DOI: 10.3901/JME.2020.14.044

盘件无模碾压技术进展及产业化分析*

樊璐璐^{1,2} 刘晓飞² 翟月雯³ 吴进军^{1,2} 金泉林¹

(1. 机械科学研究总院集团有限公司 北京 100044;

2. 中机生产力促进中心 北京 100044;

3. 北京机电研究所有限公司 北京 100044)

摘要: 无模碾压技术在发动机用双性能涡轮盘成形方面具有特色优势,并广泛应用于高温合金、钛合金、轻合金和钢类等大型复杂盘件的加工成形。通过详细剖析无模碾压技术及设备研究现状,分析并探讨了现有设备样机存在的问题及实现无模碾压技术产业化应用的主要途径。研究结果表明,目前仅有俄罗斯和美国 GE 掌握无模碾压成形工艺和装备,国内仍处于基础研究阶段;现有样机设备刚度和强度不足,在框架结构、加热系统、成形工艺及模拟仿真方面还存在一些问题,尚不能满足高温合金涡轮盘样件的成形需求,亟需开发新一代无模碾压成形设备;基于前期在电阻炉加热系统、碾压头设计、工艺计算软件和工艺数控执行系统的研究成果,依托现有成熟的卧式数控辗环机并在其基础上改造升级,是无模碾压技术快速实现产业化的最佳途径。

关键词: 无模碾压;双性能涡轮盘;高温合金;辗环机

中图分类号: TG337

Technical Progress and Industrialization Analysis of Dieless Rolling for Turbine Disk

FAN Lulu^{1,2} LIU Xiaofei² ZHAI Yuewen³ WU Jinjun^{1,2} JIN Quanlin¹

(1. China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Beijing 100044;

2. China Productivity Center for Machinery, Beijing 100044;

3. Beijing Research Institute of Mechanical and Electrical Technology, Beijing 100044)

Abstract: Dieless rolling technique is quite important for the forming of large complex disk parts such as high temperature alloy or titanium alloy turbine disc and has special advantages in double performance turbine disc forming. The results show that only Russia and the United States GE have mastered the technology and equipment of dieless rolling forming at present, and China is still in the preliminary stage; The stiffness and strength of existing equipment cannot satisfy the requirements of high-temperature alloy turbine disc forming and there are still some problems in frame structure, heating system, forming process and simulation, and it is still crucially necessary to develop a novel second-generation equipment; Based on the previous findings on the heating system of resistance furnace, design of rolling head, technology calculation software and process system, the transformation and upgrading of the traditional rolling ring machine is the best way to realize the industrialization of dieless rolling technology.

Key words: dieless rolling; dual performance turbine disk; superalloy; rolling ring machine

0 前言

盘件无模碾压技术及设备在 20 世纪 90 年代首先由俄罗斯科学院乌法超塑性问题研究所发明,技术亮点在于取代大型压机和节约模具成本,当时可成形 $\phi 800$ mm 钛合金的涡轮盘并已用于燃汽轮机;后由美国 GE 公司出资支持的相关研究^[1-2]证明该设

备可成形出形状复杂,微观组织分布和力学性能良好的钛合金涡轮盘。但因其技术保密,迄今尚未查到他们的工艺和设备研究报告,也未见其成形出高温合金涡轮盘的相关研究成果。

国内机械科学研究总院从 2003 年开始跟踪这项技术^[3],相关人员做了大量基础研究工作,金泉林团队^[4-6]终于在 2006 年研制出一台小型碾压试验设备样机,但当时只能在室温下成形直径不大于 $\phi 280$ mm 的铅盘。2009 年该团队对原设备进行数控改造并增加了加热系统,从而实现合金盘件的数控碾压成形,并取得了一些如何控制微观组织分布

* 国家科技重大专项资助项目(2018ZX04044-001)。20190923 收到初稿,20200320 收到修改稿

的工艺设计成果^[7]。2010 年金泉林等^[8-9]采用温控高频感应加热设备解决了高温不足的问题, 为避免与碾压头干涉, 感应线圈只能套在盘件两端, 由此形成了盘心低温区和盘缘高温区的不均匀温度场。对于钛合金恰好形成了双相区成形的局面(盘心 $\alpha+\beta$ 相细晶, 盘缘 β 相粗晶), 与双性能涡轮盘指标不谋而合, 由此设计者放弃最初对碾压工艺等温超塑成形的提法, 转而提出非均匀温度场+双性能成形的工艺特色, 并通过对 TC4 试验样件的解剖分析, 取得了不同组织分布的效果。但在尝试碾压高温合金材料时, 设备表现出能力不足。此外, 在允许的锻造温度之上进行反复碾压成形的方法缺乏研究价值, 无法开展深入的高温合金碾压成形机理和工艺研究。因此, 目前国内无模碾压技术和设备仍处于基础研究阶段。

随着我国 400 MN、800 MN 模锻压机、360 MN 垂直挤压机、200 MN 等温锻压机等大型设备陆续服役, 钛合金和高温合金整体锻造成形的吨位瓶颈已经解决, 如 2014 年直径为 2 m 重达 6 t 的高温合金涡轮盘已在中国第二重型机械集团公司 800 MN 模锻压机上研制成功。在降低设备载荷和无模化成形方面, 2005 年宝钢在 40 MN 快锻机上采用分区锻造法, 锻造出直径 2 m 的 GH2674 燃机轮机盘^[10]; 2008 年, 贵州安大采用非矩形截面锥辊在 5 MN 辗环机上成形出直径 2 m 的不锈钢燃机轮机盘, 并轧制出对称、非对称的空心或实心盘件^[11]; 西北工业大学近年来应用 ACDR 摆辗技术^[12]展开了大型盘件成形的探索研究, 以上新设备和工艺均对无模碾压技术产生极大冲击。

