

核电安全端结构中材料拘束的作用范围研究

戴悦¹ 杨杰¹ 陈浩峰²

1 上海理工大学 能源与动力工程学院 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室 上海 200093

2 Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, G1 1XJ, UK

摘要 分别选择核电安全端实际结构和简化结构为研究对象,对不同材料拘束下2种结构的 J 积分-弯矩曲线、等效塑性应变(PEEQ)等值线所围绕区域的面积和失效评定曲线进行计算,以考察结构中材料拘束的作用范围。结果表明:在核电安全端实际结构和简化结构中均存在着材料拘束的作用范围。 J 积分-弯矩曲线、PEEQ等值线所围绕区域的面积和失效评定曲线均不受材料拘束作用范围之外材料的影响。简化结构几何拘束较低、材料拘束作用范围较大、失效评定曲线略高,与实际结构相比,可能会产生非保守的评价结果。

关键词 核电安全端, 材料拘束, 作用范围, 失效评定曲线

中图分类号 TH114.0346

文章编号 0412-1961(2021)×-××-×

The Effect Range of Material Constraint in Nuclear Safe and Structure

DAI Yue¹, YANG Jie¹, CHEN Haofeng²

1 Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

2 Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, G1 1XJ, UK

Correspondent: YANG Jie, associate professor, Tel: (021)55272320, E-mail: yangjie@usst.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.51975378)

Manuscript received 2020-11-04, in revised form 2021-03-08

ABSTRACT Constraint is the resistance of a specimen or structure against plastic deformation that contains geometric and material limitations. Both can affect the fracture behavior of a material significantly. For a material constraint, most studies focused on the strength mismatch of both sides of a crack, such as over-match and under-match. Nevertheless, the effect range of the material constraint also needs to be clarified. In previous

资助项目 国家自然科学基金项目 No.51975378

收稿日期 2020-11-04 **定稿日期** 2021-03-08

作者简介 戴悦,女,1996年生,硕士生

通讯作者 杨杰, yangjie@usst.edu.cn, 主要从事金属材料损伤与断裂等方面的研究

DOI 10.11900/0412.1961.2020.00445

studies, the effect range of a material constraint was demonstrated in different specimens. In this study, the actual and simplified nuclear safe end structures were selected. The J - M curves (where J is the J -integral, which reflects the degree of stress and strain concentration at the crack tip due to a wide range of yield; M is the bending moment, which reflects the bending moment of the structure), which are the areas surrounded by the equivalent plastic strain (PEEQ) isoline, and the failure assessment curves of the two structures under different material constraints were calculated to determine the effect range of material constraint in structure. The results show that the effect range of a material constraint exists in actual and simplified nuclear safe end structures. The J - M curves were unaffected by the material located out of the effect range. Compared to the actual nuclear safe end structure, the simplified structure had a lower geometric constraint, a larger material constraint effect range, and a higher failure assessment curve, possibly producing a non-conservative assessment result. Thus, in the design and structure integrity assessment of a nuclear safety end structure and other strength-mismatched structures, the influence of the material constraint effect range should be considered, particularly in the following two aspects. The first aspect is that in the design process, a material with weak properties should be designed out of the material constraint effect range. This can effectively avoid weakening of the structural properties caused by the weaker material. The second is that in the assessment process, the material out of the material constraint effect range does not need to be taken into account. Only the material in the material constraint effect range should be considered, which will reduce the difficulty and workload of an assessment.

KEY WORDS nuclear safe end, material constraint, effect range, failure assessment curve

在固体力学中, 拘束是指试样或结构抵抗塑性变形的能力, 并可分为几何拘束和材料拘束。几何拘束受试样或结构尺寸的影响, 材料拘束则受试样或结构中不同材料间性能失配的影响。几何拘束和材料拘束均显著影响着试样或结构的断裂行为。

其中, 材料拘束的概念于 20 世纪 90 年代首先由 Joch 等^[1]和 Burstow 等^[2]提出, 用于表征滑移线场随母材屈服强度的变化。随后, Zhang 等^[3]建立了材料拘束参数 M , 以表征双材料接头中界面裂纹性能失配对裂尖应力场的影响。Betegón 等^[4]定义了另一个材料拘束参数 β_m , 以表征高配焊接接头中性能失配对裂尖应力场的影响。近年来, Yang 等^[5-7]基于裂尖等效塑性应变(equivalent plastic strain, PEEQ)等值线所围绕区域的面积提出了一个统一拘束参数 A_p , 该参数可以同时几何拘束和材料拘束进行表征。

除了上述针对材料拘束的表征所进行的研究外, 关于材料拘束对 J - R (J 代表 J 积分, 是围绕裂纹尖端区应力应变场任意迴路的能量线积分, 它反映裂纹尖端由于大范围屈服而产生的应力和应变集中程度; R 为阻力; J - R 阻力曲线反映了材料断裂阻力的大小)阻力曲线、裂纹扩展路径、断裂韧性和裂尖应力应变场的影响也有很多研究。其中, 针对 J - R 阻力曲线, Wang 等^[8,9]研究了不同材料拘束下和不同初始裂纹位置

