

燃气轮机涡轮叶片制造工艺现状及发展方向

崔慧然, 冯相如, 任建伟

(无锡透平叶片有限公司, 江苏无锡 214174)

摘要: 航空发动机和燃气轮机, 被誉为工业“皇冠上的明珠”, 其涡轮叶片的制造工艺是典型的高科技、高附加值技术。本文概括阐述了近年来铸造涡轮叶片材料和构型的发展现状及未来发展方向, 结合现阶段产品介绍了涡轮叶片的制造工艺特点现状, 归纳论述了涡轮叶片制造工艺难点, 并对涡轮叶片新材料的发展和制造工艺革新进行了展望。

关键词: 涡轮叶片; 新材料; 构型设计; 制造工艺; 发展方向

在燃气轮机和航空发动机中, 涡轮叶片由于处在温度最高、应力最复杂、环境最恶劣的部位, 而被列为第一关键件, 其性能水平是一个型号发动机先进程度的重要标志^[1]。为满足性能水平的提升, 从设计端采用了许多新材料、新结构, 这就要求制造端研发出新的更优工艺来加以实现。通过调研相关文献, 多见涡轮叶片各专业单个技术难点突破的报道^[2-9], 本文则着眼于燃气轮机涡轮叶片制造全流程, 以满足设计需求为出发点, 对涡轮制造的关键工艺现状及发展方向进行阐述。

1 燃气轮机涡轮叶片的设计与制造实现方式

1.1 燃气轮机的发展与涡轮叶片的设计依据

20世纪中叶以来, 燃气轮机为现代航空动力奠定了基础, 随后, 燃气轮机也被广泛应用于舰船、坦克等运载工具的先进动力装置。如今, 燃气轮机在世界不同的工业领域得到了更多更广泛的应用。如图1所示, 目前世界上正在服役与在研中的燃气轮机可按结构形式与用途分类, 按结构形式可分为重型、中型和微型燃气轮机; 按用途主要可分为航空动力装置用燃气轮机、舰船动力装置用燃气轮机与发电用燃气轮机。其中, 发电用燃气轮机占据了世界燃气轮机市场的大部分, 而重型燃气轮机 (Heavy-duty Gas Turbine, HDGT) 因其联合循环发电效率高、污染排放少、投资低、建设周期短、用地用水量少等优点, 逐渐成为世界各国不可或缺的战略能源装备。

燃气轮机是典型的高技术密集型产品, 自1939年第一台燃气轮机在瑞士诞生以来, HDGT的涡轮前的进气温度由最初的550℃提高到了现如今的1600℃, 单循环效率由17.4%提高到了40%以上, 单机功率也由最初的4 MW提高到了470 MW。使用大于1600℃涡轮前进气温度的先进燃气轮机所能达到的联合循环电厂效率可达62%以上。

大多数HDGT由压气机、燃烧室和高温涡轮三大核心部件组成, 基于此三大核心部件, HDGT的基本工作原理可分为绝热压缩、定压吸热、绝热膨胀和定压放热四个阶段^[10], 其循环效率可由公式(1)得出。

$$\eta_{GT} = \frac{\frac{\tau}{K-1} \times \eta_{\text{turb}} - \frac{1}{\eta_{\text{comb}}}}{\frac{\tau-1}{K-1} - \frac{1}{\eta_{\text{comb}}}} \quad (1)$$

作者简介:

崔慧然(1979-), 女, 工学博士, 主要从事材料加工、特种工艺技术研究工作。电话: 0510-81086569, E-mail: cuihr@turblade.com

中图分类号: TG132.3⁺2
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2022)02-0143-08

收稿日期:

2021-07-05 收到初稿,
2021-07-26 收到修订稿。

式中： η_{GT} 为HDGT的循环效率， K 为绝热指数， π 是压气机压缩比， τ 为增压比， η_{turb} 为涡轮内效率， η_{comb} 为压气机内效率。由此式可以知道，通过提高压缩比和增压比可以显著提高HDGT的循环效率。当今HDGT压气机压缩比已经达到了很高的水平，只有不断提高涡轮前的进气温度才能不断地有效提高HDGT的循环效率。经过70多年的发展，先后研究生产了第一代E/D级HDGT（涡轮前进气温度 $< 1\ 000\ ^\circ\text{C}$ ），第二代F/G级HDGT（涡轮前进气温度 $< 1\ 500\ ^\circ\text{C}$ ）和第三代H/J级HDGT（涡轮前进气温度 $> 1\ 600\ ^\circ\text{C}$ ），目前基本形成了以GE、SIEMENS、三菱、安萨尔多公司为主的产品体系，代表了当今世界燃气轮机制造业的最高水平。

