

基于中子衍射技术的航空发动机部件 残余应力测试分析

师俊东,耿长建,邢丕臣,王宇,王刚
(中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

摘要: 为了研究航空发动机典型部件内部残余应力分布,介绍了材料残余应力常用的测试分析方法和中子衍射测试分析方法,并对各方法的分辨率和穿透深度进行了对比,详细阐述了中子衍射技术在航空发动机机匣、叶片、涡轮盘等部件的残余应力测试分析及材料微观变形机理研究方面的应用。与其他残余应力测试方法相比,中子衍射测试分析方法具有穿透能力强、分辨率高等优点,能够准确、无损地测试和分析材料的内部残余应力,可用于测量材料或工程部件的 3 维残余应力,为评估航空发动机部件的安全性和可靠性提供依据。

关键词: 中子衍射;残余应力;无损检测;机匣;叶片;涡轮盘;航空发动机

中图分类号: V214.3+2 **文献标识码:** A **doi:** 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.03.011

Test and Analysis on Residual Stress of Aeroengine Components Based on Neutron Diffraction

SHI Jun-dong, GENG Chang-jian, XING Pi-chen, WANG Yu, WANG Gang
(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to study the distribution of internal residual stress of aeroengine typical components, the common test and analysis methods of material residual stress and neutron diffraction were introduced. The resolution and penetration depth of each method were compared. The application of neutron diffraction technique in residual stress test and analysis of aeroengine casing, blade, turbine disk and the study of micro deformation mechanism of materials were described in detail. Compared with other residual stress test methods, neutron diffraction test and analysis method have the advantages of strong penetration ability and high resolution. Neutron diffraction test and analysis method can accurately and nondestructive test and analyse the internal residual stress of materials, can be used to measure the three-dimensional residual stress of materials or engineering components, and can provide the basis for evaluating the safety and reliability of aeroengine components.

Key words: neutron diffraction; residual stress; nondestructive testing; casing; blades; turbine disk; aeroengine

0 引言

残余应力是指在没有外加载荷和力矩的作用下,材料自身为保持平衡而存在的弹性应力。材料中的残余应力可分为 3 类:第 1 类残余应力分布于材料较大区域内(多个晶粒范围),通常称为宏观残余应力;第 2 类残余应力分布于材料较小区域内(1 个晶粒或少数几个晶粒内的区域);第 3 类残余应力在材料极小

区域(几个原子间距)内保持平衡,在晶体亚结构范围内大小不均匀。材料的残余应力主要来源于材料本身温度分布不均匀形成的热应力、弹塑性变形不均匀导致的机械应力以及相变不均匀导致的相变应力。

目前工程上使用的残余应力测量和评估方法都具有一定的局限性:X 衍射法只能获得表面应力信息^[1];小孔法和散斑法均为有损测试;磁测法和超声波测

收稿日期:2019-09-15 基金项目:航空动力基础科研项目资助

作者简介:师俊东(1976),男,博士,高级工程师,从事航空发动机材料工艺体系设计工作;E-mail:shenyangsjd@163.com。

引用格式:师俊东,耿长建,邢丕臣,等.基于中子衍射技术的航空发动机部件残余应力测试分析[J].航空发动机,2020,46(3):59-65. SHI Jun-dong, GENG Chang-jian, XING Pi-chen, et al. Test and analysis on residual stress of aeroengine components based on neutron diffraction[J]. Aeroengine, 2020, 46(3): 59-65.

量的是应力平均值等。中子衍射技术是 1 种无损检查技术,能测试分析部件内部残余应力分布,具有以下优点:(1) 穿透力强,有利于测量材料内部的应力状态,能够提供从表层以下 100 μm 到深度为几厘米的应力应变信息;(2) 有毫米级的空间分辨率,可以实现部件内的应力梯度测量;(3) 深穿透能力允许自由地选择材料内部应变的测量方向;(4) 能测定材料内部特殊相应力及晶粒间应力;(5) 可加载不同环境(如热、力或热力耦合)模拟服役条件,获得服役条件下多尺度应力分布;(6) 可以获得材料的组织结构信息,如织构等。因此,中子衍射是工程部件内部应力测量和评估的强有力工具^[2-3]。

