

V216
1

恶劣环境和高温测量技术

吴宗岱 张秀珍 等译校



内 容 提 要

本书较全面地介绍了近年来在恶劣环境和高温测试方面所做的工作,包括恶劣环境下的材料试验,高温应变和位移测量,高温、高压和多轴向引伸计技术等。既展示了现状,水平,又报道了发展动向,还介绍了测试设备及方法,是广大测试工作人员的良好参考书。

恶劣环境和高温测量技术

吴宗岱 张秀珍 等译校

航空工业出版社出版发行

(北京市和平里小关东里14号)

★ 全国各地新华书店经售

北京市通县向阳印刷厂印刷

1988年12月第1版

1988年12月第1次印刷

787×1092毫米1/32

印张: 4.53

印数: 1—2500

字数: 102千字

ISBN 7-80046-060-6/Z·018

定价: 1.60元

前 言

航空航天事业的飞速发展，要求航空器和航天器的许多构件在高温及其他恶劣环境(如高压、真空、有害气体等)中工作。为适应这种需要，研制了各种新材料(如碳复合材料、陶瓷等)，而测量这些构件在恶劣环境中的应变应力状态及材料性能就成为迫不及待的任务。

在我国，航空测试的重要性越来越为更多的有识之士所认识。为适应我国航空测试界及关心航空测试工作的广大读者的需要，我们翻译了美国实验力学学会第四届恶劣环境及高温测试会议文集。本文集全面介绍了近年来在恶劣环境和高温度测量方面所做的主要工作、现状、水平、发展动向以及测试设备和方法等，对我国从事航空、航天事业的领导机关、研究单位、高等院校和工厂等很有参考价值，对其他行业从事这个专业的测试工作人员也是一本良好的参考书。

本书的译、校工作主要由吴宗岱、张秀珍承担，参加翻译的还有梁凯、凌志勤、王崇明、季萍、赵林豹，参加校对的还有蒋寅元。丛选超审阅全书。本书的出版得到部机载设备局有关同志的大力支持，特致谢意。

由于水平所限，不足之处在所难免。敬请读者指正。

译 者

1988年1月

目 录

高温云纹法	1
用光学技术测量高温应变	11
应变计温度补偿的双元件法	26
用达700°C和800°C的温度补偿电阻应变计性能比较	33
双轴热-机械疲劳	41
NASA 刘易斯研究中心高温疲劳和结构实验室	48
铸造镍合金在氢气中的低周疲劳	68
对附着在碳复合材料衬底上箔式应变计的表观应变的实验 评价	75
高温碳复合材料用应变/温度计和安装系统的研制	88
高压多轴向引伸计	108
用到1200°C的轴向-扭转引伸计	121
在岩石力学中采用直接接触的引伸计测量变形	131
附录	141

高温云纹法

〔美〕G. Cloud 〔加〕M. Bayer

摘 要

在高达1370°C的温度下研究超耐热合金的应变时，采用了一种利用高分辨率栅的照相技术，光学付里叶变换和条纹图象数字处理的云纹技术。试件栅是通过将每毫米40线的镍网粘贴在涂有薄层耐温漆的表面制成的。

引 言

对那些必须在高温下和恶劣环境中长时间工作的机械部件需要进行应变测量。常规的应变分析方法难于完成此任务，特别对于温度高于数百摄氏度以上需要长时间稳定性的情况更是如此。对于现场研究(例如涡轮发动机)以及全场应变图的要求进一步使得情况变得复杂起来。分析人员必须经常使用一些综合方法，即使在他对数据的需要和实验力学技术所能提供的有限的手段之间能够妥善解决时，亦是如此。

一种新的云纹技术对于在这些困难情况中的测量具有吸引力，因为它具有远距离的不接触的本领，可以自行校准的特点，以及在人们乐于采用的微分形式下使用很方便。一般说来，它不致经受由于材料的不匹配、相似性或温度效应

产生的误差。在相当完善的云纹技术中，当完成了试验并且原始数据在玻璃照相底板上永久记录下来之后，它的灵敏度可以在宽广的范围内变化。即使试验不能重复或者试件已损坏，对于试件的若干不同状态制出了数据底板，则每一状态的底板可以与另一状态的底板成对进行微分研究。这种方法是全场的，并且容易同时得到三个位移分量，因而易于表征试验对象表面上的或在一个合适的透明体内多个平面上的应变张量。

