

文章编号: 1001-4888(2023)06-0675-13

低温数字图像相关方法中的 制斑技术及其相关应用*

耿传庆¹, 李阳阳¹, 刘函², 谢惠民¹

(1. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084; 2. 北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要: 数字图像相关技术(Digital Image Correlation, DIC)是一种基于散斑载体的全场变形测量技术。散斑载体的制备是实现变形测量的关键,目前已有喷涂、刻蚀、转印等一系列制斑方法。低温实验测试表明,常温制斑工艺在低温下会出现脆化效应,导致载体承受大变形时易开裂和脱落,使得变形测量产生较大误差,此外测量结果也受到结霜和气流扰动等问题影响,因此迫切需要开发低温散斑制备工艺。结合相关需求,本文发展了刻蚀喷涂法和基于聚四氟乙烯(PTFE)衬底的喷涂法 2 种低温制斑工艺,由此制得的散斑在低温条件下具有良好的稳定性,低温验证实验中,试件直至断裂前均未发生衬底开裂和散斑脱落;使用 13X 分子筛干燥方法解决了低温测量中的结霜问题,减少了结霜引起的图像噪声。将开发的低温制斑工艺成功应用于焊接件的低温力学性能测试和断裂力学参数反演,常温和 -180°C 的拉伸实验测试结果表明,低温下材料的弹性模量呈递增趋势,应力强度因子(Stress-intensification Factor, SIF)呈递减趋势。

关键词: 低温; 数字图像相关; 散斑制备; 焊接; 参数反演

中图分类号: O348.1; V415 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-025

0 引言

迄今为止,以数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)为代表的光学变形场测量技术得到了广泛应用,其中 DIC 因其全场性、非接触、操作简单、适用范围广等特点,成为变形测量的重要手段^[1-5]。散斑作为 DIC 测量的变形载体,是实现变形测量的关键^[6-7],制斑技术主要包括喷涂、刻蚀、3D 打印、纳米压印等^[8-10]。

常温制斑工艺相对成熟,可以实现不同尺度的散斑制备。近年来,高温制斑工艺迅速发展,通过设计有针对性的制斑工艺,可以满足有氧环境 $1200^{\circ}\text{C}\sim 1600^{\circ}\text{C}$ 温度范围的 DIC 测量,在真空环境下可实现 3000°C 的 DIC 测量^[11-14]。低温散斑常用于航天领域,在航天器燃料的储存和输送,航天器的服役过程中,均需要面对极端低温环境的考验,可以将 DIC 技术作为低温变形测量的重要手段。为适应更加复杂的低温测试环境,保证散斑载体在低温环境下不发生开裂和脱落,低温散斑制备工艺和低温力学测试技术已经得到更多关注^[15-16]。

王浩等^[17]将 DIC 技术应用于 TiO_2/PI 纳米杂化薄膜的低温全场变形测量,在 $-60^{\circ}\text{C}\sim 18^{\circ}\text{C}$ 温度下开展单轴拉伸实验,获得了薄膜的低温力学参数。为满足更极端的低温测试需要,同时避免低温对光学器件的干扰,Zhang 等^[18]开发了一种由 G-M 低温冷却器冷却的无液氦低温力学性能测试系统,可以实

* 收稿日期: 2023-02-06; 修回日期: 2023-03-26

基金项目: 航天 702 所委托项目(20224810180); 国家自然科学基金项目(No. 12032013, No. 11972209)

通信作者: 谢惠民(1965-),男,博士,教授。研究领域:光测实验力学。Email: xiehm@mail.tsinghua.edu.cn

现室温到 -253.15°C 左右的连续可调环境温度,并在 -253.15°C 的温度下通过单轴加载研究了Ti6Al4V材料的力学性能。低温容易引起试件和观察窗结霜,从而影响DIC变形测量的精度,Zhou等^[19]通过氮气气封减少结霜影响,并针对焊接件开展了低温力学性能测试。为进一步分析低温对焊接件力学参数的影响,丁会明等^[20]通过 $-196^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 下的低温拉伸实验,表明焊接接头与母材的屈服强度和抗拉强度随温度降低呈现明显的增加趋势,有显著低温强化效应。

虽然DIC在低温力学性能测试中已经有了很好的应用^[21-22],但仍存在一些亟待解决的问题,如低温测试中散斑附着下降,会造成散斑脱落,影响其变形传感能力;另外低温容易引起试件表面结霜,导致成像质量下降,影响低温DIC测量精度,因此迫切需要发展DIC低温测量技术解决相关问题^[23-24]。

针对相关需求,本文发展了刻蚀喷涂法和基于PTFE衬底的喷涂法2种低温制斑方案,并通过低温拉伸实验验证了所制散斑的稳定性;使用13X分子筛干燥,并循环低温试验箱气流,从而避免了实验过程中的结霜问题。在满足低温测试条件后,将基于聚四氟乙烯衬底的喷涂散斑应用于焊接件的低温力学性能测试,实现了焊接件不同区域的本构参数计算和断裂力学参数反演。

1 低温数字图像相关法

1.1 材料和系统

本文实验所用低温实验系统如图1所示,该系统采用液氮做制冷剂,通过配备人工智能温度控制器,实现温度的精准控制,试验箱的最低温度可达 $83.15\text{K}(-190^{\circ}\text{C})$ 。将高低温控制系统与Instron万能试验机相匹配,进行低温原位拉伸实验,试验机的最大拉力为 20kN 。

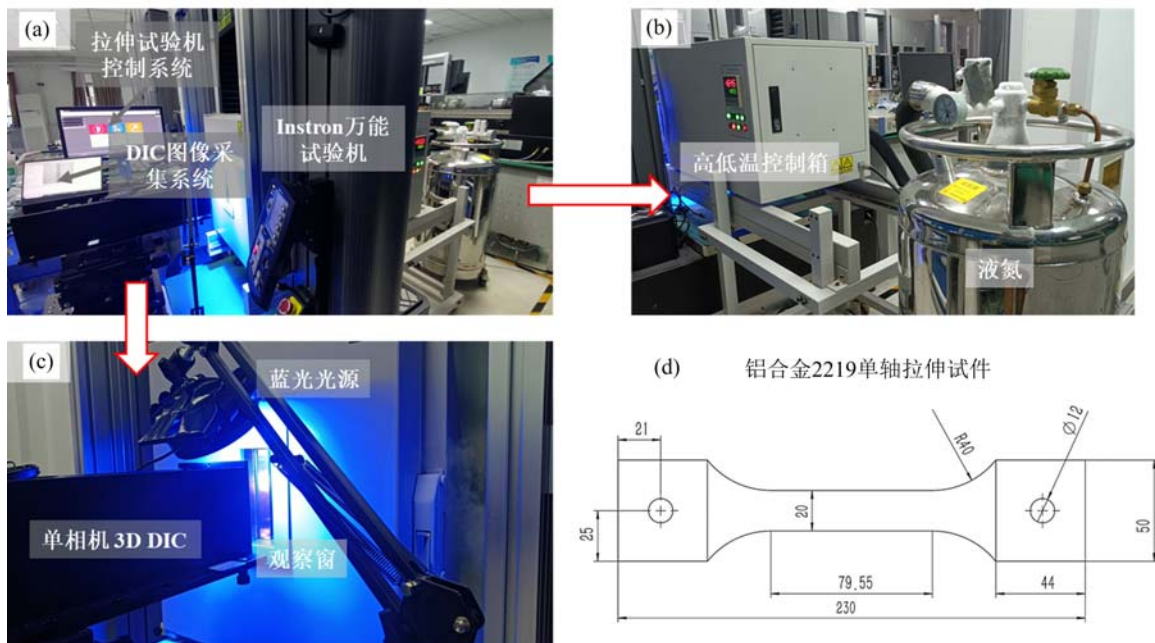


图1 低温实验系统:(a)加载装置和图像采集装置;(b)低温制冷装置;

