

承压设备蠕变损伤的无损评价技术

徐北琼,周新华,邓 捷

(合肥通用机械研究院,合肥 230031)

摘 要:在高温环境下运行的承压设备,随着运行时间的增加,存在蠕变失效的可能性。经常出现蠕变损伤的承压设备有高温环境下工作的电站锅炉承压部件、主蒸汽管道和石化装置中的转化炉管等。在评价承压设备寿命的时候,定量确定材料的损伤程度非常重要。在国内外文献研究的基础上,综合分析了承压设备蠕变破坏早期损伤的无损评价方法。得出研究早期蠕变损伤的无损检测方法是评价设备损伤程度,预测设备寿命的重要课题。

关键词:蠕变损伤;无损评价;高温环境;承压设备

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2009)05-0371-03

Nondestructive Evaluation Techniques of Creep Damage in Pressure Equipment

XU Bei-Qiong, ZHOU Xin-Hua, DENG Jie

(Hefei General Machinery Research Institute, Hefei 230031, China)

Abstract: With the increment of running time of running, the creep failure on pressure equipments which were under the high temperature environment could appear. Several pressure equipments, such as power station boiler, steam pipe, reformer tube of refinery, often suffered from creep damage under high temperature environment. To evaluate the life of the pressure equipments, it was highly significant to determine the damage level of the material. On the foundation of the domestic and foreign literature, this paper discussed the nondestructive method to evaluate the early stage failure of the pressure equipments caused by the creep damage. It is believed that the nondestructive evaluating, which focus on the creep damage of the early stage, is a significant topic in damage estimation and operational life prediction of the pressure equipments.

Keywords: Creep damage; Nondestructive evaluation; High temperature environment; Pressure equipment

在高温环境下承受载荷的金属材料,除了产生相应的弹性变形外,随着时间的增加,在高温和应力作用下会逐渐产生塑性变形,受力部件的这种与时间相关的变形称为蠕变。承压设备用金属材料只有当温度达到一定程度时,如碳钢在超过 300~350 ℃ 时,合金钢在超过 350~400 ℃ 时才会发生蠕变。

一般认为蠕变分为三个阶段,第一阶段为蠕变的不稳定阶段,金属材料以逐渐减慢的变形速度积累塑性变形;第二阶段为蠕变的稳定阶段,金属材料以恒定的变形速度进行变形;第三阶段为加速变形阶段,金属材料以加速方式变形,直至断裂。高温蠕

变性能是评价金属材料性能的重要指标。

蠕变会导致损伤,而损伤会最终导致断裂。产生蠕变的关键因素是温度和应力。表征蠕变发展的一个参数是蠕变变形速率,它是材料、载荷和温度的一个函数。蠕变损伤速率(应变速率)对载荷和温度都很灵敏。一般地,对不同材料来说,高于某一温度,就会发生蠕变损伤和蠕变开裂,对较高抗拉强度的材料和焊缝,这种现象更加严重;粗晶材料比细晶材料更可能发生,例如 CrMo 钢中的某些碳化物会促进蠕变的发生。

蠕变损伤的初始阶段只能通过扫描电子显微镜金相来识别。蠕变孔隙一般在晶界处出现,在较后期形成微裂缝,然后形成裂纹。可以观察到明显的变形,如转化炉管在发生最终断裂前可能遭遇长期

收稿日期: 2008-07-10

作者简介: 徐北琼(1957—),女,高级工程师,硕士,长期从事过程装备机械技术研究。

蠕变损伤,并呈现出明显的鼓胀,其变形量很大程度上取决于材料和温度在应力水平的组合。在容器和管道中,在高温下应力集中的区域可能发生蠕变开裂,这类蠕变开裂多发生在主要的结构不连续处,包括管道三通、接管或裂纹处的焊缝等位置,而蠕变开裂一旦萌生就会快速发展。