透平叶片是燃气轮机的心脏，承受最高的进气温度，为了保证燃气轮机安全可靠地运行，必须保证涡轮叶片材料能在高温下保持足够的强度，在频繁的热振和高污染工况下保持较好的耐久性。这种要求给涡轮叶片的设计指明了方向：①耐高温材料；②冷却设计；③热障涂层。

1.2 涡轮叶片的设计思路

20世纪50年代，为了满足第一代航空燃气轮机的使用需求，开发了第一代铸造高温合金涡轮叶片，其使用温度达到了 $800\ ^\circ\text{C}$ 。后期，随着真空熔炼技术与精密铸造工艺的蓬勃发展，一大批使用温度更高、性能更好的高温合金开始涌现出来，这期间铸造高温合金逐步成为燃气轮机涡轮叶片的主选材料。随后，定向凝固、粉末冶金、单晶合金、等温锻造、陶瓷凝固等一大批新工艺的应用造就了高温合金在燃气轮机领域大放异彩的局面，尤其是定向凝固工艺的应用造就了使用温度接近合金熔点 $\sim 90\%$ 的第三代铸造高温合金。现阶段几乎所有先进发动机都采用第四代定向凝固单晶铸造高温合金来制作高温区工作的叶片。

燃机的热效率和输出功率随着进气温度的提升而大幅增加，相关研究表明，涡轮进口温度每提高 $40\ ^\circ\text{C}$ ，

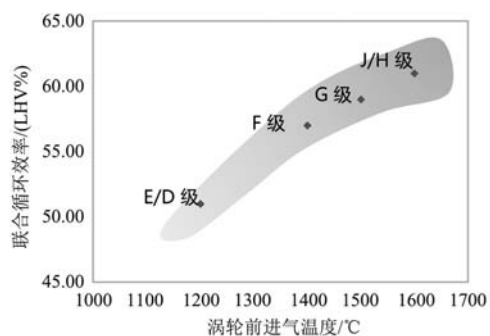


图1 重型燃气轮机涡轮前进气温度与联合循环效率

Fig. 1 Intake temperature and cycle efficiency of the heavy duty gas turbine

燃气热效率可提高1.5%，功率相应增加10%，随着燃气轮机涡轮进口温度的提高，涡轮叶片的工作温度也不断提高，但是叶片材料的耐热温度每年提高约 $8\ ^\circ\text{C}$ 的速度小于燃气轮机初始温度提升的速度。这种材料性能供不应求的局面倒逼涡轮叶片构型设计，催生了更为先进的高效冷却结构和涂层技术，尤其是冷却技术的应用能够将叶片的承温能力提升 $300\sim 500\ ^\circ\text{C}$ ，而先进的热障涂层又能够将叶片的承温能力提升 $150\sim 200\ ^\circ\text{C}$ 。

1.3 制造涡轮叶片的实现途径

涡轮叶片发展至今是叶片设计、合金、铸造工艺、加工以及表面涂层工艺共同发展所做出的共同贡献。现阶段，先进的涡轮叶片设计几乎都采用了单晶、空心、复合气膜冷却^[11]以及陶瓷层热障涂层结构。要实现涡轮叶片的制造生产须基于涡轮叶片的设计方案，经历毛坯铸件制备，机械加工和涂层三大主要步骤。

在研在用的高温合金有等轴铸造高温合金（国内牌号通常以K开头）、定向铸造高温合金（国内牌号通常以DZ开头）和单晶合金（国内牌号通常以DD开头）。采用不同材料的涡轮叶片的铸造工艺不尽相同，其中最复杂也是成本最高的是单晶合金的铸造工艺。铸造单晶高温合金首先需经过多次真空熔炼以严格控制合金中的杂质元素，熔炼结束经过定向凝固技术采用选晶法或籽晶法进行熔模铸造，最终经过固溶与时效热处理达到最终铸件状态。

涡轮叶片的冷却设计是构型的核心，需要采用熔模铸造+加工的方式完成。在制备铸件时应按照设计模型铸出叶片的内腔复杂空心结构，叶片表面的气膜孔需借助电火花打孔、激光打孔^[12]方式加工，叶片构型的其他关键尺寸需采用五轴缓进强磨或铣加工的方式来实现。

燃气轮机涡轮叶片涂层主要包含抗氧化涂层与热障涂层。其中抗氧化涂层包括MCrAlY涂层、铝化物涂层与改性铝化物涂层，制备MCrAlY涂层的工艺方法主要有PVD、HVOF、APS与VPS等，实现铝化物涂层的制备方法主要有固体粉末包埋法、热浸法、料浆法和化学气相沉积（CVD）方法等，热障涂层的陶瓷面层可采用APS、VPS和EB-PVD等方法制备。