此外,中子还可用于材料的 3 维成像,具有快速、分辨率高的特点,也可加载耦合不同环境,原位研究材料 3 维结构、缺陷等问题^[4-6]; 中子小角散射技术(Small Angle Neutron Scattering, SANS) 可以测量材料纳米至微米尺度大微结构,包括空位、位错、析出相等^[7-9],结合原位环境加载,可研究材料内部微结构的演变过程和规律等^[10-11]。因此中子技术是研究工程材料的独特工具,可为工程材料开发与服役可靠性研究提供技术支持。

本文介绍了残余应力产生的原因及其测量方法,并着重介绍了中子衍射技术在航空发动机盖板 T 型高能束焊接接头、涡轮盘、涡轮后机匣、整流叶片、环锻件内部残余应力测试分析中的应用。

1 残余应力的产生与测量

残余应力可以在几乎所有的制造过程中产生,也可以在部件的服役过程中发展。当材料受到外部环境(如载荷、温度梯度等)作用时,在部分区域产生不协调的局域形变,周围的材料必须进行弹性变形才能够保持空间尺寸的连续性,残余应力由此产生。在工程材料中产生残余应力的一些典型过程包括:

(1) 不均匀塑性变形。在制造过程中改变材料形状的工艺过程包括锻造、轧制、弯曲、拉伸和挤压等,以及表面处理过程如加工、磨削、电镀、喷丸、渗碳等,极易产生宏观残余应力。在喷丸处理过程中,通过硬质小球对材料的表层进行垂直挤压,表面的塑性变形层需要沿水平方向扩展,但由于下层材料的约束产生了表面压应力,并由内部的拉应力平衡。

(2) 材料的相变和(或)密度的变化。当存在较大

的温度梯度时,例如在焊接、铸造、淬火、合金的沉淀硬化和塑料的聚合过程中,由于发生相变或者相间晶格常数和热膨胀/收缩系数的差异,也会导致较大的残余应力产生。在焊接过程中,金属焊料在熔融时是无应力的,金属焊料和热影响区的冷却温度范围比其他部分更大,因此,为了保持空间尺寸连续性,在焊缝处会产生较大的纵向残余拉应力,同时周围材料中会产生压应力与之平衡。

与最常用的 X 射线、透射电镜等其他衍射技术相比,由于中子具有高的贯穿能力,成为探测金属材料与工程部件内部晶体结构与多尺度微观组织/应力的有效手段。透射/扫描电镜具有非常高的空间分辨率,可以直接给出原子尺度的微观形貌及晶体结构信息,但由于电子束通过原子核外电子相互作用获得衍射信息,穿透深度一般不超过几十纳米;X 射线也是与原子核外电子相互作用,穿透深度随能量变化而变化一般从几微米到几十微米,对于 1 种同步辐射高能 X 射线(也叫硬 X 射线,能量在 50 keV 以上,相当于波长小于 0.0248 nm),可以穿透厚度为几毫米的大多数金属;由于中子直接与原子核交互作用,可以穿透很深的金属材料(对于铁基合金一般可以穿透几厘米,而对于铝合金可以穿透几十厘米)。与 X 射线衍射相同,中子衍射不仅可以获得工程合金材料中晶体结构信息,而且可以通过布拉格衍射获得衍射面间距的弹性相对变化(点阵应变),最后通过胡克定律确定宏观与微观应力。中子的空间分辨率一般在毫米量级,较好的中子应力测量装置可以实现 1 维分辨小于 0.1 mm。中子衍射技术由于具有高的穿透性,可以在 3 个主应力方向实现工程部件 3 维弹性应变/应力扫描,一般扫描范围很大(米级),此特点是中子衍射应用于工程部件研究的巨大优势,也是其他技术无法比拟的。中子穿透深度、分辨率及费用成本与其他方法的比较如图 1 所示。

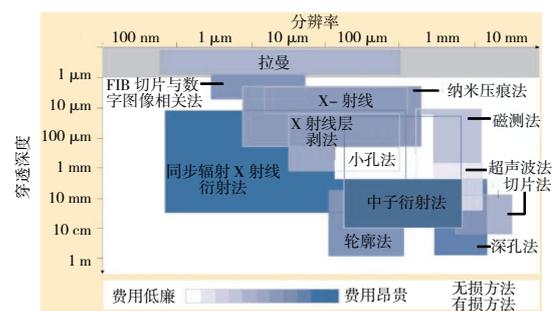


图 1 几种残余应力测试方法对比

另外,由于中子的高穿透性,易于施加各种应力、温度、磁场及气氛等多种环境,可以模拟甚至实现热处理、冷热加工、再结晶/相变、凝固焊接、电磁场处理等真实外场作用下组织演化与微观力学行为的研究。可以说,中子衍射技术的出现,为包括多尺度应力配分、晶粒旋转及裂纹形核与扩展损伤在内的工程材料微观力学行为研究,提供了新的不可或缺的重要手段。