(c)单相机3D DIC的照明装置;(d)铝合金2219单轴拉伸试件构型(单位:mm)

Fig.1 Cryogenic test system; (a) loading device and image acquisition device;

(b) cryogenic cooling device; (c) lighting device for single camera 3D DIC;

(d) configuration of aluminum alloy 2219 uniaxial tensile specimens(unit: mm)

使用双棱镜单相机系统(图2)采集加载过程中的图像,成像系统由双棱镜、双远心镜头、CMOS相机、蓝光灯组成。成像系统中双远心镜头的光轴与双棱镜后表面垂直,光轴刚好通过双棱镜的棱边,形成正负两侧光路,搭建的双棱镜单相机光路结构如图2(a)所示。以初始时刻图像为参考图像,加载后的图像为变形图像,采用基于Ncorr改进后开发的BSLDIC软件,可以计算试件在不同载荷水平下的三

维位移和应变场^[25]。

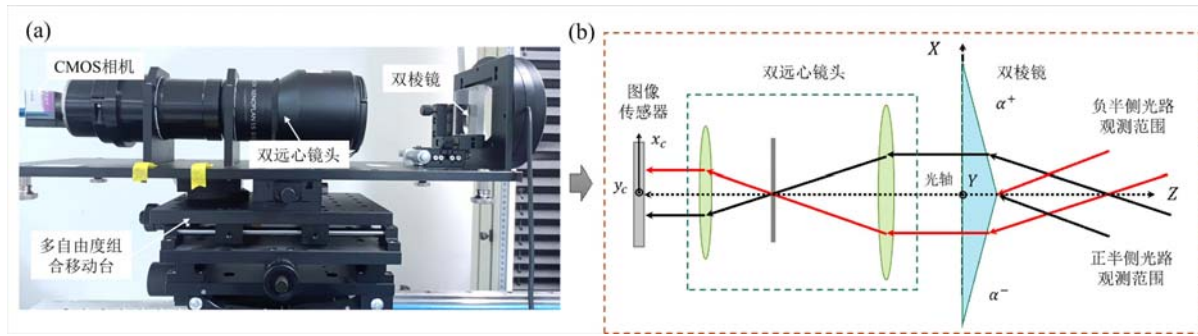


图 2 双棱镜单相机系统:(a)系统各部分组成;(b)成像系统光路图^[26-27]

Fig. 2 Biprism single camera system: (a) system components; (b) optical path diagram of the imaging system^[26-27]

实验材料为铝合金 2219,该材料具有良好的低温力学性能,可用于制作高强度焊接件,已被广泛应用于航空航天等领域^[28]。将铝合金 2219 材料加工为狗骨板状试件后,其几何尺寸如图 1(d)所示,截面尺寸为 20mm×3mm。在试件表面进行变形载体制备,用于低温力学性能测试。

为避免降温过程中试验箱和试件表面结霜,实验开始前在箱体内放置 13X 分子筛(其材料为碱金属硅铝酸盐,可以吸附大于 0.364nm 小于 1nm 的任何分子),用于试验箱体环境的深度干燥。干燥后的试验箱空气湿度大幅降低,空气的露点降低,水分更不易析出,从而实现防止结霜的目的。在-100℃的实验环境中进行测试,从图 3 可以明显看出,在箱体内无任何干燥措施时,试件的界面和表面均出现严重结霜,对图像质量产生较大影响;整瓶放置 500g 分子筛后,仅在试件界面出现部分结霜,结霜对图像质量的影响降低;将 500g 分子筛装于纱袋后放置于试验箱内,增大了分子筛与空气的接触面积,试件表面几乎无结霜,说明 13X 分子筛对试验箱的气体环境有良好的干燥效果。随着温度的进一步降低,箱体内氮气浓度升高,形成氮气气封环境,试件表面不再继续结霜。

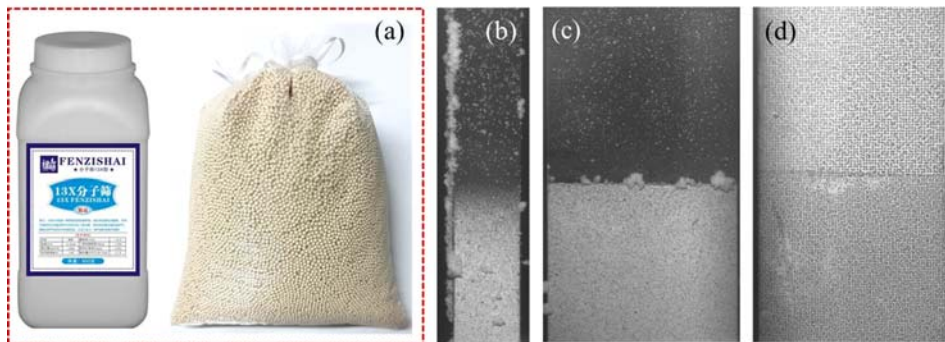


图 3 -100℃低温下的除霜方案和除霜效果:(a)13X 分子筛;(b)不使用任何干燥措施;
(c)整瓶放置 13X 分子筛;(d)13X 分子筛装于纱袋后放置试验箱

Fig. 3 Defrosting scheme and effect at -100℃: (a) 13X molecular sieve; (b) without any drying measures;
(c) place the whole bottle with 13X molecular sieve; (d) 13X molecular sieve is put in the yarn bag and then placed in the test chamber

为避免气流扰动和机械振动干扰,每完成一次加载后采集 30 帧图像,各帧图像采集时间间隔为 1ms,将采集到的图像进行灰度平均,随后进行 DIC 计算。

1.2 低温脆化效应

散斑制备中通常需要在试件表面喷涂哑光漆等材料作衬底,增加散斑载体的对比度,而衬底材料的抗脆化能力是决定低温散斑性能的关键。为验证变形载体在低温环境下的脆化效应,采用水转印和激光烧蚀 2 种制斑技术,在-180℃的低温环境中开展单轴拉伸实验,观察试件发生塑性屈服以及断裂后

的散斑状态,并与常温单轴拉伸实验对比。实验结果如图4所示,由图可知,常温环境下(30℃),材料断裂前均未出现衬底开裂和脱落现象,哑光漆衬底在常温环境具有良好的韧性。

将实验温度降低至-180℃,并将试件加载至大变形状态(位移大于8mm),散斑衬底在拉伸载荷作用下出现开裂,由此表明-180℃的低温已低于衬底的脆变温度,衬底因低温脆化效应而韧性降低,在载荷作用下易发生开裂。如图4所示,裂纹附近的轴向位移存在明显的突变,位移场的平滑度降低,衬底开裂增大了DIC测量的误差。