2 复杂构型涡轮叶片的制造工艺现状

第一章阐述的涡轮叶片设计的实现所要经历的工序可能多达上百道，使用的加工技术也有几十种。复杂的工序和先进的加工技术构成了涡轮叶片全流程制造工艺，其工序间的配合与加工技术的优化开发是涡轮叶片满足使用要求的有力保证，这对任何燃气轮

机涡轮叶片制造从业者而言都是不小的挑战。

典型的涡轮叶片的制造工艺路线如图2所示，精密加工通常包含封堵与去密封、叶根装配面加工、气膜孔加工、铝化物涂层、组件焊接、热障涂层、流量检测等多种以高新前沿技术为依托的关键工艺，这些加工工艺在发展和应用过程中造就了燃气轮机热端涡轮叶片高附加值的特点，也体现了高端燃气轮机制造工艺精湛化的总体要求。

2.1 封堵与去密封工艺

燃气轮机涡轮叶片通常具有复杂的内腔结构，同时具有数量众多的表面气膜孔。加工过程中的铁屑、微小螺钉等多余物一旦进入叶片的内腔和气膜孔，将很难被发现并清除，这些多余物将是燃气轮机运行过程中的巨大隐患。因此，必须有一种工艺能够很好地阻止多余物进入涡轮叶片内腔和气膜孔，同时又不对加工过程产生任何不利影响。

封堵涡轮叶片内腔有多种方法可以选择，比如胶带遮蔽、封堵工装夹具、填料封堵等。其中填料封堵的方法应用最广。封堵用填充料的种类有水溶性的盐、水溶胶、非水溶性胶、水溶性蜡和非水溶性蜡等。可根据不同工艺阶段选择不同的填充料。

机加工工艺过程中产生的多余物多且难以控制，

因此针对机加工工艺阶段的封堵工艺作用巨大。机加工过程中需要使用水基切削液，不可采用水溶性的填充物，机加工过后需要将填充料清除干净，同时要求填充料易去除。根据以上要求，可选用非水溶性的低熔点蜡作为填充料，同时选用合适的清洗剂去除填充料，开发合适的去密封工艺。

如图3所示，为提高工艺效率和产品质量，通常需要使用真空注蜡机与自动除蜡清洗装备。封堵与去密封过程中注蜡机的注蜡压力、融蜡温度、清洗机的清洗时间、超声功率、清洗温度等关键参数都会对封堵与去密封效果产生重要影响。此外，清洗剂的选择、带涂层涡轮叶片参数差异化开发、工序衔接等因素都会对产品的质量产生重大影响。如若封堵与去密封工艺使用不当，将可能产生多余物进入内腔、残蜡清洗不净、叶片表面杂质污染等问题。综上，封堵与去密封工艺是涡轮叶片加工不可或缺的保障性工艺，可为提升产品质量提供坚实支撑。

2.2 叶根及装配面加工

涡轮叶片材料使用的高温合金具有优异的热强性与热稳定性，这些优异的力学性能也决定了其难加工的材料特性。涡轮叶片叶根榫齿及装配面的切削加工过程中通常面临刀具磨损、成本高、效率低的难题，

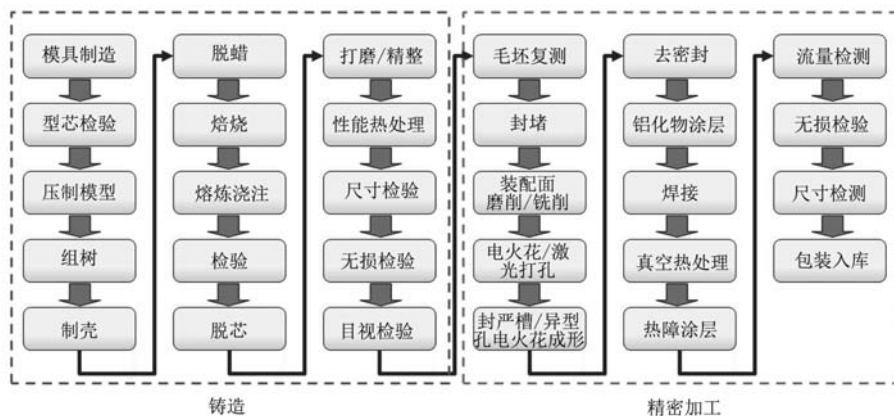


图2 典型涡轮叶片制造工艺路线

Fig. 2 Typical process route of the manufacturing of the gas turbine blade

因此，目前难加工涡轮叶片的榫齿及装配面大多采用磨削的方式。

图4所示为五轴缓进强磨设备与涡轮叶片榫齿磨削效果图。缓进强磨工艺技术的特点是大切深、接触面积大、加工过程易振动、热量散失慢，很容易导致加工面的表面质量不过关。基于以上因素，需要对缓进强磨工艺持续优化，目前大多数做法是从加工参数方面进行优化。研究表明，磨削进给速度 v_w 、砂轮线速度 v_s 、磨削深度 a_p 三个重要参数的组合可以对加工表面的质量产生重要影响。另有研究针对单晶高温合金的磨