时 Alloy52M 异种金属焊接接头的 $J-R$ 阻力曲线; Sarikka 等^[10]研究了材料拘束对 SA508-Alloy52 异种金属焊接接头 $J-R$ 阻力曲线的影响; Fan 等^[11-13]研究了不同加工硬化下双金属焊接接头的 $J-R$ 阻力曲线。针对裂纹扩展路径, Samal 等^[14]和 Yang 等^[15]研究了材料拘束对异种金属焊接接头裂纹扩展路径偏转的影响。针对断裂韧性, Lindqvist 等^[16]重点研究了断裂韧性随材料拘束的改变; Jang 等^[17]重点研究了裂纹位于不同位置时 Alloy82/182 异种金属焊接接头的断裂韧性。针对裂尖应力应变场, 杨新岐等^[18]研究了非匹配焊接接头中性能失配对裂尖三维应力状态的影响; Zhu 等^[19]研究了材料拘束对核电站 A508-III 异种金属焊接接头裂尖应力应变场的影响; Younise 等^[20]研究了材料非均质性和拘束状态对焊接接头裂尖应力应变场的影响; Xue 等^[21]研究了焊接接头力学非均匀性对裂尖局部应力应变场的影响; Khan 等^[22,23]研究了强度失配接头中静态裂纹在平面应变模式 I 加载下的应力场结构。

上述研究侧重于裂纹两侧的性能匹配(如高配或低配)对材料断裂行为的影响。但在性能失配试样或结构中还存在着一个有趣的科学问题——材料拘束的作用范围需要澄清。它是指材料拘束本身是否存在一个作用范围, 当材料位于该作用范围之外时, 无论材料的机械性能如何, 断裂行为均不受影响。之前的研究^[24-27]中, 作者选择实验室常用的三点弯曲(single edge-notched bend, SENB)试样、紧凑拉伸(compact tension, CT)试样、单边裂纹拉伸(single edge-notched tensile, SENT)试样和中心裂纹拉伸(centre-cracked tension, CCT)试样为研究对象, 设计不同性能失配的组合, 针对试样中材料拘束的作用范围进行了研究。研究表明: 无论何种几何形状和加载类型, 无论是中心裂纹或界面裂纹、浅裂纹或深裂纹, 材料拘束的作用范围存在于所有性能失配的试样中。试样的 $J-R$ 阻力曲线和裂纹扩展路径不受该作用范围之外材料的影响, 且该作用范围的大小受几何约束和性能失配的影响。

本工作在之前研究的基础上, 将这一科学问题从试样引入结构, 分别选择核电安全端实际结构与简化结构为研究对象, 进一步针对结构中材料拘束的作用范围进行研究。

1 核电安全端结构的有限元数值计算

1.1 核电安全端实际结构几何

核反应堆压力容器、蒸汽发生器和稳压器是压水堆核电站中一回路的主要承压容器, 其中核反应堆压力容器通过安全端与一回路主管道相连。安全端左边与核反应堆压力容器相连, 右边与一回路主管道相连, 具有复杂的几何和异种金属焊接结构, 同时承受自重、内压、轴向力、弯矩等作用, 是安全评定中的重点部位。核电安全端实际结构几何如图 1a 所示。

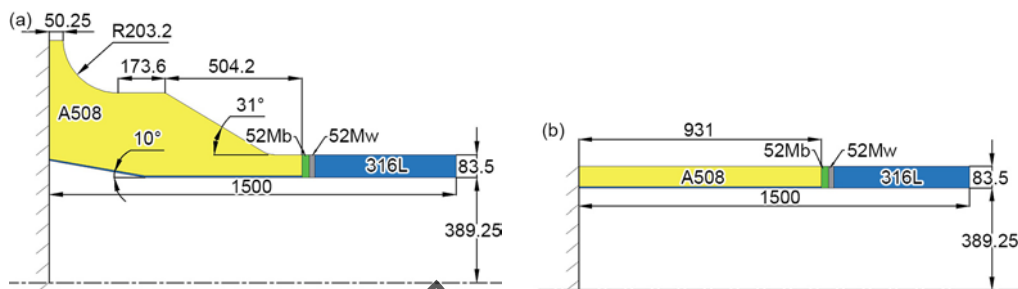


图 1 核电安全端实际结构几何和简化结构几何

Fig.1 Geometries of actual nuclear safe end structure (a) and simplified nuclear safe end structure (b) (unit: mm;

52Mb— isolation layer material formed by surfacing, 52Mw—weld material formed by butt multi-pass welding)

1.2 核电安全端简化结构几何

在国际上涉及核电管道结构完整性评价的规范中^[28-30], 一般在几何上将核电安全端简化为直管处理, 即将接管安全端管嘴部分简化为与主管道等直径的直管。鉴于此, 本工作中核电安全端简化结构将管嘴部分简化成与一回路主管道相同壁厚和直径的直管, 其他结构和尺寸均保持不变, 如图 1b 所示。