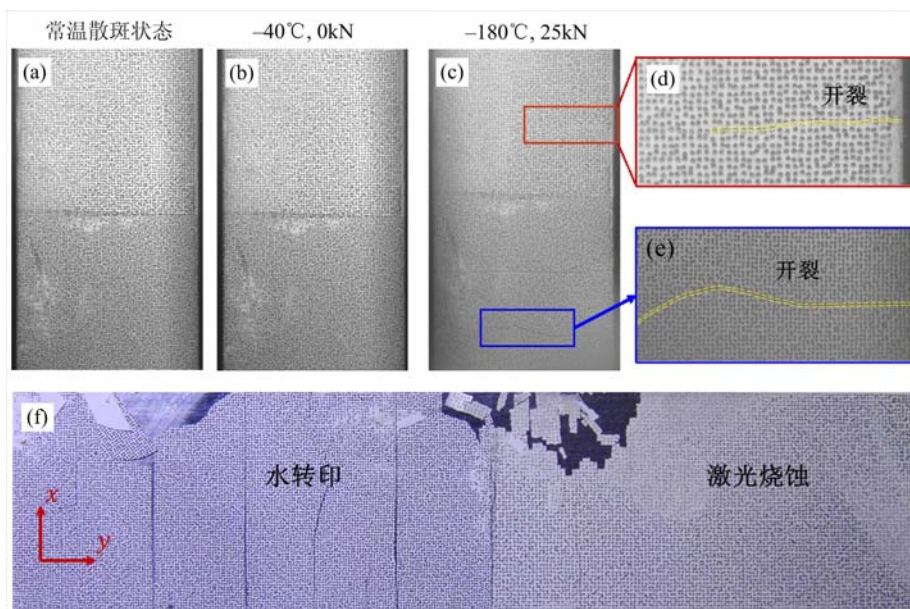


图4 转印和刻蚀散斑载体在低温条件下的状态:(a)常温加载过程的散斑状态;(b)-40℃未加载时的散斑载体状态;(c~e)-180℃加载至25kN后的散斑载体状态;(f)卸载并静置24h后的散斑衬底开裂状态

Fig. 4 Status of transfer and etched scatter at low temperatures: (a) speckle state during loading at room temperature; (b) the state of the speckle carrier without load at -40℃; (c~e) the state of the speckle carrier after loading to 25kN at -180℃; (f) cracking state of the speckle substrates after unloading and standing for 24 hours

衬底的低温韧性与其厚度相关,不同制斑方式表现出的低温脆化现象存在一定差异,水转印制斑对衬底材料无损伤,可近似假设衬底厚度均匀;而刻蚀形成的变形载体厚度不均匀。在均匀拉应力和低温共同作用下,试件形成较大塑性变形后,衬底发生直线形状的开裂,开裂方向沿 x 轴方向,衬底和基材材料间存在严重脱落。对于激光刻蚀散斑,在低温和拉应力作用下,开裂首先出现在底漆较厚的位置,尤其是试件边缘,随后衬底裂纹沿着散斑延伸扩展,直至完全开裂。

采用激光烧蚀制斑,在常温和低温(-180℃)环境进行单轴拉伸实验,根据不同环境下的 ϵ - σ 曲线(图5)可知,铝合金2219材料在低温环境下的屈服强度和抗拉强度显著提升,弹性模量增大,断裂韧性提高。然而,试件表面的哑光漆衬底出现明显的低温脆化,导致铝合金基底和散斑衬底的低温韧性存在较大的差异,衬底材料因无法承受大变形而开裂。试件断裂后因冲击力的作用,出现散斑的破碎和脱落。

1.3 低温制斑技术研究

低温散斑应当具有良好的附着性、抗脆化性能和稳定性,为发展适用于低温条件下的制斑技术,对喷涂、转印和刻蚀等几种常温的制斑技术和本文开发的低温制斑技术进行测试,基于散斑占空比、散斑尺寸和平均灰度梯度进行散斑质量的评价,几种制斑方案所得散斑的质量评价结果如图6所示。

对比可知,水转印和刻蚀散斑具有更高的平均灰度梯度,散斑粒径和随机度可控,水转印和氧化锆散斑载体表面光滑,试件表面不易结霜。

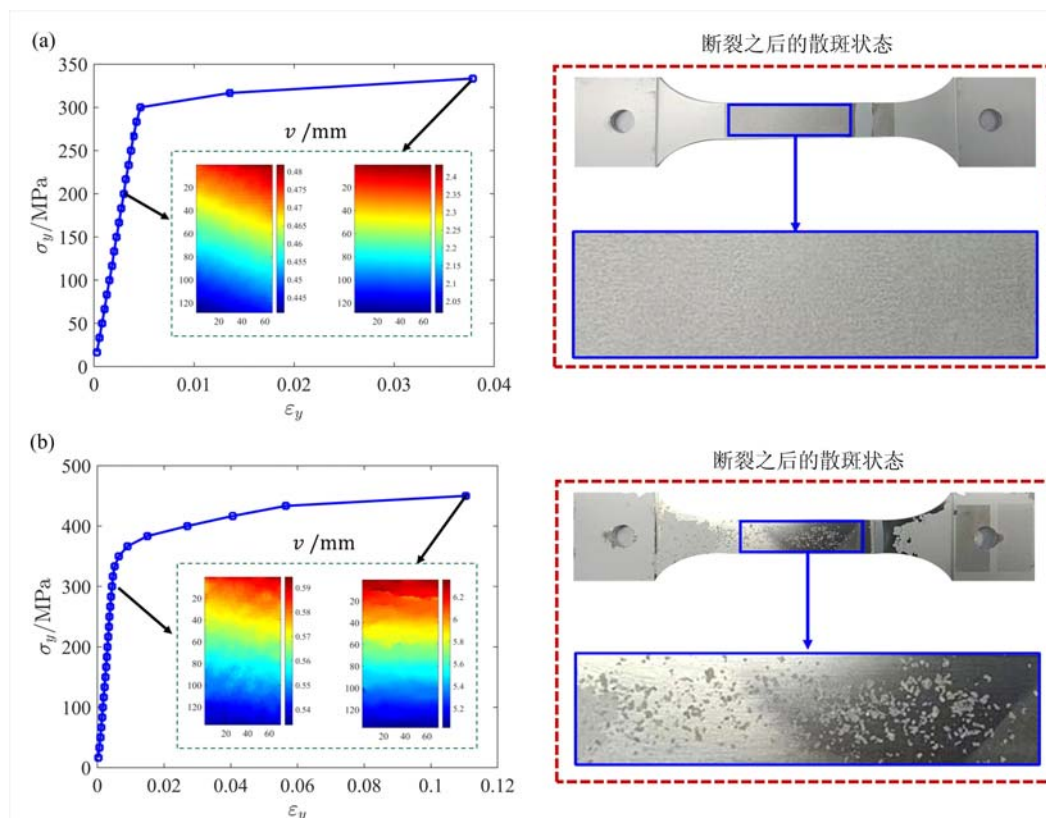


图 5 以激光烧蚀散斑为例的低温脆化效应验证：(a)常温单轴拉伸测试的本构曲线、位移场和断裂后的散斑载体状态；(b)低温-180℃单轴拉伸测试的本构曲线、位移场和断裂后的散斑载体状态