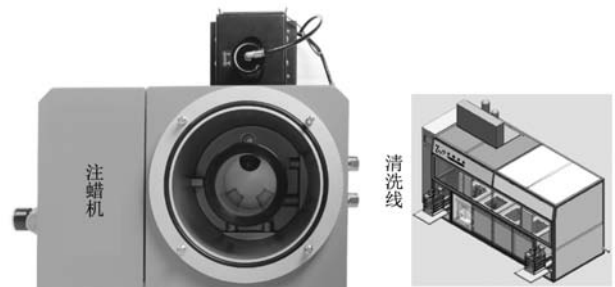


图3 真空注蜡机与自动除蜡清洗装备

Fig. 3 Vacuum wax injection machine and automatic wax removal cleaning equipment



图4 五轴缓进强磨设备与涡轮叶片磨削效果

Fig. 4 Five-axis power grinding machine and the grinding result on the turbine blade

削工艺进行研究, 结果表明, 沿单晶高温合金不同晶体取向的磨削效果存在着一定差异, (111)面的磨削效果较(100)、(110)面要好, 并且沿(111)面磨削产生的再结晶层也较小。

除优化加工工艺参数外, 适当增加工装辅助和外场辅助也可以影响加工效果。通过增强夹持工装的刚性, 改善优化接触面的阻尼特性, 可在一定程度上减小加工振动, 从而提升加工面的表面光洁度。通过外加气流、控制水流可以有效减小加工接触面的热量积累, 从而减少加工面再结晶与烧伤的风险, 提升表面质量。

2.3 气膜孔加工

现阶段燃气轮机涡轮叶片的主流冷却设计多为气膜孔冷却, 要实现气膜冷却需要在叶片的表面加工圆形孔和异型孔。这些小孔孔径约为0.2~0.8 mm, 空间角度复杂, 数量多, 精度要求高, 低重熔层, 无裂纹。这对孔加工工艺提出了较高的要求, 传统的机械加工方法无法满足。目前, 工艺方法主要有激光打孔、电液束打孔和电火花打孔等, 三种加工方法各有优缺点^[13], 如表1所示, 综合看来, 由于电火花打孔产生的重熔层较薄、加工精度高、成本低的优势, 其在燃气轮机涡轮叶片气膜孔加工方面的应用较为广泛。

图5为涡轮叶片电火花打孔工艺过程中使用的设备、加工过程以及典型加工问题, 目前国内电火花打孔设备可以将重复定位精度控制在0.015 mm以内, 位置度公差控制在0.01 mm以内。图5c所示电火花打孔工艺加工异型孔时容易出现加工豁口缺陷, 这是由于气膜孔一次加工不到位时通常需要补加工, 二次加工很难做到完全重合定位, 此时容易产生二次放电, 造成金属表面重熔层加厚; 此外, 气膜孔内腔斜孔锐角倒圆也难以做到。批量加工时, 由于每个零件的型面轮廓度存在差异, 因此很难通过一次装夹和编程保证每件产品加工都合格。针对以上问题, 需要持续以加工

需求为导向优化电加工机床设备的使用性能, 同时开发效率更高、再现性更好、更稳定的加工工艺。

2.4 铝化物涂层

高温防护涂层是保障燃气轮机性能和涡轮叶片寿命的关键核心技术。目前, 先进铝化物涂层既可作为燃气轮机涡轮叶片的高温抗氧化涂层, 同时也可作为热障涂层的粘结层。近年来, 为弥补单一铝化物涂层脆性大, 退化速度快和抗热腐蚀性能差的不足, 添加Co、Cr、Si、Pt等有益元素一方面增强氧化膜与基体

表1 气膜孔常见制备工艺优劣势对比
Table 1 Comparison of common preparation techniques for the gas film holes