1.3 4 种材料的力学性能

在核电安全端中, 接管嘴材料为 SA508Gr.3Cl.2 低合金钢(简称为 A508), 安全端过渡短管材料为 F316LN 奥氏体不锈钢(简称为 316L), 隔离层和对接焊缝材料均采用 52M/ERNiCrFe-7A 镍基合金, 但焊接工艺不同。分别将堆焊形成的隔离层材料和对接多道焊形成的焊缝材料记为 52Mb 和 52Mw。此外, 因为 A508 不耐轻水堆腐蚀, 在管嘴内壁上堆焊有一层 316L。A508、316L、52Mb 和 52Mw 4 种材料的弹性模量分别为 202410、156150、178130 和 178130 MPa, Poisson 比均为 0.3, 真应力-应变曲线见文献[8]。

1.4 2 种结构中不同材料拘束的设计

在核电安全端薄弱位置(A508 与 52Mb 界面处)设置椭圆形初始周向裂纹, 如图 2 所示。其中 a 为初始裂纹深度, $2c$ 为椭圆形裂纹长轴长度, t 为核电主管道壁厚, R_o 为核电主管道外半径, R_i 为核电主管道内半径。初始周向裂纹 $a/t=0.5$, $a/c=0.6$ 。为了得到不同的材料拘束, 在核电安全端实际结构和简化结构中, 考虑结构的现实情况, 均单独改变裂纹右侧 52Mb 的长度, 使其从 0 变化到 548 mm, 以获得初始裂纹尖端不同的材料拘束。且在 52Mb 长度靠近其实际长度时, 取值较为密集, 在 52Mb 长度不太符合其实际长度时, 取值较为分散。

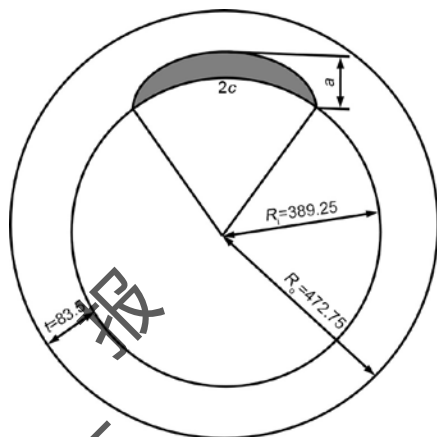


图 2 初始周向裂纹示意图

Fig.2 Schematic of the initial circumferential crack (unit: mm; a —initial crack depth, $2c$ —long axis length of an ellipse crack, t —thickness of pipe, R_o —outer radius of pipe, R_i —inner radius of pipe)

1.5 有限元数值计算

采用 ABAQUS 6.14 软件，分别对核电安全端实际结构及其简化结构建立三维有限元模型。鉴于 2 种结构的对称性，仅选取二分之一结构建立模型，如图 3a 和 b 所示。所有模型网格采用线性减缩积分三维单元 C3D8R。由于裂纹尖端区域存在着应力和应变梯度，为得到准确的有限元分析结果，在裂纹前端采用传统的聚焦环式网格包围在初始半径只有 $2\ \mu\text{m}$ 的裂纹尖端以增强非线性迭代的收敛性^[31]，如图 3c 和 d 所示。

因为管嘴焊在核反应堆压力容器上，所以在结构左端设置固定约束；在对称面上设置对称约束。安全端管工作压力为 17 MPa，内压所产生的轴向力为 35.786 MPa，在安全端右侧与一回路管道连接处用耦合的方式在参考点上施加弯矩，并通过设置材料密度属性和重力加速度的方式施加重力。对 2 种结构不同材料拘束下的 J 积分-弯矩曲线、PEEQ 等值线所围绕区域的面积和失效评定图(FAD)进行计算。

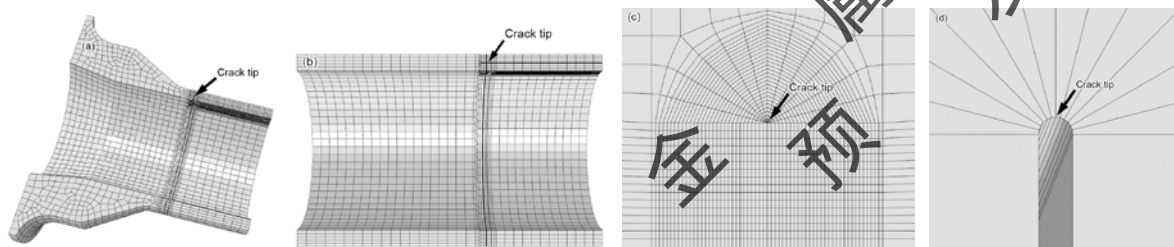


图 3 安全端实际结构和简化结构整体网格划分及裂尖局部网格划分

Fig.3 Whole meshes of actual safe end structure (a) and simplified safe end structure (b), and the local meshes at crack tip in low (c) and high (d) magnifications

2 核电安全端实际结构

2.1 不同材料拘束下的 J 积分-弯矩曲线

不同材料拘束下核电安全端实际结构的 J 积分-弯矩(J - M)曲线如图 4 所示。可以发现, 随着外加弯矩的增加, 裂纹尖端 J 积分随之增加。在不同的材料拘束下, 随着裂纹右侧 52Mb 长度 W_{52Mb} 的增加, J 积分-弯矩曲线呈现出了先升高后降低, 最后趋于稳定的趋势。当 52Mb 的长度为 40mm 时, J 积分-弯矩曲线最高; 当 52Mb 的长度达到 400mm 时, J 积分-弯矩曲线趋于稳定。这说明与各实验室试样相同, 在核电安全端实际结构中同样存在着材料拘束的作用范围。当超出该作用范围后, 核电安全端实际结构的 J 积分不受该作用范围之外材料机械性能的影响。