2 中子衍射测残余应力的原理

中子衍射测量应力的基本原理是通过测量晶面间距 d 的变化以计算弹性应变 ε ,从而计算出应力场。当波长为 λ 的单能中子束通过多晶材料样品时,对应晶面间距 d 在满足布拉格关系($\lambda=2d\sin\theta$)的位置出现衍射峰,通过测量晶面间距的改变 $d-d_0$ 计算出弹性应变 ε ,中子衍射的原理如图 2 所示,然后根据应变计算应力 σ 。

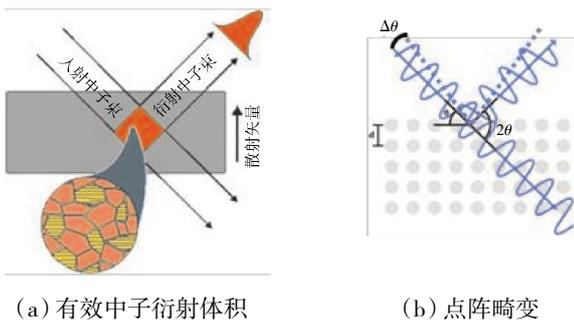


图 2 中子衍射原理

应变 ε 的计算公式为

$$\varepsilon = \frac{d-d_0}{d_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon = -\cot \theta_0 \Delta\theta \quad (2)$$

应力 σ 的计算公式为

$$\sigma_x = \frac{E_x}{(1-2\nu)(1+\nu)} [(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] \quad (3)$$

式中: σ_x 为 x 方向的应力; E_x 为弹性模量; ε_x 、 ε_y 、 ε_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的应变; ν 为常数。

中子衍射测量的待测体积是 1 个由衍射狭缝和入射狭缝相交的空间区域决定的。直接测量的平均体应力易与有限元计算结果进行比较。通过平移和转动待测部件,使中子束中心与部件待测位置重合,得到不同位置的正应变,并据此计算相应位置的 3 向应力。

中子衍射法通过测量某一晶面的弹性应变来计算残余应力。由于材料的弹性和塑性是各向异性的,不同的衍射晶面对宏观应力场的响应也不同,如图 3

所示。从图中可见,黑色线为宏观拉伸应力-应变曲线的弹性阶段,其余为不同晶面的晶格应变响应。在面心立方金属的弹性区域内,用于测量的任何晶面都是线性响应的,{311}

晶面与材料宏观应力应变响应最接近,即受晶间应力影响较小。因此,作为面心立方金属的高温合金通常选取{311}作为衍射法测量残余应力的晶面。

在 20 世纪 80 年代,国际上在反应堆中子源上开展了金属材料织构与残余应力测量研究,同时建立了专门的应力测量装置^[12-14]。反应堆中子源产生的连续波长中子一般利用单色器或中子导管聚焦成单一波长中子,应力需要较高的空间分辨率与倒空间应变分辨率,精确确定衍射峰峰位需要高质量的衍射峰^[15-17]。由于反应堆中子源上的应力测量中使用恒定波长,一般探测器很难覆盖大的布拉格衍射角(单色器的聚集几何较小,决定其很难大范围使用),固定探测器角度仅可收集有限数目衍射面的极图与点阵应变^[18-20]。另外,有些面间距较大晶面(具有较小的衍射角)的点阵应变测量精度很低,这些低衍射角晶面点阵应变测量过程中也很难限定有效衍射体积在 1 个合理的范围。70 年代末美国、英国相继建立了散裂中子源,利用慢化器和中子导管聚焦的连续波长中子实现了应力与织构的高效研究^[21-24]。21 世纪美国、日本建立散裂中子源专门应力谱仪,由于通量极大提高,使用效率进一步提升,应力、温度等外场环境也极大改善,已经开展了分钟甚至秒级与时间相关热机械处理过程中组织与应力演化的研究工作^[25-26]。

中国工程材料中子散射研究起步较晚,随着中子科学研究装置的发展及国内对工程材料中子应力与织构研究的迫切需要,21 世纪初中国研制了专门的应力谱仪,如图 4 所示。该应力谱仪分辨率等重要指标已达到世界先进水平,配备的 500 kg 载重台为测量大型工程部件提供了保证,已经开展了部分基础与工业应用研究^[27-28]。建立在散裂中子源基础上的时间飞行技术对多尺度应力与组织研究更具特色,特别是对