制备工艺	优势	不足
激光打孔	(1) 应用范围广, 对材料几乎无要求; (2) 超短脉冲激光打孔, 重熔层薄, 热影响区极小; (3) 为非接触式, 无工具损耗, 对环境友好; (4) 高精度、高效率、高质量	(1) 存在背面损伤风险; (2) 设备成本高
电液束打孔	(1) 无应力冷态溶解加工; (2) 可获得无重熔层、无微裂纹、无热影响区的表面; (3) 表面粗糙度可达1.6~0.8 μm	(1) 加工速率极低; (2) 存在杂散腐蚀; (3) 孔的轮廓形状难控制; (4) 电极制造难; (5) 不能加工异形孔
电火花打孔	(1) 可加工任何导电材料, 不受硬度和强度限制; (2) 成本低; (3) 重熔层深度在0.02~0.04 mm以内	(1) 无法加工非导电的陶瓷层; (2) 加工速率低; (3) 电极损耗大

的结合力，另一方面降低维持铝选择性生长的临界铝含量，发展出了具有更好的综合性能的改性铝化物涂层。

铝及改性铝化物涂层的制备方法主要有固体粉末包埋法、热浸法、料浆法和化学气相沉积（CVD）方法^[14]。粉末包埋法渗铝的成本较低，适合小零件的涂层制备，是使用最广泛的，但是其难以制备形状复杂的工件、内壁及气孔处的铝涂层；零件表面会附着颗粒，粗糙度差；配置渗剂时粉尘多，工作环境差。料浆法操作简单，节省用料，不受工件形状限制，是制备Si改性铝化物涂层最常用的方法，缺点就是料浆的涂覆和去除比较麻烦。CVD方法是非接触式涂层制备方法，涂层厚度均匀，可控性高，适用于形状复杂的零件，尤其能够实现空心涡轮叶片内腔铝化物涂层的制备，极大地满足了先进复合铝化物涂层的开发与應用。

图6所示为某型涡轮叶片内腔的CVD渗铝涂层，该涂层与合金基体结合良好，涂层质量优异，可很好

地满足涡轮叶片的防护使用需求。遮蔽环节是该工艺的难点所在，不当的遮蔽工艺容易造成涂层漏渗的情况，这严重影响涡轮叶片的服役性能，因此，应当将遮蔽工艺作为CVD工艺的关键控制工艺进行管理。

目前，渗铝涂层向多元复合方向发展，CVD工艺方法为复合渗铝涂层的发展提供了便利。目前发展最为迅速也是应用最为广泛的多元复合涂层是以Pt-Al为基础的涂层。虽然Pt-Al涂层体现出了优异的抗氧化性与耐腐蚀性，但是多元复合涂层的作用机理目前尚没有形成定论，其设计方向依然不可控。