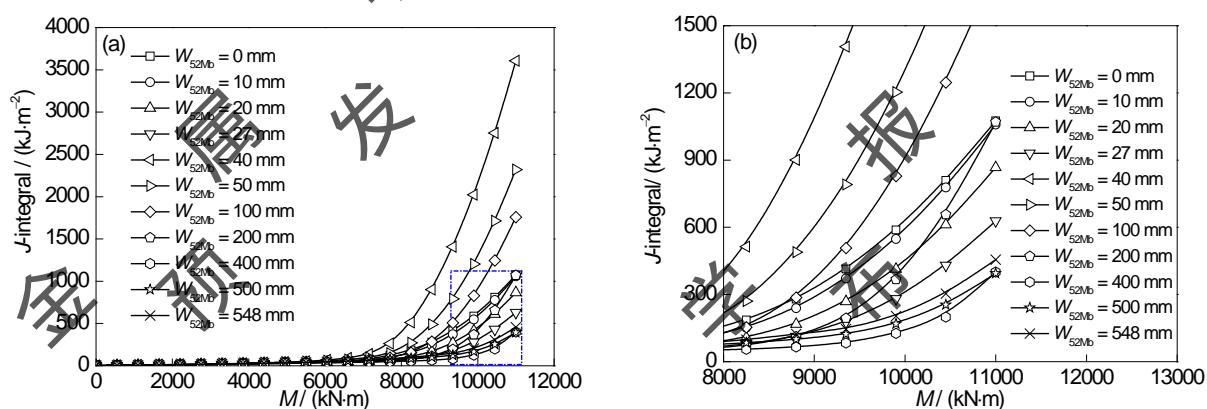


图 4 不同材料拘束下核电安全端实际结构的 J 积分-弯矩(J - M)曲线

Fig.4 J -integral versus bending moment (J - M) curves (a) and its partial enlargement of the data-intensive area (b)

of actual nuclear safe end structure under different material constraints (W_{52Mb} —width of 52Mb)

2.2 不同材料拘束下 PEEQ 等值线所围绕区域的面积

因为 PEEQ 不仅反映了裂尖的应变场情况, PEEQ 等值线所围绕区域的面积(A_{PEEQ})还可以用来表征裂纹尖拘束度的大小^[5-7], 故针对核电安全端实际结构, 对不同材料拘束下不同 J 积分时 A_{PEEQ} 进行了计算。之前研究^[5-7]表明, 在加载处塑性应变与裂纹尖端 PEEQ 等值线不相连的情况下, 用不同的 PEEQ 等值线对拘束的表征是一致的。本工作选取 PEEQ = 0.5 等值线, 对其所围绕区域的面积进行了计算, 如图 5a 所示。并在相同的 J 积分下($J = 900 \text{ kJ/m}^2$), 对不同拘束下 A_{PEEQ} 进行了对比, 如图 5b 所示。可以看出, 随着裂纹右侧 52Mb 长度的增加, A_{PEEQ} 呈现出了先降低后升高, 最后趋于稳定的趋势。当 52Mb 的长度为 40 mm 时, A_{PEEQ} 最低; 当 52Mb 的长度达到 400 mm 时, A_{PEEQ} 达到稳定。这一方面可以与图 4 的结果相互印证, 另一方面说明在核电安全端实际结构中, 材料拘束的作用范围确实存在。当 52Mb 的长度达到 400 mm 时, 整个结构对所含裂纹的拘束效应已不再受作用范围之外材料机械性能的影响, 换言之, 只有作用范围内的材料才对所含裂纹的拘束及其力学行为有影响。