碾压技术是基于“点”的连续成形, 可通过调整碾头的转速和进给量, 并配合温控系统实现对工件所有区域的微观组织柔性控制, 从而达到“双性能”目标^[13]; 而整体锻、分区锻和轧制等工艺为“面、线”成形, 无法实现小局部组织控制。因此, 试制一台大刚度和大载荷的中型设备样机, 成形出具有双性能或者较佳性能的涡轮盘产品样件, 证明该技术的可行性和先进性, 从而实现其产业化道路, 对于提高我国高性能涡轮盘制造水平及解决工艺瓶颈^[14-15]具有重要意义。本文通过详细阐述和剖析无模碾压技术及设备现状, 论证了依托于现有成熟的数控辗环机设备并在其基础上改造升级, 是无模碾压技术实现产业化的最佳途径。

1 无模碾压设备的框架结构设计

1.1 目前设备的框架结构

图 1 为盘件无模碾压成形原理示意图, 盘件由

中心轴固定, 4 个碾压头对称分布在盘坯两侧。碾压头绕自身中心轴自转, 通过摩擦力驱动盘件转动并迫使盘件发生局部变形, 盘件最终形状和性能由碾压头的运动轨迹和姿态决定。其中沿盘件厚度方向的上下两对碾头相对独立, 即同侧碾头在径向位置同步, 而异侧碾头可处不同径向位置。

图 1 盘件无模碾压成形原理示意图

图 2 为俄罗斯学院的无模碾压设备, 可以看出其设备采用盘件立式装卡形式, 驱动系统采用液压驱动, 中心的加热系统以及其他细节由于遮挡无法看清。图 3 为机械科学研究总院仿制的数控无模碾压设备样机(未安装加热系统), 是国内目前唯一的一台碾压工艺雏形设备。

图 2 俄罗斯学院的 SRZh-800 型碾压设备图

图 3 数控无模碾压设备样机

由于是首台试制且经费不足, 在刚度设计上欠

失考虑,设备工作过程中发生横梁弹性变形,对试验工作造成了极大影响;同时设备加载能力也不足,使得高强度材料成形试验较难完成,只能通过小变形的积累完成大变形,造成设计的理想工艺路线不能试验印证,削弱了一些工艺规律的参考价值。

图4为碾压设备样机的刚度试验分析结果,根据受力示意图4a,测得设备框架最大变形可使碾头顶端偏移量达2.75 mm。图4b对比不同转速 ω 对应曲线图可知,成形时设备框架变形损失量基本在50%以上,碾头转速越高变形损失越小。例如,在盘件1/2半径处并转速0.48 rad/min下,当横梁进给4.0 mm时,碾压一圈结束后将损失75.5%的进给,即实际槽深只有0.98 mm。

(a) 设备样机受力示意图 (b) 盘件不同位置的变形损失率

图4 设备样机的刚度分析

图5为碾压过程中的一些成形缺陷^[16],设备框架的变形可能导致或者加重了这些缺陷的发生。在设备理想刚度条件下,工件产生缺陷的程度和规律到底如何,现在还无法定量解释。

图5 碾压中的成形缺陷

综上所述,设计较长悬臂的碾压设备时应首先考虑刚度要求,必须避免大跨度横梁及开放式框架结构设计。此外,每个碾压头的进给机构最好独立控制,且工作状态下的支撑框架应为封闭的闭环结构,以保证最小弹性变形。

1.2 设备其他结构的设计探索

鉴于现有设备的刚度问题,关注碾压技术的研

究人员提出了一些改进的框架结构设计模型。图6为北京科技大学宋晓东等^[17]设计的一种具有环形导轨的碾压设备模型,设计者采用环形导轨的出发点是降低设备的重心,增加稳定性,弹性变形由基座中心向四周扩散,可有效提高刚度。此外,该设备还考虑了碾压头和基座的冷却措施,配备可更换不同规格碾头的工具库,每个碾头均有一套独立的液压驱动统。由于碾头控制灵活,4个碾头可以独立形成各种姿态,可以成形一些复杂形状的工件。但环形导轨的直径限制了盘件加工的尺寸范围,使该设备柔性加工能力的不足。

图6 环形导轨碾压设备模型

图7是另一种直角坐标系封闭框架结构碾压设备设计模型^[18],由北京科技大学和哈尔滨工程机械研究所联合设计。该模型采用封闭框架式结构保证其刚度,碾头有3个自由度,分别由径向、轴向和摆角3个液压缸驱动;设备采用L型导轨将液压缸与工件隔开,起到了隔热保护作用,但是该模型缺少设备的整体设计部分。

图7 一种封闭框架结构的碾压设备模型

机械科学研究总院冯庆柱等^[19-20]在单个碾压头的液压进给机构方面进行了研究,如图8所示,碾压头部件与底座由6根液压杆并联铰接,通过液驱动碾压头完成轴向、径向和旋转运动,该进给机构替代了传统的导轨进给方式,具有较大灵活性,但同时也增加了控制的复杂度。

图8 碾压头6杆并联液压驱动机构

1.3 基于辗环机结构的卧式碾压设备设计模型

碾压工艺原理大抵脱胎于辗环机或旋压机, 因此依据轴向辗环机的结构, 机械科学研究总院刘晓飞设计了一种卧式碾压设备, 模型如图9所示。

图9 卧式碾压设备设计模型

盘件1置于平台7上, 平台内有中心轴卡头穿入盘件中心, 通过法兰可将盘件托起; 平台在一侧开槽, 以便一对碾头伸入。在总框架内安装2个彼此独立的子框架A、B, 它们可分别由液压缸5驱动沿盘件轴向运动; 子框架内各安装一套碾压头组, 包括碾头、轴承箱、电机和径向滑块, 碾压头组由液压缸6驱动沿盘件径向运动; 同时, 碾压头组在子框架内具有上下摆动自由度(图中未标出)。

总框架一半在地基中, 平台端面正好与车间地面齐平, 相较于立式结构更便于工件的取放。2为加热炉, 图中隐藏了另一半, 它可以通过导轨自由推入或退出, 当盘件装卡完成后, 两瓣加热炉推入对合后起到保温和加热作用。机构3则仿照辗环机设计, 当盘件装卡完成后, 其带动下中心轴卡头4落下与平台内的中心轴卡头配合将盘件固定, 并保证盘件自由旋转; 同时通过辅助辊子(图中未画出)保证盘件在成形中的圆度和形状。