2.5 焊接

燃气轮机涡轮叶片包含许多复杂组件，比如导流片、盖板、蜂窝等，这些组件与叶片主体之间需要通过焊接工艺来连接。

导流片、盖板等钣金件通常采用高温合金板材，是典型的难变形材料，通过冲压方式成形，并结合金属镀层、打孔、焊接等工序，在产品实际制造过程

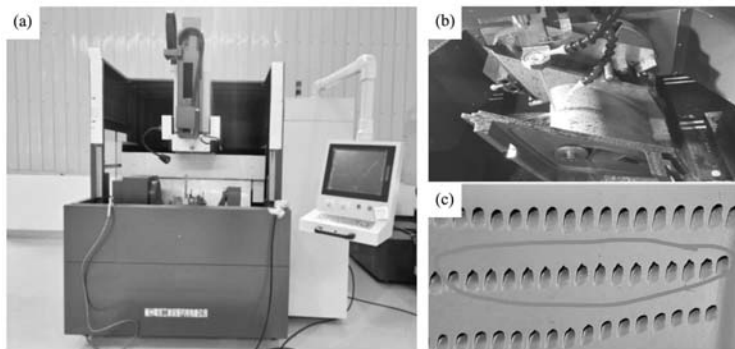


图5 涡轮叶片电火花打孔工艺

Fig. 5 Electric spark drilling process for the turbine blade

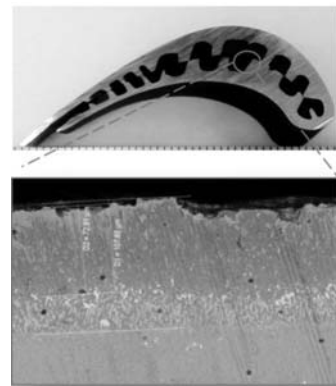


图6 某型涡轮叶片内腔的CVD渗铝涂层

Fig. 6 The inner CVD aluminized coating of a turbine blade

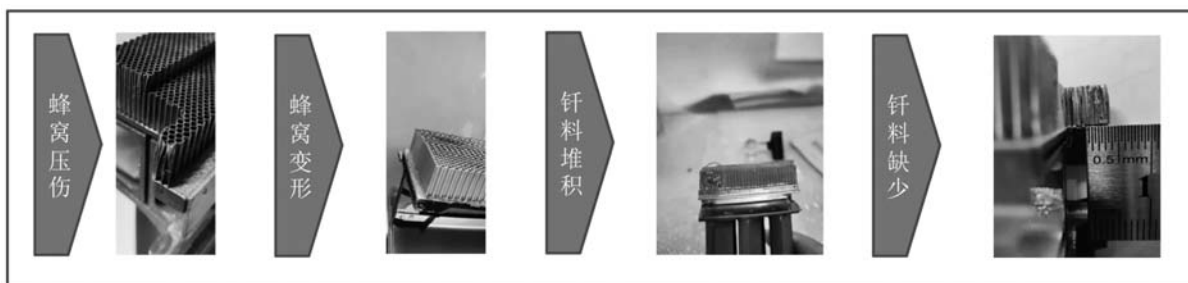


图7 蜂窝真空钎焊工艺常见的缺陷

Fig. 7 Common defects of the honeycomb vacuum brazing process

中，常出现钣金件回弹、叶片与钣金件的孔位置度差异和焊接变形等情况。同时，在进行钣金件与涡轮叶片焊接时常常因热输入不均匀导致焊接变形，解决问题的关键就是减少热输入以及合理优化焊接顺序。

蜂窝真空钎焊是涡轮叶片组件焊接工艺中的核心

工艺，其难点主要体现在：钎焊面积大，对钎料的预制均匀性要求高；组件装配要牢固，同时要保证钎焊工艺间隙；工装固定阶段不能损伤蜂窝。由于较大的工艺难度，蜂窝真空钎焊过程中容易出现各种缺陷，图7展示了蜂窝真空钎焊工艺常见的缺陷。通过优化工

装设计, 优化工艺参数可完美解决这些缺陷。

2.6 热障涂层

热障涂层技术是先进燃气轮机制造的关键工艺技术之一, 是目前保障涡轮叶片使用寿命切实可行的手段。

热障涂层由底层和面层构成, 底层通常分为两类, 一类是前述扩散铝化物涂层, 另一类是包覆金属涂层, 后者的制备方法有很多, 其中PVD和热喷涂的应用最多。面层通常是YSZ涂层, 这种涂层具有2700℃的熔点和较低的热传导系数, 同时具有与高温合金匹配良好的热膨胀系数, 可达到180℃左右的隔热效果, 热障涂层的制备方法主要包括高速火焰喷涂(HVOF)、高频脉冲爆炸喷涂(HFPD)、等离子体喷涂(PS)、电子束物理气相沉积(EB-PVD), 其中等离子体喷涂和电子束物理气相沉积应用最为广泛, 近年来, 在现有技术的基础上又开发了等离子激活电子束物理气相沉积、悬浮等离子喷涂、等离子喷涂-物理气相沉积(PS-PVD)等新型制备工艺, 其工艺优势对比详见表2^[15]。结合不同燃机的使用场景, 热障涂层的制备方法也有区别, 通常APS或VPS制备的热障涂层呈现片层结构, 片层与片层之间存在20%左右的孔隙, 常应用在地面燃气轮机涡轮叶片上。EB-PVD方法制备的热障涂层呈现柱状晶结构, 具有很高的应变容限, 其寿命长, 隔热效果更好, 但是其制备成本较高, 通常应用在服役条件苛刻的航空发动机中。中小型燃气轮机一部分就是航改燃型, 其热障涂层的制备常以APS制备底层, EB-PVD制备面层为主, 重型燃气轮机涡轮叶片所需的抗热冲击循环寿命有大幅提高, 需要更厚的热障涂层加以防护, 其热障涂层的制备以HVOF制备底层, APS制备面层为主。

图8所示为采用VPS制备的YSZ涂层结构, 该涂层结构良好, 与基体结合界面情况良好, 且厚度均匀, 能很好地满足热障涂层制备的质量要求。

表2 热障涂层常见制备工艺优劣势对比
Table 2 Comparison of common preparation processes for the TBC

