

焊接结构合于使用评定技术

Fitness for Service Assessment of Welded Structures

北京航空航天大学 张彦华 夏 凡 段小雪



张彦华

工学博士,北京航空航天大学教授,主要从事焊接结构断裂控制与完整性工程分析等方面的教学与科研工作。

焊接结构以其整体性和轻量化优势在航空航天结构中得到广泛的应用,如何在经济可承受的条件下保证焊接结构的完整性是飞行器安全的关键之一。焊接结构的绝对完整往往是很难做到的,其完整程度被接受的准则是合于使用性(Fitness for Service, FFS),或者说其损伤程度不影响使用性能。合于使用评定又称工程临界分析(Engineering Critical Assessment, ECA),是以断裂力学、弹塑性力学及可靠性系统工程为基础的工程分析方法。焊接结构在制造及运行过程中不可避免地存在或

焊接结构的合于使用评定理论和方法已经发展成为一门重要的工程学科方向,是一项多学科交叉集成技术,具有综合性与科学性。其研究范围从断裂与疲劳评定向高温及腐蚀损伤、塑性极限分析、材料性能劣化、失效概率和风险评估等方面拓展。

出现各种各样的缺陷或损伤、材料组织性能劣化以及可能超出设计预期的载荷等因素对结构使用性能产生影响。特别是随着结构服役时间的增长,损伤的累积与扩展将破坏结构的完整性,进而威胁结构系统的安全性。在制造过程中结构出现了缺陷,根据“合于使用”原则确定该结构是否可以验收。在结构使用过程中,评定所发现的缺陷是否允许存在;在设计新的焊接结构时,规定了缺陷验收的标准。国内外长期以来广泛开展了断裂评估技术的研究工作,形成了以断裂力学为基础的合于使用评定方法,有关应用已产生显著的经济效益和社会效益。

合于使用评定也称为缺陷评定,缺陷是否被接受的经济意义是不可忽视的。如果在结构正常使用条件下发现缺陷,通过合于使用评定要决定在下次检修之前是否能安全运行。如果评定结果认为缺陷是可以

接受的,则使用者可以避免因非正常中断运行所带来的损失。即使在维修期间(正常或非正常),如果评定结果认为在下次正常维修之前可以安全运行,则可以免去或推迟结构运行期间的非必要维修。此外,构件的非正常报废也是不经济的,替代构件的延期到货更会影响生产,依据合于使用评定受损构件能否继续使用至替代构件的到货同样具有经济意义。如果焊接结构寿命消耗速率能够通过合于使用评定精确评估,结构效用将得到充分发挥,从而大大提高产出以获得显著的经济效益,这将是合于使用评定技术发展的重要目标。

根据航空航天结构环境载荷作用下的完整性要求,这里重点介绍基于合于使用原则的焊接结构断裂、疲劳、腐蚀和蠕变失效的评定方法。

断裂评定

含缺陷结构的断裂评定经历了

从线弹性断裂力学的应力强度因子 (K) 判据、弹塑性断裂力学的裂纹尖端张开位移 (CTOD) 判据到考虑脆性断裂和塑性失稳 2 种失效机制的双判据方法的发展历程。目前基于失效评定图的双判据方法在含缺陷结构的弹塑性断裂分析中得到广泛应用。双判据法是综合考虑 2 种破坏机制对构件失效的作用, 建立 2 种失效机制共存情况下的断裂评定准则。

双判据法使用失效评定图对含缺陷结构的完全性进行评定。失效评定图的概念最早由英国中央电力局 (CEGB) 提出, 又称为 R6 评定方法, 该方法集中反映了弹塑性断裂力学的发展。国际上有关含缺陷结构合于使用评定规范 (如 BS7910、SINTAP/FITNET、API 579-1/ASME FFS-1 等) 均采用了 R6 评定方法, 并逐步推广到应力腐蚀和高温蠕变失效评定。

失效评定图 (图 1) 纵轴和横轴分别代表断裂驱动力与断裂韧性的比率以及施加载荷与塑性失稳载荷的比率, 以如下 2 个参量表示:

$$K_r = \frac{K}{K_{mat}} \text{ 或 } K_r = \sqrt{\delta_r} = (\delta/\delta_{mat})^{1/2},$$

$$L_r = \frac{P}{P_L \sigma_y},$$

式中, K 或 δ 为断裂驱动力; K_{mat} 或 δ_{mat} 为断裂阻力; P 为作用载荷; P_L 为含缺陷结构的极限载荷。 K_r 和 L_r 取决于施加载荷、材料性能以及裂纹

尺寸、形状等几何参数。

失效评定曲线根据材料、载荷数据的不同, 有多种评定选择。当仅知道材料屈服应力时, 失效评定曲线最为简单, 由下式定义

$$f(L_r) = (1 + 0.5L_r^2)^{-1/2} [0.3 + 0.7 \exp(-0.6L_r^6)].$$

截断线位于塑性失稳点

$$L_r < L_r^{max} \equiv \frac{1}{2} (1 + \frac{\sigma_u}{\sigma_y}), \sigma_u \text{ 为流变应力}.$$