Fig. 5 Verification of low temperature embrittlement effect by laser ablation scattering: (a) constitutive curve and displacement field of uniaxial tensile test at room temperature and the state of the speckle carrier after fracture; (b) constitutive curve and displacement field of uniaxial tensile test at -180°C and the state of the speckle carrier after fracture

哑光漆衬底在低温大变形条件下容易开裂,为了进一步避免低温脆化效应的影响,提高散斑的低温性能,本文发展了 2 种低温散斑制备方案:刻蚀喷涂制斑和基于 PTFE 衬底的喷涂制斑,2 种散斑的制斑流程如图 7 所示。刻蚀喷涂制斑方案中,首先对铝合金试样进行抛光,随后基于数字化散斑模板在铝合金试件表面刻蚀凹槽,使用刀具或砂纸去除凹槽的边缘凸起,保证制斑后的试件表面平滑;在试件表面喷涂哑光黑漆至完全覆盖凹槽,待哑光漆凝固后,使用无水乙醇擦除表面多余黑漆,保留凹槽内黑漆形成散斑。基于 PTFE 衬底的喷涂制斑方案中,在试件表面喷涂一层 PTFE 干性低温润滑剂,形成光滑的白色均匀薄层,随后喷涂哑光漆形成黑色散斑。PTFE 干性低温润滑剂呈白色蜡状、半透明、耐寒性优良,可在-180℃~260℃长期使用,具有良好的抗酸抗碱性能,可以起到表面润滑效果,适合低温散斑衬底的制作。

在-180℃下采用单轴拉伸实验进行测试,结果表明 2 种制斑方案均具有良好的低温性能,散斑对比度提高,材料发生大变形和断裂前,衬底材料均未发生脆化和开裂现象,散斑具有可重复使用的优点,在低温疲劳测试中也可以发挥重要的作用。

为进一步研究刻蚀对材料强度的影响,在低温-180℃下进行单轴拉伸实验,将刻蚀喷涂制斑方案与哑光漆喷涂制斑方案做对比,由图 8 可知,材料的弹性极限均为 350MPa,断裂极限均为 450MPa,表明 2 种散斑载体在低温变形测量中均具有良好的适用性。