当然，即使在其高度发展状况下，云纹方法仍然有困难的问题。最麻烦的是需要对光学信息的存取。需要处理和再现线和点的栅格图象也被看成是一个不利因素，因为牵涉到重要的技艺，这必须通过学习和令人沮丧的试验中学会。即使借助于计算机器，将条纹图处理成应变也是麻烦的；由于必须将实验的原始模拟数据进行微分，误差的扩展也可能是严重的。

云纹技术

在讨论云纹技术时，必须对常规的粗云纹、高灵敏度云纹干涉法以及利用衍射、干涉和付里叶光学的某些方面的混合技术加以区别。

这种混合技术是由克劳德(Cloud)和他的同事们所发展并在不同的应用场合加以利用的^[1-6]。这种技术包含用一改进的照相机以得到高分辨率的栅的照片，对适合的栅照片获得的位移条纹进行光学付里叶变换，并对条纹图进行数字处理以确定应变图形。别的研究人员(例如[7-10])也曾利用云纹方法进行高温应变分析，但他们没有使用两步的高分辨

率栅格再现和看起来特别适用于这种困难应用场合的光学处理方法。这种改进的方案已在温度高达 1370°C 的不同现场应用场合中使用。

试件栅

高温云纹法的一个基本的要求是得到在试验周期中能够始终进行照相的试件栅。实际上，栅能够存活是在困难的环境中使用云纹方法的主要难点。基于光刻印刷和真空沉积贵金属以生产适于在 600°C 下达1000小时的栅的某些技术曾有过介绍^[11]。这种栅曾经进一步试验过，发现它在 700°C 时仍能存活。然而，在 820°C 时，每一个真空沉积的贵金属栅就完全损坏了。

本文作者最近发展了一种能够用到 1370°C 的双向试件栅的技术⁽⁴⁾。这种方法使用了耐温陶瓷漆(Big Three工业公司Tempil公司生产的Pyromark2500)，它是上述文献(11)中介绍的沉积膜栅中所使用的。在这种新技术中，这种漆是作为防护陶瓷层，可以增强反差，并且用做镍网栅的粘结剂，这是一种最好的办法。

用一气动刷将漆喷涂到试件的表面上，随后用一聚四氟乙烯条将一片每毫米40线(每英寸1000线)的镍网(明尼苏达州St. Paul市的Buckbee Mears公司产品)压到漆中，聚四氟乙烯条可以使漆不粘于其上，漆层的厚度应为 $3\sim 4\mu\text{m}$ 以防开裂。漆中的粉粒，易脆镍网的运用和得到可以适于工作的漆的粘度，喷射距离及空气压力的组合是一种复杂的事情，必须从良好的技术与试验中找出。

为了能够更好地拍摄出照片，镍网最好埋留在陶瓷漆层

中,当漆在加热完全固化以前,也可以将镍网从漆层中剥离。这样就留下一序列陶瓷小方块组成的图形,当光斜向照射时,它非常容易看出来。

试 验

上述的栅被制出来以便对具有或没有缺口的涡轮机超耐热合金板状拉伸试件的表面应变分布进行测量。每一个带栅的试件被安装到如图1所示的液压伺服试验机上。试件由射频感应加热发生器的水冷螺旋管所环绕。在测量部位,螺旋管圈之间留有空间,允许光学信息的取得,如图2所示。试件的温度由焊在测量部位反面的热电偶监测。



图 1-1 装有高分辨率照相机的试验机



图 1-2 安装好的有感应加热螺旋管的试件

将带有 120mmf5.6 蔡司S-平面镜头(调到最佳约为5:1共轭值)的加固Horseman观测照相机用最大光圈以1:1.02

对试件栅照相。对于这种高分辨率的应用，焦距和对准极为关键。用一个可以平行于感光乳胶平面移动的显微镜以便对栅在全部范围内聚焦。照相机的底座和试验机装在橡胶垫上以减少振动。为了进一步减小振动、对流和从灼热试件的背景辐射的影响，将两个闪光灯用于照相时照明。将它们分别在平行和垂直于试件栅的平面内离轴约 45° 放置，以使试件栅能有最大的清晰度。

