径薄板：材料加工性+弱刚性结构特性
高面形精度、高表面质量要求
根据加工要求将加工分为减薄、面形误差控制、表面质量改善三个阶段
减薄及面形转化
不规则面形影响面形误差控制
电化学研磨
提高电化学研磨操作电位
面形误差控制
缺乏加工后面形预测，难以实现针对性调整表面材料去除量分布
探索一种基于压强和速度调控的化学机械研磨方法
建立考虑压强与速度分布对MRR影响的面形预测模型
表面质量改善
薄板受工作压强等因素影响产生变形
以低压强电化学机械抛光在面形误差无明显恶化基础上提升表面质量
提出一种金属大直径薄板面形误差高面形精度高表面质量方法

图7

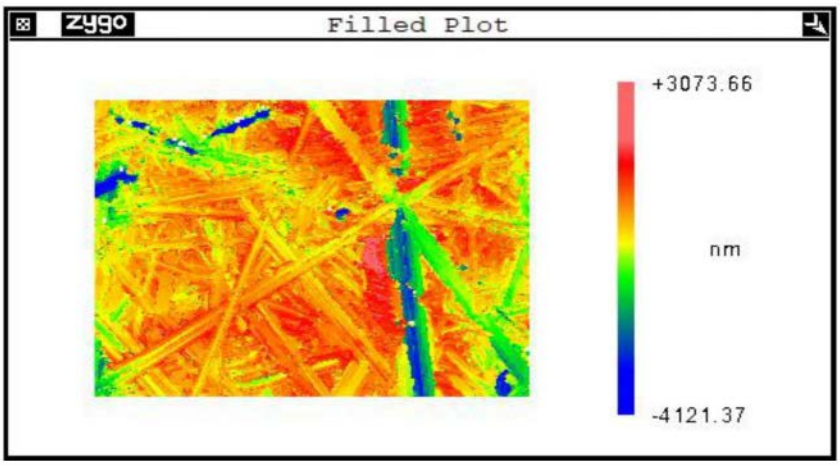

zygo
Filled Plot
+3073.66
nm
-4121.37

图8