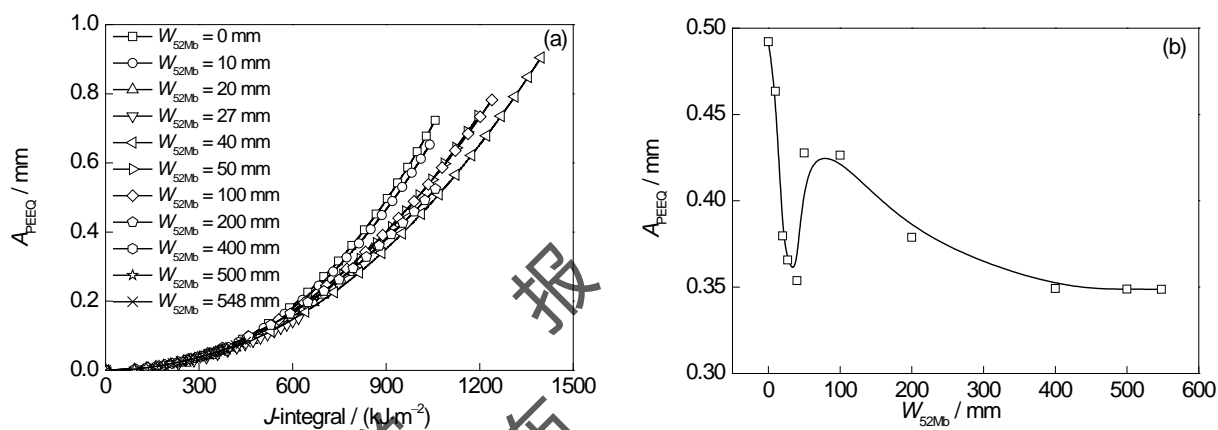


图 5 不同材料拘束下不同 J 积分时与相同 J 积分时 PEEQ 等值线所围绕区域的面积(A_{PEEQ})

Fig.5 Areas surround by PEEQ isoline (A_{PEEQ}) at different J -integrals (a) and same J -integral ($J = 900 \text{ kJ/m}^2$) (b) under different material constraints

2.3 不同材料拘束下的 FAD

按照结构完整性评定规范 R6^[29]中选择 3 的方法构建不同材料拘束下核电安全端实际结构的 FAD，如图 6 所示。在构建 FAD 时，首先采用理想弹塑性材料模型(即略去材料应变强化特性)计算不同材料拘束下的极限弯矩载荷(M_L)，然后计算不同材料拘束下裂纹最深点处的弹性 J 积分(J_e)和弹塑性 J 积分随 M 的变化曲线。由无量纲应力强度因子 $K_r = (J_e / J)^{1/2}$ 和无量纲载荷因子 $L_r = M / M_L$ 分别计算每一个 M 下的 (L_r, K_r) ，连接起来即可得到 FAD。可以看出，在核电安全端实际结构中，当 52Mb 的宽度为 200 mm 时，失效评定曲线最高；当 52Mb 的宽度为 400、500 和 548 mm 时，失效评定曲线最低，且 3 条曲线基本重合。这一方面验证了材料拘束作用范围的存在，并证明材料拘束作用范围对失效评定曲线也有影响；另一方面，该变化趋势与不同 52Mb 宽度下核电安全端实际结构的极限弯矩载荷有关。当 52Mb 的宽度为 400、500 和 548 mm 时，结构的极限载荷明显增加，如图 7 所示，这导致了相同下 K_r 下 L_r 的降低。再一方面，该变化趋势也与不同 52Mb 宽度下结构的拘束度有关。从图 5b 中可以发现，当 52Mb 的宽度为 40、400、500 和 548 mm 时，PEEQ 等值线所围绕区域的面积最低，即此时结构处于高拘束状态，在图 6 中所对应的 4 条失效评定曲线也较低，即裂纹的安全性较低，这是互相吻合的。

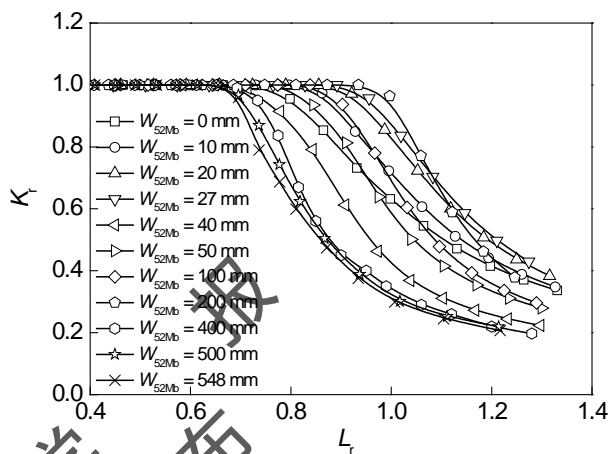


图 6 核电安全端实际结构在不同材料拘束下的失效评定图(FAD)

Fig.6 Failure assessment diagram (FAD) of actual nuclear safe end structure under different material constraints

(K_I —dimensionless stress intensity factor, L_T —dimensionless load factor)

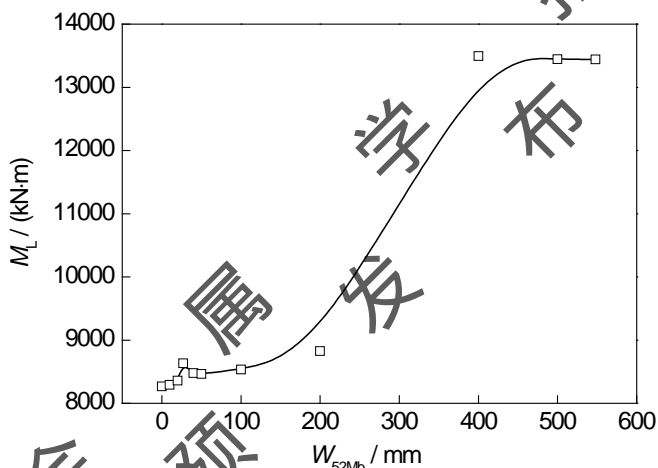


图 7 核电安全端实际结构在不同材料拘束下的极限弯矩载荷(M_L)

Fig.7 Ultimate bending moment (M_L) of actual nuclear safe end structure under different material constraints