碾压机与辗环机的主要区别包括中心轴一般固定, 不进行扩孔变形; 上下碾头径向可以不一致; 碾头母线长度较短。

2 设备的加热系统设计

2.1 感应加热系统

碾压工艺是一种间歇式累积成形工艺, 整个成形时间至少在20 min以上, 因此盘件的保温问题是一个技术难点。如图10所示, 文献[18]中的感应加热系统采用高频电源, 感应加热线圈由一根铜管绕成, 中间空白区域为碾头和中心轴留出空间。图中盘件为 $\phi 180\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 的钛合金, 盘件的温度控制由红外测温仪与温控系统配合完成, 红外测温点A打在线圈空隙处; 右图为另一种感应线圈绕法。

图10 感应加热线圈绕法及盘件转动时的温度场

在盘件不转动情况下, 盘件中心由于没有线圈而形成低温区($850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下), 因此工艺根本无法执行。为解决低温区问题, 设计者提出了在盘件转动下加热的方案, 取得了一些效果, 但盘件各区域温度呈现不均匀性状态, 可能更易导致混晶发生。感应加热方式的一些弊端分析如下。

(1) 工件的装卸问题。由于感应线圈必须包覆盘件, 且间隙不能过大, 使得工件装卡和取出时的夹持部位有限, 操作过程困难。

(2) 红外控温点的随机性。由于是开放式加热, 工件各区域氧化程度不同, 感应加热效果的温度不均, 加之盘件旋转, 使得红外控温点的采集温度始终是变化的, 因此盘件的温度分布无法保持恒定控制, 具有一定随机性。

(3) 大型盘件的热透及热应力问题。高频感应加热深度仅为 $0.5\sim 2.5\text{ mm}$, 适用于中小型盘件的加热, 对于大型盘件就必须采用中频或工频感应加热设备。为避免遮挡红外测温探头, 工件四周无法加装保温围挡, 会造成巨大的辐射热量损失。在加热炉加热规范中, 直径大于 $\phi 200\text{ mm}$ 的钛合金和高温合金毛坯加热时间至少在3小时以上, 那么在感应加热方案下是否会发生热应力开裂^[21-22]现象, 必须引起重视。

(4) 感应加热线圈的可适应性。图 11 为某盘件的线圈示意图, 左侧为饼坯, 右侧为零件。加工结束时线圈与工件端面的间隙由 t_0 增大到了 t_1 , 饼坯的边缘位置 A_0 变为了工件内部点 A_1 , 以上变化都将影响工件的温度控制; 此外盘件变形过大还可能与线圈发生干涉。

图 11 感应加热线圈的适应性

(5) 设备的冗杂问题。由于感应线圈总长度与电源匹配, 因此电源只能放置在工件附近, 图 12 为安装了感应加热系统后的碾压设备。感应电源和线圈安装在大跨度框架上, 架子下有滚轮可以移动。可看到设备四周几乎都被附件包围, 显得十分杂乱, 特别是框架将坯料的上方装卡空间也占据了, 使得坯料装卡及设备维修较为困难。

图 12 含感应加热系统的碾压设备

(6) 设备热保护问题。轴承及液压系统对温度的敏感性很高, 感应加热方案的开放式加热模式热辐射极大, 因此必须对设备增加热保护措施。

综上所述, 感应加热方案不但没有使工件的温度可以精确控制, 反而造成其温度场分布更为复杂, 且影响因素众多; 温度场的复杂性、随机性和不可控性, 使微观组织的控制也变得困难; 刚性感应线圈还容易与工件的柔性成形发生干涉。诸如此, 感

应加热方案总体上弊大于利, 不适宜施行。

2.2 电阻炉加热系统

图 13 为电阻炉式加热系统, 炉子位于设备中心, 分为上、下两个炉膛, 上炉膛可由电动铰链拉起或放下; 加热元件为定制的硅碳棒(也可用电阻丝), 位于炉子底端和顶端, 总功率 4 kW; 热电偶连接至温控系统。炉子中部开 6 个孔洞, 可插入 4 个碾头和 2 个中心轴, 孔洞形状刚好包容了碾头所有运动轨迹。由于 6 个轴都在炉膛内, 因此增加了轴承水冷保护措施, 是通过 12 路水管实现(6 进 6 出)。与图 12 对比, 采用电阻炉方案使得设备布局更加简洁。

图 13 电阻炉加热系统下的碾压设备

碾压设备上的电阻炉称为“保温炉”更为确切, 坯料首先在专用加热炉中加热到温, 然后夹持到碾压设备上装卡, 通过炉体继续加热一段时间, 恢复在运料途中损失的热量, 之后即可进行成形。

图 14 为六角形电阻炉模型俯视图(上半炉已隐藏), 与俄罗斯研究院的方形电阻炉比较(图右下角), 六角形炉的设计充分利用了设备现有空间, 可获得最大功率从而保证了工作温度的要求, 具有很大实

图 14 六角形电阻炉与方形炉比较

用性。此外,通过加热元件的分区控制,还可实现炉腔内不同温度分布的可控。

2.3 隔热、冷却及防氧化设施设计

不论哪种加热方式,对设备的热防护都是一种必须的规范。图 15a 为在碾轴后端安装水冷环的冷却措施,水环直接套在碾压轴的后端,用石墨盘根进行密封;图 15b 为一种直接在碾轴内部打孔冷却的设计;图 15c 为当前设备的简易保护措施,碾轴的非工作区域以及水冷环端面都用陶瓷棉进行了隔热保护,陶瓷棉在长期加热情况下会出现脆化、断裂脱落,最好采用隔热涂料为宜。此外还要考虑碾压头和卡轴的氧化问题。