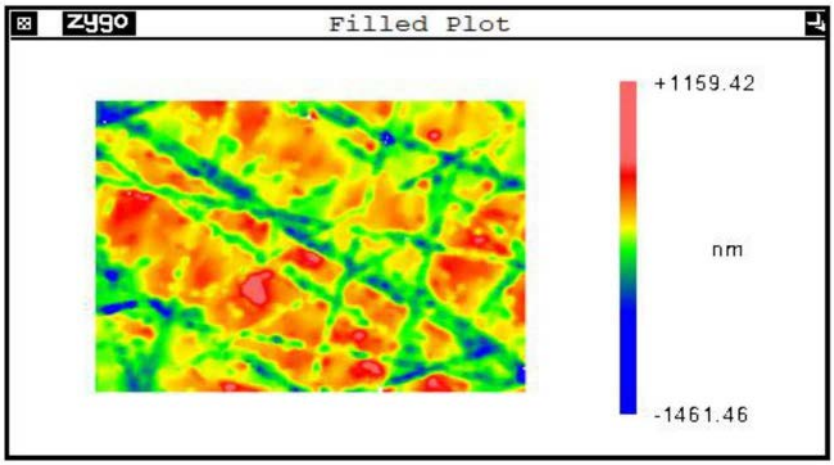

zygo
Filled Plot
+1159.42
nm
-1461.46

图9

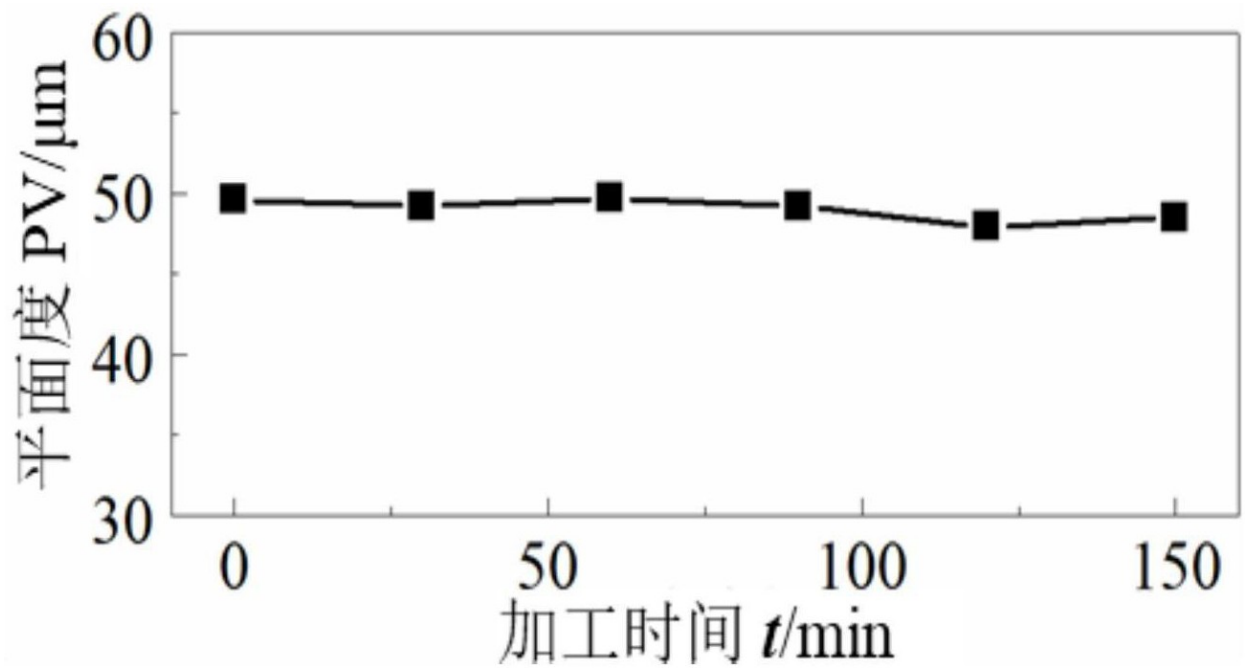

60
50
40
30
平面度 PV/μm
0
50
100
150
加工时间 t/min

图10

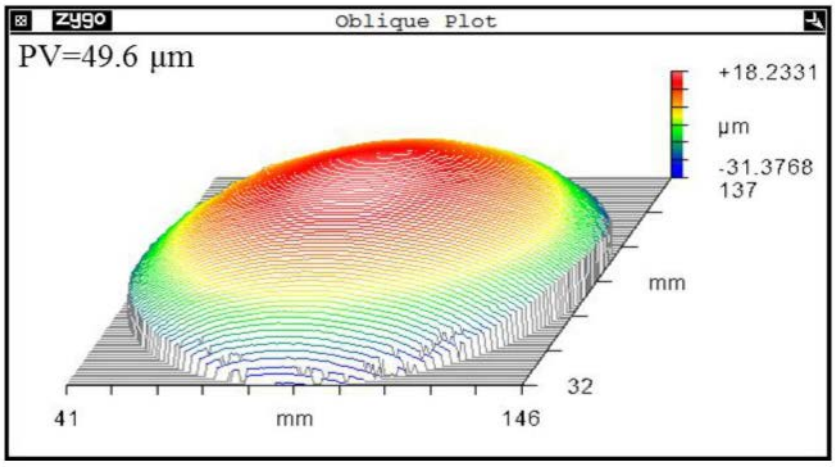

zygo
Oblique Plot
PV=49.6 μm
+18.2331
μm
-31.3768
137
mm
32
41
mm
146

图11

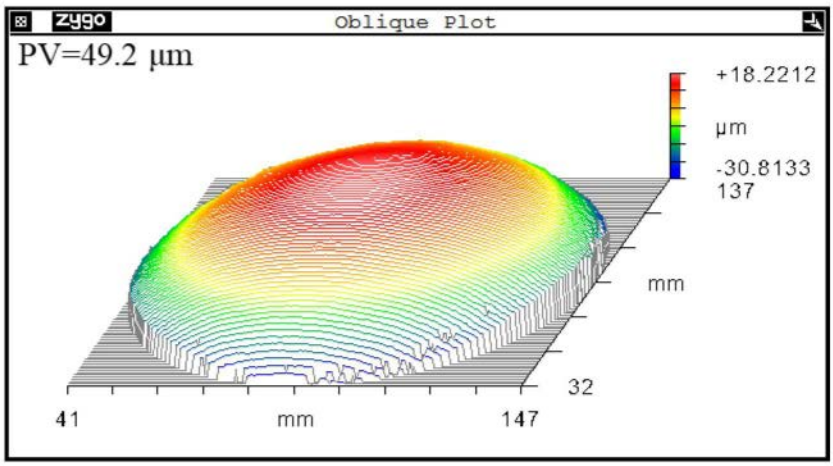

zygo
Oblique Plot
PV=49.2 μm
+18.2212
μm
-30.8133
137
mm
