

先进航空发动机用高温钛合金 双性能整体叶盘的制造

蔡建明¹,李娟¹,田丰²,叶俊青²

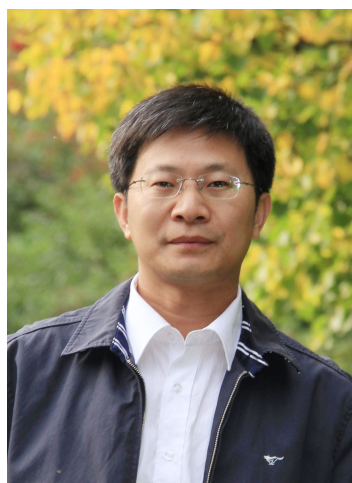
(1. 中国航发北京航空材料研究院,北京 100095;

2. 贵州安大航空锻造有限责任公司,安顺 561005)

[摘要] 钛合金整体叶盘是先进航空发动机压气机系统的典型轻质高效结构。整体叶盘零件工作时,叶片和盘承受不同的热力条件,采用“双性能”代替传统的“均质”设计,是提高压气机转子减重效果及满足愈加严苛且多变的温度和载荷工作条件使用的有效措施。对比分析了两种“梯度热处理”工艺,即分区控温梯度热处理工艺和局部包覆控时梯度热处理工艺制备钛合金双性能整体叶盘的可行性,评估了叶片、盘及过渡区的显微组织控制能力。试验结果表明:两种工艺均能在钛合金整体叶盘的叶片与盘之间的过渡区形成稳定可控的温度梯度,得到双重组织,即叶片为双态组织,盘为细小的片层组织,过渡区位置和尺寸可控,显微组织呈渐变特征。可根据整体叶盘锻件的外形特点和组织性能要求,选用适合的制备工艺及相应的工艺参数。

关键词: 钛合金双性能整体叶盘;分区控温梯度热处理;局部包覆控时梯度热处理

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.19.034



蔡建明

工学博士,高级工程师,主要从事航空发动机用高性能高温钛合金的科研工作。在国内外学术期刊上发表论文 30 余篇。

先进航空发动机高推重比、高增压比、高涡轮前温度及低油耗目标的实现,除了采用先进的结构设计和精准的强度计算外,还强烈依赖于轻质耐热钛合金材料及高效轻量整体叶盘结构的综合应用。传统钛合金受航空发动机压气机转子部件高温、高压、高速工作状态引起的蠕变、保载疲劳、氧化、钛火等因素的制约,长时工作温度不能超过 600℃^[1-2],典型的 600℃高温钛合金有英国 IMI834 及我国 Ti60 等。与国内其他常用航空钛合金如 TC11、TA19、TC17 相比, Ti60 钛合金在 500℃以上有显著的蠕变性能优势,适用于高压压气机后段的整体叶盘、机匣等部件。在 400~600℃温度区间,与 GH4169 镍基高温合金相比, Ti60 钛合金的比强度和比疲劳强度有优势,在获得相

同使用性能情况下,通过以钛代镍,可实现约 40% 的减重效果^[3],且钛合金转子相对降低了对压气机轴的载荷作用,从而可以提高发动机的推重比和使用可靠性。与传统榫齿连接结构相比,采用整体叶盘结构可以显著提高发动机的部件减重效果,提高压气机空气增压效率和气动稳定性,并可避免榫齿连接结构因叶片榫头与盘榫槽接触区域发生微动磨损引发疲劳失效的风险。

航空发动机压气机整体叶盘工作时,叶片和盘承受的温度条件和应力条件有着显著差异,相对而言,叶片工作温度高、应力小、振动频率大,主要承受离心拉应力和高频振动应力的综合作用,且有受到外物冲击的可能,因此应重点考虑叶片的拉伸强度、高周疲劳和抗外物冲击性能;盘承受高的

多轴低频循环应力作用,工作温度相对较低,且从盘心到盘缘沿径向有较大的温度梯度和应力梯度^[4],又考虑到叶片与机匣需保持小的间隙以及盘破裂会带来发动机非包容损伤的巨大危害,因此应更加强调盘的高温蠕变、低周疲劳和损伤容限性能^[5],可见,同一个整体叶盘零件的不同部位实际上对力学性能是有不同特定要求的。传统的压气机转子叶片/盘的榫齿连接结构,叶片和盘分别制造,可以灵活选用钛合金材料及组织状态,叶片宜采用 $\alpha + \beta$ 区变形和 $\alpha + \beta$ 区热处理以得到细小的双态组织,盘宜采用 β 区锻造或 β 区热处理以得到细小的网篮组织或片层组织,可以实现力学性能的最优化配置。但是,对于采用整体锻件并采用高速铣削或电化学加工等减材方法制造的整体叶盘,整体锻件一般得到的是“均质”组织,即锻件所有区域的组织是相同的。航空发动机性能的提高,要求转子承受愈加严苛多变的热力条件,为了进一步优化发动机的结构设计,需要保证钛合金整体叶盘各部位有适应使用条件的力学性能,一个很好的解决措施是实现整体叶盘“双性能”,即叶片与盘体获得不同且特定的显微组织。