制备工艺	优势	不足
等离子体喷涂	(1) 结构均匀; (2) 成膜性好; (3) 普适性好; (4) 沉积效率高; (5) 成本和能耗低; (6) 层状堆叠结构	(1) 涂层中容易产生裂纹, 致密度不高; (2) 涂层与基体的结合力不强, 容易失效
悬浮等离子喷涂	(1) 涂层颗粒分布均匀, 致密稳定; (2) 抗热震性能好	沉积速率慢, 不适宜制备较厚的热障涂层
电子束物理气相沉积	(1) 涂层热循环寿命高; (2) 涂层致密性高, 抗腐蚀氧化性好; (3) 化学结合为主, 结合力高; (4) 表面光洁度好; (5) 涂层结构多样	(1) 阴影效应: 当基体复杂时, 涂层不均匀, 致密度不高; (2) 工艺设备昂贵, 工件尺寸受限, 成本高; (3) 涂层成分复杂时, 成分不易控制
超音速火焰喷涂	(1) 涂层致密; (2) 结合力强; (3) 表面光洁度好; (4) 设备简单	(1) 沉积效率低; (2) 制作成本高

热障涂层制备过程中会面临一系列的问题, 比如需严格控制喷涂参数来保证涂层的均匀性; 带有气膜孔的叶片制备热障涂层后气膜孔会产生缩孔现象; 热障涂层很难采用无损检测的方法进行检测; 一次涂层不成功很难进行涂层的返工作。这些问题是涂层技术工作者经常面临的问题, 需要通过不断改进技术装备, 优化工艺路径与方法来解决这些问题, 从而保证

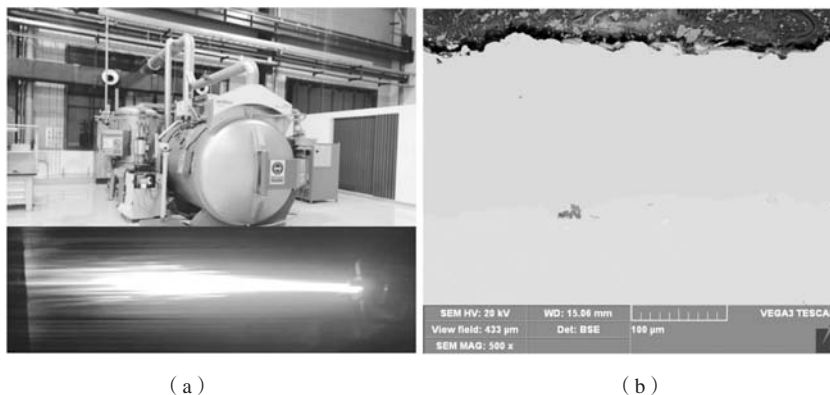


图8 采用VPS制备的YSZ涂层结构
Fig. 8 YSZ coating fabricated by the VPS

热障涂层的质量合格。

多年的发展,热障涂层在新材料、新结构和新制备方法上竞相发展,如纳米结构热障涂层,大大降低陶瓷涂层的脆性;梯度功能结构热障涂层具有成分连续、孔隙率连续及多层机构变化,其抗热震性能良好;液体注入等离子喷涂方法喷涂热障涂层等新的制备方法。

2.7 流量检测技术

带有气膜孔的涡轮叶片的流量检测是判断叶片加工是否合格的重要判定技术。一般流量检测技术有气流量检测和水流量检测,流量检测的关键工作在于工装的设计与制作,好的工装可以保证检测时的气密性,保证结果准确。

3 发展方向及思考

3.1 发展方向

随着燃气轮机进气温度的提升,涡轮叶片在材料、结构和制造工艺方面均发生着深刻的革新,产生了很多值得关注的的发展方向。

材料方面,目前第三、四代单晶高温合金的研究仍在持续进行中,但是受到其物理理论限制,其工作温度无法超过1 227 ℃,为了进一步提高进气温度,提升燃气轮机性能,新型的陶瓷基复合材料逐渐进入了叶片设计者的视线。陶瓷基复合材料既拥有陶瓷耐高温的特性,又具有较高的机械强度与抗热裂性能,目前应用较广的陶瓷基复合材料主要是各种纤维增韧的SiC复合材料。先进陶瓷基复合材料的使用温度可以达到1 650 ℃。由此可见,陶瓷基复合材料是一种非常理想的涡轮叶片材料。

结构方面,更有效地增强气膜冷却效果,向着冷却结构更复杂的方向发展,例如双层壁结构的发散冷却。

成形工艺方面,新型制造技术也进入了高速发展阶段,目前在陶瓷基复合材料涡轮叶片的制造技术方面已经发展出了3D打印金属增韧骨架、气相沉积陶瓷界面层、3D打印光固化树脂膜、化学腐蚀去树脂、烧

结多孔复合陶瓷、化学气相沉积SiC、水射流、激光加工、超声加工去余材的复杂工艺路线。其中多项技术都是世界加工领域的前沿技术。

气膜孔加工工艺方面,激光-电火花复合加工、电解-电火花复合气膜孔加工技术,充分发挥两种工艺优点,通过合理调整加工工序,会大大提高叶片气膜孔的加工质量及效率,缩短加工周期,保证加工质量。