栅的拷贝是记录在高分辨率的 Agfa 10E56 型或其相当的全息照相底板上。由于试件是在这不可逆的试验中变形，因而要在不同的温度和载荷阶段分别在不同的底板上照出相片以求应变场的发展过程有全面的记录。例如，在一次试验中，分别在 870°C 、 1090°C 、 1230°C 和 1370°C 进行照相。钢试件在这最高温度时会熔化，最后一个可用的底板是在测量部位刚要熔化时获得的。

图 3 所示为一埋有镍网的栅在试验前的显微照片。图 4 为该栅在暴露于 1230°C 后的显微照片。请注意该栅显然没有什么损坏。



图 1-3 埋有镍网的每毫米40线陶瓷栅在试验前的显微照片

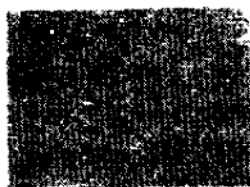


图 1-4 埋有镍网的每毫米40线陶瓷栅在 1230°C 试验后的显微照片

图 5 为没有镍网的陶瓷栅在室温下经受 30% 的应变后的显微

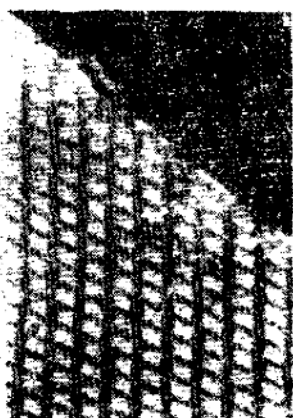


图 1-5 每毫米 40 线陶瓷栅在室温与大应变试验后的显微照片

照片。虽然经受过极大的应变，陶瓷栅仍然粘附良好。陶瓷漆层的小方块在高应力集中区已变成平行四边形。实际上，可以直接从这些显微照片在适当的灵敏度水平内确定出剪应变和正应变的大小。这一研究结果提出一个比较方案进行云纹处理，以从栅格的照相底片确定应变。

在试件上完成了试验程序之后，将显影后的栅格记录与基准栅迭合放置在一如图 6 所

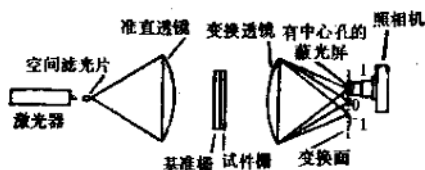


图 1-6 从栅的照相底板获得云纹条纹的相干光学处理系统的示意图

示的相干光学付里叶变换系统中，以消除光学噪声并产生云纹条纹图象。通常，在这阶段采用对节距错动一合意的大小和符号，以改善插值的能力。在图 7 中复制出某些典型的条纹图象。将这些图象处理成应变曲线是一已经研究得很好的程序，它上面引用的参考文献中已作过叙述。这一过程要求将条纹图象成对处理，以使在图象的差别中，透镜失真，原



