磨机大齿轮加工工艺

马龙飞
北方重工集团有限公司　辽宁沈阳　110141

摘要：针对磨机大齿轮的大尺寸、高精度和易变形特点，结合多年的加工经验，对整个加工过程进行工艺改进。采用两半把合、组对加工的方法实现车铣加工，通过“三车两铣”和人工时效来消除大齿轮的铸造与加工应力，解决了此类零件的加工难题。

关键词：磨机；大齿轮；变形；把合；组对加工；车削；铣削

1　序言

目前，磨机已在各行业得到广泛的应用[1，2]。图1所示为球磨机试车。大齿轮是溢流型球磨机的主要零件，常见结构是将两件1/2齿轮组对后使用。本文以右旋5°15′斜齿的大齿轮为例进行介绍。

图1　球磨机试车

2　工艺要点

图2所示为大齿轮，其毛坯尺寸中，最关键的尺寸是轮缘壁厚，加工前及工序中需多次测量、监控齿轮变形程度和轮缘余量状况。由于加工中去除的材料较多，会产生很大的切削应力（主要在粗车和粗铣齿工序），所以要考虑应力释放问题，并尽量减小释放应力后的变形量（毛坯来料要带拉筋）。

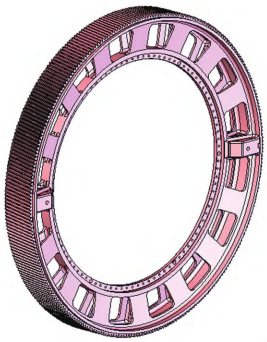

图2　大齿轮

大齿轮材质以ZG35居多，也有ZG35SiMn、ZG42CrMo等，需调质处理以达到预定强度，同时还有探伤要求，一般为JB/T 5000.9—1998中的超声探伤II级。调质、探伤的顺序要合理安排。

两件半轮连接的结构形式包括销轴定位（又称“哑铃销”）、铰制孔螺栓定位和螺纹锥销定位等。定位销孔均需要同步加工，并需在精加工之前进行。哑铃销孔的轴线要处于两半轮的结合面上，并尽量使其与齿轮上端面垂直。保证大齿轮外圆与分度圆、内法兰各圆的同心度要求（包括内法兰把合孔的位置精度），大齿轮外圆与齿轮端面（齿宽方向）、内法兰把合面的垂直度要求。这就需要正确地选择工艺基准[3，4]。两半齿轮的结合面包含了直结合面、斜结合面及多处空刀。在最终一次把合时，要求直结合面局部间隙＜0.1mm，斜结合面的间隙＞0且＜0.5mm。结合面的加工要避免半轮出现“大小半”的情况，同时还要考虑不同空刀的加工次序（注意直结合面和斜结合面之间的空刀槽底是斜面）。

3　半齿轮加工工艺

半齿轮的加工工艺流程如下。

1）工序01：划线。工件平放到划线平台上，垫三处等高方箱，综合考虑齿宽余量、内法兰厚度

余量以及两结合面高度尺寸余量的对称情况，用千斤顶调整水平，并在半齿轮外圆上划出水平找正线（简称“平线”）。根据轮缘内壁（非加工面）厚度的均匀性确定半齿轮的中心，在半齿轮顶面划出找正圆线，并划出结合面加工线（直结合面及5°15′斜结合面）。最后在各线端部打两到三处冲孔。要求详细记录轮缘壁厚数据，反映给技术人员。壁厚超差则需返修。

2）工序02：粗镗。将图3所示半齿轮平放到等高方箱上，结合面对床头。按平线及结合面加工线找正，找正偏差控制在±0.5mm，夹紧压牢。粗铣直结合面及两端空刀槽，每面留量6mm。然后在两结合面下方铣削出两小段找正基面。各加工面表面粗糙度值Ra=6.3μm。将半齿轮的90°位置垫高，使其平线呈5°15′斜角。利用找正基面、直结合面及角度尺进行找正，使直结合面呈5°15′斜角。压牢工件。粗铣一端的斜结合面，单面留量6mm，表面粗糙度值Ra=6.3μm。将半齿轮的两结合面端垫高，其平线呈－5°15′斜角。装夹找正方法同上，粗铣另一处斜结合面，单面留量6mm，表面粗糙度值Ra=6.3μm。