采用上述方法对有缺陷构件进行失效分析时, 需要按有关规范要求对缺陷进行规则化处理, 然后分别计算 K_r 和 L_r 并标在失效评定图上作为评定点, 如果评定点位于坐标轴与失效评定曲线之间, 则结构是安全的, 根据评定点的位置可评估缺陷的危险程度; 如果评定点 $A (K_r, L_r)$ 位于失效曲线之外的区域, 则结构是不安全的; 如评定点落在失效评定曲线、截断线 ($L_r = L_r^{max}$) 以及纵横坐标之间, 则缺陷是安全的, 否则缺陷是不安全的。若评定点落在失效曲线上, 则结构处于临界状态。

截断线 ($L_r = L_r^{max}$) 的位置取决于材料: 对于奥氏体不锈钢, $L_r^{max} = 1.8$; 对于无平台的低碳钢及奥氏体不锈钢焊缝, $L_r^{max} = 1.25$; 对于无平台的低合金钢及焊缝, $L_r^{max} = 1.15$; 对于具有长屈服平台的材料, $L_r^{max} = 1.0$ 。

根据评定点在失效评定图所处的区域, 可判断结构断裂的模式, 结构的不同断裂模式与其断裂控制参量相对应。

含裂纹焊接接头的断裂模式受接头强度失配比、裂纹尺寸和应变硬化性能等因素的相互作用影响。焊接结构断裂评定必须考虑焊缝强度非匹配的影响。因此, 建立考虑焊缝强度非匹配作用的裂纹驱动力分析

方法和失效评定曲线是焊接结构断裂评定的重要内容。

疲劳评定

焊接结构的疲劳裂纹萌生取决于焊接接头焊趾或焊根等应力集中区的局部缺口应力状态, 疲劳裂纹扩展受控于裂纹 (包括缺口效应在内) 的局部应力强度因子。发生在焊趾或焊根处的疲劳裂纹多数都会进入到热影响区或母材, 且焊趾与焊根处同时存在缺口效应和不均匀性。在焊接接头疲劳损伤中, 局部最大应力起着主导作用, 因此焊接接头和焊接结构的疲劳强度的工程分析方法有 4 个不同的层次, 即名义应力评定方法、结构应力评定方法、缺口应力评定方法和断裂力学评定方法。这里仅简单介绍名义应力评定方法。

大量试验结果表明, 影响焊接接头疲劳强度的主要因素是应力范围和结构构造细节, 当然材料性质和焊接质量也有较大影响, 而载荷循环特性的影响较小。因此, 以名义应力为基础的焊接结构的疲劳设计规范大多采用应力范围和结构细节分类进行疲劳强度设计, 要求焊接结构中因疲劳载荷引起的应力范围 $\Delta\sigma$ 不得超过规定的疲劳许用应力范围 $[\Delta\sigma]$ 。

$$\Delta\sigma \leq [\Delta\sigma].$$

焊接接头的疲劳质量与接头的几何形状相关。焊缝的存在降低了接头的疲劳质量, 其本质是接头区存在应力集中, 即所谓的缺口效应。即疲劳缺口效应越大, 焊接接头的疲劳强度越小, 从而导致焊接接头的疲劳质量越低。

不同的焊接接头形式对应于不同的缺口等级, 而不同的缺口等级对应于不同的疲劳质量等级, 因此不同的焊接接头的疲劳质量就可以用疲劳等级来评定 (图 2)。焊接接头疲劳质量分级是将接头分为不同的缺口等级并对各缺口等级规定不同的

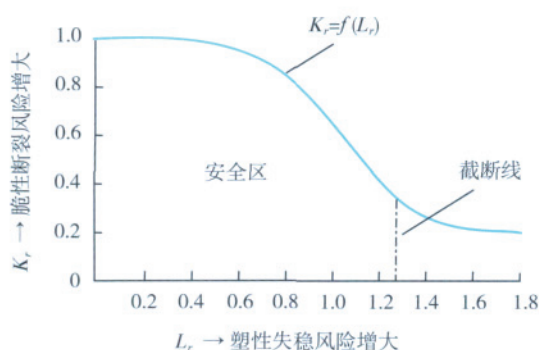


图1 失效评定曲线

S-N 曲线和工作寿命曲线。S-N 曲线和工作寿命曲线通常是关于应力水平和循环次数的线性曲线,焊接接头在按其几何形状、焊缝种类、加载形式及制造等级分类后便可归于一族许用应力或持久应力值不同的标准 S-N 曲线和工作寿命曲线。