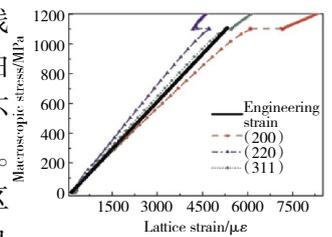


图 3 不同晶面对单轴拉伸载荷的应变响应

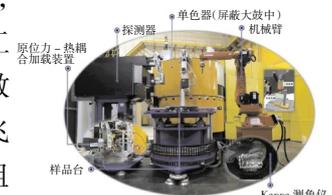


图 4 中子衍射应力谱仪

微观力学与相变模型的验证更具优势。中国的散裂中子源也有应力谱仪的规划。

3 应用进展

近几年,随着航空发动机研制和生产技术的深入发展,在国内利用中子衍射技术对航空发动机相关部件开展了残余应力分析。

3.1 盖板 T 型高能束焊接接头的残余应力与疲劳裂纹扩展测试分析

高能束焊接接头中的残余应力取决于焊接工艺参数、接头几何形状、工装约束以及材料自身的强度。在无相变的结构材料中,通常沿焊接方向产生强烈的纵向残余拉应力,与热影响区母材的压应力达到平衡并伴随着接头几何形状的改变。虽然为抵消残余拉应力而通过构件预置进行矫正,但仍有一定水平的残余应力场分布在构件中并影响疲劳裂纹扩展和损伤容限。

为研究残余应力对疲劳裂纹扩展行为的影响,需在确定初始残余应力场的基础上,考虑裂纹生长引起的应力松弛和再平衡。中子衍射技术被用于测量铝合金部件焊接接头中的残余应力,随着疲劳载荷作用和裂纹扩展的演变,对采用不同焊接工艺时平板和带槽平板 T 型接头的疲劳寿命和横向残余应力进行了测量,同时,将基于模拟的裂纹闭合有限元模型的预测结果与测量结果进行对比,如图 5 所示。结果表明,该模型有效地预测了残余应力场中的疲劳裂纹扩展,揭示了疲劳裂纹扩展过程中裂纹闭合区域附近的残余应力场演变规律^[29]。

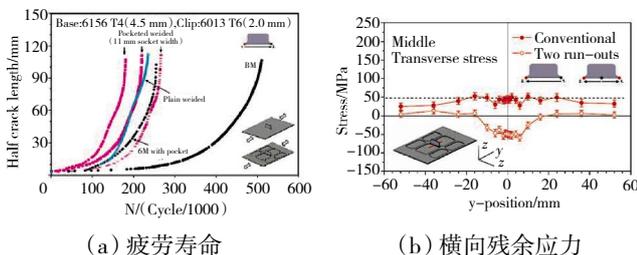


图 5 采用不同焊接工艺时平板和带槽平板 T 型接头的疲劳寿命和横向残余应力

3.2 涡轮盘内部残余应力测试分析

镍基单晶/多晶高温合金的力学性能主要取决于 γ' 析出相的形貌、分布和尺寸。将中子衍射与中子小角散射技术相结合,可原位观察构件在加工和服役条件下, γ' 析出相微观结构演变。

与具有晶体取向各向同性或有一定特定取向的多晶叶片相比,被用作涡轮叶片的镍基单晶显示出显著的抗蠕变性。在不同温度和载荷下发生蠕变变形后,镍基单晶合金中析出相微观结构特征的演化过程十分复杂^[30]。而在发动机大型零件中,镍基高温合金涡轮盘件经热锻后,由于塑性变形不均匀而在厘米级宏观尺寸范围内引起较高的残余应力,在设计过程中须考虑。Staron 等^[31]利用中子衍射技术精确地确定热锻盘件内部的残余应力,涡轮盘件的固溶冷却温度场和残余应力场的分布如图 6 所示。