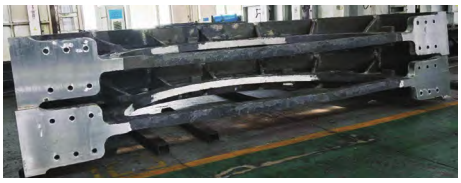

图3　半齿轮

3）工序03：划线。按大齿轮的圆线和平线找正（可以到机床划线），划出结合面各孔加工线，孔中心打冲孔。

4）工序04：粗镗。将半齿轮平放，结合面对床头。钻结合面各把合孔，单边留量6～8mm。孔背面锪平。各面表面粗糙度值Ra=12.5μm。

4　组对后加工工艺

由于大齿轮质量较大，在吊装时务必注意安全。在精加工后，吊装时要做好防护措施，不得损伤加工面。组对后大齿轮的加工工艺流程如下。

1）工序01：钳。将两件半齿轮按平线、圆线对正，用工艺螺栓把合，并在结合面上方非加工面焊牢焊块。半齿轮组对焊接位置如图4所示。焊接焊块时注意让开销孔位置。

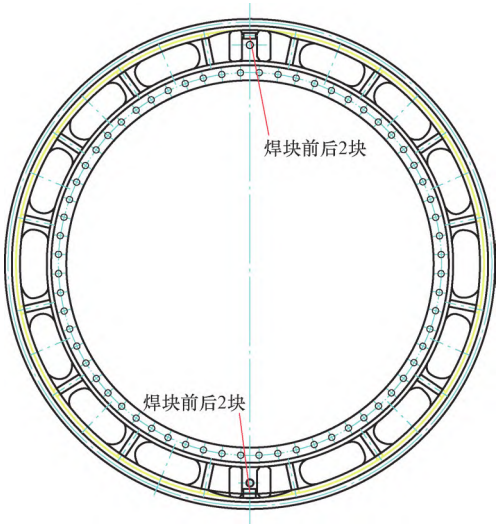

图4　半齿轮组对焊接位置示意

2）工序02：划线。将大齿轮平放到划线平台上，垫三处等高方箱，参考半齿轮原有的平线，用千斤顶找平。以两半轮结合面为基准，综合考虑轮缘内壁均匀性，定出大齿轮的中心。在外圆和顶面依次划出水平找正线（简称“平线”）、上下端面加工线及外圆加工线（简称“圆线”），在各线端部打两到三处冲孔。检查结合面厚度、轮辐厚度是否符合图样要求、拉筋是否影响齿轮把合。大齿轮各点标记如图5所示，薄面A、I、B和H处厚度达60mm以上，C、G、D、E和F处厚度达50mm以上，并在轮辐背面标记出数值。厚面各轮辐厚度达95mm以上，并在轮辐背面标记出数值。

3）工序03：粗车（加工各面为探伤和调质做准备）。上立式车床反卡内法兰（可根据齿轮宽度确定是否增加卡爪支座），用千斤顶调整水平，并

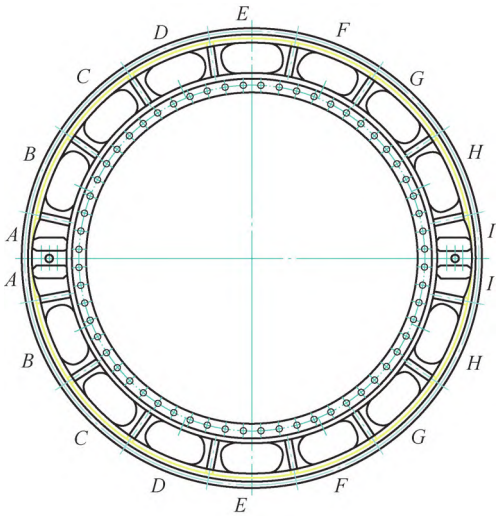

图5　大齿轮各点标记示意

用划线盘检查平线，使水平偏差在±1mm。然后调整卡盘卡爪，把划针固定到刀座上检查圆线，使工件与回转工作台同心，同心度偏差在±1mm。卡紧、压牢工件，依次粗车上平面、外圆，单面留量20mm。再用反刀在齿轮下平面车削出20mm宽环状基准面。外圆表面粗糙度值Ra=3.2μm，其余各面表面粗糙度值Ra=6.3μm（内法兰各面暂不加工）。工件翻转180°，卡外圆，并以外圆和上端面环带为基准面找正，偏差在±0.5mm，粗车上平面，单面留量20mm，表面粗糙度值Ra=6.3μm。各棱角倒钝3mm×45°，以防止淬火产生裂纹。