32
41
mm
147

图12

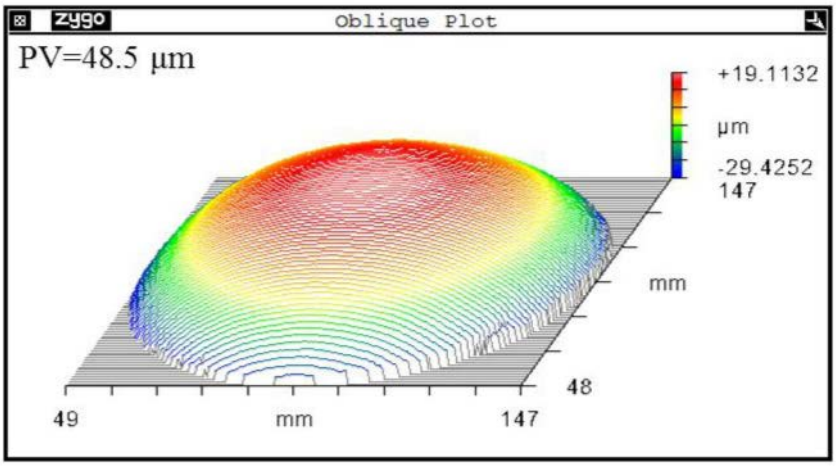

zygo
Oblique Plot
PV=48.5 μm
+19.1132
μm
-29.4252
147
mm
48
49
mm
147

图13

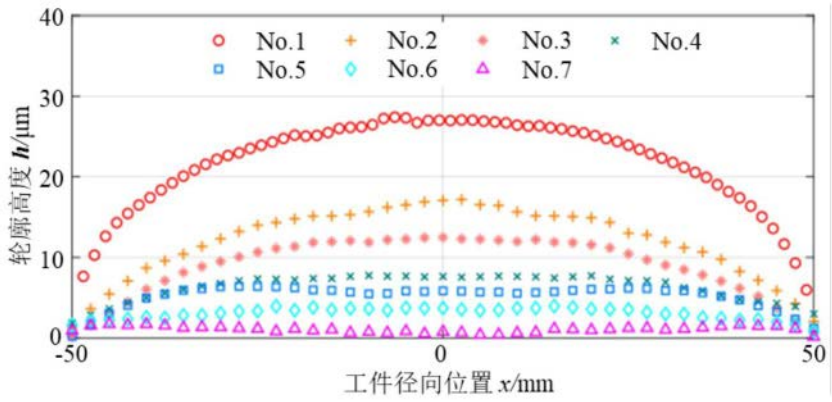

No.1
No.2
No.3
No.4
No.5
No.6
No.7
轮廓高度 h/μm
工件径向位置 x/mm
40
30
20
10
0
-50
0
50

图14

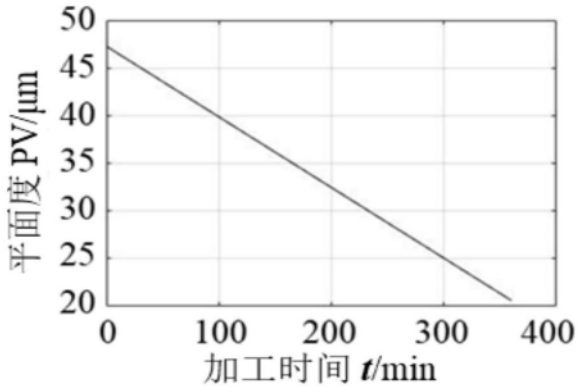

平面度 PV/μm
50
45
40
35
30
25
20
0
100
200
300
400
加工时间 t/min

图15