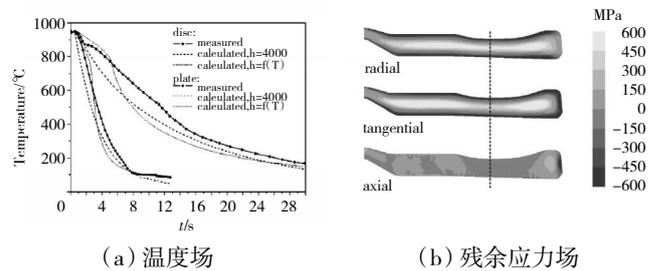


图 6 涡轮盘件固溶冷却温度场和残余应力场分布

利用国内的中子衍射平台和面探 X 射线衍射技术,分别对涡轮盘制造过程中、固溶处理和时效处理后从表面到内部的残余应力分布进行研究,从而对涡轮盘件中相同位置的 3 向残余应力演化过程有了清晰认识,并利用有限元法对空冷淬火应力场模拟结果进行验证^[32],镍基涡轮盘件的淬火残余应力模拟和测量结果如图 7 所示。该项工作对关键工程构件的低应力制造和延长服役寿命提供了重要依据。

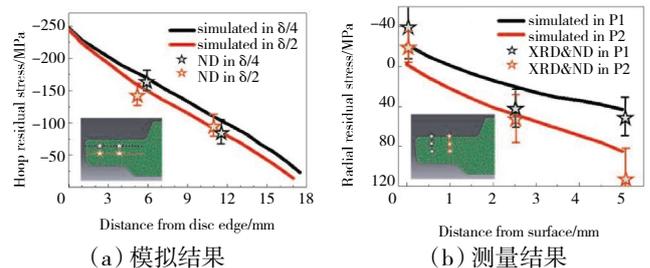


图 7 镍基涡轮盘件的淬火残余应力模拟和测量结果

3.3 涡轮后机匣内部残余应力测试分析

涡轮后机匣的残余应力测试方法与其他常规工件的测试方法有较大区别。因机匣自身体积大、结构复杂,在某些位置只能测试特定方向的晶面间距 d ;机匣采用的 K4169 合金组织不均匀(部分位置存在大晶粒)以及可能存在的成分偏析造成不同部位的无应力状态晶面间距 d_0 不同,不能使用无应力标样作

为 d_0 的测试标样, 必须在机匣原件选定的位置测试完成后, 将其切割释放应力, 并重新定位, 准确寻回初始测试的位置进行 d_0 的标定, 需要在短时间内完成切割及重新准确定位等工作。

涡轮后机匣残余应力测试过程为: (1) 选定待测区域和待测晶面(311), 规划样品的摆放以及衍射矢量方向; (2) 通过吊车将机匣放置于测试台面上并固定牢靠; (3) 通过调节样品台的 $x/y/z$ 轴位移及样品台转角 ω , 利用经纬仪与垂直激光或者铅锤将机匣待测位置大致定位; (4) 通过中子束扫描准确定位衍射位置后进行测试, 获得不同位置的晶面间距 d ; (5) 切割机匣, 释放应力后重新通过上述方法定位, 测试相同位置的残余应力 d_0 ; (6) 进行数据处理和分析得到结果。

根据各点的衍射角度及布拉格方程计算出(311)晶面的晶面间距, 如图8所示。从图中可见, 切割释放应力后, 晶面间距减小, 说明 $d > d_0$; 在衍射矢量方向上, 机匣产生拉应变。较多的测试点可以保证较好的统计性, 因此可以用平均的晶面间距进行大致分析, 计算出释放应力后的平均晶面间距为 $d_0 = 1.0855 \text{ \AA}$, 机匣原件的平均晶面间距为 $d_0 = 1.0864 \text{ \AA}$, 该方向的平均应变约为 800 个微应变, 各点应变的计算结果如图9所示。

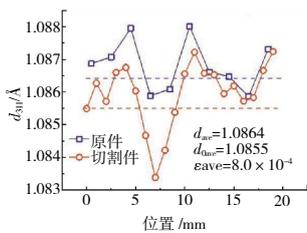


图8 不同位置测试点晶面间距的计算结果

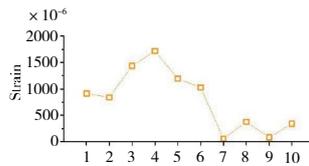


图9 各测试点的应变

由于机匣体积大且形状复杂, 很难测试到主应力(周向)方向, 只能通过主应力方向的泊松效应即衍射矢量方向的拉应变推算出主应力(周向)方向受到压应力作用, 其压应力约为 $\sigma = -E\varepsilon\nu$, 其中 ν 为材料的泊松比, E 为弹性模量。又由于机匣中含有大晶粒, 在定位过程中, 角度产生一点点偏差就会导致大晶粒的衍射峰位偏移, 该偏移并不一定是由残余应力产生的, 这就是对于铸态试样测试的定位要求非常准确的原因。尽管在测试过程中尽量保证了定位的准确性, 为了使计算结果更加准确, 将各点的细晶部分或者大