4）工序04：钳。将两半齿轮拆开。

5）工序05：探伤（检查材料内部缺陷）。按图样技术要求，对大齿轮外圆面进行超声探伤检查。

6）工序06：精整（修复毛坯缺陷）。精整毛坯外观，对超标的缺陷部位进行精整（清理缺陷、补焊及打磨），复检合格后至下道工序。

7）工序07：检查。检查材料化学成分及分布合理性。用手电钻在齿轮非冒口侧的30°、90°、150°位置和冒口处（注意要求厂家在工件上标出冒口位置）各取切屑50g左右，切屑上不得有油渍，用纸袋装好，并在纸袋上标明齿轮的生产号、图号、台次和铸字号。将齿轮上取得的样品送理化室检验化学成分，将检验结果与标准进行比对，并将同一齿轮上各点成分进行比对，看是否在标准范围内。符合要求后至下道工序，并把成分单返给热处理公司。

8）工序08：划线。复检毛坯尺寸，记录轮辐厚度。按已加工的外圆和端面作为划线基准，划线检查各部分的加工余量，对比标记的数值检查轮辐厚度。

9）工序09：调质处理（改善力学性能）。图6所示为对半齿轮进行调质处理，使硬度达到图样技术要求。

10）工序10：钳。释放应力，加工法兰。用气割切掉拉筋，并妥善保管。

a）半齿轮装炉加热　　b）半齿轮淬火

图6　半齿轮调质处理

11）工序11：划线。检查毛坯变形情况。工件平放，找正方法参照工序02。以齿轮端面（齿宽方向）作为粗基准找平。按轮缘内壁厚度均匀性以及两结合面上的孔间距确定半齿轮中心。根据热处理变形情况，考虑各处加工余量均匀性划全线，划出找正平线，并在半齿轮上平面（结合面处）划出两小段对正用圆线。划出直结合面和5°15′斜结合面加工线以及空刀槽加工线。在各线端部打两到三处冲孔。检查轮辐厚度，把合面及其相邻面和过渡圆角是否胀箱并作出标记。注意若结合面孔距尺寸超差＞10mm，需暂停工序，进行返修。

12）工序12：半精镗。将半齿轮平放到等高方箱上，结合面对床头。按平线及结合面加工线找正，找正偏差控制在±0.5mm，夹紧压牢。半精铣直结合面及两端空刀槽，每面留量3mm，表面粗糙度值Ra=6.3μm。在两结合面下方铣削出两小段找正基面。将半齿轮的90°位置垫高，利用找正基面、直结合面及角度尺进行找正，使直结合面呈5°15′斜角。压牢工件，半精铣一端的斜结合面，单面留量3mm，表面粗糙度值Ra=6.3μm。将半齿轮的两结合面端垫高，使直结合平线呈－5°15′斜角。半精铣另一处斜结合面，单面留量3mm，表面粗糙度值Ra=6.3μm。注意在加工斜结合面时，需在纵向中心线位置上刀，使斜结合面中心低于直结合面中心0.25mm。

13）工序13：划线。按半齿轮的外圆和上平面找正（可以到机床划线），划出结合面各孔的加工线。注意划结合面的孔加工线时，要兼顾齿轮调质变形情况，可适当调整孔位，使两半齿轮一致即可。

14）工序14：镗孔。工件平放，结合面对床头。钻结合面各孔，单边留量3～4mm。孔背面锪平。各面表面粗糙度值Ra=12.5μm。

15）工序15：钳。精整两半轮结合面，清理飞边、毛刺及污垢等，按圆线和平线对正，允差±0.5mm。用工艺螺栓把合两半齿轮，要求直结合面的间隙＜0.2mm。在齿轮上端非加工面打字头，并在结合缝的非加工部位焊接工艺焊块。注意组对时，需仔细核对半齿轮图样，确认是否存在上下轮缘尺寸不一致、顶丝座（顶丝孔）不均布等非对称设计元素，以免造成装配错误。