3 核电安全端简化结构

3.1 不同材料拘束下的 J 积分-弯矩曲线

不同材料拘束下核电安全端简化结构的 J - M 曲线如图 8 所示。可以看出, 随着外加弯矩载荷的增加, 裂纹尖端 J 积分随之增加。与核电安全端实际结构一致的是, 在不同的材料拘束下, 随着裂纹右侧 52Mb 长度的增加, J 积分-弯矩曲线同样呈现出了先升高、后降低、最后趋于稳定的趋势, 这说明在核电安全端简化结构中同样存在着材料拘束的作用范围。与核电安全端实际结构不同的是, 在核电安全端简化结构中, 当 52Mb 的长度达到 500 mm 时, J 积分-弯矩曲线才趋于稳定, 高于核电安全端实际结构中的 400 mm。这应该是由核电安全端实际结构的几何更为复杂、几何拘束更高造成的。高几何拘束会降低材料拘束的作用范围, 反之亦然^[26]。

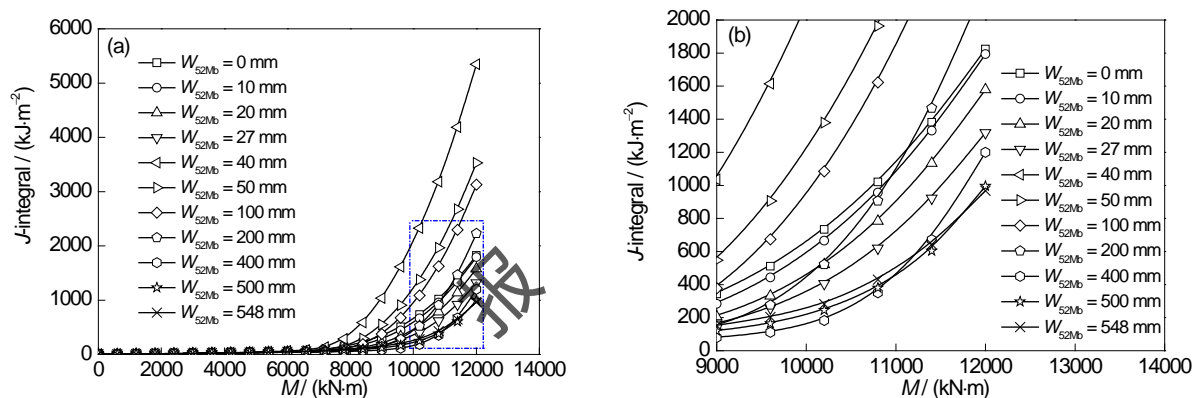


图 8 不同材料拘束下核电安全端简化结构的 $J-M$ 曲线

Fig.8 $J-M$ curves (a) and its partial enlargement of the data-intensive area (b) of simplified nuclear safe end

structure under different material constraints

3.2 不同材料拘束下 PEEQ 等值线所围绕区域的面积

针对核电安全端简化结构, 对不同材料拘束下不同 J 积分时 PEEQ=0.5 等值线所围绕区域的面积进行了计算, 如图 9a 所示; 并在相同的 J 积分下 ($J = 900 \text{ kJ/m}^2$), 对不同拘束下 PEEQ 等值线所围绕区域的面积进行了对比, 如图 9b 所示。图 9 中反映的规律与图 5 一致, 并可以与图 8 的结果相互印证。在核电安全端简化结构中, 材料拘束的作用范围同样存在, 但其作用范围比实际结构略广, 当 52Mb 的长度达到 500 mm 时, 才超出了该作用范围。通过对比图 5b 与图 9b 也可发现, 在相同的 J 积分下, 核电安全端实际结构中的 A_{PEEQ} 要低于简化结构。因为拘束是试样或结构对塑性变形的阻碍, 这也说明核电安全端实际结构的几何拘束比简化结构更高。而这种简化降低了核电安全端的拘束, 可能会带来非保守的评价结果。

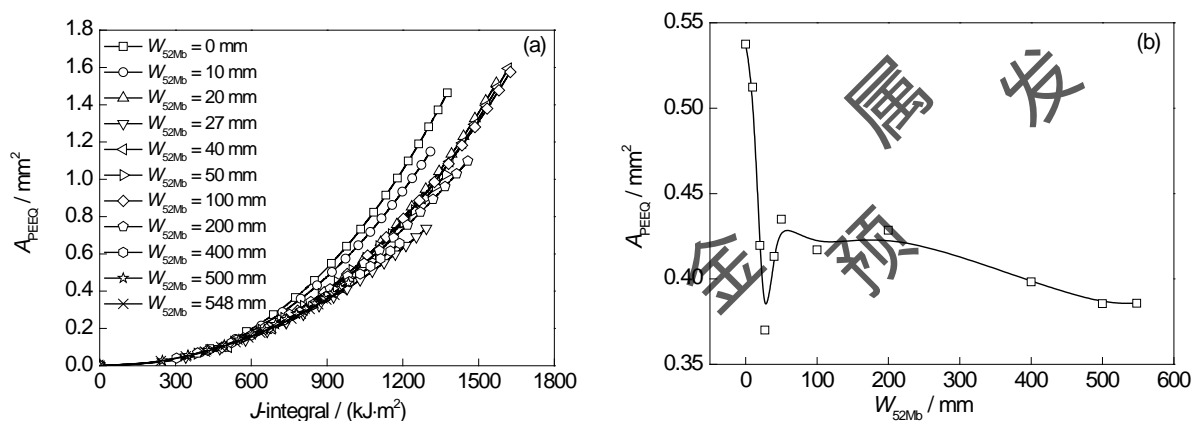


图 9 不同材料拘束下不同 J 积分时与相同 J 积分时的 A_{PEEQ}

Fig.9 A_{PEEQ} at different J -integrals (a) and same J -integral (b) under different material constraints