晶粒部分提取出来进行计算。

各点的残余应变和周向残余应力分别如图10、11所示。计算表明, 机匣的平均周向压应力约为 300 MPa。

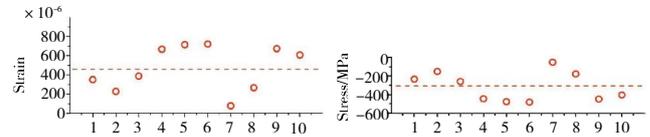


图10 各测试点的应变

图11 各测试点的周向残余应力

3.4 整流叶片内部残余应力测试分析

为了比较2种热处理工艺条件下TC4合金整流叶片的残余应力分布状态, 对1#(750℃出炉)、2#(900℃出炉+磁力抛光)2个叶片的残余应力进行分析, 共测量了1#-1、1#-2、2#-1和2#-2 4个位置的残余应力。测量晶面选为 α 相的(10-13)晶面, 按照中子波长 0.1592 nm 计算该晶面对应的衍射角约为 73.4°。为提高中子衍射的信号强度, 所选的衍射体积为 $(2 \times 2 \times 10) \text{ mm}^3$ 。

4个测量点的衍射峰分别如图12所示。通过拟合可获得4个点位置对应的衍射角、晶面间距、应变等信息。

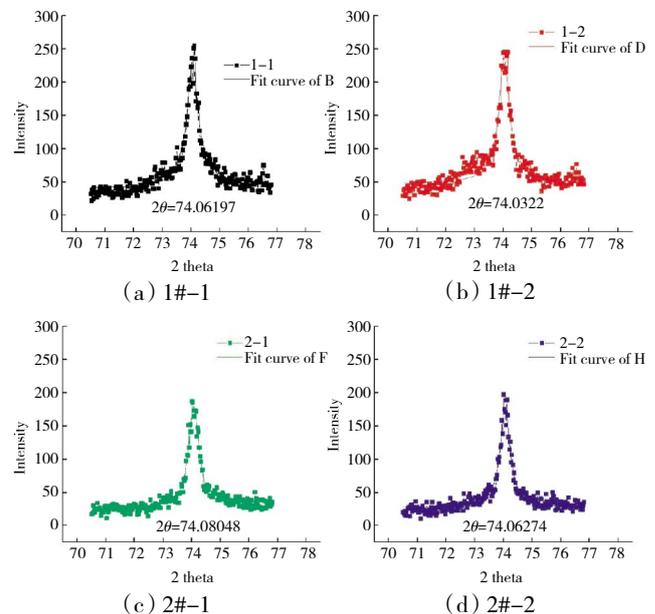


图12 中子衍射的峰形拟合

按4点平均的晶面间距计算, 其相对微应变分别为 -24.59 、 88.90 、 -69.99 和 $5.67 \mu\varepsilon$ 。由于没有无应力状态下的标样, 无法计算每个测量点的绝对应变值, 也就无法获知每个点的残余应力值, 但通过4个测量点的相互比较可以得到其相对应应力的大小。TC4钛合金的弹性模

量取为 110 GPa,则 4 个测量点之间的应力差值均不大于 15 MPa。

通过以上分析可知,在 2 种热处理工艺条件下整流叶片的残余应力分布差异不大。

3.5 环锻件胀形前后内部残余应力测试分析

为了研究胀形工艺对发动机环锻件内部残余应力分布的影响,开展了 GH907 合金环锻件胀形前后内部残余应力分布的测试工作,测试结果如图 13 所示测试点分布如图 14 所示。从图中可见,环锻件经胀形工艺处理后残余应力分布更加均匀,且压应力增大。