涂层制备工艺方面,发展出了新的涂层材料体系、新的涂层结构、开发新的涂层制备技术、并逐步建立涂层性能测试与评价的标准。如纳米结构和梯度结构热障涂层,如采用液体注入等离子体法喷涂热障涂层,以及元素掺杂新型低热导率热障涂层。

3.2 思考

纵观燃机行业发展实情,以促进行业健康持久发展为己任,提出如下措施建议。

设计理念体系化。设计端尚不成熟,不确定性多,制造过程中常发生设计变更,需要设计和制造深度融合,逐步形成成熟的燃气轮机透平叶片精密铸造和加工质量控制和验收规范。

叶片材料与叶片成形技术融合化。在研发叶片材料时关注叶片成形技术,在研发叶片成形技术时关注叶片材料技术,通过材料与制造的融合和互动,促进叶片材料及其制造技术共同快速协同发展。

关键装备自主化。研发叶片制造所需的关键制造工艺装备,降低高端制造装备被国外“卡脖子”风险,提高自主保障能力。

过程管控规范化。与国外的热部件制造相比,仍需努力提高合格率和批量一致性,加强涡轮叶片制造过程中的流转防护与多余物控制,提高涡轮叶片制造的整体质量水平。

人才培养有序化。加强专用型人才培养,完善燃机人才培养体系,切实提高人才待遇,避免人才流失和断层。

资源整合最优化。整合、优化国内已有资源,避免盲目投资,促进热端部件产业链和创新链均衡、有序、健康发展。

参考文献:

- [1] 陈荣章. 航空铸造涡轮叶片合金和工艺发展的回顾与展望 [J]. 航空制造技术, 2002 (2): 19-23.
- [2] 康臻. 燃气涡轮叶片内冷结构设计及性能研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2020: 3-6.
- [3] 彭建强, 吕振家, 张宏涛, 等. 重型燃气轮机透平叶片用单晶合金发展趋势 [J]. 热力透平, 2019, 48 (4): 299-303.
- [4] 伍赛特. 重型燃气轮机研究现状与技术发展趋势展望 [J]. 机电产品开发与创新, 2019, 32 (2): 65-67.
- [5] 周建华. 中国航发燃气轮机发展现状 [J]. 燃气轮机技术, 2019 (2): 58-61.

- [6] 张健, 王莉, 王栋, 等. 镍基单晶高温合金的研发进展 [J]. 金属学报, 2019, 55 (9): 1077-1094.
- [7] 刘鸣, 姜卫国, 何洪涛, 等. 复杂结构空心高压涡轮导向叶片精密铸造工艺 [J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31 (4): 345-347.
- [8] 郭双全, 冯云彪, 何勇, 等. 未来航空发动机热障涂层材料及制备技术 [J]. 表面技术, 2012, 41 (5): 119-123.
- [9] 韩松. 先进发动机用热障涂层的制备及其性能 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [10] 徐自力, 艾松. 叶片结构强度与振动 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2018.
- [11] 蒋睿蒿, 汪文虎, 王增强, 等. 航空发动机涡轮叶片精密成形技术及其发展趋势 [J]. 叶片制造技术, 2016 (21): 57-62.
- [12] 张文武, 郭春海, 张天润, 等. 涡轮叶片先进气膜冷却与相关激光打孔技术进展 [J]. 航空制造技术, 2016 (22): 26-31.
- [13] 陈阳, 朱红钢, 王增坤, 等. 发动机动、静叶片激光电火花复合制孔加工工艺技术研究 [J]. 电加工与模具, (增刊1), 2016: 56-59.
- [14] 刘贺. 单晶高温合金用低扩散铂铝涂层的制备及性能研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [15] 崔慧然, 李宏然, 崔启政, 等. 航空发动机及燃气轮机叶片涂层概述 [J]. 热喷涂技术, 2019 (1): 82-90.

Research Status and Technology Development Trend of Gas Turbine Cast Turbine Blade

CUI Hui-ran, FENG Xiang-ru, REN Jian-wei
(Wuxi Turbine Blade Co., Ltd., Wuxi 214174, Jiangsu, China)

Abstract:

Aero engine and gas turbine are regard as the jewels in crown. The manufacture technique of the turbine blade is typical high-tech and high value-added. The recent progress in research and development of materials and structure of the turbine blade was briefly reviewed in the present paper. According to the products in process, this paper introduced the technology of those currently used, summarized manufacturing difficulties and looked forward to their development trend.

Key words:

turbine blade; new materials; structure design; manufacture process; development trend