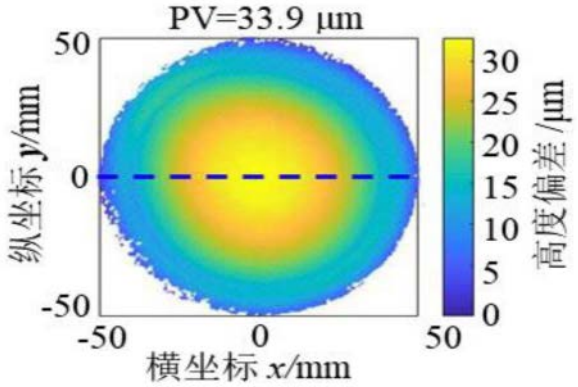

PV=33.9 μm
纵坐标 y/mm
50
0
-50
-50
0
50
横坐标 x/mm
30
25
20
15
10
5
0
高度偏差 /μm

图16

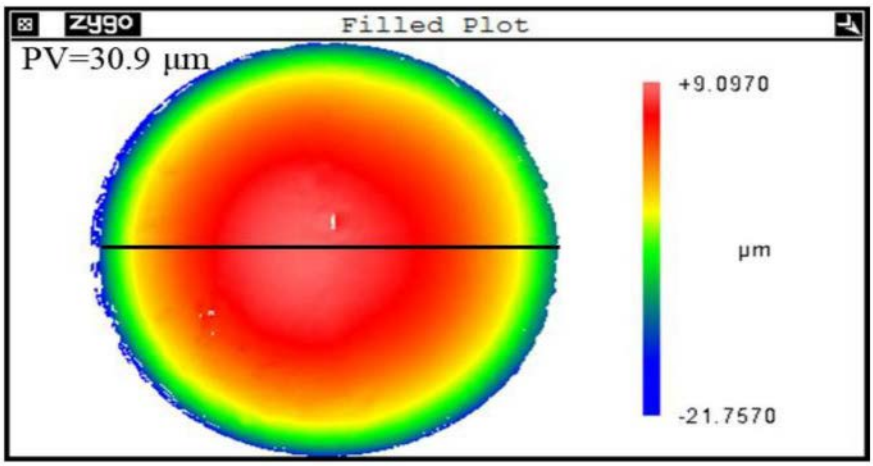

zygo
Filled Plot
PV=30.9 μm
+9.0970
μm
-21.7570

图17

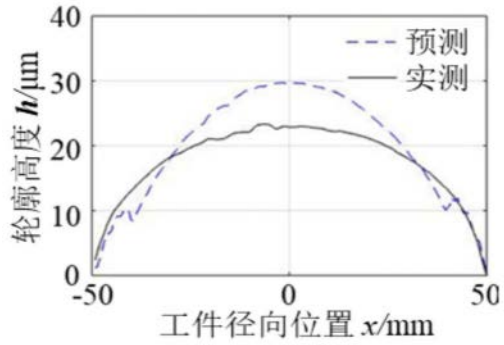

预测
实测
轮廓高度 h/μm
工件径向位置 x/mm
40
30
20
10
0
-50
0
50

图18

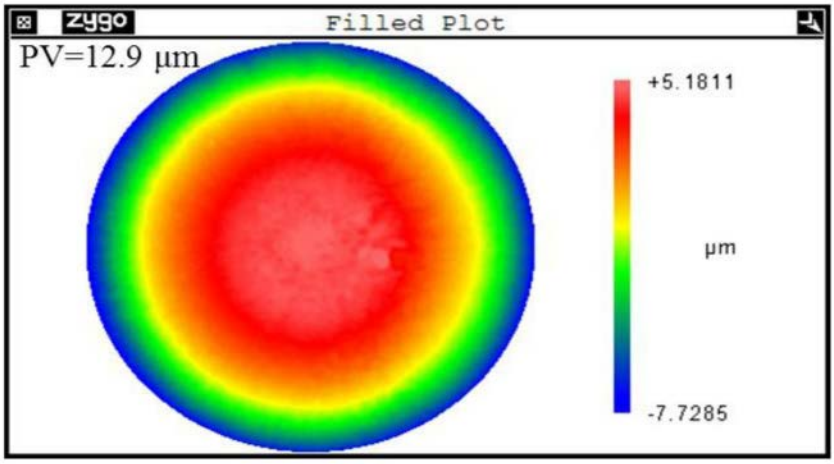

zygo
Filled Plot
PV=12.9 μm