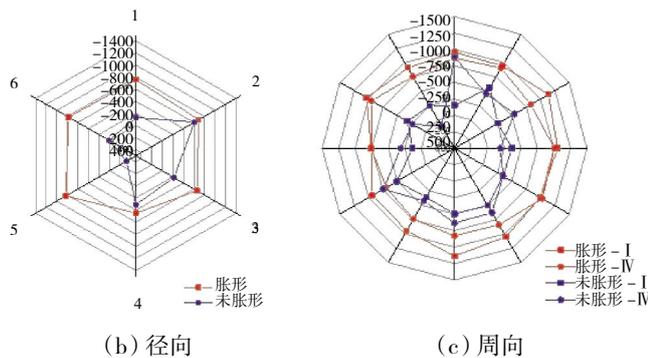


图 13 GH907 合金环锻件胀形前后应力分布

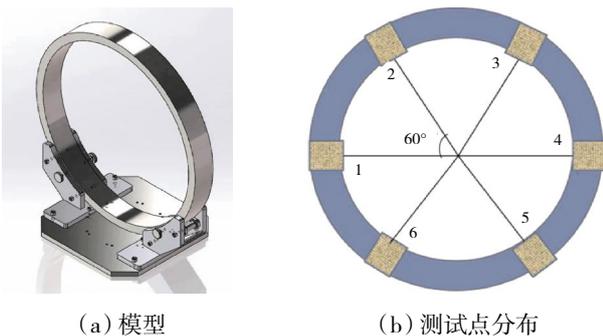


图 14 GH907 合金环锻件应力测试的测点分布

4 结论

(1)由于中子衍射技术具有穿透性强的特点,在航空发动机涡轮盘、机匣、叶片等部件的内部残余应力测试分析中得到一定应用,为航空发动机部件的安全使用提供技术支持;

(2)将中子衍射技术与有限元模型相结合,能有效地预测残余应力场中的疲劳裂纹扩展规律;

(3)将中子衍射技术与面探 X 射线衍射技术相结合,可以得到涡轮盘件锻造、固溶处理和时效处理后从表面到内部的残余应力分布;

(4)涡轮后机匣的平均周向压应力约为 300 MPa;

(5)750 °C 出炉、900 °C 出炉 + 磁力抛光 2 种热处理工艺对整流叶片的残余应力分布影响不大;

(6)环锻件经胀形工艺处理后残余应力分布更加均匀,且压应力增大。

参考文献:

- [1] Wither P J, Bhadeshia H K D H. Overview—residual stress part 2—nature and origins[J]. *Materials Science and Technology*, 2001, 17(4): 366–375.
- [2] Borlato C R, Mompean F J, Lin R, et al. Neutron strain scanning on bimetallic tubes [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2000, 288(2): 288–292.
- [3] Martinez P M L, Borlato C R, Mompean F J. Measurement and modeling of residual stress in straightend commercial eutectoid steel rods[J]. *Acta Materialia*, 2005, 53: 4415–4425.
- [4] Park M J, Yang H N, Jang D Y, et al. Residual stress measurement on welded specimen by neutron diffraction [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155–156: 1171–1177.
- [5] Paradowska A, Price J W H, Ibrahim R, et al. A neutron diffraction study of residual stress due to welding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 164–165: 1099–1105.
- [6] Dutta M, Bruno G, Edwards L, et al. Neutron diffraction measurement of the internal stresses following heat treatment of a plastically deformed Al/SiC particulate metal-matrix composite [J]. *Acta Materialia*, 2004, 52: 3881–3888.
- [7] Oliver E C, Mori T, Daymond M R. Neutron diffraction study of stress-induced martensitic transformation and variant change in Fe-Pd[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51: 6453–6464.
- [8] Hutchings M T, Withers P J, Holden T M, et al. Introduction to the characterization of residual stress by neutron diffraction [M]. Boca Raton: CRC Press, 2005: 1–57.
- [9] Schajer G S. *Practical residual stress measurement methods* [M]. Vancouver: John Wiley & Sons Ltd, 2013: 1567–1747.
- [10] Philip J, Withers C R. Mapping residual and internal stress in materials by neutron diffraction [J]. *Physique Technology*, 2007, 8(7–8): 806–820.
- [11] Wolfgang K, Jorg E, Volker A, et al. Research with neutron and synchrotron radiation on aerospace and automotive materials and components [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2011, 13(8): 637–657.
- [12] Liu C K, Li N, Zhao W X, et al. Requirements of microstructure and residual stress evaluation of aeronautical materials for neutron scattering and synchrotron radiation techniques [J]. *Failure Analysis*