航空发动机盘件(包括整体叶盘)的“双性能”设计构思由来已久,在镍基高温合金涡轮盘和钛合金压气机盘上进行过探索研究。为了获得同种合金的双性能盘或整体叶盘,开发了多种制造方法,如局部高频感应加热法^[6-7]、分区控温热处理法^[8-9]、双重组织热处理法(DMHT)^[10],其技术共性是在盘辐与盘缘(或盘体与叶片)之间的某个位置形成精确可控的温度梯度,工艺装置的设计制造与工艺参数的精确控制是技术核心,需要精确掌控工艺实施过程中部件不同位置的温度随时间的动态变化及显微组织演变的规律。对于镍基高温合金双性能涡轮盘,通过特殊的

工艺措施,控制盘缘和盘辐采用不同的固溶温度来实现,即将盘缘在 γ' 相溶解温度以上固溶处理得到粗晶组织,将盘辐在 γ' 相溶解温度以下固溶处理得到细晶组织^[11]。对于大尺寸叶片的风扇或低压压气机钛合金整体叶盘,一种高效率的方法是将单个叶片焊接到盘体上,基于疲劳性能、焊接接头完整性等因素,目前最可行的方法是线性摩擦焊技术^[12]。德国MTU公司开发和验证了双材料钛合金线性摩擦焊整体叶盘(DUTIFRISK: Dual Material Titanium Alloy Linear Friction Welded Blisk)技术^[13],盘体采用高强高韧的Ti-6246或Ti-17(网篮组织),叶片采用高温高强的Ti-6242S或Ti-6Al-4V(双态组织),使得叶片和盘的材料和组织状态更适应整体叶盘实际使用工况对力学性能的要求^[14];英国罗罗公司开发了异种钛合金整体叶盘的线性摩擦焊工艺,并评估了部件的低周疲劳性能,部件通过了20000次循环的低周疲劳试验^[15]。对于叶片尺寸较小的高压压气机钛合金整体叶盘,通过将盘在 β 转变温度以上变形或固溶处理,得到细小的片层组织或网篮组织,将叶片在 β 转变温度以下变形和固溶处理,得到双态组织。

本文以我国600℃高温钛合金Ti60整体叶盘锻件为例,开发了分区控温梯度热处理工艺和局部包覆控时梯度热处理工艺技术,评估了这两种工艺制备双性能整体叶盘的可行性,实现盘体、叶片双重组织以及过渡区位置及尺寸等的控制能力。

试验材料

试验用材料为中国航发北京航空材料研究院研制的Ti60钛合金,名义成分为Ti-5.8Al-4Sn-4Zr-0.7Nb-1.5Ta-0.4Si-0.06C,合金化的主要特点是加入Nb和Ta两个弱 β 稳定化元素,由于其在 α -Ti中具有

较大的固溶度,可增强 α 相的固溶强化作用,有助于提高高温蠕变抗力。通过严格控制合金低的Fe和O元素含量,最大程度地改善高温蠕变抗力。通过加入微量C,扩大合金 $\alpha + \beta$ 两相区上部的工艺窗口,使合金具有更好的锻造及热处理工艺适应性。Ti60钛合金的 T_{β} 转变温度约为1050℃。

将Ti60钛合金 $\Phi 300$ mm棒材在 $\alpha + \beta$ 两相区进行改锻和近等温模锻,经粗加工得到图1所示的整体叶盘锻件,外径 $\Phi 650$ mm,最大截面厚度60mm。

试验结果与分析

1 梯度热处理工艺设计

为了实现钛合金整体叶盘锻件的“双性能”,设计了特殊的热处理工艺,即在预固溶处理与时效处理之间,增加一次梯度热处理工艺。预固溶处理温度根据所要求的初生 α 相含量而定,一般控制在 T_{β} 转变温度以下15~50℃,时效处理温度一般控制在700~750℃。通过梯度热处理独特的工装设计以及工艺参数的精确控制,在整体叶盘锻件的叶片与盘之间的区域(即过渡区)形成足够的温度梯度,如图2所示,控制盘区的温度进入 β 相区,经过 β 热处理和随后的冷却,得到所需的片层组织;控制叶片区的温度低于预固溶处理温