图 1-7 不同试验条件的典型云纹条纹图象

- a. 在室温与无载荷时的基线图象
- b. 相同试件在1090°C与无载荷时
- c. 在1230°C下加载时

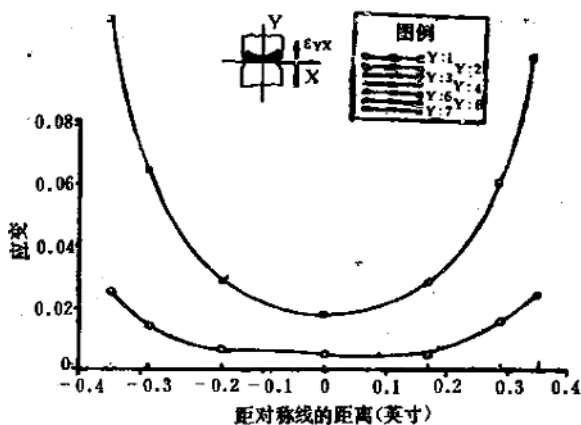


图 1-8 870°C时两种载荷的应变曲线

始条纹图象,微小的起始载荷等影响都可以消除。图8表示所得到的应变曲线的实例。对于研究材料的特性、应力集中和晶粒边界效应,其质量与灵敏度是合用的。

结 论

在温度至少达到 1370°C 时可以进行实用的全场非接触云纹应变测量。采用每毫米40线的云纹栅能够得到中等灵敏度,这对于涡轮机合金在大应变范围内进行研究是足够的。有三种提高灵敏度的办法:一是在光学处理栅记录时使用条纹倍增技术^(3,12,13);二是照相时使用开槽的光阑以使实际的栅的密率可以成倍增加,这就象Cloud已指出的那样⁽¹⁴⁾;三是采用较密的栅。实际上,照相复制试件栅大致限于每毫米60或80线栅,除非视场缩小了和/或可以得到较佳的光学系统。从上面提到的来源可以得到这些线条密度的镍栅。使用条纹倍增和/或栅线倍增的同时采用较密的栅,可以做到:在使用精心的技术并接受对复盖表面上的某些限制时,应能将灵敏度扩大到大的弹性应变水平。

参 考 文 献

1. Cloud, G. L., Residual Surface Strain Distributions Near Holes which are Coldworked to Various Degrees, Air Force Materials Lab Tech Report AFML-TR-78-153, Wright-patterson AFB, Ohio, Nov 1978.
2. Cloud, G. L., "Measurement of Strain Fields Near Coldworked Holes," Exp. Mech., 20, 1, 9-16 (Jan

1980)

3. Cloud, G. L., "Simple Optical Processing of Moire Grating Photographs, "Exp. Mech., 20, 18, 265—271(Aug 1980).
4. Bayer, M., Cloud, G., "Moire to 1370.C. " Proc. 1986 SEM Spring Conference on Experimental Mechanics, New Orleans, LA, June 1986.
5. Bayer, M., Moire Strain Measurements in the Temperature Range of 1600°F to 2500°F (870 to 1370 °C), Studien Arbeit for RWTH Aachen, West Germany, Michigan State University, East Lansing, MI, Feb. 1985.
6. Cloud, G., Sikarskie, D., Mahajerin, E., Herrera Franco, P., Theoretical and Experimental Analysis of Mechanically Fastened Composites, Army Tank and Automotive Command Tech. Report. No. 13004, TACOM, Warren, MI, 48090, July 1984.
7. Straka, P., Pindera, J.T., "Application of Moire Grids for Deformation Studies in a Wide Temperature Range, "Exp. Mech., 14, 5, 214, May 1974.
8. Durelli, A. J., Buitrago, J., "Residual Strains in a Stainless Steel Plate with a Circular Hole and Subjected to Reverse Loading at Elevated Temperature, " Pressure Vessels and Piping, ed by Corrum and Wright, ASME, 1975.
9. Johnson, L., "Moire Techniques for Measuring Strains During Welding", Exp Mech., 14, 4, 145—151, April 1974.

10. Rao, R.K., Sciammarella, C.A., "Fracture Study of Stainless Steel Rings at 1100°F, "NSF Report 77-1, Dec.1977.
11. Cloud, G., Radke, R., Peiffer, J., "Moire Gratings for High Temperatures and Long Times", Exp. Mech., 19, 10, 19N-21N, Oct, 1979.
12. Post, D., "Analysis of Moire Fringe Phenomena", App.Opt., 6, 11, 1938, Nov.1967.
13. Post, D., "New Optical Methods of Moire Fringe Multiplication", Exp. Mech., 8, 2, 63-68, Feb. 1968.
14. Cloud G., "Slotted Apertures for Multiplying Grating Frequencies and Sharpening Fringe Patterns in Moire Photography", Opt. Eng., 15, 6, 578-582, Nov.1976.