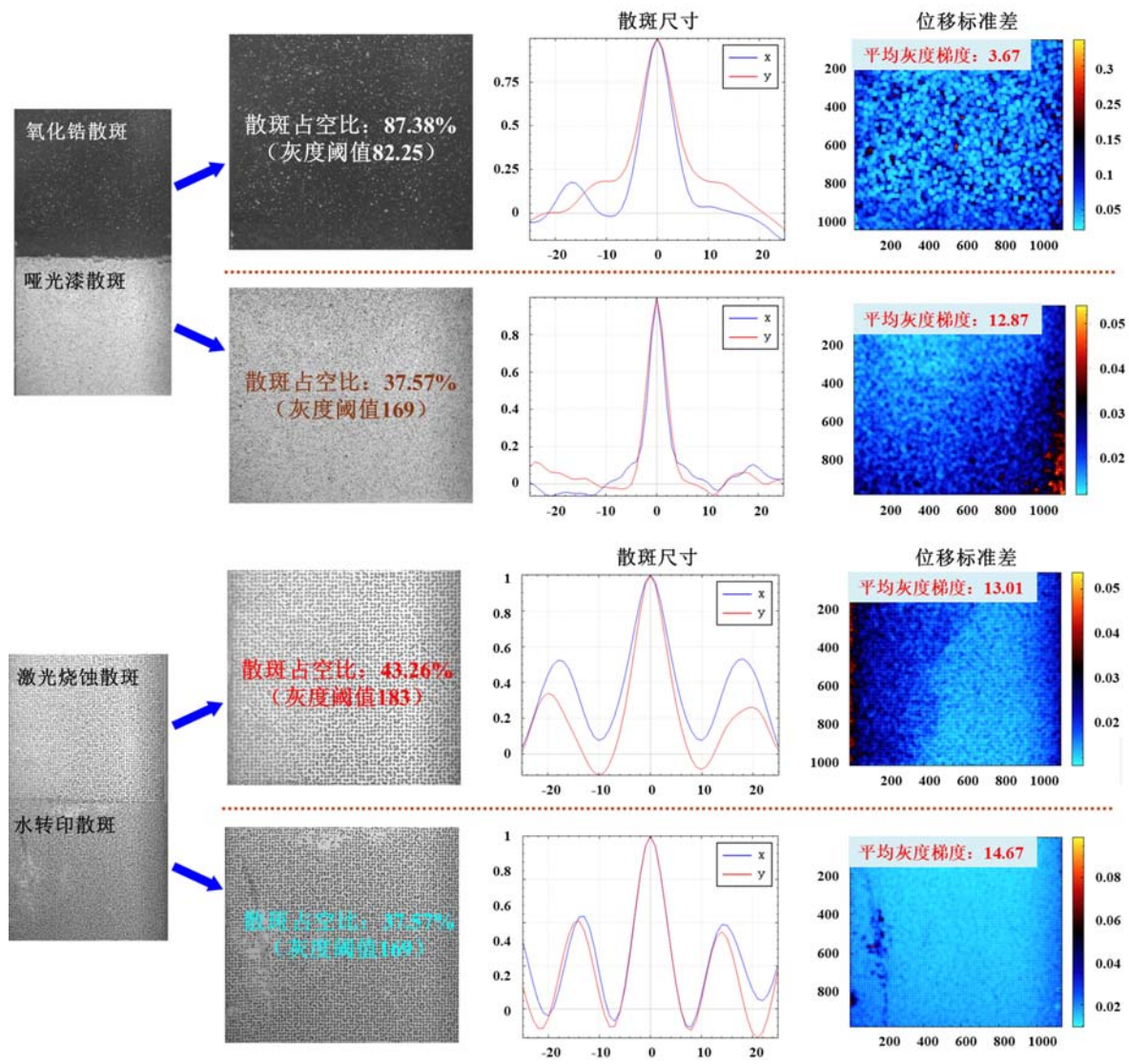


图 6 4 种制斑方案的散斑质量评价

Fig. 6 Speckle quality evaluation of four speckle making schemes



图 7 2 种低温散斑制备方案

Fig. 7 Two low temperature speckle fabrication schemes

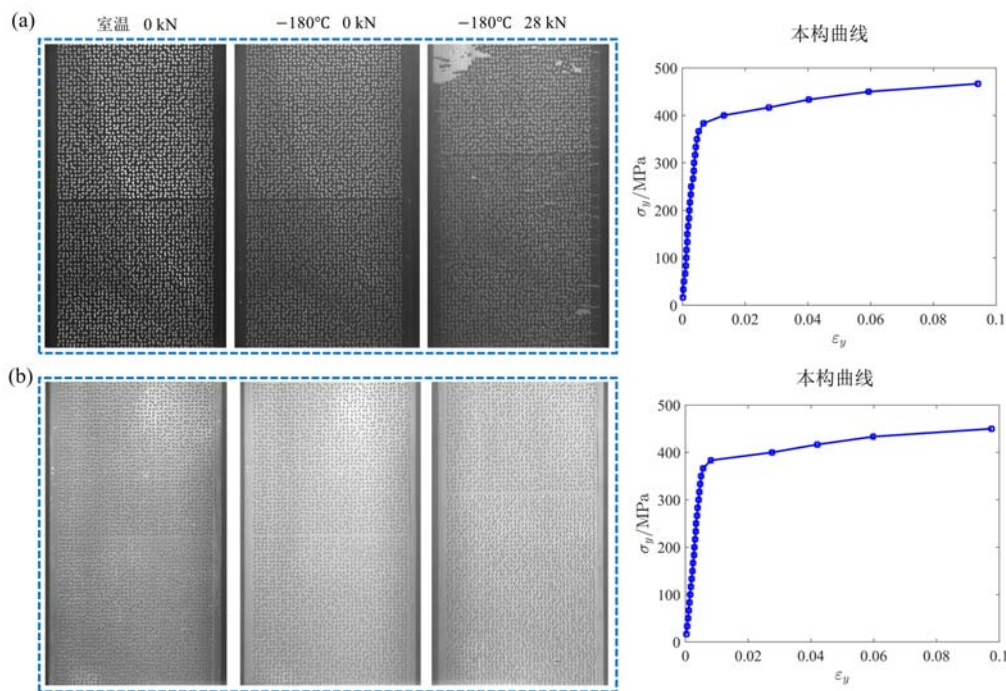


图 8 2 种制斑方案的低温 DIC 测试对比:(a)哑光漆喷涂散斑在低温条件下的散斑状态和本构曲线;
(b)刻蚀喷涂散斑在低温条件下的散斑状态和本构曲线

Fig. 8 Comparison of two speckle fabrication schemes for low-temperature DIC testing;
(a) speckle state and constitutive curve of matte paint spray speckle under low temperature conditions;
(b) speckle state and constitutive curve of etch spraying speckle fabrication scheme at low temperature

2 焊接件低温力学性能测试

2.1 本构参数测试

在室温和 -180°C 温度环境下对焊接件进行单轴拉伸实验,根据其模量变化分析低温对材料力学性能的影响,焊接件可以划分为 3 个区域,分别为焊接区、热影响区和基材区^[29-30],其中焊接区的宽度为 20mm,热影响区范围相对较小。采用基于 PTFE 衬底的喷涂制斑工艺,得到实验所需的低温散斑,随后进行单轴加载,载荷步长为 200N,最大载荷值为 1600N,材料始终保持弹性变形状态。选取包含焊接区和非焊接区的 ROI 区域,基于 Ncorr 计算得到 ROI 区域的应变场,随后以等宽度间隔划分为 30 个子区域,分别计算得到各子区域的弹性模量 E 平均值,结果如图 9 所示。由图可知,基材区的弹性模量高于焊接区,常温下焊接区弹性模量在 40GPa 左右,基材区弹性模量在 70GPa 左右,热影响区弹性模量略高于基材区,最大可达 80GPa。在 -180°C 的低温环境下,材料各区域的弹性模量显著升高,焊接区升高更加明显。

2.2 断裂力学参数反演

根据实验要求和实验规范,确定铝合金紧凑拉伸试件的尺寸如图 10 所示,紧凑拉伸试件的厚度 B 为 4mm,宽度 W 为 60mm,初始裂纹的长度 a 为 21mm。紧凑拉伸焊接件加工过程中,首先通过氩弧焊将两块含 45° 倒角的铝合金板焊接,焊接深度为 5mm,随后在焊接后的铝合金板上切割出所需尺寸的紧凑拉伸试样,试样的焊接方向垂直于拉伸方向,焊接区的宽度为 5mm。

采用紧凑拉伸试样进行断裂力学参数的反演,通过单轴拉伸实验分析平面应力状态下紧凑拉伸焊接件在不同载荷水平下的 SIF 变化,以及低温对焊接件 SIF 的影响。

对于常温实验,在试件表面喷涂高温哑光漆形成随机散斑,在 -180°C 低温环境下,采用基于 PTFE 衬底的喷涂制斑工艺,实验过程中步进式增大载荷并采集散斑图像,加载至出现较明显变形,停止加载。采用 Ncorr 软件处理散斑场图像,可以得到裂纹尖端 ROI 区域的位移场和应变场,实验结果如图 11 所

示,由图可见,在不同的温度和载荷条件下,位移场和应变场均满足 I 型断裂变形规律。

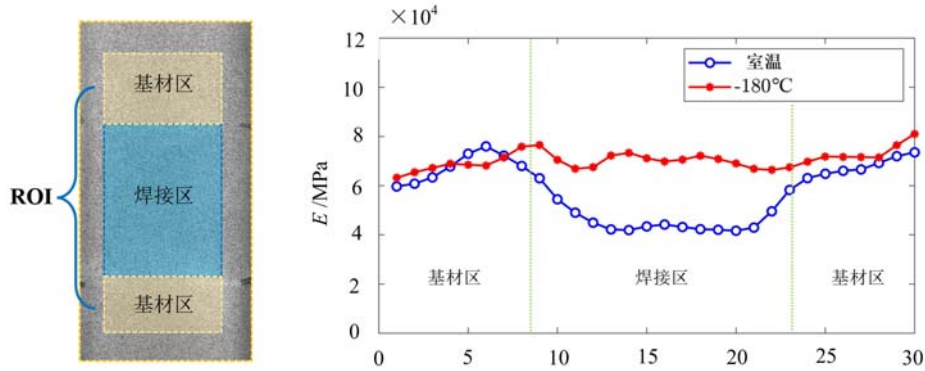


图 9 焊接件不同区域的弹性模量分布

Fig. 9 Distribution of elastic modulus in different areas of weldment

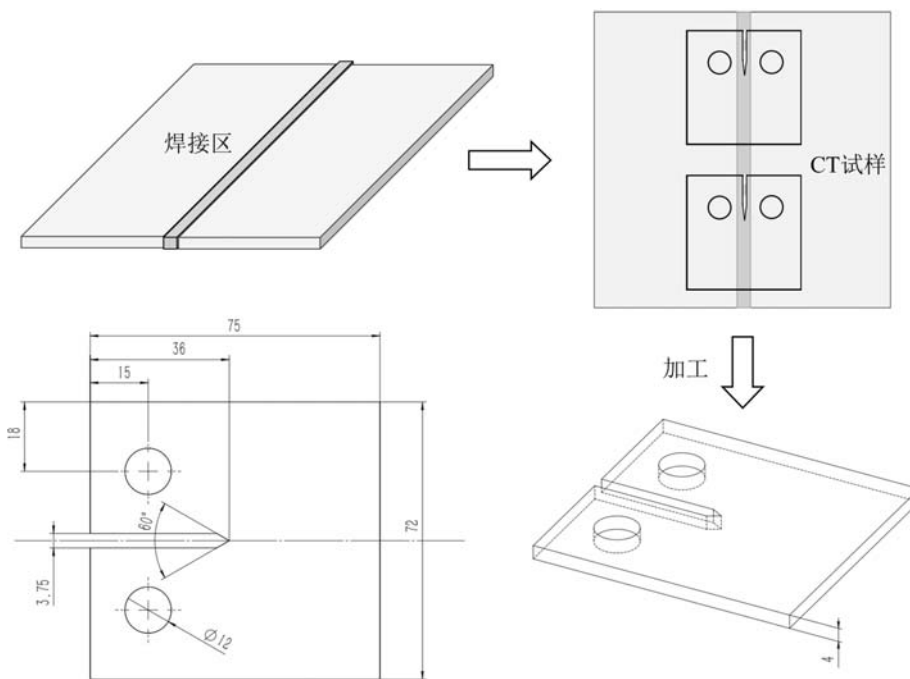


图 10 焊接紧凑拉伸试件的设计和加工过程(单位:mm)^[31]