+5.1811
μm
-7.7285

图19

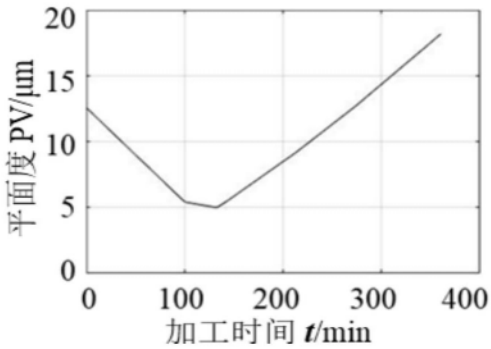

平面度 PV/μm
加工时间 t/min
20
15
10
5
0
0
100
200
300
400

图20

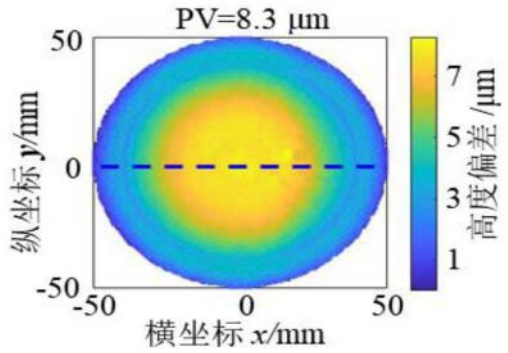

PV=8.3 μm
50
0
-50
-50
0
50
纵坐标 y/mm
横坐标 x/mm
7
5
3
1
高度偏差 /μm

图21

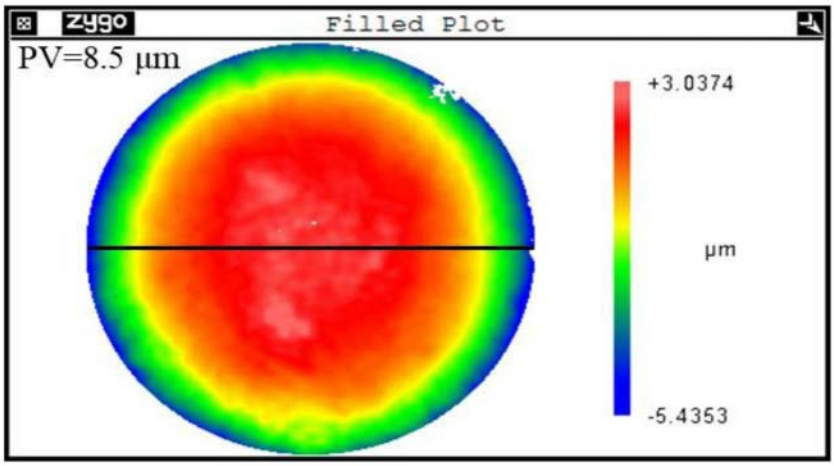

zygo
Filled Plot
PV=8.5 μm
+3.0374
μm
-5.4353

图22

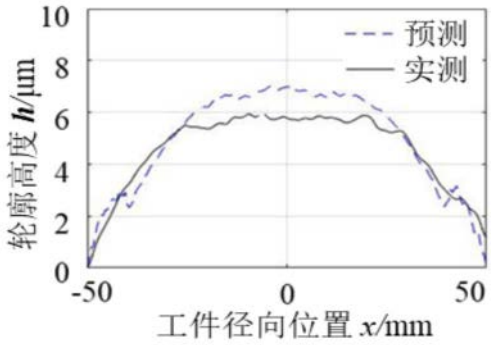

10
8