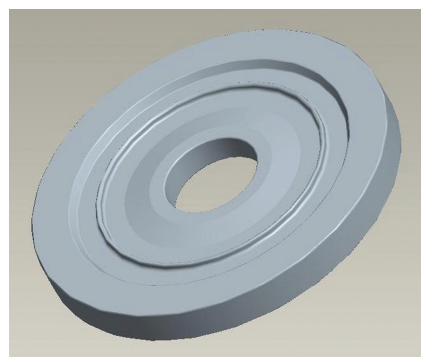


图1 Ti60钛合金整体叶盘锻件示意图
Fig.1 Diagram of Ti60 titanium alloy blisk forging

度,即控制在 $\alpha+\beta$ 相区的较低温度,以保持预固溶处理状态的双态组织。

为了实现图 2 所示的整体叶盘锻件叶片与盘过渡区达到设计要求的温度梯度条件,设计了两种梯度热处理工艺方法,即分区控温梯度热处理工艺和局部包覆控时热处理工艺。与整体叶盘锻件外部轮廓相匹配,设计和制造相应的工装,通过试验分析两种工艺的优缺点,评估获得双性能整体叶盘的可行性和控制能力。

2 分区控温梯度热处理工艺

2.1 工装设计与实施

根据图 1 所示的 Ti60 钛合金整体叶盘锻件轮廓结构,设计了一套具有专利技术的分区控温梯度热处理装置,如图 3 所示,三维结构装配示意图如图 4 所示。

分区控温梯度热处理工艺具体操作步骤为:先将工件的叶片区罩上空心的风冷套装置,盘体暴露于外,风冷套外层包覆隔热材料,风冷

套内设置与外部连通的压缩空气管路,将风冷套装置连同工件一起组装完毕后整体移入加热炉进行 β 相区固溶处理。工装和工件的不同位置设计安装负载热电偶,记录和监控热处理过程的实时温度,并与热处理炉温度控制箱连接,使用可激活的压缩空气冷却系统管理和控制风冷套内的温度,一旦温度达到设定值(对于 Ti60 钛合金,设定为 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$),自动开启压缩空气阀对风冷套内进行强制冷却,风冷套内的温度始终保持在 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。梯度热处理时,盘体的温度控制在 β 相区(即 $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上),因此,在 Ti60 钛合金整体叶盘锻件过渡区形成大于 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度梯度。该工艺方法需要一套特殊的压缩空气管路并要进入炉体内部,整套装置上装有多条负载热电偶,还要求整个热处理的入炉和出炉操作过程迅速,因此,工装的装配密封、入炉出炉转移等具体操作有较大难度。此外,还需要对常规的热处理炉进行

改造以适应各种管路的连通。受具体操作限制,梯度热处理后只能采取空冷的冷却方式。

在进行实际梯度热处理工艺试验前,先进行数值模拟计算,对整个热处理过程的热传导、工件温度动态分布等进行模拟计算。将工艺模拟与实践操作相结合,不断优化工装设计、工艺参数及热电偶放置位置、测温仪表、压缩空气管路排列等细节,改进数据记录和热电偶监控能力,在规定的时间和空间内,保证梯度热处理过程操作的稳定可靠。

2.2 低倍组织和显微组织分析

采用分区控温梯度热处理工艺制备的 Ti60 钛合金整体叶盘锻件径向低倍组织如图 5 所示,叶片和盘的显微组织如图 6 所示,过渡区的显微组织如图 7 所示。叶片区的低倍组织为完全的模糊晶,显微组织为双态组织,初生 α 含量约 40%,保持了 $\alpha+\beta$ 两相区预固溶处理得到的组织状态,说明在梯度热处理过程,风冷套内的温度始终低于设定值。盘体低倍组织为细小的清晰晶, β 晶粒尺寸在 $0.5\sim 1\text{mm}$,高倍组织为片层组织,说明梯度热处理时盘体温度进入了 β 相区,随后冷却时形成片层组织。过渡区呈略微弓出的“C”形,与 DMHT 工艺的镍基高温合金双性能涡轮盘的特征相同^[16],过渡区的显微组织从盘体的片层组织到叶片

