

钛合金格栅类零件的加工

张殊

海装沈阳局驻沈阳地区第一军事代表室 辽宁沈阳 110034

摘要：针对钛合金格栅类零件耳片孔的加工难点、零件变形量的控制以及小转角的高效处理等进行分析，创新性地提出各项解决方案，实施过程顺利，最终解决了钛合金格栅类零件的加工问题，使零件合格率阶段性达到100%。

关键词：钛合金；深孔；变形；小转角



张殊

1 序言

某机钛合金格栅类零件由于采用全新设计的结构形式，具有超深耳片孔、小转角，刚性弱，给加工制造带来极大的难度和挑战。本文通过对零件结构进行工艺性分析，找出加工难点，针对各个难点逐项研究，找出解决方案，为类似结构钛合金零件的加工提供参考。

2 格栅类零件结构及机械加工工艺性分析

对于单个格栅板来说，其结构主要由9个非均匀分布的耳片孔、10个非均匀分布的U形槽和6个电火花打孔区域组成。

格栅零件由钛合金材料的板材加工而成，最终

腹板厚度为4mm，筋高为3mm，零件刚性较差，电火花加工后应力分布严重不均，易造成较大变形。同时，耳片孔长度726mm，尺寸精度为 $\phi 5.1H9$ ，长径比极大，加工难度及风险极高。格栅所有内形及耳片转角均为R2.5mm，加工效率较低，同时，刀具直径小、易折断。

针对以上问题，主要从以下几方面展开研究，逐个解决问题。

(1) 耳片孔加工工艺方案研究 耳片孔长径比达142，属超大长径比深孔。同时加工精度要求高，加工难度非常大。重点研究如何使耳片孔的精度满足设计要求。

(2) 零件变形量控制方法研究 分析板材毛料的内部应力分布状态，设计零件在毛料应力平衡区的位置布置；通过热工艺方法的合理安排，进一步消除零件内部残余应力；通过数控加工走刀轨迹的合理优化，减小机械加工过程中应力的产生，最终达到控制零件变形量的目的。

(3) 小转角创新性处理方案研究 零件所有内形转角均为R2.5mm，目前一般厂商刀具的最小直径为5mm，加工时效率低、刀具易折断。研究采用创新性的摆线铣削、大小直径刀具分别处理等方法，在提高零件加工效率的同时，有效降低刀具折断风险，提高零件质量稳定性。

3 耳片孔加工难点

图1为格栅耳片孔，目前行业内尚无加工如此长

径比的超细长钛合金铰链孔的经验。其加工难点主要体现在：①孔尺寸精度要求高，孔径极易超差。钛合金材料的特点是有一定的收缩性，加工过程中容易造成收口，形成“喇叭”孔，一端超上差、一端超下差。②工艺方案安排难度大。由于耳片孔的长径比达142，目前国内外现有资料信息中，无法找到加工此类深孔的方案可供借鉴，行业内也从未有过此类超长深孔的加工先例。③刀具设计制造困难。钻头及铰刀的长度需达到890mm以上，而刀具直径为4.8~5.1mm，对刀具材料、加工工艺要求极高，同时跳动、直线度及刃部精度要求也极高。若刃部直径偏差0.02mm以上，则无法加工出合格的产品。④工装制造难度大。为了配合钻头及铰刀的使用，需分别设计专用钻模1套及专用铰模1套。主要难度在于钻模板的精度极高，同轴度要求0.03mm左右，工装制造风险极大。