6
4
2
0
-50
0
50
轮廓高度 h/μm
工件径向位置 x/mm
预测
实测

图23

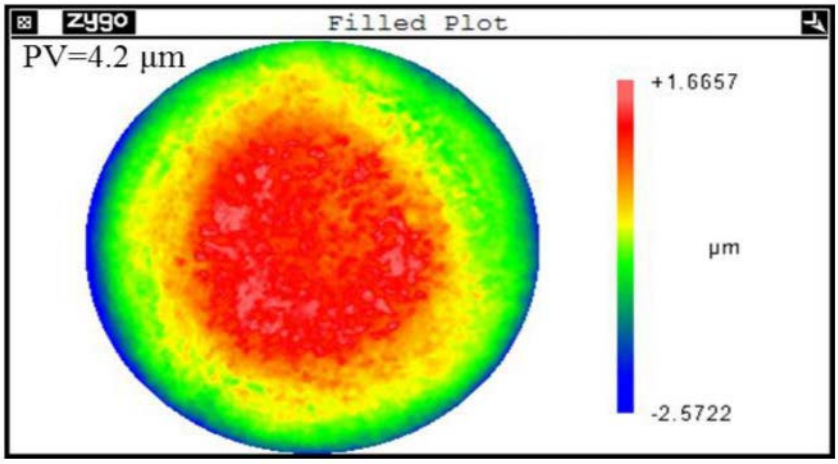

zygo
Filled Plot
PV=4.2 μm
+1.6657
μm
-2.5722

图24

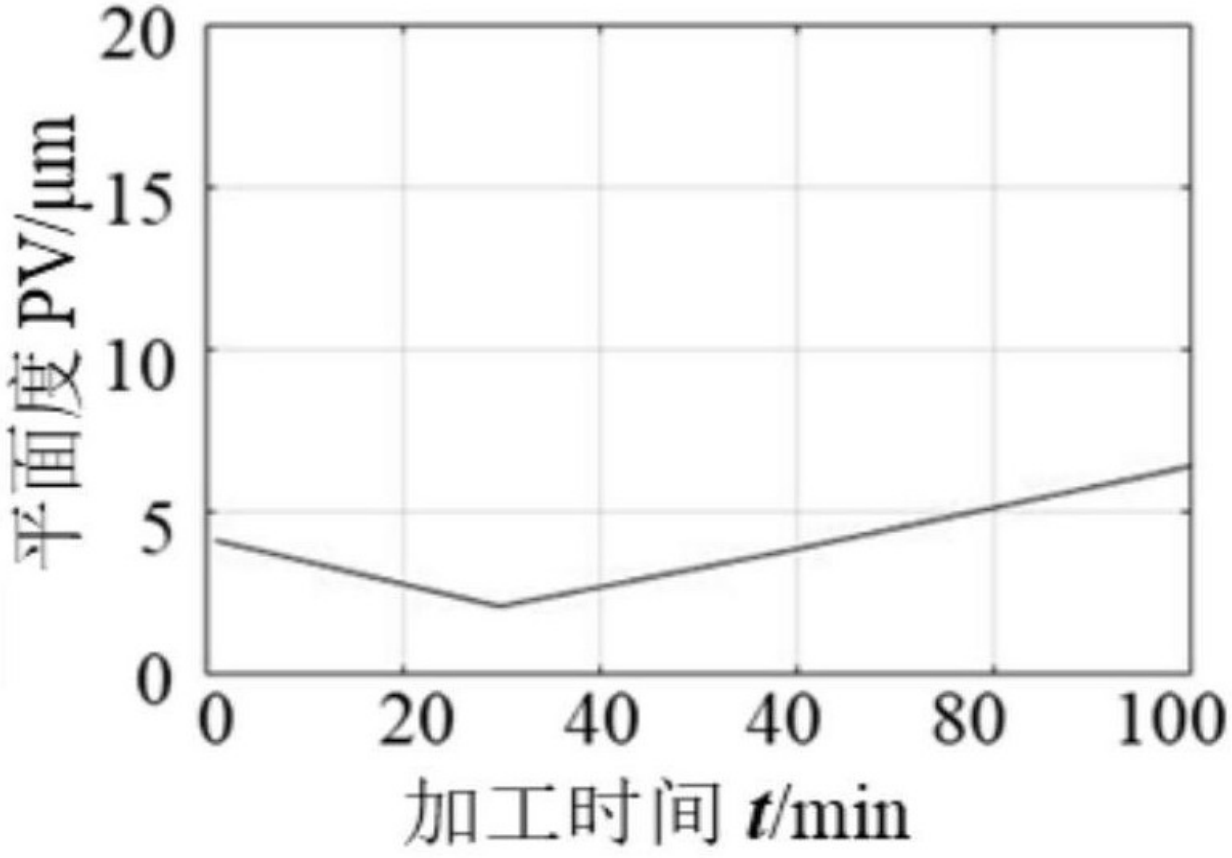

20
15
10
5
0
平面度 PV/μm
0
20
40
40
80
100
加工时间 t/min

图25

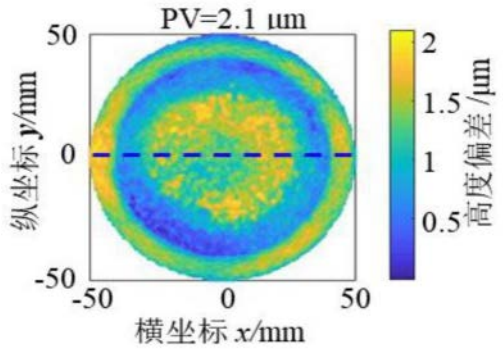

PV=2.1 μm
50
0
-50
-50
0
50
纵坐标 y/mm
横坐标 x/mm
2
1.5
1
0.5
高度偏差/μm

图26