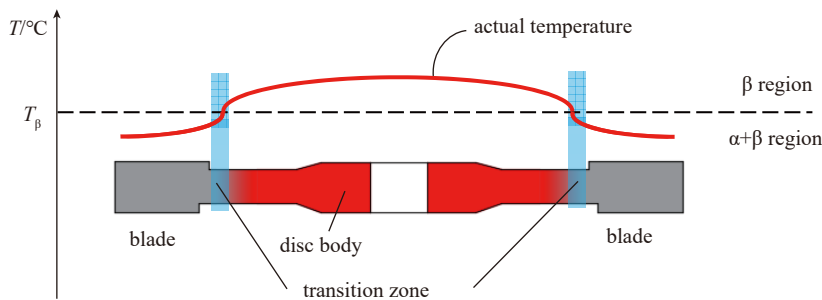


图2 整体叶盘锻件径向温度梯度示意图

Fig.2 Diagram of radial temperature gradient of blisk forging

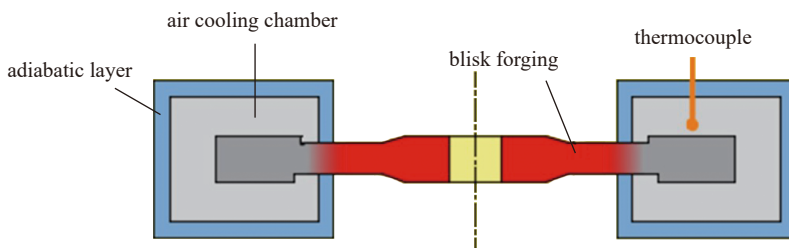


图3 分区控温梯度热处理装置示意图

Fig.3 Diagram of device for separated-region temperature-controlled GHTP

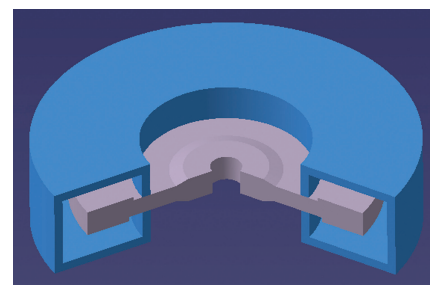


图4 分区控温梯度热处理装置三维截面结构示意图

Fig.4 3D cross-section diagram of separated-region temperature-controlled GHTP device

的双态组织呈现渐进变化,初生 α 含量递增,过渡平缓。多轮试验结果表明,分区控温梯度热处理工艺能够实现钛合金整体叶盘锻件从叶片到盘的过渡区稳定可控且形成了足够的温度梯度,叶片和盘可以容易获得设计所需的显微组织。

3 局部包覆控时梯度热处理工艺

3.1 工装设计与实施

分区控温梯度热处理工艺装置较为复杂,热处理后只能空冷,导致盘区的细晶强化效果受到限制。如果盘区经 β 热处理后能够立即水冷,通过细化 β 晶粒和 α 集束以及减小 α 片层厚度,可以提高盘区的拉伸强度,从而提高盘体抵抗超转破裂的能力。为此,提出了一种局部包覆控时梯度热处理工艺,即采用耐热钢制上、下两个圆形隔热块,设置一个空心内腔,上、下隔热块配合面设计成梯形结构,与整体叶盘锻件形成一个紧密配合的整体工装,可以进行快速装配和拆卸。将钛合金整体叶

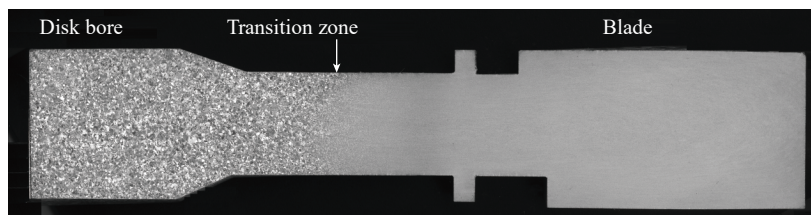


图5 分区控温梯度热处理工艺制备的Ti60钛合金双性能整体叶盘锻件径向低倍组织
Fig.5 Radial macrostructure of Ti60 titanium alloy dual-property blisk forging manufactured by separated-region temperature-controlled GHTP

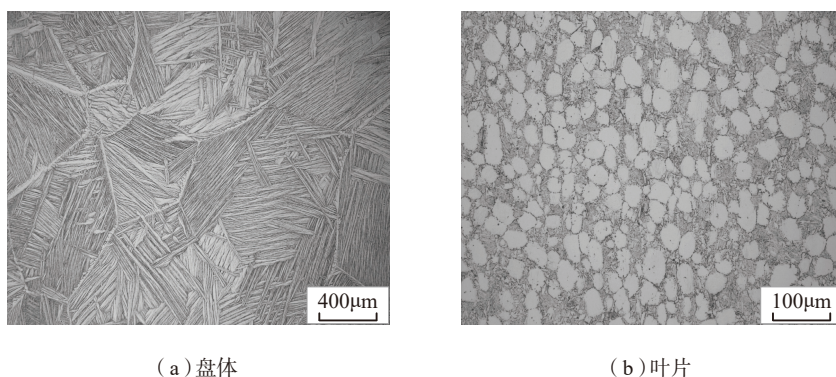


图6 分区控温梯度热处理工艺制备的Ti60钛合金双性能整体叶盘锻件盘体和叶片的显微组织
Fig.6 Microstructures of disk and blade of Ti60 titanium alloy dual-property blisk forging manufactured by separated-region temperature-controlled GHTP