16）工序16：划线。工件平放，找正方法参照

工序02。以两半轮结合面为基准，综合考虑轮缘内壁的均匀性，定出大齿轮的中心。划平线、外圆加工线及上下端面加工线，并在各线端部打两到三处冲孔。要求详细记录轮缘的壁厚数据（圆周上取10点），反映给技术人员。壁厚超差则暂停工序，返修。

17）工序17：半精车（为粗铣齿做基准）。上立式车床反卡轮缘内壁，用千斤顶调整水平，并用划线盘检查平线，使水平偏差在±0.5mm。然后调整卡盘卡爪，把划针固定到刀座上检查圆线，使工件与回转工作台的同心度偏差在±0.5mm。卡紧、压牢工件，依次半精车上平面、外圆，以及内法兰的里孔、端面和相邻止口，单面留量10mm，表面粗糙度值Ra=3.2μm。再用反刀在内法兰下平面车削出20mm宽环状基准面。工件翻转180°，卡外圆。以外圆和内法兰上平面环带为基准找正，偏差在±0.1mm，半精车齿轮上平面和内法兰上平面，单面留量10mm，表面粗糙度值Ra=3.2μm。在齿端面的分度圆处车削出60°V形圆线，深1mm[5]。

18）工序18：探伤。按图样技术要求对整个大齿轮外圆进行超声探伤，尤其注意是否有裂纹。

19）工序19：粗铣齿。预先调整工作台各支座位置，使支座最外端略小于大齿轮齿根圆尺寸。大齿轮有V形刻线的一端朝上、放平，用百分表检测上平面（轴向圆跳动＜0.5mm）。用千斤顶分别顶住刀架和齿轮外圆，再用百分表检查外圆，调整大齿轮和回转工作台同心（径向圆跳动＜0.5mm）。合格后，压牢工件。在结合缝处对刀，刻刀花两处（要求刀花上下一致，结合缝处于齿沟中间）。粗铣齿，单面留量10mm，表面粗糙度值Ra=6.3μm。注意铣齿前应检查齿轮外圆留量情况，以及分度圆刻线位置是否正确，以便确定粗铣齿的齿深。铣齿后，质检员需目视检测各齿沟内是否存在裂纹等表面缺陷。

20）工序20：钳。拆开两半齿轮，焊上拉筋。因内法兰已粗加工，导致拉筋不够长，可将拉筋向半齿轮90°方向作适当平移，也可连接工艺钢板（采用连续角焊缝，焊角高15mm）。注意对于直径≤8000mm的大齿轮，不必执行此工序。

21）工序21：热处理。人工时效。要求工件用等高垫块垫平，支点数量≥4。注意当工件直径≤8000mm时，必须整体进炉时效。

22）工序22：钳。对于整体时效的大齿轮，将其拆成两半；若是半齿轮进行时效，则需将拉筋割掉。用钢刷配合除锈剂，清理各粗铣齿的齿沟，以便于质检员目视检测齿沟是否存在裂纹。注意对于质检员提出的疑似裂纹，若无法通过进一步打磨清理确认，则可通过着色探伤确认。

23）工序23：划线。检查工件热处理后的变形情况。以结合缝和齿顶圆为基准找正，并考虑轮缘壁厚的均匀性，定出半齿轮的中心。然后划出结合面的加工线（要求加工余量尽量小）。注意各齿沟深度最大差值＞3mm或结合面加工余量＞3mm时应暂停工序，并通知技术人员处理。

24）工序24：镗削。工件平放，按平线及直结合面加工线找正后压牢，找正偏差在±0.5mm。精铣半齿轮的直结合面至达到图样要求（见平即可），同时需加工直结合面上的各空刀台阶至达到图样要求，并在上平面铣削出X、Y两个方向的找正带，长度≥400mm。依次垫起工件90°位置和两结合面位置，使直结合面分别呈5°15′和－5°15′斜角，加工斜结合面和空刀槽。注意本工序各工步的找正方法可参照工序12。

25）工序25：划线。按半齿轮的外圆和上平面找正（可以到机床划线），划出结合面各孔的加工线及检查线。

26）工序26：镗削。按平线及结合面找正，镗削各把合孔并锪平背面至达到图样要求。

27）工序27：钳（两半齿轮精确归圆）。精整两半轮结合面（见图7），清理飞边、毛刺及污垢等，按字头对正结合面。然后对齐圆线、平线，偏差控制在±0.5mm。用产品螺栓把合两半齿轮，直结合面缝隙需＜0.1mm，并在结合缝的非加工部位焊接工艺焊块。