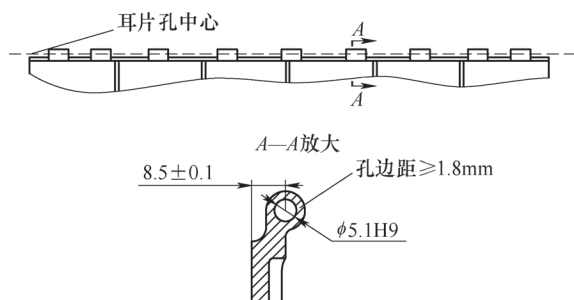


图1 格栅耳片孔示意

4 优化加工方案及采用专用工装

耳片孔的结构特点决定了其加工方案不可采用常规的钻孔方案，经多次论证，最终决定采用如下加工方案。

1) 利用专用钻模钻制 $\phi 4.8\text{mm}$ 底孔。先后使用300mm、500mm不同长度的钻头从零件两侧分别钻孔，从而避免直接用长钻头而产生的钻头振颤、偏摆等问题，充分利用钻头的有效长度，只需使用耳片孔总长度一半长度的钻头即可。将钻头长度缩短一半意味着将耳片孔的长径比缩短一半，可以有效避免钻头折断，工艺性大大提高。该工艺方案的缺点：零件左右两侧的耳片孔可能不是同轴的，第4组和第5组耳片直径会产生耳片孔中心轴线的突然错位，给后续铰孔增加了难度。

2) 利用专用铰模铰孔至 $\phi 4.9\text{mm}$ 。为了解决耳

片孔中心轴线错位问题，特别设计 $\phi 4.9\text{mm}$ 铰刀的前引导为 $\phi 4.5\text{mm}$ ，目的是保证铰刀前引导能够顺利通过错位的耳片，同时， $\phi 4.9\text{mm}$ 铰刀（斜刃，有扩孔作用）加工过后，对耳片孔的同轴度也有一定的修正作用。

3) 铰孔至 $\phi 5\text{mm}$ 。由于该工序铰削量较小（0.1mm），铰削余量也很均匀，所以加工稳定性及加工质量都比较好，同时也可进一步修正孔中心轴线的偏离。

4) 铰孔至 $\phi 5.1\text{H9}$ ，保证最终孔的尺寸精度。该工序主要依赖最终铰刀的制造精度及钻模的制造精度，若两者参数、结构设计合理，制造精度满足要求即可保证所有耳片孔最终尺寸精度。

5 钻头和铰刀参数及材料

耳片孔的加工成功与否主要取决于刀具、工装的精度。刀具存在的问题及解决措施如下。

(1) 钻头精度问题 钻头的设计要求跳动量为0.01mm，实际上钻头放在平台上，直线度已达3~4mm，产生了极大的变形。在使用过程中，钻头随机床转动时产生了极大的偏心摆动，钻头杆已经甩动成椭圆轨迹，直接导致钻出的底孔不是直线，而是带有一定挠度的“曲线”。且由于部分钻头尺寸不合格，无法顺利通过钻套，所以对钻头进行改磨处理，后续在设计层面对钻头进行改进，最终符合加工需求。

(2) 铰刀参数设计问题 耳片孔最终尺寸的保证，依靠最终使用的 $\phi 5.1\text{H9}$ 铰刀。按通用设计标准，该铰刀的刃部直径为5.105~5.115mm，后引导尺寸为 $\phi 5.1\text{f6}$ ，但是经过对多个试验件的试验验证，该尺寸参数的铰刀无法加工出合格的耳片孔，超差率高达88%。后续经过反复多次改磨刀具、试验验证，最终摸索出刀具的实际设计参数应为：刃部直径5.10~5.11mm，后引导直径 $\phi 5.1_{-0.03}^{+0.02}\text{mm}$ 。只有符合该公差范围的铰刀才能最终加工出合格的耳片孔，最终实现了零超差交付。

(3) 刀具材料问题 原刀具材料为高速钢，经加工验证，高速钢材料强度及耐磨性不够高，刀具磨损剧烈，后续与设计部门协调，将钻头、铰刀材料全面改为硬质合金。

6 实施效果

利用2件工艺试验件验证工艺方案的可行性，又利用6件地面台架试验件进行了工艺方法完善和改进，摸索出钻头、铰刀设计参数及刀具材料。反复改制钻模工装，最终使格栅零件超长耳片孔的一次性加工合格率达到100%。该工艺方案的成功，不仅填补了行业内钛合金超长长径比细长孔加工研制的空白，更为后续相同结构零件的加工储备了技术能力。