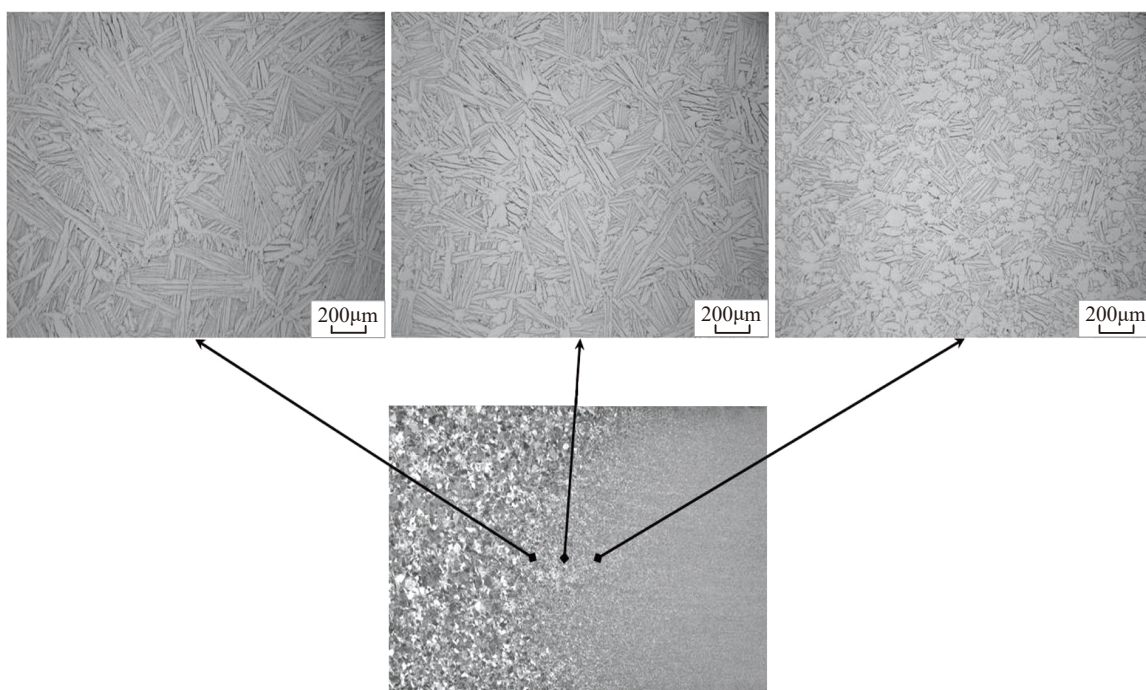


图7 分区控温梯度热处理工艺制备的Ti60钛合金双性能整体叶盘锻件过渡区的显微组织
Fig.7 Microstructures of transition zone of Ti60 titanium alloy dual-property blisk forging manufactured by separated-region temperature-controlled GHTP

盘锻件放入上、下隔热块并闭合后,锻件盘区暴露于外,锻件叶片区与上、下隔热块之间采用低热导率的材料隔开,起到隔热和后续快速拆卸的作用。

整体工装进行固溶处理时,炉温设定在 β 相区,因盘区截面厚度相对更小,到达 β 相区所需的时间短,而锻件叶片区因被隔热块包覆,相应的,叶片到达 β 相区所需的时间会更长,叶片区温度随着时间的延长而不断升高,如图 8 所示,当到达所示标识的保温时间时,盘区在 β 相区保持了一定时间,而叶片区仍处于 $\alpha + \beta$ 相区的较低温度,其结果是,在整体叶盘叶片与盘之间的过渡区沿径向形成较大的温度梯度;根据工艺设计要求,热处理之后整套工装可以水冷或者空冷。

采用数值模拟综合分析了隔热块表面覆加保温材料以及隔热块与工件之间增加隔热材料隔离等方案,热处理过程中工件与隔热块、炉内气氛的热交换和热传导的作用,工件的温度场动态变化等,获得热传导的规律,并与试验结果进行迭代,不断优化工装设计与梯度热处理工艺参数。

3.2 低倍组织和显微组织分析

采用局部包覆控时梯度热处理工艺制备的 Ti60 钛合金整体叶盘锻件径向低倍组织如图 9 所示,盘和叶片的显微组织如图 10 所示,过渡区的显微组织如图 11 所示。盘区低倍为细小的清晰晶组织,与图 5 相比,其 β 晶粒尺寸更小,显微组织为细小的片层组织, α 集束尺寸和晶内 α 片层更加细小。说明缩短在 β 相区的保温时间可以有效抑制 β 晶粒的长大,随后采用水淬,得到细小的 β 转变组织。叶片区因厚截面钢制隔热块而减缓热传导的作用,在图 8 所示的加热时间内,叶片区依然保持在 $\alpha + \beta$ 相区的较低温度,因此,高低倍组织保持预固溶处理的组织状态,即低倍组织为完全的模糊晶,