3.3 不同材料拘束下的 FAD

不同材料拘束下核电安全端简化结构的 FAD 如图 10 所示。从图 10 中同样可以发现，与核电安全端实际结构一致，当超出材料拘束的作用范围后，失效评定曲线不再改变，52Mb 宽度为 500 mm 时的失效评定曲线与 52Mb 宽度为 548 mm 时基本重合。当 52Mb 的宽度为 200 mm 时，失效评定曲线最高，这与材料拘束存在一个最优值有关^[32]。失效评定曲线的变化趋势同样与不同 52Mb 宽度下核电安全端简化结构的极限弯矩有关，如图 11 所示。此外，当 52Mb 的宽度为 40、400、500 和 548 mm 时， A_{PEEQ} 较低(图 9b)，结构的拘束度较高，图 10 中所对应的 4 条失效评定曲线较低，裂纹的安全性较低。

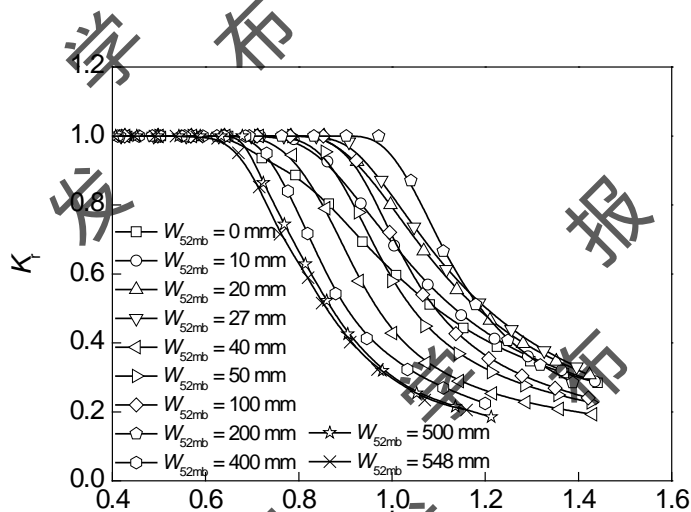


图 10 核电安全端简化结构在不同材料拘束下的 FAD

Fig.10 FAD of simplified nuclear safe end structure under different material constraints

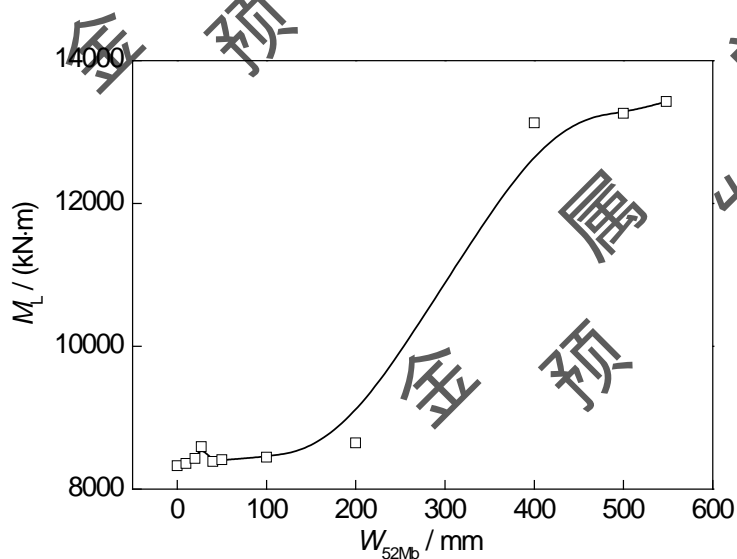


图 11 核电安全端简化结构在不同材料拘束下的 M_L

Fig.11 M_L of simplified nuclear safe end structure under different material constraints

为了对简化结构的合理性进行考察,对核电安全端实际结构与简化结构的 FAD 做了逐一对比。当 52Mb 的宽度为 100 和 200 mm 时 2 者的对比如图 12 所示。可以看出, 2 种结构的失效评定曲线基本吻合。但由于简化结构降低了核电安全端的拘束, 其失效评定曲线略高, 这可能会带来非保守的评价结果。