7 变形量控制方法研究

由于造成零件变形的因素众多，不同因素相互制约，关系错综复杂，所以应从多个方面入手，多管齐下，解决变形问题，最终控制零件平面度在0.3mm以内。

1) 分析钛合金板材的应力分布，调整零件在板材毛料中的位置，从源头上避免应力不均。依据材料标准，厚度30mm的钛合金板材供应状态为热轧退火状态，热处理制度为：750~850℃，15~120min，空冷。国内外关于TA15M钛合金板材材料性能方面的相关科研论文及试验数据表明，其应力分布状态为：厚度方向中心部的拉应力 σ_b 基本处于平衡状态，即应力对称分布；而板材上下表面方向，拉应力则逐渐增大。据此特别设计零件最终加工状态的腹板中心在板材毛料厚度方向的中心对称面上。零件在毛料中的位置如图2所示。这样在加工完零件之后，零件的腹板处由毛料带来的残余应力就可以基本消除，对平面度的控制起到积极的作用。

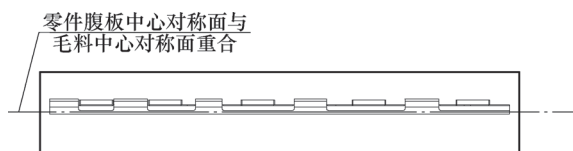


图2 零件在毛料中的位置示意

2) 安排热处理工序，通过工艺方案的合理安排控制变形。虽然通过前述手段能够极大程度地减少机械加工过程中残余应力的形成，但是残余应力在毛料热轧、机械加工过程中仍会不可避免地出现，这就需要在机械加工过程结束后，安排热处理工序，进一步消除残余应力。热处理后即进行电火花加工，由于电火花加工对零件的结构改变巨大，应

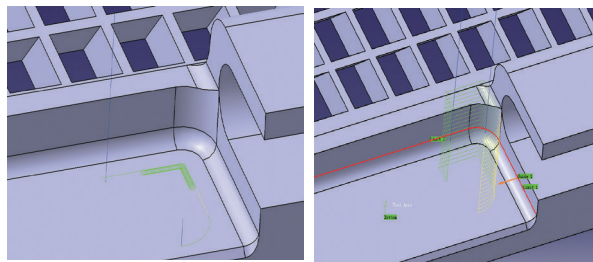
力再次重新分布，故需在电火花加工工序后监测零件的平面度，如 $>0.3\text{mm}$ ，则需重新进行热处理。

8 小转角的创新性处理方案

格栅零件的内形及耳片、U形槽端面与外形转接处的转角均为R2.5mm，这就要求加工此部位只能使用本厂最小直径5mm的刀具。由于小直径刀具的强度极差，所以极易发生折刀现象，导致加工速度极低且容易出现质量风险。

达索软件公司CATAI V5高版本软件中，出现了Trochoid-Mill摆线铣削加工命令。摆线铣削能够很好地解决切削力突变问题，非常适用于刀具强度及刚性差的情况。加工轨迹一圈套一圈，加工过程中处于切削状态的时间较少，非常有利于解决钛合金散热不好的问题。摆线铣削可以实现相对大切削深度、小切削宽度和大进给的切削方式，充分利用刀具有效刃长，可以实现满刃长切削，有效提高金属去除率。

摆线加工由两个运动合成，分别为刀具自转和刀具绕转。刀具每绕转一圈，刀具径向切削一个单位，采用圆弧切向进刀和退刀，切削深度从零开始逐渐增加到最大，然后再逐渐减小到零。同时，在摆线加工的整个过程中，切削力从零开始逐渐增大、到再减小的变化过程，一直是平缓均匀变化的状态。摆线铣削和分层铣相比，刀具使用寿命提高3倍以上，加工效率提高3倍以上，加工优势非常显著。摆线铣削与传统加工方法的对比如图3所示。



a) 传统加工

b) 摆线铣削

图3 摆线铣削与传统加工方法的对比

与传统加工方法不同，摆线铣削的主要目的是在充分满足径向切削深度的情况下，避免槽铣等全浸入式铣削。这对于减少刀具的磨损、延长刀具使用寿命非常有利。而对于采用较小的刀具-工件包角有可能带来的切削效率降低，在摆线铣削技术中，可以采用比常规铣削方法更大的轴向切削深度，以