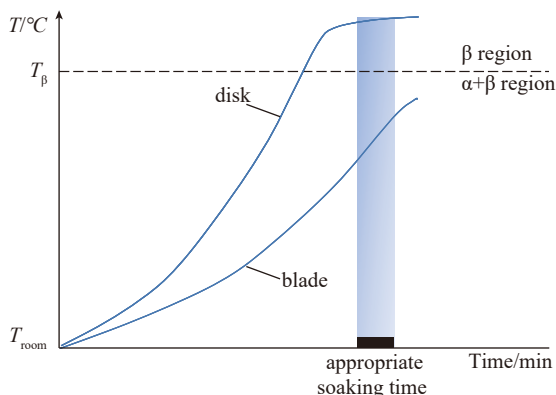


图8 局部包覆控时热处理过程整体叶盘锻件叶片和盘温度随时间变化示意图
Fig.8 Diagram of temperature change with time of blisk forging's blade and disk during partial-packed time-controlled GHTP

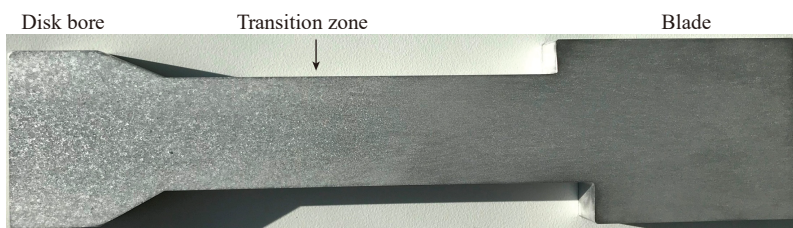


图9 局部包覆控时梯度热处理工艺制备的Ti60钛合金双性能整体叶盘锻件径向低倍组织
Fig.9 Radial macrostructure of Ti60 titanium alloy dual-property blisk forging manufactured by partial-packed time-controlled GHTP

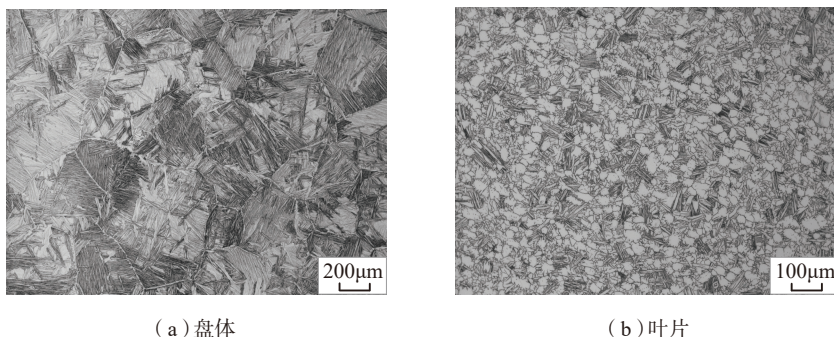


图10 局部包覆控时梯度热处理工艺制备的Ti60钛合金双性能整体叶盘锻件盘体和叶片的显微组织

Fig.10 Microstructures of disk and blade of Ti60 titanium alloy dual-property blisk forging manufactured by partial-packed time-controlled GHTP

显微组织为初生 α 含量约 40% 的双态组织。过渡区的组织变化平缓且无明显界面,从盘区的片层组织到叶片区的双态组织呈渐进变化。

4 钛合金双性能整体叶盘制备工艺适应性分析

上述试验结果表明,采用分区控

温梯度热处理工艺和局部包覆控时梯度热处理工艺,均能很好地实现钛合金整体叶盘双重组织的预期,即通过梯度热处理,控制叶片区保持在 $\alpha + \beta$ 相区较低温度,通过 $\alpha + \beta$ 相区预固溶处理控制初生 α 相含量,得到所需的双态组织;盘区在 β 相