图 15 冷却及隔热保护措施

3 碾压头的设计及选材

图 16 为碾压头设计参数示意图,包括前端直径 D_1 , 后端直径 D_2 , 头颈直径 D_3 ; 圆角 R_1 、 R_2 、 R_3 ; 碾头半锥角 β , 母线长度 W , 后端倾角 θ , 垂直进给深度 h_1 ; 碾轴长度 L , 碾轴后端直径 D 。工艺参数包括碾头中心轴与工件端面的摆角 α , 进给深度 h_2 , 碾轴转速 ω , 以上参数有的是独立的, 有的与其他参数互为关联。各参数设计一般具有通用性, 工件大小是主要影响因素; 但是对于一些复杂盘件, 则需要设计专用碾头。

图 16 碾压头设计参数

右图为乌法研究所的碾头形状, A 区一对碾头的前、后圆角 R_1 、 R_2 较大, 母线 W 较短, h_1 较大, 几乎为饼形; B 区一对碾头与机械科学研究总院的设计相近, 但是 h_1 几乎没有, 猜想其作用是为了整形或辅助支撑, 负责成形的仅为 A 区碾头, 这种设计形式可以借鉴。由于碾头的头颈前端始终接触高温盘件, 在长期循环载荷下易发生蠕变变形。图 17 为碾头的变形情况, 可以看到碾头在发生径向变形的同时, 前端区材料还向前流动形成了环形槽。

图 17 碾头的高温变形

在碾压头选材方面, 根据高温强度、抗氧化性、持久/蠕变强度性能要求, 可按成本顺序选择模具钢、镍基高温合金和陶瓷基复合材三类, 优质模具钢价格一般在 50 元/kg, 后两种材料价格则是它的 8 倍以上。因此采用整体结构的碾轴成本过高, 可考虑分体式碾压头轴的设计, 图 18a、图 18b 分别为高温合金材料的前端碾头及模具钢材料的后端主轴, 它们采用锥孔连接。图 18c 为乌法研究所使用的碾头, 该模型为分体结构, 采用方轴连接。

图 18 分体式碾压头的设计及校核计算

在碾压头设计方面, 碾头前端头颈处 D_3 是最大应力集中区, 应进行仿真计算校核。在碾头涂层方面, 已不是技术瓶颈, 如 CVD 和 PVD 技术可在合金表面沉积高硬度的陶瓷基薄膜, 从而大大改善耐磨性和耐烧蚀性, 寿命提高 3 倍以上。

此外, 碾头磨损后还可通过金属粉激光熔覆技术进行修复。

4 碾压工艺的数值模拟及数控实现

4.1 碾压工艺的工步计算

图 19 为碾压工艺的工步计算软件, 首先根据盘件的截面形状特点, 将其划分成多个连续的“圆环”, 按每个环的体积不变原则, 可倒推出饼坯的直径和厚度; 之后通过碾压头控制每一个环的形状和位置, 进行多道次累积变形达到最终形状。每个环的形状参数为宽度 L_i 和厚度 H_i ; 位置参数为内径 r_i 和厚度中心 Z_i ; 碾压头的定位坐标取下端母线前点 $P(R, Z)$ 。

图 19 碾压工艺自动计算软件

按轮毂到轮缘的顺序将各“环”依次编号(0~n), 成形时也按此顺序依次碾压。各环都碾压一道后称为“一遍次”, 达到零件最终形状时需要多遍次碾压; 在一遍次中, 某环可能需要碾压多次, 则每次称之为“一道次”。图 20 为各类形状的涡轮盘及碾压头姿态, 其中虚线部分为毛坯。

图 20 各类形状的涡轮盘

举例说明环的算法, 图 21 的碾头正在碾压 5 号环, 虚线部分和实线部分分别为变形前后的 5、6 号环, 设 5 号环体积为 V_5 , 初始内径 r_5 , 厚度 H_5 ; 当 5 号环厚度总变形为 δ_5 时, 变形后 5 号环内径不变, 则 5 号环外径(亦即 6 号环内径)为

$$r_6 = \sqrt{\frac{V_5}{\pi(H_5 - \delta_5)}} + r_5^2$$

5 号环变形引起盘件半径增量为 Δr_5 , 同时由于材料流动也引起 6 号环在厚度上的缩减 δ_6 , 以上式类推, 便可推导出后面几个环的尺寸。

图 21 “环”的尺寸链算法

4.2 工艺数值模拟的技术难点

数值模拟的优势本在于节约试验成本, 缩短研发周期, 但当前碾压工艺在数值模拟上有三个尚未解决的技术难点, 使得模拟计算结果参考度不高。

(1) 摩擦类型问题。非特殊情况下, 金属之间的动摩擦因子一般都小于 1.0, 但在轧制类工艺数值模拟时, 摩擦因子一般都要设置 1.0 以上, 工件才能变形或运动, 否则打滑严重, 摩擦模型是目前所有商业仿真软件的难点技术之一。如果剪切摩擦因子 f 误差较大, 则具有耦合关系的流动应力、应变、应变速率和温度都无法保证精度; 当宏观数据计算不准, 则微观组织预测也将缺乏参考价值。

图 22 为碾压过程模拟计算中摩擦因子 f 与盘件的轴向载荷关系曲线, 可以看出摩擦因子与载荷的关系几乎无规律可寻。要确定摩擦因子大小, 必须通过与试验实测数据相互验证的方法确定。

图 22 摩擦因数对载荷的影响

“甩高”是在试验中发现的一个碾压工艺特殊现象, 并作为了一个研究亮点。图 23 为“甩高”示意图, h_1 为压痕深度, 即碾头的进给量, 碾压结束后成形的实际槽深为 h_2 , 则深度差 $\Delta h = h_1 - h_2$ 称之为“甩

高”,此现象原因解释为与摩擦有关,甩高可以增加与碾头的接触面积,从而增大摩擦力,抵制打滑。但是在数值模拟中这个现象并未出现,显然也与摩擦因子的模型和设置有关。

图 23 “甩高”现象分析

(2) 微观组织演变本构模型问题。金泉林等^[7]在 Deform 软件二次开发基础上加入了微观组织预测模型,对铝合金碾压过程的晶粒度演变进行了模拟计算。但目前高温合金和钛合金等材料的微观组织预测模型还不完善,因此通过数值模拟尚无法演算碾压工艺在双性能盘成形上的过程,只能通过试验方法验证,成本较大。