Fig. 10 Design and machining process of welded compact tension specimens(unit: mm)^[31]

基于实验获得的位移场数据,可以采用 Williams 公式进行断裂力学参数反演,Williams 公式的极坐标表达式为^[32]

$$\begin{cases} u_i = \frac{1}{2G} \sum_{n=1}^m a_n r_i^{\frac{n}{2}} \left[\left(k + \frac{n}{2} + (-1)^n \right) \cos \frac{n}{2} \theta_i - \frac{n}{2} \cos \left[\frac{n}{2} - 2 \right] \theta_i \right] + u_0 - \alpha r_i \sin \theta_i \\ v_i = \frac{1}{2G} \sum_{n=1}^m a_n r_i^{\frac{n}{2}} \left[\left(k - \frac{n}{2} + (-1)^n \right) \sin \frac{n}{2} \theta_i + \frac{n}{2} \sin \left[\frac{n}{2} - 2 \right] \theta_i \right] + v_0 + \alpha r_i \cos \theta_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: $G = E/2(1 + \mu)$ 为剪切模量, E 和 μ 分别为材料的杨氏模量及泊松比; m 为 Williams 公式的多项式展开阶数; a_n 为通过最小二乘法拟合的待定系数; u_0 、 v_0 为刚体位移; u_i 、 v_i 为第 i 个像素点的横向和轴向位移; $k = (3 - \mu)/(1 + \mu)$ 为平面应力假设条件下的 Kolosov 常数; r_i 、 θ_i 为原点在裂纹尖端的第 i 个像素点的极坐标值:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, \theta_i = \arctan \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0} \quad (2)$$

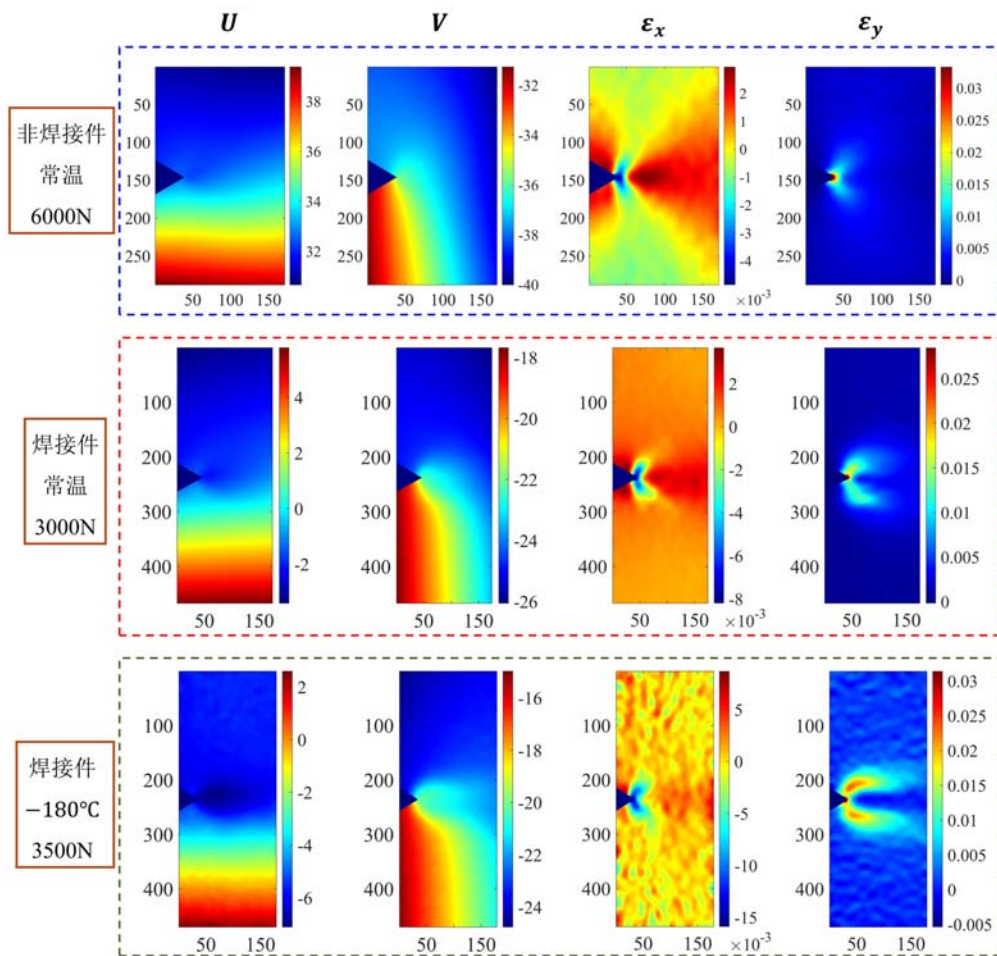


图 11 不同实验条件下的裂纹尖端附近位移场和应变场(位移场单位为 pixel,应变场单位为 pixel/mm)

Fig. 11 Displacement and strain fields near the crack tip under different experimental conditions (displacement field in pixel, strain field in pixel/mm)

根据拟合位移场的选择区域,选取合适的多项式展开阶数^[33]。本研究中采用的展开阶数 $m=3$, 通过多项式拟合可以得到待定系数,从而计算得到实验应力强度因子 K_{Ie} ,其表达式为^[34]

$$K_{Ie} = \sqrt{2\pi} a_1 \tag{3}$$

在实验结果的计算中,考虑到裂尖塑性区对应应力强度因子结果的影响,需要去除裂尖一定区域,以载荷为 3000N 的常温加载状态为例,位移场和 SIF 的计算范围及去除裂尖塑性区前后的位移场如图 12 所示。

针对实验采用的紧凑拉伸试件构型,得到其理论应力强度因子 K_{It} 的计算公式为^[35]

$$K_{It} = \frac{P}{B \sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \tag{4}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 29.6 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{1}{2}} - 185.5 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}} + 655.7 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{5}{2}} - 1017.0 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{7}{2}} + 638.9 \left(\frac{a}{W}\right)^{\frac{9}{2}} \tag{5}$$

式中: P 为所施加的载荷; B 为试件的厚度; a 为裂纹长度; W 为试件宽度。

由图 13 理论和实验计算得到的应力强度因子 K_{It} 和 K_{Ie} 对比可知,当载荷较小时, K_{It} 和 K_{Ie} 变化保持一致,裂尖塑性区对 SIF 的计算结果影响较小;当载荷过大时,裂纹尖端塑性区的影响占据主导地位,导致实验结果高于理论值,结果失真,因此只有载荷在一定范围内才可以从实验获得准确的 SIF。常温条件下,满足小范围屈服的最大载荷为 1400N, -180°C 低温环境下,紧凑拉伸试件发生低温脆化,强化后的模量为 58GPa,泊松比为 0.3,相比于常温实验结果,低温环境下测得的 SIF 较低,此时满足小范围屈服的最大载荷为 2000N。