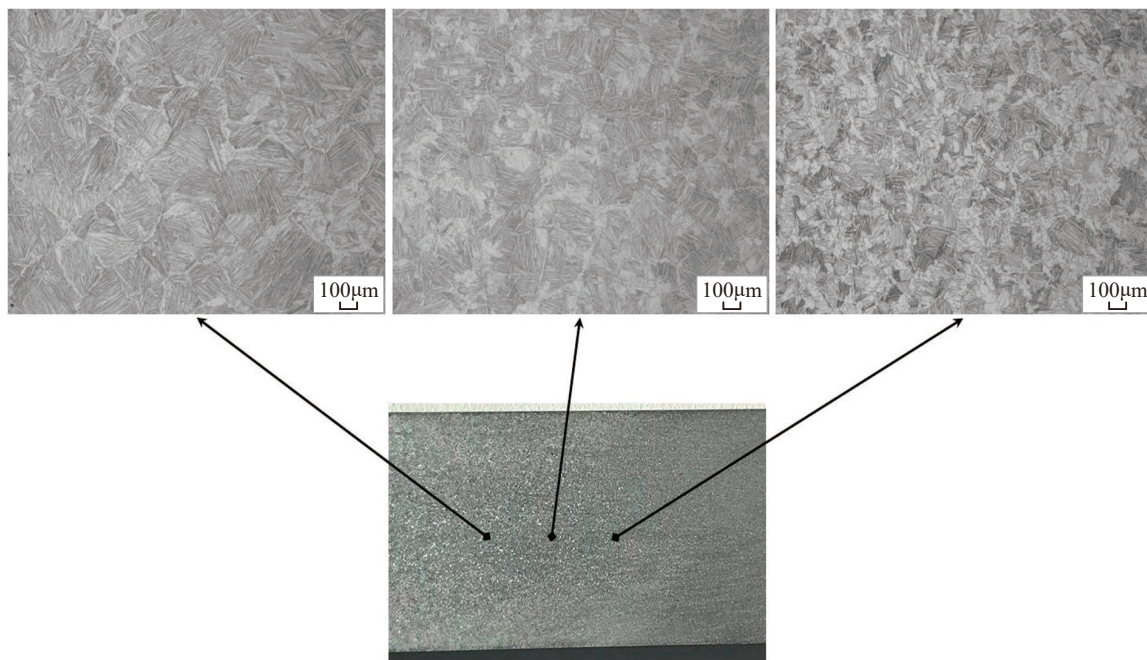


图11 局部包覆控时梯度热处理工艺制备的Ti60钛合金双性能整体叶盘锻件过渡区的显微组织
Fig.11 Microstructures of transition zone of Ti60 titanium alloy dual-property blisk forging manufactured by partial-packed time-controlled GHTP

区进行固溶处理,控制在 β 相区的温度、保温时间及随后的冷却速度,获得细小的片层组织,从而实现整体叶盘“双性能”的目的。

上述两种制备工艺各有优缺点,分区控温梯度热处理工艺的优点是能够实现整体叶盘工件沿径向稳定且较大的温度梯度,过渡区范围窄,缺点是因整套工装安装有与外部相通的压缩空气管路及监控用的负载热电偶,需要对热处理炉进行改造。此外,热处理入炉和出炉操作较为繁琐,且热处理后只能空冷,由于片层组织不够细化,导致盘体拉伸强度偏低。局部包覆控时梯度热处理工艺原理简单,制备的钛合金整体叶盘过渡区范围较宽,盘区因在 β 相区保温时间短, β 晶粒细小, α 集束和晶内 α 片层也细小,有助于提高拉伸强度和低周疲劳强度,因整套工装重量大,加之出炉之后要迅速水冷,因此对出炉操作要求极高,转移时间要尽可能短。

对于轴对称设计的钛合金双性

能整体叶盘,过渡区的位置、尺寸和组织控制是关键。通过工装设计和实际装配时设置的定位机构,可以保证过渡区具有合理的位置和尺寸,并能很好地保证同心和等圆。过渡区的位置与工装设计、材料热导率有关,可根据设计要求进行灵活调整。过渡区的宽度较大,且显微组织变化平缓,过渡区的力学性能不会发生突变,应该不是部件的薄弱区域。

结论与展望

制造钛合金双性能整体叶盘锻件的工艺有多种,具有相同的目标,即通过特殊的工艺设计和具体操作,在整体叶盘的叶片与盘之间形成稳定可控的温度梯度,得到所需要的双重组织,要求操作过程简便快速,并要求有良好的一致性。

将数值模拟和工艺试验相结合,持续改进分区控温梯度热处理工艺和局部包覆控时梯度热处理工艺的装置,优化工艺参数及操作过程,稳

定可靠地制备钛合金双性能整体叶盘。根据对力学性能的不同设计要求,可以选择适合的工艺方法。

双性能整体叶盘的设计思路,不仅可用于先进航空发动机高压压气机高温钛合金整体叶盘,也可以应用于风扇级或低压压气机整体叶盘,如TC17钛合金整体叶盘,目前采用 β 锻工艺制造的锻件,因其尺寸大、截面厚、重量大,组织细化程度不够,而且网篮组织的叶片疲劳性能较低,往往不能满足设计要求,如果能设计成双性能的TC17钛合金整体叶盘,叶片采用双态组织,盘体采用网篮组织,可以更好地实现钛合金整体叶盘性能的最优化设计。