(3) 数值模拟的效率问题。由于碾压工艺是局部变形,计算网格折叠引起的频繁网格重划分十分频繁,因此导致整个工艺的模拟计算周期较长,且计算精度受损,这也是尚未解决的一个软件问题。

4.3 工艺数控实现的关键要点

保证工件的尺寸精度、成形效率和力学性能是数控系统的重要指标,第一代机械传动式碾压设备数字化改造后,可通过数控系统进行进给量的补偿,弥补了设备刚度不足、传动机构间隙过大、人工操作低效的问题,在二代液压碾压设备中应在数控系统上继续完善以下方面。

(1) “闭环”控制。“开环”控制往往导致较大的累积误差,因此在二代设备中,必须应用“闭环”控制。包括碾头坐标、盘件尺寸、温度等参数都应形成闭环,并随时加以修正。

(2) 碾轴转速。前期研究表明,低转速并不有利于预防打滑,反而高速更利于成形过程中材料的流动稳定性,在二代设备中可尝试选用 5~20 rad/min 无级调速电机。

(3) 碾头的移动轨迹。整个碾压工艺中碾头的加工时间,即与工件的接触时间仅为总时间的 1/5 左右,其他大部时间都消耗在碾头的移动中,可通过优化碾头轨迹和提高进给速度及进给量来改善。

(4) 碾头自由度及工具库。图 24a、图 24b、图 24c 为二代数控碾压设备成形出的一些盘件,形状比较简单,图 24d 是 GE 公司公布的所谓碾压成形出的钛合金盘件,其形状十分复杂,甚至有一些“负角”,猜想是加工后的产品。如果要成形一些形状较为复杂的盘件,碾压设备一定要具备足够的自由度(多轴),且需配置不同尺寸形状的工具库。

图 24 数控碾压成形的盘件

(5) 多种工艺复合控制成形。如果让碾压设备具有更大的柔性成形优势,应考虑其在多种工艺功能上的复合控制。例如,图 20a 中的 2 号环宽度很大,可将碾头换为类辗环机的锥辊进行轧制,以提高效率;图 20c 中可考虑控制 1 对碾头按曲线轨迹加工,即类似旋压工艺成形出碗状工件;图 20d 中盘件中心形成盆地,碾压成形困难,可考虑将摆角 α 调为 90° 进行挤锻变形;参考辗环机,还可给中心轴径向自由度,也能进行扩孔成形,从而大幅提高材料利用率;在卧式设备中,可抬起上端中心轴,对工件中心也可以进行成形,而避免干涉。

(6) 成形过程中的缺陷监测和处置。如,盘件翘曲严重则碾头在坐标转换中就可能与之干涉,因此数控系统随时要对工件成形中的一些“事故”作出判断,并及时自动处理或报警。

(7) 辅助设施之间的协调控制。包括中心轴、导向辊、辅助辊、测量设备、加热设备、水冷设备等,通过数控系统控制配合碾压头成形。

5 我国盘件无模碾压技术产业化分析

5.1 涡轮盘制造设备及工艺状况

钛合金和高温合金涡轮盘是发动机的重要热端部件,由于钛合金工作温度低于 600°C ,高温合金涡轮盘是未来主流需求。目前高温合金粉末盘成形较先进的工艺是热等静压(Hot isostatic pressing, HIP)+热挤压+超塑等温锻造,也可直接热等静压成

型。该工艺需要大型挤压机来使粉末细化,美国、俄国最大挤压机分别为 315 MN 和 200 MN,国内北重集团的 360 MN 垂直挤压机已经服役。而超塑成形由于成形载荷低,不需要大型压力机,美国、俄国最大等温模锻机只有 70 MN 和 40 MN,但是等温模锻机制造成本极大,如钼基模具必须在真空或保护气下工作。我国也研制了一些小型等温锻造设备,2014 年天锻自主研发的 200 MN 等温锻造液压机在陕西宏远航空锻造公司服役。

我国的涡轮盘制造目前还以传统工艺为主,即真空熔炼+自由锻开坯或轧制(细晶化处理)+包套热模锻成形,模具温度不高于 800 °C,因此其成本较粉末盘低得多。2011 年前只有一台 1 MJ 对击锤和 300 MN 水压机,只能制造一些小型涡轮盘;对于大型盘件则形状都做较大简化,导致加工余量大,材料利用率低,组织性能与国外还有很大差距。近年随着西安三角公司的 400 MN 液压机和德阳二重的 800 MN 液压机的服役,已锻造成功直径 1 m 和 2 m 的高温合金涡轮盘,说明制约我国的设备瓶颈已经突破,接下来应在工艺技术上有所突破。

由于国内大型模锻压机与国外还有一定的产量能力差距,因此也发展了类似碾压工艺的盘件局部成形技术。图 25a 为宝钢的“分区锻造法”,依托设备为 40 MN 快锻机,其模具为一条贯穿盘件直径的梁,下端与盘件截面形状近似,锻击一次后盘件由托板带动旋转一个角度,再二次锻击直至成形。该工艺成形出了直径 2.2 m、重达 6.3 t 的 GH2674 燃气轮机涡轮盘,组织性能满足要求,产值达 1 300 多万元。

图 25 涡轮盘局部成形工艺

图 25b 为贵州安大利用辗环机发明的轧制工艺^[23],与图 10 比较可看出轴向锥辊不再是光辊,而是加工成与盘件截面相同的形状,上、下锥辊形状不同就可成形不对称的盘件;驱动辊也可加工成一定形状,

使盘件外缘具有形状;此外,在没有芯辊情况下增加了一对导向辊保证盘件的圆度,这样可成形出没有中心轴的盘件;当加上芯轴后,还可同时进行扩孔的成形,该工艺也成形出了 $\phi 2.2$ m 的不锈钢燃气轮机盘。