蠕变损伤是不可逆的。一旦检测到损伤或开裂,部件的大部分寿命就已经耗尽,一般需选择修复或更换损坏的部件。但是,随着技术的发展和生产竞争的加剧,生产的安全性和经济性的协调逐渐成为业主们关心的焦点。以转化炉管为例,其通常用于炼油、石油和化肥工业。炉管采用离心铸造方式制造,是一种耐热奥氏体钢(如 HK-40、HP-40 以及 HP)金属材料,通常设计寿命为 100 000 h。由于每根炉管价值数千美元,过早报废炉管或过迟更换炉管都会造成巨大的资金损失,因此,很多业主期望采用状态评价代替时间评价。很多转化炉使用超过了 100 000h,但鉴定其性能时发现,这些炉管的试样中有碳化物析出,但未发现蠕变空洞或裂纹,表明采用状态评价的方式延长转化炉管的寿命是可能的^[1]。无损或微损方法可用于代替破坏性检验的方法评价炉管剩余寿命。

1 蠕变损伤的检测技术

任何一种检验方法都不能有效地发现有关微孔形成、裂纹和尺寸变化的蠕变损伤。应组合采用几种无损或微损方法(如 PT, MT, UT, RT, EC, 尺寸测量和复膜金相),结合使用破坏性取样和金相检查来确认损伤^[2-4]。当制定检测评估计划时,必须考虑以下四个关键因素:

(1) 灵敏度 定量损伤检测技术的能力要大于需要获取的缺陷尺寸精度最小值。

(2) 覆盖率 检验技术所检查的区域覆盖了蠕变可能处于的位置。

(3) 可靠性 检测技术的可靠度(POD)和错误率(NFI)。

(4) 速度 对设备的检查需要在停车检修期内完成。

对于压力容器,检验应集中在蠕变范围内运行的 CrMo 合金的焊缝上。1Cr-0.5Mo 和 1.25Cr-0.5Mo 材料对低蠕变延展性特别敏感。大部分检验通过肉眼检查方式进行,然后每隔几年进行 PT(液体渗透检查)或 WFMT(湿性荧光磁粉检测)。虽然

蠕变损伤的早期阶段很难检测到,但也可以采用斜探头(横波)超声检测,记录制造过程中的缺陷图以备将来参考。

1.1 宏观检查

目测被检设备是否有鼓胀、鼓包、开裂、下垂和弧状弯曲现象,使用钢尺、千分尺或卡规等专用工具测量是否发生变形。例如,当炉管发生蠕变损伤时,炉管鼓胀,有经验表明,对材质为 HK-40 和 HP-45 的炉管,可允许的直径增量分别为 2%~3%, 5%~7%。但是,在一些案例中也显示,直径增大明显的炉管,其内部并未出现损伤,而管径增大<1%的管子却出现了明显的损伤,使用管径增大的方法(外径和内径)可以得到非常明显的炉管状态的指示。但是仅使用管径增大来测量蠕变损伤是远远不够的,有可能导致对炉管实际状态的严重误判。

1.2 超声测厚

当蠕变损伤(变形)发生时,壁厚减少是明显的,将超声测厚值与初始值进行比较,可以表明蠕变变形发生的数值。原始壁厚可以从原设计条件、竣工图纸及历次检验报告获得。但是,一旦出现微空洞、空隙或微裂纹,由于声波绕行,会出现壁厚增厚现象。因此若测量壁厚与原始壁厚不一致,应该引起高度的关注。

1.3 表面检查

采用渗透或磁粉检测方法是确定蠕变损伤是否出现严重情况的重要手段。渗透或磁粉方法检测设备表面非常有效,采用磁粉检测也可以发现近表面的蠕变裂纹;但对于管道或炉管内壁的蠕变裂纹,渗透或磁粉检测就无能为力了。

1.4 超声波检查

通过测量超声衰减来确定蠕变损伤是一种重要的技术。当蠕变造成微孔洞和起裂(微观和宏观)时,累积的蠕变损伤会吸收超声能量,特别是在蠕变损伤发生的早期阶段。

1.5 涡流检查

涡流技术利用电流的变化来检测缺陷。当被检材料的机械性能发生变化时,电流阻抗将发生变化。利用监测阻抗的变化,观察涡流信号参数的变化,并与类似已发生蠕变损伤的材料的变化进行对比,即可推断是否发生蠕变损伤。涡流的穿透深度主要受检测频率以及材料电导率和相对磁导率的影响。此外,适当的探头线圈设计对提高信噪比有重要影响。