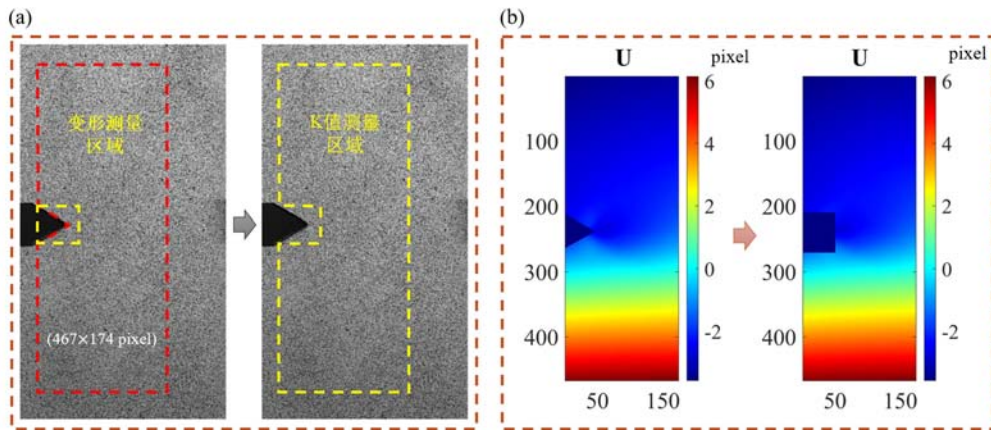


图 12 (a)位移场计算区域和裁剪裂尖塑性区后获得的 SIF 计算范围;
(b)裁剪前后的位移场 U (室温条件,载荷值为 3000N)

Fig. 12 (a) the calculation area of displacement field and the SIF calculation range obtained after cutting the plastic zone of crack tip; (b) displacement field U before and after cutting (at room temperature, the load value is 3000N)

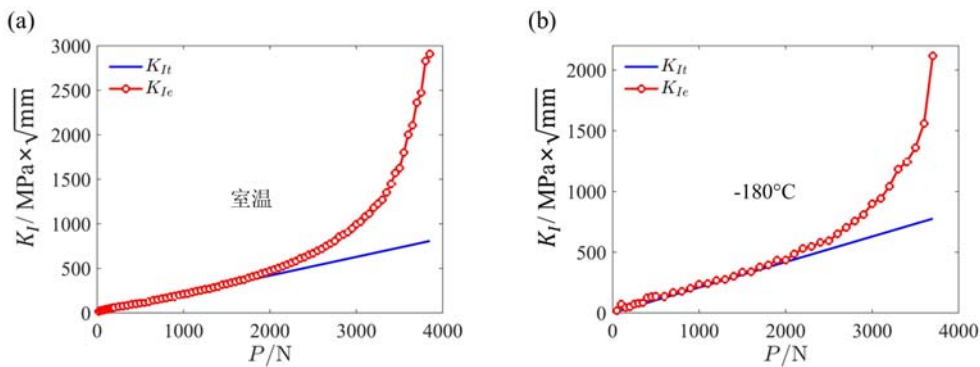


图 13 (a)常温环境下焊接件 SIF 随温度的变化;(b)-180°C 低温下焊接件 SIF 随着温度的变化
Fig. 13 (a) the variation of SIF of weldment with temperature at room temperature;
(b) variation of SIF of weldment with temperature under low temperature of -180°C

3 结论

本文主要针对低温数字图像相关方法中的制斑技术及其应用开展研究,主要结论如下:

(1)为解决低温 DIC 测试中散斑载体的失效问题,提出 2 种可耐受超低温测试环境的制斑工艺,分别为刻蚀喷涂法和基于 PTFE 衬底的喷涂法,并通过 -180°C 下的单轴拉伸实验对散斑性能进行检验。实验结果表明,试件拉伸至断裂前,2 种散斑载体均具有良好的稳定性,未发生衬底的开裂和散斑脱落现象,同时具有良好的灰度对比度。

(2)为避免结霜对低温测试结果的干扰,使用 13X 型号的分子筛对低温实验箱进行深度干燥,并循环实验箱内的气流,减少了试件表面霜的附着,由此可降低结霜带来的图像噪声,并提升散斑图像的质量,进而提高低温测试的精度。

(3)结合本文提出的基于 PTFE 衬底的喷涂法,在铝合金 2219 焊接件表面制备低温散斑,并对其进行单轴拉伸测试。常温和 -180°C 下的测试结果表明,低温会引起材料弹性模量的提高,在焊接区域更加显著。

(4)采用相同的制斑工艺,对铝合金 2219 紧凑拉伸焊接件进行断裂力学分析。通过 DIC 获取单轴拉伸过程中裂纹尖端的位移场数据,并结合 Williams 公式进行应力强度因子的反演。对比常温和 -180°C 下的测试结果可知,低温下材料的应力强度因子呈递减趋势,并可以在更大的载荷下满足小范

围屈服。

参考文献:

- [1] Dong Y L, Pan B. A review of speckle pattern fabrication and assessment for digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2017, 57(8):1161–1181.
- [2] Pan B. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(8):082001.
- [3] 潘兵, 吴大方, 夏勇. 数字图像相关方法中散斑图的质量评价研究[J]. *实验力学*, 2010, 25(2):120–129 (PAN Bing, WU Dafang, XIA Yong. Study of speckle pattern quality assessment used in digital image correlation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2010, 25(2):120–129 (in Chinese))
- [4] 代树红, 马胜利, 潘一山, 等. 基于数字散斑相关方法测定 I 型裂纹应力强度因子[J]. *实验力学*, 2013, 28(2):269–276 (DAI Shuhong, MA Shengli, PAN Yishan, et al. Determination of mode I stress intensity factors by digital speckle correlation method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(2):269–276 (in Chinese))
- [5] 邵新星, 陈振宁, 戴云彤, 等. 数字图像相关方法若干关键问题研究进展[J]. *实验力学*, 2017, 32(3):305–325 (SHAO Xinxing, CHEN Zhenning, DAI Yuntong, et al. Research progress of several key problems in digital image correlation method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(3):305–325 (in Chinese))
- [6] Gioacchino F D, Fonseca J Q D. Plastic strain mapping with sub-micron resolution using digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2012, 53(5):743–754.
- [7] Lionello G, Cristofolini L. A practical approach to optimizing the preparation of speckle patterns for digital-image correlation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(10):107001
- [8] Yang J, Tao J L, Franck C. Smart digital image correlation patterns via 3D printing[J]. *Experimental Mechanics*, 2021, 61(7):1181–1191.
- [9] 陈振宁, 邵新星, 吴家林, 等. 水转印数字散斑场用于人体颈动脉全场测量[J]. *光学学报*, 2017, 37(3):237–242 (CHEN Zhenning, SHAO Xinxing, WU Jialin, et al. Full-field deformation measurement of human carotid artery based on water transfer printing speckle patterns[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3):237–242 (in Chinese))
- [10] 朱奇, 郝文峰, 陈雷, 等. 微尺度散斑制备方法研究及应用进展评价[J]. *实验力学*, 2018, 33(1):77–84 (ZHU Qi, HAO Wenfeng, CHEN Lei, et al. On the fabrication method of micro-scale speckle and evaluation of its application progress[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(1):77–84 (in Chinese))
- [11] 段淇元, 宫文然, 郭保桥, 等. 高温数字图像相关方法中的制斑和图像处理技术[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2019, 59(6):425–431 (DUAN Qiyuan, GONG Wenran, GUO Baoqiao, et al. Techniques of speckle fabrication and image processing for high temperature digital image correlation[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2019, 59(6):425–431 (in Chinese))
- [12] 乔美霞, 潘志伟, 黄生洪, 等. 真空环境下钨材料高温形变的数字相关测量技术研究[J]. *实验力学*, 2020, 35(4):557–566 (QIAO Meixia, PAN Zhiwei, HUANG Shenghong, et al. Investigation on digital image correlation measurement technique for high temperature deformation of tungsten materials in vacuum environment[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2020, 35(4):557–566 (in Chinese))
- [13] 赵丽娜, 贺平照, 邢树根, 等. 基于数字散斑技术的炭/炭复合材料高温应变测量[J]. *固体火箭技术*, 2014, 37(5):729–733 (ZHAO Lina, HE Pingzhao, XING Shugen, et al. Strain measurement of carbon/carbon composites at high temperatures by digital speckle correlation method[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2014, 37(5):729–733 (in Chinese))
- [14] Pan Z, Huang S, Su Y, et al. Strain field measurements over 3000°C using 3D-digital image correlation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 127:105942.
- [15] Alharake M-R, Fazilleau P, Godfrin A, et al. Full-field displacement measurement method of metal-as-insulation pancake at liquid nitrogen temperature [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2022, 32(4):1–5.
- [16] 梁准, 张颖晗, 高原, 等. 低温下 2219 铝合金贮箱焊接缺陷的试验与仿真分析[J]. *强度与环境*, 2021, 48(5):52–57 (LIANG Zhun, ZHANG Yinghan, GAO Yuan, et al. Experiment and simulation analysis for weld defected 2219 aluminum alloy tank at low temperature[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2021, 48(5):