图 25c 则是纯粹的自由锻成形,盘件自由旋转,通过 2 对锤头不断累积成形,该方法变“碾压”为“挤压”,锤头不再受弯矩且更换方便,设备简单,可在快锻机基础上改造。图 25d 为西北工业大学探索的摆辗成形,并试验成形出了 $\phi 330$ mm 的样件,但摆辗设备复杂,制造成本较高。

5.2 碾压工艺实现双性能涡轮盘的可行性

涡轮盘一般工作温度在 540~840 °C,航空发动机涡轮前工作温度则高达 1 000 °C 以上,如美国普惠公司的 F119 发动机涡轮盘,推重比达到 10,涡轮前温度高达 1 700 °C。涡轮盘轮缘部位承受高温和较低应力,这就要求轮缘部分在高温下具有高的持久、蠕变强度、抗疲劳裂纹扩展和损伤容限,需要粗晶,晶粒度等级要求在 3~6 级(127~44.9 μm);而轮毂部分的温度相对较低,但应力较高,需要具有高的拉伸屈服强度(扭转)和低周疲劳性能,需要细晶,晶粒度等级要求在 8~12 级(22.5~5.6 μm)以上,这就是第四代双性能涡轮盘。

目前双性能高温合金涡轮盘全部是粉末盘,美国于 1977 年开始研究双性能粉末盘,直到 1997 年才装配在 F119 发动机上,英国、俄罗斯、日本以及中国等国家也开展了双性能粉末盘的研究工作,尚处于研究阶段,未得到实际应用,双性能盘包括双合金双重组织和单合金双重组织两类。

(1) 双合金。俄罗斯采用 HIP 扩散连接工艺制造双合金双性能粉末盘;日本采用 HIP 成形+超塑性锻造工艺,如轮毂采用 TMP-3 合金,轮缘采用 AF115 合金,轮毂和轮缘分别 HIP 成形,然后两部分同时进行超塑性锻造得到双性能盘粉末盘。对于双相型钛合金(如 TC11),也可采取类似工艺获得双性能盘^[24],即将 $\alpha+\beta$ 相的等轴组织内坯和 β 相的网篮状组织外坯用电子束焊接,再等温锻造成形。

(2) 单合金。美国通用公司采用锻造时轮毂变形而轮缘不变形的方法获得双性能;应用较多的工艺则是“梯度(双重)热处理法^[25]”,上述美国用在 F119 发动机上的涡轮盘即是使用这种方法,图 26 为该方法的原理图,盘件中心被保温层包覆后整体放入炉中进行固溶处理,这样轮缘暴露在炉内高温区形成粗大晶粒,而轮毂则由于保温层隔热作用升温较慢,晶粒长大有限,由此获得双性能组织。

双性能盘成形机理可归纳如下。即轮毂=低温+大变形；轮缘=高温+小变形。碾压工艺要实现双性能盘成形，关键技术要点在于首先应保证提供高质量细晶饼坯；其次通过电阻炉使炉膛形成中心低温、外围高温的梯度温度(T)分布；然后在碾头转速(ε)、进给量(ϵ)、道次间歇时间(t)耦合控制下进行盘件成形，即可获得从轮毂到轮缘的梯度晶粒度分布，实现“双性能”目标。

图 26 梯度热处理法获得双性能组织

图 27 为金泉林在感应加热方式下碾压得到的 TC4 钛合金盘^[8]，最高成形温度为 960 °C，图 27a 为轮缘处的金相，包含初生 α 组织转变后的层状和针状 α 组织，以及 β 转变组织；图 27b 为轮毂处的金相，由于温度低且变形小，以初生圆形和长条形 α 组织为主；图 27c 为碾压区，金相呈 $\alpha+\beta$ 相的网篮组织， α 等轴晶的尺寸为 15~20 μm 。整个盘件实际形成了轮毂和轮缘粗晶，变形区细晶的分布，这显然不符合双性能盘的定义，原因主要是轮毂区初始晶粒度过大，且几乎没有变形，因此在后续工艺措施中必须加以改进。

图 27 TC4 盘碾压后的晶粒度分布

总之，在碾压设备上实现双性能涡轮盘的可行性目前只有理论上的证明，而现役设备无法提供同等尺寸的高温合金涡轮盘产品件，因此缺乏有力的事实证明，故二代设备的研制迫在眉睫。

5.3 无模碾压设备的产业化可能性分析

无模碾压技术与设备要实现产业化，按目前现状则必须经历以下阶段。

(1) 可行性论证阶段。实现高品质双性能涡轮盘成形是否是碾压工艺领先于其他工艺的重要优势，其可行性和必要性必须加以证明，否则将使大量财力、人力的投入无法得到回报，造成企业重大损失。

(2) 资金筹措阶段。应尽力争取国家纵向资金支持，以及国内装备制造企业的投资，并自筹部分资金，才能维持研发。该阶段需要 1~2 年。

(3) 二代中试样机的设计阶段。最好委托具有资质的辗环机设备企业进行合作设计，碾压机于辗环机有许多相通之处，可以充分利用企业的丰富经验，在辗环机设计图纸上进行改造升级，可大大缩短研发周期。该阶段需要 1~2 年，表 1 为二代样机的基本设计参数指标。

表 1 第二代碾压设备的技术参数

序号	参数	第一代设备	第二代设备
1	盘件直径/mm	150~280	300~1 000
2	盘件厚度/mm	10~50	20~120
3	盘件轴向抗力/kN	30	5 000
4	碾头转矩/(N·m)	800	45 000
5	碾头转速/(rad/min)	0.5~10	5~20
6	中心轴转速/(rad/min)	0	1~15
7	轴向进给速度/(mm/s)	0.1~2.1	1~100
8	径向进给速度/(mm/s)	0.1~50	1~150
9	轴向进给精度/mm		0.01~0.02
10	径向进给精度/mm		