提高材料去除率。

摆线铣削加工技术可以采用较大的轴向切削深度，从而可以代替传统加工中需要进行多次分层的情况。摆线铣削加工技术在难加工材料的高效切削加工中作用显著，从实测结果中可以看出，在相同的材料切除量与加工时间情况下，采用摆线铣削加工时的刀具磨损量远低于采用常规加工方法时的刀具磨损量。通过摆线铣削加工技术的应用，加工小转角结构可以取得事半功倍的效果，既保证了零件的装机质量，又提高了加工效率，降低了生产成本，还能更好地保证零件的加工质量。

9 结束语

通过采用上述工艺方案，进行数控加工程序的编制，以及钻头、铰刀和专用钻模的设计制造，解决了耳片孔加工难点问题。钛合金深孔加工的一次合格率达到100%，薄壁结构格栅类零件的平面度达到0.3mm。相比传统加工方法，小转角加工的效率提高3倍。基于以上关键工艺技术的创新性突破，格栅类零件的加工得以顺利完成。

参考文献：

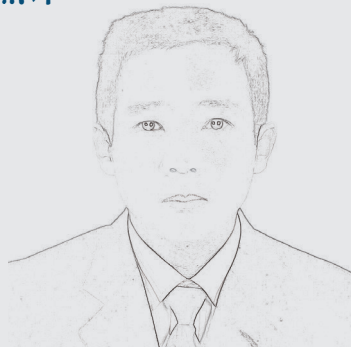
- [1] 王小翔，王伟琪，李献军，等. 钛及钛合金厚板残余应力简析：第十三届材料科学与合金加工学术年会论文集[C]. 北京：中国有色金属学会，2009：103-106.

- [2] 刘智恩. 材料科学基础[M]. 西安：西北工业大学出版社，2003：236~237.

- [3] 郑文虎. 难切削材料加工技术[M]. 北京：国防工业出版社，2008.

MW 20210506

专家点评



文章的亮点是关键工艺技术的创新性突破。针对钛合金格栅类零件的结构特点进行工艺性分析，找出加工难点并逐项提出解决方案，通过钻头、铰刀和专用钻模的设计制作，解决了耳片孔加工难题。通过工艺方案的合理安排，解决了变形难题，达到了零件的平面度要求；通过摆线铣加工方法，提高小转角加工效率，最终解决了零件加工问题，为类似结构钛合金零件提供了新的加工方案。

发改委等八部委印发《汽车零部件再制造规范管理暂行办法》

为规范汽车零部件再制造行为和市场秩序，保障再制造产品质量，推动汽车零部件再制造产业高质量发展，国家发展改革委、工业和信息化部、生态环境部、交通运输部、商务部、海关总署、市场监管总局及银保监会联合印发了《汽车零部件再制造规范管理暂行办法》（以下简称《暂行办法》）。

《暂行办法》共八章、三十六条，立足我国汽车零部件再制造行业发展实际，对再制造企业规范条件、旧件回收管理、再制造生产管理、再制造产品管理、再制造市场管理及监督管理等方面作出了明确规定。

对再制造企业的质量管理、生产过程、技术装备和环保设备等方面提出了规范性要求。明确再制造企业是再制造产品的质量责任主体，对再制造企

业生产行为的主要环节进行了规范，包括旧件检测鉴定能力，拆解、清洗、制造、装配、产品质量检测等方面技术装备和生产能力，相关废物处理环保要求等。

《暂行办法》提出了再制造产品的管理规范。明确规定再制造产品应具备与原型新品同样的质量特性，出厂时进行与原型新品同样的检验检测或认证。要求再制造产品的质量应符合原型新品的质量标准，安全标准应不低于国家对机动车零部件原型新品的要求，环保性能应符合国家相关标准要求。

同时明确了国务院发展改革、工业和信息化部、生态环境、交通运输、商务、海关、市场监管及银保监会等部门在各自的职责范围内负责汽车零部件再制造相关监督管理工作。

（来源：中国机械工业联合会统计信息部）