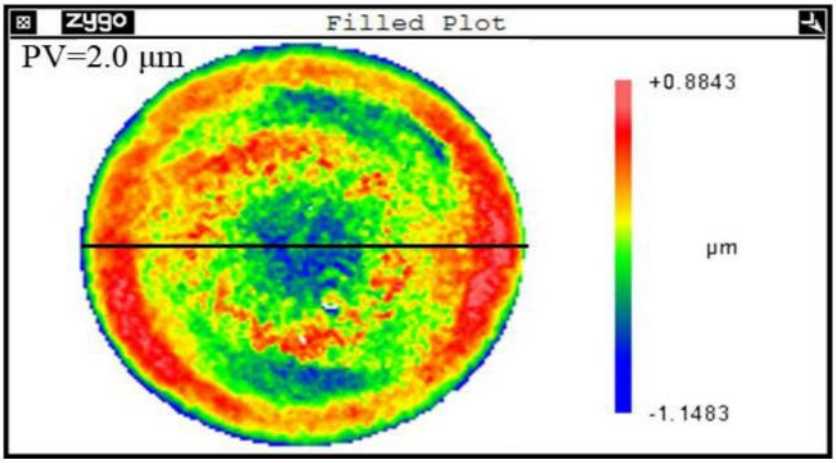

zygo
Filled Plot
PV=2.0 μm
+0.8843
μm
-1.1483

图27

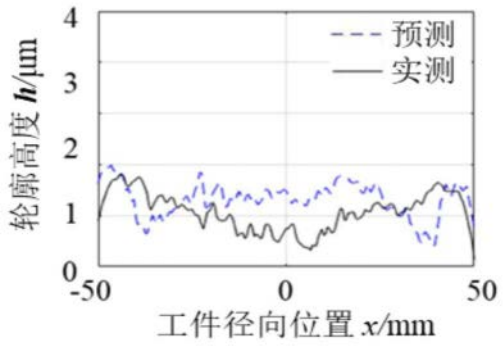

4
3
2
1
0
-50
0
50
轮廓高度 h/μm
工件径向位置 x/mm
预测
实测

图28

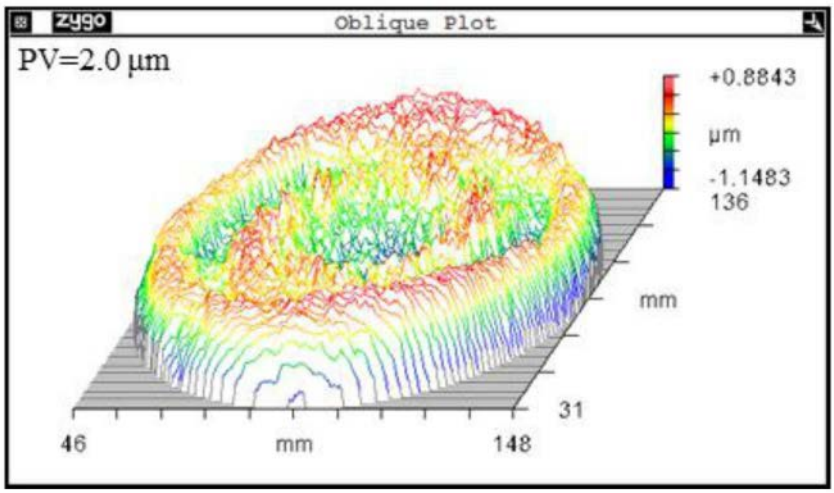

zygo
Oblique Plot
PV=2.0 µm
+0.8843
µm
-1.1483
136
mm
31
46
mm
148

图29

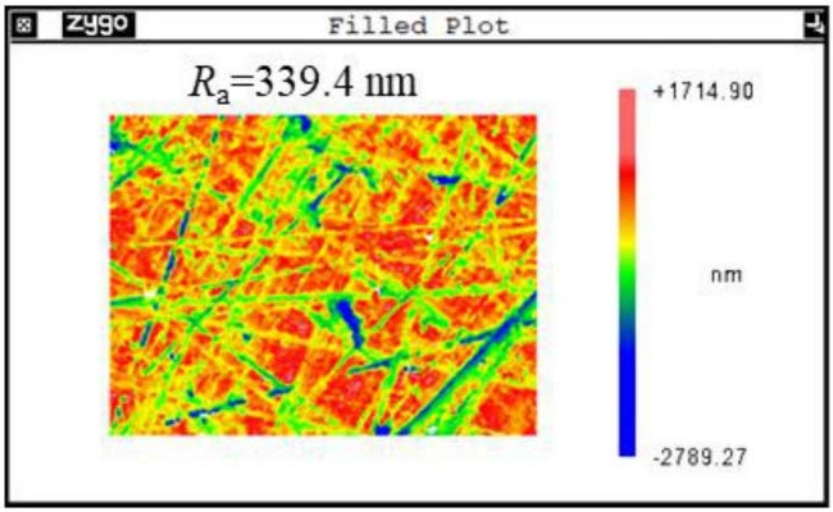

zygo
Filled Plot
R_a=339.4 nm
+1714.90
nm
-2789.27