28）工序28：划定位销孔。划两处销孔（哑铃销安装孔）加工线。

图7　精整两半轮结合面

29）工序29：镗削。工件平放，按结合面上方的找正带找水平，允差在±0.02mm/100mm（找正距离尽量大），压牢。用直角铣头钻扩两处销孔及同心沉孔至达到图样要求，注意不要把销孔加工成大小半。加工后，须在孔附近的非配合面打字头，标明*A*、*B*字样，以便于配制销轴。

30）工序30：钳（组对为整体大齿轮）。将齿轮拆开装入销钉后重新把合，间隙用塞尺检查时0.05mm塞尺不入，用产品螺柱和螺母把合牢固，质检部检查合格、做好记录并在销钉上打相应的字头。注意如精车、精铣前要拆开重新把合时，必须检查并记录结合面间隙。

31）工序31：划线（确认找正、加工基准）。以结合缝为基准划十字中心线，划各圆及端面加工线。

32）工序32：精车（为精铣齿和安装找正做基准）。上立式车床反卡轮缘内壁，依次按平线和圆线找正，偏差在±0.5mm。卡紧、压牢工件。依次半精车上平面、外圆，以及内法兰的里孔、端面和相邻止口至达到图样要求，表面粗糙度值*Ra*=3.2μm。再用反刀在内法兰下平面车削出20mm宽环状基准面。工件翻转180°，卡外圆。以外圆和内法兰上平面环带为基准找正，偏差在±0.1mm，精车齿轮上平面和内法兰上平面至达到图样要求，表面粗糙度值*Ra*=3.2μm。在齿端面的分度圆处车削出60°V形圆线，深1mm。注意本工序各工步的找正方法可参照半精车工序。

33）工序33：铣齿（见图8）。以外圆和下端面（齿端无刻线的一面）为基准找正，轴向圆跳动、径向圆跳动均符合图样要求后压牢工件[6]。按原有齿沟对刀，并以两半轮结合面为对称中心（要求结合缝两侧齿面均匀），精铣齿至达到图样要求。

34）工序34：划线。工件平放，以内法兰里孔为基准划内法兰把合孔加工线和检查线、止口上的螺孔加工线；以齿顶圆或其同心圆为基准划齿侧面各螺孔加工线及检查线，并在各孔中心打样冲孔。

图8　铣齿加工

35）工序35：钻孔。工件平放、压牢，钻内法兰把合孔、钻铰齿轮端面各螺孔预孔至达到图样要求。注意钻孔前需先检查划线孔距是否符合图样要求，再用样冲对正原样冲孔敲击放大。对于直径较大的孔，还须先用小规格的钻头钻预孔，待确定各预孔与检查线同心后，方可钻扩至图样尺寸。

36）工序36：钳。用万向钻钻铰径向的各螺孔，并对齿轮端面的螺孔进行攻螺纹。重新把合齿轮检查结合面的间隙情况并作记录。待整体交检合格后，拆开两半齿轮，并在结合面附近的非加工面上打字头（或点焊专用钢板后再打字头），再进行后续的装配、涂装和包装（见图9）等工序。

图9　半齿轮的包装

5　结束语

本文中的磨机大齿轮具有大尺寸、高精度及多处把合的特点，难点是零件加工后应力比较集中，容易变形。通过工艺改进，制定两半组合、整体加工的工艺路线，并采用“三车两铣”和人工时效的方法来消除铸造和加工应力，解决了大齿轮的加工和变形难题，为此类零件的制造提供了参考。

参考文献：

[1] 李文亮，杨涛，于向军，等. 国外大型球磨机发展现状[J]. 矿山机械，2007（1）：13-15.

[2] 母福生. 破碎及磨矿技术在国内外的技术发展和行业展望（一）[J]. 矿山机械，2011（11）：58-65.

[3] 王春红，姬建钢，杜强，等. 超大型矿用磨机起吊和运输方案研究[J]. 矿山机械，2014（3）：59-65.

[4] 赵宗立. 磨机大齿圈加工工艺及精度的综合分析[J]. 矿山机械，2013（9）：8-12.

[5] 陈宏钧. 实用机械加工工艺手册[M]. 北京：机械工业出版社，2009.

[6] 张宝珠. 齿轮加工速查手册[M]. 北京：机械工业出版社，2010.

MW 20240407