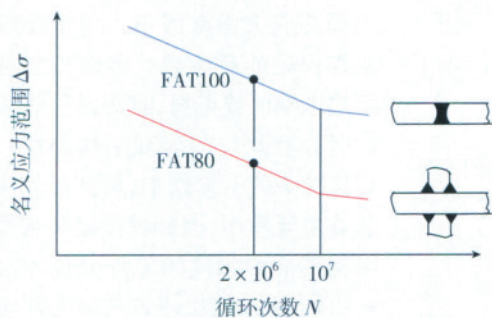


图2 对接接头和十字型接头的名义应力范围与循环次数的关系

目前,焊接接头的疲劳强度设计大多采用质量等级 S-N 曲线确定焊接接头的疲劳质量。根据基于名义应力的焊接接头疲劳质量按接头细节分级评定方法,可建立含缺陷焊接接头疲劳评定则简化的评定程序。在含缺陷焊接结构疲劳评定程序中,缺陷的验收通过比较表征含缺陷接头的实际疲劳强度和所需疲劳强度的 S-N 曲线来实现。

腐蚀损伤评定

腐蚀损伤可以用多种特征量来表征,例如腐蚀深度、腐蚀面积、腐蚀体积等。但通常情况下,腐蚀损伤是不规则的,其几何形状十分复杂,因此以上特征量不易确定。腐蚀损伤容限是指结构因腐蚀作用导致承载面积削弱后,仍能满足结构的静强度、动强度、稳定性和结构使用功能的要求的最大允许腐蚀损伤状态。为了确定腐蚀损伤容限,首先确定结构性能随腐蚀损伤的变化规律;确定腐蚀部位的环境谱及具体部位的应力谱;计算结构腐蚀后的疲劳寿命;评定不同腐蚀尺寸下的结构静强度、稳定性、结构功能等是否满足

要求,最终确定腐蚀损伤容限。

腐蚀损伤容限可以用不同的损伤机制进行定义。例如用腐蚀等级作为腐蚀损伤容限;用腐蚀作用后结构的剩余强度作为腐蚀损伤容限;用腐蚀作用后结构的损伤容限寿命作为腐蚀损伤容限等。由于腐蚀作用

引起的容器或管道结构局部凹陷或减薄的极限压力与凹陷深度和面积有关,当凹陷程度及减薄面积较大时就需要对结构的剩余强度进行评估。

对于应力腐蚀开裂问题也可采用失效评定图进行评定。在失效评定图中需要引

入应力腐蚀临界应力强度因子 K_{ISCC} 参数。如果评定点落入安全区但可能发生亚临界扩展,则必须采取修正措施防止其扩展。要防止应力腐蚀裂纹扩展就必须使其 $K=K_{ISCC}$,因此需要降低应力,或改善环境条件,或进行维修。如果补救措施不能应用或无效,则要规定缓慢的亚临界扩展容限,这就需要对裂纹和环境进行全面评价以限制其扩展速率。对于给定的材料、环境和应力条件,要确定其达到临界条件(如泄露)所容许的最大裂纹尺寸。若达到临界裂纹内尺寸大的时间或循环次数大于设计寿命,或裂纹扩展速率在寿命期内在许可的范围,则焊接结构在应力腐蚀环境下是合于使用的。

蠕变失效评定

航空发动机中的热端部件长期在高温条件下工作,这些部件在高温环境和载荷的作用下会发生高温蠕变损伤,损伤的累积导致结构最后蠕变断裂。与常温下含缺陷结构的破坏机制类似,含缺陷结构在高温长期载荷作用下也会发生由于蠕变裂纹扩展导致的断裂和含缺陷截面达到

蠕变极限引起的失效及其两者的混合失效模式。因此,同样可以采用失效评定图方法对含缺陷结构的蠕变失效进行评定。考虑到蠕变是一个时间相关过程,在一般失效评定图中需要引入时间因素,例如,在英国 R5 规范中提出了时间相关的失效评定图法(TDFAD),该方法与常温下缺陷评定规范 R6 采用的失效评定图(FAD)方法相似,只不过用“蠕变韧性”代替了常规的断裂韧性,而且需要计算与时间相关的应力和应变参量。

焊接接头存在的应力集中和组织不均匀性对其蠕变强度有较大影响。焊接接头的蠕变强度与焊缝和母材的蠕变性能组合密切相关。焊接接头的蠕变失效评定时要充分考虑焊缝不均匀性产生的影响。一般而言,焊接接头的应变限制要比母材更为严格。这就要求蠕变强度设计时尽可能使焊缝避开非线性应变累积增大的部位,以及采用合适的焊接方法与焊接材料使焊接区的蠕变塑性与母材尽可能相近。

结束语

综上所述,焊接结构的合于使用评定理论和方法已经发展成为一门重要的工程学科方向,是一项多学科交叉集成技术,具有综合性与科学性。其研究范围从断裂与疲劳评定向高温及腐蚀损伤、塑性极限分析、材料性能劣化、失效概率和风险评等方面拓展。焊接结构的合于使用要充分考虑到焊接接头性能不均匀性、焊接应力与变形、焊接缺陷、接头细节应力集中等因素对结构完整性的影响。焊接结构的合于使用评定方法包括简单的检测评定和复杂的计算机模拟分析,需要多学科知识和多数据源提供支持。开展结构合于使用评定技术研究与应用,对保证航空航天结构的安全性及经济性具有极其重要的意义。(责编 良辰)