- 52–57 (in Chinese))
- [17] 王浩, 孙翠茹, 张晓川, 等. 基于数字图像相关方法的 TiO_2/PI 纳米杂化薄膜低温力学性能研究[J]. 实验力学, 2018, 33(3): 343–351 (WANG Hao, SUN Cuiru, ZHANG Xiaochuan, et al. Study of low temperature mechanical properties of TiO_2/PI nano-hybrid thin film based on Digital Image Correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(3):343–351 (in Chinese))
- [18] Zhang H C, Huang C J, Huang R J, et al. Liquid helium free cryogenic mechanical property test system with optical windows[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017.
- [19] Zhou J, Su Y, Xu G, et al. Study on mechanical properties of welded structures in ultra-low temperature environment based on DIC [C] // Sixth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Applications, 2020:670–680.
- [20] 丁会明, 吴英哲, 郑津洋, 等. S30408 焊接接头低温力学性能试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(2): 217–223 (DING Huiming, WU Yingzhe, ZHENG Jinyang, et al. Experimental study on low-temperature mechanical properties of S30408 welded joints[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(2):217–223 (in Chinese))
- [21] Zhao W, Feng G, Leira B J, et al. Static and cyclic behavior of welded DH36 steel and its application at low temperatures [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2022, 144(1):011701.
- [22] Oh D, Song S, Kim N, et al. Effect of cryogenic temperature on low-cycle fatigue behavior of AISI 304L welded joint [J]. Metals, 2018, 8(9):657–670.
- [23] Liao X, Wang Y, Wang Z, et al. Effect of low temperatures on constant amplitude fatigue properties of Q345qD steel butt-welded joints [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 105:597–609.
- [24] Li Z, Zhang D, Wu H, et al. Fatigue properties of welded Q420 high strength steel at room and low temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2018, 189:955–966.
- [25] Blaber J, Adair B, Antoniou A. Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software [J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(6):1105–1122.
- [26] Wu L, Yin Y, Zhang Q, et al. Bi-prism-based single-lens three dimensional digital image correlation system with a long working distance: methodology and application in extreme high temperature deformation test [J]. Science China Technological Sciences, 2017, 61(1):37–50.
- [27] Wu L, Zhu J, Xie H. Single-lens 3D digital image correlation system based on a bilateral telecentric lens and a bi-prism: validation and application [J]. Applied Optics, 2015, 54(26):7842–7850.
- [28] Li H, Zou J S, Yao J S, et al. The effect of TIG welding techniques on microstructure, properties and porosity of the welded joint of 2219 aluminum alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 727:531–539.
- [29] Bai R, Jiang H, Lei Z, et al. Virtual field method for identifying elastic-plastic constitutive parameters of aluminum alloy laser welding considering kinematic hardening [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 110: 122–131.
- [30] Bai R, Wei Y, Lei Z, et al. Local zone-wise elastic-plastic constitutive parameters of laser-welded aluminium alloy 6061 using digital image correlation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 101:28–34.
- [31] E647-15e1 standard test method for measurement of fatigue crack growth rates[S]. ASTM International, 2015.
- [32] Yoneyama S, Morimoto Y, Takashi M. Automatic evaluation of mixed-mode stress intensity factors utilizing digital image correlation [J]. Strain, 2006, 42(1):21–29.
- [33] Mokhtarshirabad M, Lopez-Crespo P, Moreno B, et al. Evaluation of crack-tip fields from DIC data: a parametric study [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 89:11–19.
- [34] McNeill S R, Peters W H, Sutton M A. Estimation of stress intensity factor by digital image correlation [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1987, 28(1):101–112.
- [35] 沈成康. 断裂力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996:104–107 (SHEN Chengkang. Fracture mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1996:104–107 (in Chinese))

Techniques of speckle fabrication and its application for low temperature digital image correlation

GENG Chuanqing¹, LI Yangyang¹, LIU Han², XIE Huimin¹

(1. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076)

Abstract: Digital image correlation (DIC) is a full field deformation measurement technique based on speckle carrier. The fabrication of speckle carrier is the key to realizing deformation measurement, and there are a series of speckle fabrication methods such as spraying, etching, and transferring. The low-temperature experimental tests show that the brittleness effect occurs at low temperature, which leads to the carrier cracking and falling off easily when it is subjected to large deformation, resulting in large errors in the deformation measurement. In addition, the measurement results are also affected by frosting and airflow disturbance, so it is urgent to develop the low temperature speckle fabrication process. Combined with relevant requirements, this paper has developed two low temperature speckle making processes: the etching spraying method and the spraying method based on polytetrafluoroethylene (PTFE) substrate. The obtained speckle has good stability under low temperature conditions. In the low temperature verification experiment, the speckle carrier did not crack and fall off until the specimen broke; The 13X molecular sieve drying method was used to solve the problem of frost formation in low-temperature measurement and reduced the image noise caused by frost formation. The developed low temperature speckle fabrication process has been successfully applied to the low temperature mechanical property test and fracture mechanics parameter inversion of weldments. The tensile test results at room temperature and -180°C show that the elastic modulus of materials increased and the stress intensity factor (SIF) decreased at low temperatures.

Keywords: low temperature; digital image correlation; speckle fabrication; welding; parametric inversion