涡流检测过程中,探伤人员评价信号变化的同

时还要注意下述因素:① 提离效应对信号响应的影响,如焊接和氧化皮会导致提高信号的响应。② 服役过程中,炉管因过热而形成铬迁移、氧化皮等,对涡流响应信号(相位、幅度)产生较大影响。③ 材料相对磁导率的变化造成的影响。

1.6 射线检查

随机射线检验通常可以作为辅助技术确认蠕变损伤的严重情况。如果损伤扩展到一定程度,如出现一定尺寸的蠕变裂纹时,X射线图像可以清晰地确定损伤的位置和程度。由于现场条件的限制,一般很少采用射线检测来确定早期的蠕变损伤。

1.7 复膜金相

复膜技术是一种现场检验外表面蠕变损伤的有效方法,可以用来检测过热引起的微观结构变化。复膜是点状评价,一般用作辅助技术,仅在蠕变损伤的发展阶段使用现场复膜技术。就炉管而言,因为损伤是在炉管内壁发生,对炉管外壁金相检测不会提供次表面损伤的清晰指示。但是,蠕变并不是高温损伤的唯一形式,复膜金相技术是发现渗碳、珠光体球化等材质劣化现象的最好方法。

(上接第 363 页)

70 kHz 左右的频率成分谱值的存在。③ 该板材的相同损伤机理频率对应的谱值幅度大小相近,且试件的频谱值均在裂纹失稳扩展时最大,最后断裂时刻有大幅度的降低。这样有理由将频谱峰值作为考察构件损伤程度的一个参数,而且该参数起伏比幅值大,这对于 AE 检测时及早发现构件严重损伤有重大意义。

4 结论

(1) 通过对板材试件拉伸断裂过程声发射撞击、能量、振铃计数参数随时间的变化分析,结合试件损伤过程的红外热图,在材料断裂力学性能的基础上,发现上述声发射参数能够很好地表征试件损伤过程。幅值与事件大小有直接关系,不但能够表征试件损伤过程,还能较好地描述其损伤机理。

(2) 分析声发射能量和持续时间图,发现试件在有较少的塑性变形及裂纹开裂情况下,能量同持续时间成 3 次方关系,该结论进一步证明声发射参数能够表征构件不同的损伤阶段。

2 讨论

高温环境下的蠕变损伤是承压设备出现失效的重要模式之一,研究早期蠕变损伤的检测方法是评价损伤程度,预测设备寿命的重要课题。目前任何一种检测手段都还不能达到理想的检测效果,只有在多种方法综合使用下方能得到较为理想的效果。研究空洞、空隙、微裂纹萌生和扩展的有效无损检测方法,不仅对于防止承压设备失效,避免重大安全事故的发生具有重要意义,而且应用前景也十分广阔。

参考文献:

- [1] Brian Shannon. Assessing Creep Damage in Cast Materials for High Temperature Reformer Tube Application[C]. ASME PVP2007/CREEP8 Conference. San Antonio, Texas, USA:[s. n.],2007.
- [2] 石油化工装置设备腐蚀与防护手册[M].北京:中国石化出版社,1996.
- [3] API RP 579—2007 Fitness for Service[S].
- [4] API RP 941—2004 Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants[S].

(3) 利用声发射监测某金属构件损伤过程,并对该材料的声发射撞击、能量、振铃计数、幅值和频谱值等进行深入分析,可以对该构件的损伤程度实现定量评估。证明了声发射技术在结构损伤预警和剩余寿命预测中有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 袁振明,马羽宽,何泽云.声发射技术及其应用[M].北京:机械工业出版社,1985.
- [2] 国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材编委会.声发射检测[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [3] Ennaceur C, Laksimi A, Herve C, et al. Monitoring crack growth in pressure vessel steels by the acoustic emission technique and the method of potential difference[J]. Pressure Vessels and piping,2006,83(3):197—204.
- [4] Vibhor Chaswal, Sasikala G, Ray S K, et al. Fatigue crack growth mechanism in aged 9Cr-1Mo steel: threshold and Paris regimes[J]. Materials Science and Engineering,2005,395(1—2):251—264.