(4) 二代中试样机的制造加工阶段。在 1 年内加工、装配、调试完成设备应不成问题，关键在于前期的设计和准备工作充分。在样机设计和制造阶段的 2~3 年内，可同时进行微观组织控制工艺数值模拟研究，为以后生产验证打好基础。

(5) 高温合金双性能涡轮盘碾压工艺研发阶段。通过大量现场试验，并与数值模拟结合，获得双性能盘件碾压工艺设计方法，建立标准化的碾压工艺设计数据库，保证产品性能稳定性。

(6) 产品论证，获得国家认可阶段。由于涡轮盘属于军工、航空航天、电力特殊领域，因此必须获得国家相关部门认可、测试，才能正式装机使用。至少需要 1~2 年。

(7) 拓展市场，投产阶段。即使产品质量再佳，如果没有固定用户，市场面窄，需求量少，形不成一定批量规模也不可能实现产业化。

综上所述,无模碾压设备的产业化历程任重道远,至少需要 5~6 年时间。在此期间,完全有可能出现更先进的工艺,碾压工艺随时面临淘汰的风险。因此,在项目启动之前必须有所预案设计,重点在设备的柔性成形设计上有所创新,如在设备的功能上有所扩展,结构上留有改造余地,拓宽加工材料种类(如轻合金金)等。

下面对涡轮盘的市场需求做简要分析。全球航天产业每年都在以 6%到 7%快速增长,2020 年我国航天市场规模将达 8 000 亿元。在军用航空设备方面,目前我国空军力量包括 1 570 架战斗机和 300 架运输机,其中四代战机约 500 架,现代化程度仅 25%,而西方发达国家四代机的比例均已超过三分之二。在民用航空设备方面,预测未来 20 年中国的航空公司将有约 4 700 架的新机交付,中国客机机队占全球机队比例将从现在的 8%上升至 14%,市场价值超过 5 000 亿美元。假设发动机价格为整机价格的 25%,国产发动机市场占有率 40%测算,未来 20 年国产客机整机增长带动的国产航空发动机需求额为 500 亿美元。另外,燃汽轮机发电已成为电力供应的重要新途径,目前 10~20 万 kW 级的燃汽轮机的研制已被我国列入发展的重点,其中超大型高温合金涡轮盘(直径 2 m 左右)是关键部件。由此,涡轮盘的需求未来具有很大市场,碾压工艺及设备必须极快成熟并服役,才可能在市场中占据一席之地。

6 结论

(1) 通过辅助加热系统形成轮缘高温到轮毂低温的不均匀温度场,并配合碾压头对局部的变形控制,理论上可形成出双性能组织分布的涡轮盘,是碾压工艺的一个特色和优势。但是目前无论数值模拟还是实际产品,都无法提供有力的事实证明,因此亟待二代碾压设备的研制。

(2) 由于当前碾压设备样机在强度和刚度上的严重不足,在其基础上进行试验而获得的数据几乎没有参考价值,也无升级改造的余地。剖析了碾压设备在框架结构、加热系统、数控成形工艺及模拟仿真方面的技术关键,并不存在任何技术瓶颈,因此二代碾压设备研制具有可行性。

(3) 贵州安大发明的辗环机涡轮盘轧制工艺,对于碾压工艺有很大借鉴价值。由此,依托于现有成熟的卧式轴向数控辗环机设计基础并创新改造升级,如在多材料多工艺复合柔性成形技术有所突破,

是碾压技术实现产业化的捷径。

(4) 舰用或发电用大型涡轮盘模具成本较高,且其形状简单,性能较易控制,可作为碾压设备的主打产品;由于国内大型锻造设备的突起,碾压设备在小型涡轮盘方面竞争力不强,可尝试在轻合金等材料大型盘件(如齿轮、法兰和轮毂等)制坯或成形上进行工艺应用,也是一种市场拓展。

(5) 无模碾压设备初步实现产业化尚需 5~6 年时间,因此建立一支高水平且发展稳定的研发团队是必要的技术基础,科学高效的科研管理更是其根本保障。

参 考 文 献

- [1] BEWLAY B P, GIGLIOTTI M F X, TYASHEY Z U, et al. Superplastic roll forming of Ti alloys[J]. *Materials & Design*, 2000, 21: 287-295.
- [2] BEWLAY B P, GIGLIOTTI M F X, HARDWICKE C U, et al. Net-shape manufacturing of aircraft engine disks by roll forming and hot die forging[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 135(2-3): 324-329.
- [3] 金泉林,刘晓飞,张艳姝. 盘形件辗压成形原理及其数值模拟[J]. *钢铁研究学报*, 2003, 15(z1): 654-658.
JIN Quanlin, LIU Xiaofei, ZHANG Yanshu. Forming principle and numerical simulation of disk-shape part[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2003, 15(z1): 654-658.
- [4] 李彤,金泉林. 盘型件双面辗压过程的数值模拟研究[J]. *锻压装备与制造技术*, 2006, 41(6): 87-90.
LI Tong, JIN Quanlin. A study on numerical simulation of double-sided roll forming processes of discal parts[J]. *China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology*, 2006, 41(6): 87-90.
- [5] 李彤. 盘型件双面辗压成形工艺研究[D]. 北京:机械科学研究总院, 2006.
LI Tong. A study on double-sided roll forming processes of discal parts[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science & Technology, 2006.
- [6] 李彤,刘晓飞,金泉林. 盘型件宽槽双面辗压的试验研究[J]. *塑性工程学报*, 2007, 14(4): 96-100.
LI Tong, LIU Xiaofei, JIN Quanlin. An experiment study on double-sided roll forming of wide groove of discal parts[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2007, 14(4): 96-100.
- [7] 金泉林,刘晓飞. 铝合金盘件辗压成形数值模拟与晶粒度演化预测[J]. *航空学报*, 2012, 33(2): 335-346.