- and Prevention, 2019, 2(14): 133–134.
- [13] Wronski S, Baczmanski A, Dakhlaoui R, et al. Determination of the stress field in textured duplex steel using the TOF neutron diffraction method[J]. *Acta Materialia*, 2016, 55(18): 6219–6233.
- [14] Allen A J, Coppola R, Hutchings M T. Study of residual stress in a ferritic steel electron beam test using neutron diffraction weldment [J]. *Materials Letters*, 1995, 23(4–6): 265–268.
- [15] Stanford N, Cottam R, Davis B, et al. Evaluating the effect of yttrium as solute strengthener in magnesium using in situ neutron diffraction [J]. *Acta Materialia*, 2014, 78: 12–23.
- [16] Zhang Z W, Feng Y F, Tan Q, et al. Residual stress distribution in Ni-based superalloy turbine discs during fabrication evaluated by neutron/X-ray diffraction measurement and thermomechanical simulation[J]. *Materials and Design*, 2019, 16(10): 107–113.
- [17] Rolph J, Evans A, Paradowska, et al. Stress relaxation through ageing heat treatment a comparison between in situ and ex situ neutron diffraction techniques [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2012, 13(3): 307–315.
- [18] Wang Z, Denlinger E, Michaleris P, et al. Residual stress mapping in inconel 625 fabricated through additive manufacturing: method for neutron diffraction measurement to validate thermomechanical model predictions[J]. *Material Designing*, 2017, 113(10): 169–177.
- [19] Cihak U, Staron P, Clemens H, et al. Characterization of residual stress in turbine discs by neutron diffraction and high-energy X-ray diffraction and comparison to finite element modelings [J]. *Material Science Engineering: A*, 2006, 437(1): 75–82.
- [20] Wimpory R C, Martins R V, Hofmann M, et al. A complete reassessment of standard residual stress uncertainty analyses using neutron diffraction emphasizing the influence of grain size [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2018, 164: 80–92.
- [21] Wimpory R C, Martins R V, Hofmann M, et al. Statistical analysis of residual stress determinations using neutron diffraction [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2009, 86(1): 48–62.
- [22] Aba-Perea P E, Pirling T, Preuss M. In-situ residual stress analysis during annealing treatments using neutron diffraction in combination with a novel furnace design[J]. *Materials and Design*, 2016, 110(22): 925–931.
- [23] Staron P, Cihak U, Stockinger M, et al. Characterization of residual stresses in IN718 turbine discs by neutron diffraction and finite element modeling [J]. *Advanced Materials Research*, 2007, 248(3): 102–107.
- [24] Philip J. Wither. Mapping residual stress in materials by neutron diffraction[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2007, 8: 806–820.
- [25] Holden T M. A canadian perspective on engineering strain measurements by neutron diffraction[J]. *Canadian Journal of Physics*, 2010, 8: 799–808.
- [26] Wolfgang K, Volker A, Norbert H, et al. Research with neutron and synchrotron radiation on aerospace and automotive materials and components [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2011, 13(8): 637–656.
- [27] 王沿东, 张哲维, 李时磊, 等. 同步辐射高能 X 射线在材料研究中的应用进展[J]. *中国材料进展*, 2017, 36(3): 168–174.
WANG Yandong, ZHANG Zhewei, LI Shilei, et al. Application of synchrotron-based high-energy x-ray diffraction in materials research [J]. *Materials China*, 2017, 36(3): 168–174.
- [28] 刘昌奎, 李楠, 赵文侠, 等. 航空材料组织与残余应力评价对中子散射与同步辐射技术的需求 [J]. *失效分析与预防*, 2019, 2(14): 133–134.
LIU Chang kui, LI Nan, ZHAO Wenxia, et al. Requirements of microstructure and residual stress evaluation of aeronautical materials for neutron scattering and synchrotron radiation techniques[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2019, 2(14): 133–134.
- [29] Bayraktar F S. Analysis of residual stress and fatigue crack propagation behaviour in laser welded aerospace aluminium T-joints [D]. Berlin: Technische Universität Hamburg, 2013.
- [30] Zrník J, Strunz P, Maldini M, et al. Small-angle neutron scattering investigation of γ' precipitate morphology evolution in creep-exposed single-crystal Ni-base superalloy CMSX-4 [J]. *Physics Condensed Matter*, 2008, 20(7): 10–19.
- [31] Staron P, Cihak U, Stockinger M, et al. Characterization of residual stresses in IN 718 turbine discs by neutron diffraction and finite element modeling [J]. *Advanced Materials Research*, 2007, 278(9): 102–107.
- [32] Zhang Z W, Feng Y F, Tan Q, et al. Residual stress distribution in Ni-based superalloy turbine discs during fabrication evaluated by neutron/X-ray diffraction measurement and thermomechanical simulation[J]. *Materials and Design*, 2019, 16(3): 107–113.

(编辑:刘静)