图30

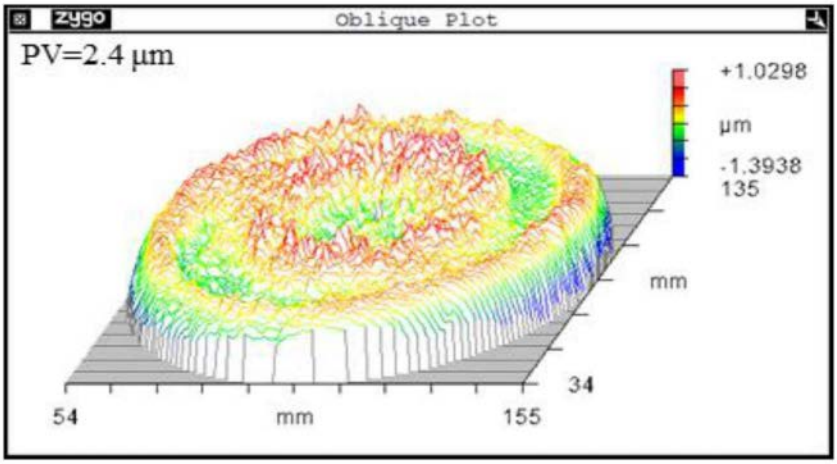

zygo
Oblique Plot
PV=2.4 µm
+1.0298
µm
-1.3938
135
mm
34
54
mm
155

图31

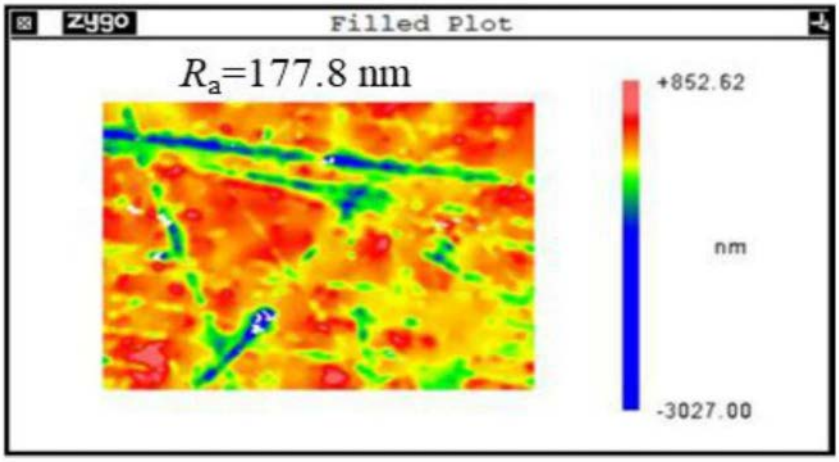

zygo
Filled Plot
R_a=177.8 nm
+852.62
nm
-3027.00

图32

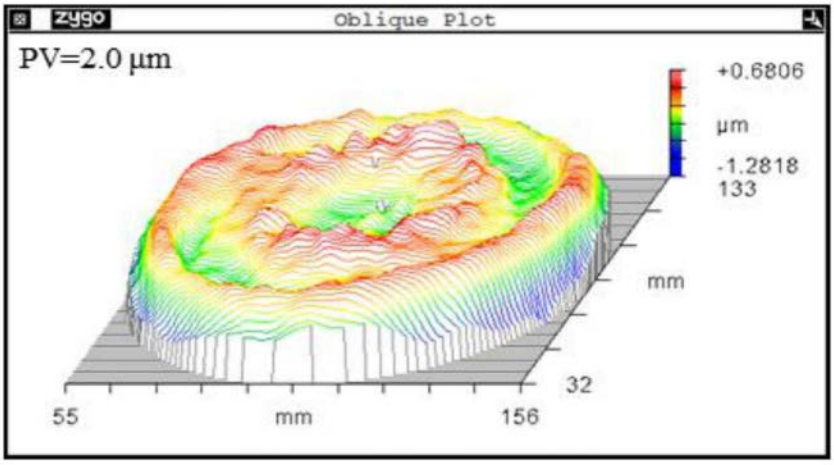

zygo
Oblique Plot
PV=2.0 µm
+0.6806
µm
-1.2818
133
mm
32
55
mm
156

图33

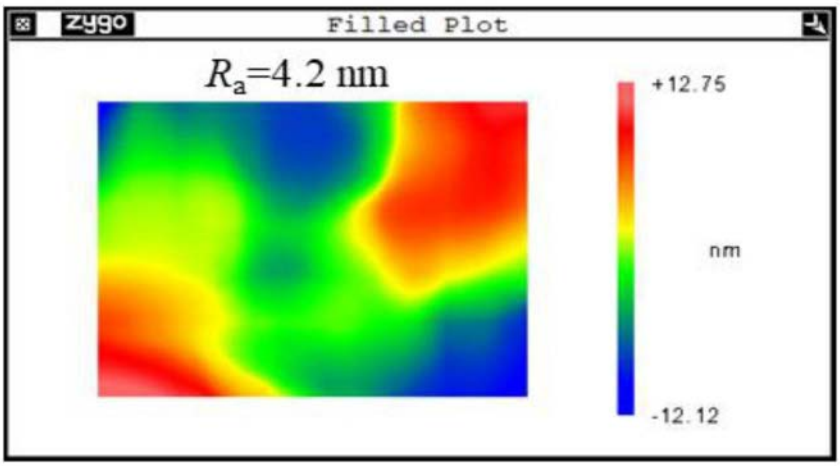


图34