用光学技术测量高温应变

〔美〕 C. A. Sciammarella

摘 要

日益增多的在高温下使用材料的技术要求已经引起了用光学技术测量高温应变新的兴趣。本文评述了云纹、散斑和全息干涉法领域的发展现状，也考虑了构成这种特殊类型应用的实践和基础理论两方面的问题；同时分析了在这些技术的资料积累容量方面恶劣环境的影响，给出了用光学技术进行高温测量的现状的综合评价。

引 言

日益增多的在高温使用材料的技术要求已经引起了利用光学技术测量应变的新兴趣。我们将集中讨论提供位移和应变数据的现场技术云纹法、全息干涉法及散斑干涉法。这里有一些共同的问题也有各自需要专门讲解的问题。

最早的参考文献之一是p.登图(Dantu)的著作⁽¹⁾。焊接铝板和钢板产生的残余应力在用云纹法确定的，云纹图是在钢板冷却之后在室温下记录下来的。斯萨姆马雷勒和罗斯⁽²⁾、斯萨姆马雷勒和斯特金⁽³⁾和西奥卡里斯(theocar's)⁽⁴⁾应用云纹法对热应力场进行了研究，西奥卡里斯和科罗尼尔斯

(koroneos)⁽⁵⁾则应用云纹法确定力学特性。有关在高温下应用云纹法的进一步介绍见参考文献〔6〕至〔12〕。在全息干涉法方面有埃文森等人的早期著作^{〔13〕}。在散斑干涉法方面,最早是戴克斯特(Dacosta)等人^{〔14〕}将这种技术应用到热场中。最近,我们得到卡尔斯特森^{〔15〕}的很有趣的著作。未来的研制工作的很多趋向是由洛克伯格(Lokberg)等人在有关电子散斑图干涉法著作中提出的^{〔17〕}。

高温云纹图的记录

为了了解在高温时记录条纹图所出现的问题,有必要看一看热表面的发射功率。按照柯克霍弗(kirch hof)定律,在给定波长的辐射能量不决定于所涉及的特定物质而是取决于它的绝对温度。柯克霍弗定律应用于黑体,在实际材料中辐射的能量取决于表面的发射率,它是物质、温度、波长、表面状态及在空间的方向的函数。在金属中,可以取相应于黑体的谱分布当作第一级近似并使用小于1的发射率,黑体的辐射谱可以用普兰克的方程式获得。

表面辐射能量提高了平均的或背景明暗度,但降低了由下式确定的条纹可见度,

$$r = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

式中, $I_{\max}$ 是场中较亮点的亮度, $I_{\min}$ 是最小亮度。这个问题可以为记录图形所用激光波长和激光功率的函数分析出来。为了提高条纹可见度,有必要采用一个与照亮试件所用的激光器波长相应的滤波器。在适宜的波长和带宽下,滤波器的谱具有最大的可传输性。一个好的滤波器在50%的峰值

处典型带宽为 10nm。希望达到的对比度损失的大致计算可用下述方法完成。对给定的温度和给定的波长，黑体发射的能量可从表⁽¹⁸⁾获得。表中提供了值

$$E_{0\lambda} = \int_0^{\lambda} E_b d\lambda \quad (2)$$

式中， E_b 是在给定波长和给定温度下的能量， $E_{0\lambda}$ 是直到相应波长的总能量。如果我们引入滤波器的带宽 $\Delta\lambda$ ，则

$$E_{0\lambda 1} = \int_0^{\lambda_0 - \Delta\lambda/2} E_b d\lambda \quad (3)$$

$$E_{0\lambda 2} = \int_0^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} E_b d\lambda \quad (4)$$

带宽内的能量由式(3)和式(4)之差给出

$$\Delta E = \int E_{0\lambda 2} - E_{0\lambda 1} \quad (5)$$

称 ε 为表面发射功率， E_s 为照射表面的能量密度，

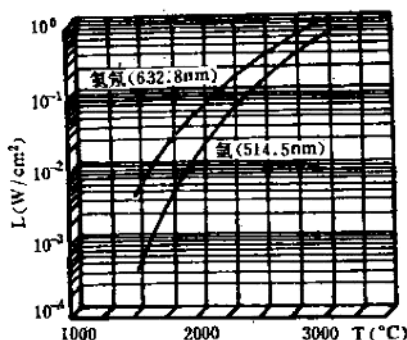


图 2-1 随温度变化的黑体背景
辐射能量(发射率 $\varepsilon=1$)