钛合金整体叶盘从单一组织的“均质”向双重组织的“双性能”的发展,需要充分融合发动机设计、材料技术、热加工工艺技术等,为发动机的设计优化和挖掘材料性能潜力提供了新的途径。未来将向双合金整体叶盘、双合金整体叶环、成分梯度整体叶盘或整体叶环方向发展。

参考文献

- [1] RUGG D. Environmental behavior of titanium alloys — threats, mechanisms and knowledge gap[C]//Ti-2015, Proceedings of the 13th World Conference on Titanium. 2015.
- [2] WILLIAMS J C. Alternate materials choices — some challenges to the increased use of Ti alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 263: 107–111.
- [3] WINSTONE M R, PARTRIDG E A, BROOKS J W. The contribution of advanced high-temperature materials to future aero-engine[C]//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2001: 63–73.
- [4] ISWAR V R, KUHN H A. Experimental and theoretical modeling of Ti-6Al-2Mo-4Zr-2Sn (Ti-6242) alloy compressor disk forging[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Titanium. Munich, 1984.
- [5] JENKINS N, RUGG D. Improved process/property/design integration of titanium based aeroengine components[J]. Powder Metallurgy, 2013, 28(1): 275–281.
- [6] BALASUNDAR I, RAGHU T. Experimental and numerical investigation on the tensile properties of a titanium alloy disc with dual microstructure[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 706: 104–114.
- [7] NISHIKIORI S, HATTORI H, NODA T, et al. Application of heat-resistant titanium-based compressor disk with dual structure[J]. Materials Science and Engineering A, 1996, 213: 124–127.
- [8] MATHEY G F. Method of making superalloy turbine disks having graded coarse and fine grains: US Patent 5312497 [P]. 1994–05–17.
- [9] NING Y Q, YAO Z K, GUO H Z, et al. Structural-gradient-materials produced by gradient temperature heat treatment for dual-property turbine disc[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 557: 27–33.
- [10] GAYDA J, GABB T P, KANTZOS P T. Heat treatment devices and method of operation thereof to produce dual microstructure superalloy discs: US Patent, 6660110B1[P]. 2003–12–09.
- [11] GAYDA J, GABB T P, KANTZOS P T. The effect of dual microstructure heat treatment on an advanced nickel-base disk alloy[C]//Superalloys. Champion, 2004: 323–329.
- [12] MATEO A, CORZO M, ANGLADA M, et al. Welding repair by linear friction in titanium alloys[J]. Materials Science and Technology, 2009, 25(7): 905–913.
- [13] HELM D, RODER O. Recent titanium research and development in Germany[C]//Ti-2007, Proceedings of the 11th World Conference on Titanium. Kyoto, 2007.
- [14] MATEO A. On the feasibility of blisk produced by linear friction welding[J]. Revista de Metallurgia, 2014, 50(3): 1–11.
- [15] WILHELM H, FURLAN R, MOLONEY K C. Linear friction bonding of titanium alloys for aero-engine applications[C]//Ti-1995, Proceedings of the 8th World Conference on Titanium. Birmingham, 1995.
- [16] GREEN K A, HELMINK R C. Development and characterization of over speed and cyclic behavior of dual grain structure turbine disks[J]. Materials Science Forum, 2007, 546–549: 1261–1270.

通讯作者: 蔡建明, E-mail: caijianming1975@126.com.

Manufacturing of High Temperature Titanium Alloy Dual-Property Blisk Used for Advanced Aero-Engine

CAI Jianming¹, LI Juan¹, TIAN Feng², YE Junqing²

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. Guizhou Anda Aviation Forging Co., Ltd., Anshun 561005, China)

[ABSTRACT] Titanium alloy blisk is a typical lightweight and efficient part of advanced aero-engine compressor. While working, the blade and disk of blisk are subjected to quiet different thermal and loading condition, it is an effective mean to improve the weight reduction effect of compressor rotor and to meet more stringent and variable thermodynamic condition through dual-property design instead of the traditional uniform-property design. The feasibility of two gradient heat treatment processes (GHTP), that is, separated-region temperature-controlled GHTP and partial-packed time-controlled GHTP, for manufacturing titanium alloy dual-property blisk is compared, and the microstructural controllability of blade, disk and transition zone is evaluated. The results show that the two processes can form stable and controllable temperature gradient in the transition zone of blisk, and dual microstructure is formed, that is, blade with duplex structure, disk with fine lamellar structure, the area and size of the transition zone is controllable, and the microstructure is gradually changed as well. According to the general contour characteristic, microstructure and performance requirements of the blisk forging, the suitable manufacturing process and corresponding process parameters are applied.

Keywords: Titanium alloy dual-property blisk; Separated-region temperature-controlled gradient heat treatment process; Partial-packed time-controlled gradient heat treatment process

(责编 大漠)