- JIN Quanlin, LIU Xiaofei. Numerical simulation and experimental validation of grain size evolution during double-sided isothermal roll forming for aluminum alloy discal parts[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2012, 33(2): 335-346.
- [8] 金泉林. 钛合金辗压盘件的微观组织分布特征[J]. *塑性工程学报*, 2013, 20(6): 9-16.
- JIN Quanlin. Microstructure distribution of rolled titanium disk[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2013, 20(6): 9-16.
- [9] 张风光, 金泉林, 李洪波. TC4 盘件双面辗压的试验研究[J]. *锻压技术*, 2013, 38(5): 87-90.
- ZHANG Fengguang, JIN Quanlin, LI Hongbo. Experimental study on double-sided roll forming of TC4 disk[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2013, 38(5): 87-90.
- [10] 马天军, 金鑫. 研制直径 2 000 mm 超大型高温合金涡轮盘的新技术[J]. *宝钢技术*, 2005(5): 50-54.
- MA Tianjun, JIN Xin. A new technology for development of $\phi 2\ 000$ mm extra-large turbine disk made of superalloy[J]. *Baosteel Technology*, 2005(5): 50-54.
- [11] 刘太盈, 李庆华, 李付国, 等. 大型盘件辗轧工艺及坯料设计[J]. *材料科学与工艺*, 2012, 20(1): 124-127.
- LIU Taiying, LI Qinghua, LI Fuguo, et al. Large disk rolling process and blank design[J]. *Materials Science and Technology*, 2012, 20(1): 124-127.
- [12] 潘阳, 刘杰, 刘东, 等. 大型盘件轴向辗轧成形过程的三维数值模拟[J]. *锻压技术*, 2010, 35(4): 61-66.
- PAN Yang, LIU Jie, LIU Dong, et al. 3D numerical simulation of axial closed dies rolling process for disk forging[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2010, 35(4): 61-66.
- [13] 李彤, 金泉林, 刘晓飞. 成形复杂盘件时辗压工具运动轨迹的研究[J]. *锻压技术*, 2008, 33(5): 76-81.
- LI Tong, JIN Quanlin, LIU Xiaofei. Experimental study on roller feed route of double-sided roll forming of disc parts with complex profile[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2008, 33(5): 76-81.
- [14] 刘莹莹, 姚泽坤, 郭鸿镇. 航空发动机双性能盘的制造技术研究进展[J]. *材料导报*, 2007, 21(12): 95-98.
- LIU Yingying, YAO Zekun, GUO Hongzhen. Research advances in manufacture technique of dual property disk applied to aircraft engine[J]. *Materials Review*, 2007, 21(12): 95-98.
- [15] 胡本芙, 田高峰, 贾成厂, 等. 双性能粉末高温合金涡轮盘的研究进展[J]. *航空材料学报*, 2007, 27(4): 80-84.
- HU Benfu, TIAN Gaofeng, JIA Chengchang, et al. Development in double-properties turbine disk of P/M superalloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2007, 27(4): 80-84.
- [16] 李彤, 金泉林, 刘晓飞. 盘型件双面辗压成形过程中打滑缺陷的试验研究[J]. *塑性工程报*, 2009, 16(1): 106-109.
- LI Tong, JIN Quanlin, LIU Xiaofei. A study on skidding between roller and disk during double-sided roll forming of discal parts[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2009, 16(1): 106-109.
- [17] 宋晓东, 焦让, 王建武, 等. 盘形件辗压成形机的液压驱动系统[J]. *液压气动与密封*, 2006(4): 13-14.
- SONG Xiaodong, JIAO Rang, WANG Jianwu, et al. Fluid drive system of the rolling forming machine[J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2006(4): 13-14.
- [18] 裴然, 焦让. 高温合金涡轮盘的辗压制造[J]. *金属世界*, 2014(4): 21-24.
- PEI Ran, JIAO Rang. The superalloy disk roll forming for aero engine[J]. *Metal World*, 2014(4): 21-24.
- [19] 冯庆柱, 于革刚, 金泉林, 等. 盘件辗压机并联液压进给机构的运动学分析[J]. *机电产品开发与创新*, 2016, 29(2): 4-6.
- FENG Qingzhu, YU Gegang, JIN Quanlin, et al. A kinematic analysis of a parallel hydraulic feed mechanism for discal part roll forming machine[J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2016, 29(2): 4-6.
- [20] 冯庆柱. 一种盘型件辗压机并联液压进给机构的分析[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2016.
- FENG Qingzhu. Analysis of a parallel hydraulic feed mechanism for discal parts roll forming machine[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2016.
- [21] 陈诗荪, 王承屏. 钛合金在锻造前的加热[J]. *锻压技术*, 1981(1): 19-25.
- CHEN Shisun, WANG Chengping. Heating of Ti-alloy before forging[J]. *Forging & Stamping Technology*, 1981(1): 19-25.
- [22] 陈诗荪, 王承屏. 高温合金在锻造前的加热[J]. *航空工艺技术*, 1981(8): 27-32.
- CHEN Shisun, WANG Chengping. Heating of superalloy before forging[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 1981(8): 27-32.

- [23] 李庆华, 李付国, 魏志坚, 等. 盘件辗轧成形技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2015, 7(6): 25-30.
LI Qinghua, LI Fuguo, WEI Zhijian, et al. A research progress in the disk roll forming technology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(6): 25-30.
- [24] 苏祖武, 姚泽冲, 郭鸿镇, 等. TC11 钛合金双性能盘研究[J]. 金属学报, 1996, 32(4): 377-381.
SU Zuwu, YAO Zechong, GUO Hongzhen, et al. New process for TC11 Ti alloy dual property disk[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1996, 32(4): 377-381.
- [25] WINSTONE M R, BROOKS J W. Advanced high temperature materials: Aeroengine fatigue[J]. Ciencia E Tecnologia Dos Materiais, 2008, 20: 15-24.

作者简介: 樊璐璐, 女, 1989 年出生, 博士。主要研究方向为机械结构多目标优化设计和热加工工艺。

E-mail: lulu_alisa_fan@163.com

刘晓飞(通信作者), 男, 1975 年出生, 教授级高级工程师。主要研究方向为金属热加工工艺及 CAE 数值模拟。

E-mail: liufly@sina.com