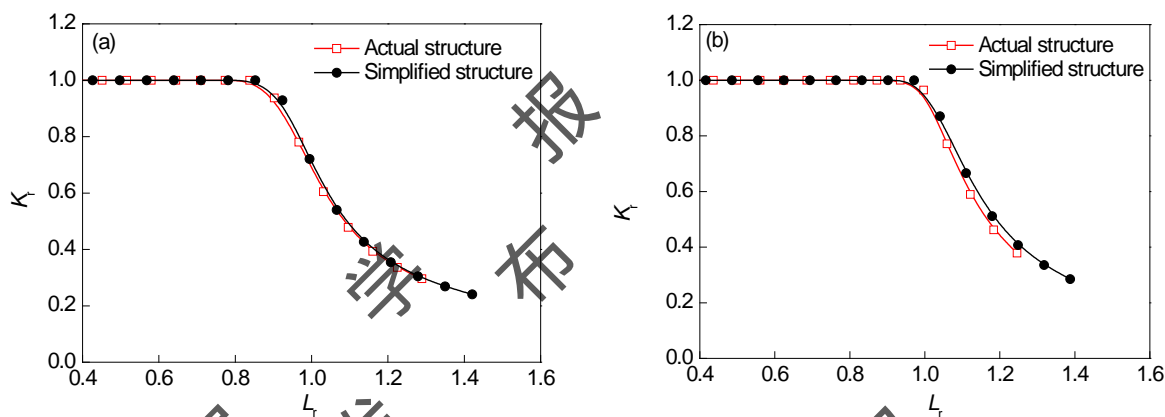


图 12 52Mb 宽度为 100 和 200 mm 时核电安全端实际结构与简化结构 FAD 的对比

Fig.12 Comparisons of FAD between actual and simplified nuclear safe end structure

(a) $W_{52Mb} = 100$ mm (b) $W_{52Mb} = 200$ mm

由于材料拘束作用范围的存在, 在核电安全端结构及其他一些性能失配结构的设计与完整性评定中, 需纳入材料拘束作用范围的影响。尤其表现在如下 2 个方面: 在设计中, 将性能较弱的材料设计在材料拘束作用范围之外, 这样可以有效避免性能较弱材料对结构性能的削弱; 在评定中, 将材料拘束作用范围之外的材料排除在外, 仅考虑作用范围内的材料, 这样可以有效降低评定难度、减少评定工作量。

4 结论

在核电安全端实际结构和简化结构中均存在着材料拘束的作用范围。当超出材料拘束的作用范围后, 2 种结构的 J 积分-弯矩曲线、PEEQ 等值线所围绕区域的面积和失效评定曲线均不再变化, 它们均不受材料拘束作用范围之外材料的影响。与核电安全端实际结构相比, 简化结构几何拘束较低, PEEQ 等值线所围绕区域的面积较高、材料拘束作用范围较大、失效评定曲线略高。这种简化可能会带来非保守的评价结果, 应予以重视。

参考文献

- [1] Joch J, Ainsworth R A, Hyde T H. Limit load and J-estimates for idealised problems of deeply cracked welded joints in plane-strain bending and tension [J]. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 1993, 16(10): 1061
- [2] Burstow M C, Ainsworth R A. Comparison of analytical, numerical and experimental solutions to problems of deeply cracked welded joints in bending [J]. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 1995, 18(2): 221
- [3] Zhang Z L, Hauge M, Thaulow C. Two-parameter characterization of the near-tip stress fields for a

- bi-material elastic-plastic interface crack [J]. *Int. J. Fracture*, 1996, 79(1): 65
- [4] Betegón C, Peñuelas I. A constraint based parameter for quantifying the crack tip stress fields in welded joints [J]. *Eng. Fract. Mech.*, 2006, 73(13): 1865
- [5] Yang J, Wang G Z, Xuan F Z, et al. Unified characterisation of in-plane and out-of-plane constraint based on crack-tip equivalent plastic strain [J]. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2013, 36(6): 504
- [6] Yang J, Wang G Z, Xuan F Z, et al. Unified correlation of in-plane and out-of-plane constraints with fracture toughness [J]. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2014, 37(2): 132
- [7] Yang J, Wang G Z, Xuan F Z, et al. Unified correlation of in-plane and out-of-plane constraint with fracture resistance of a dissimilar metal welded joint [J]. *Eng. Fract. Mech.*, 2014, 115: 296
- [8] Wang H T, Wang G Z, Xuan F Z, et al. Local mechanical properties of a dissimilar metal welded joint in nuclear power systems [J]. *Mat. Sci. Eng A-Struct.*, 2013, 568: 108
- [9] Wang H T, Wang G Z, Xuan F Z, et al. An experimental investigation of local fracture resistance and crack growth paths in a dissimilar metal welded joint [J]. *Mater. Design*, 2013, 44: 179
- [10] Sarikka T, Ahonen M, Mouginito R, et al. Effect of mechanical mismatch on fracture mechanical behavior of SA508 e Alloy 52 narrow gap dissimilar metal weld [J]. *Int. J. Pres. Ves. Pip.*, 2017, 157: 30
- [11] Fan K, Wang G Z, Tu S T, et al. Geometry and material constraint effects on fracture resistance behavior of bi-material interfaces [J]. *Int. J. Fracture*, 2016, 201(2): 143
- [12] Fan K, Wang G Z, Xuan F Z, et al. Effects of work hardening mismatch on fracture resistance behavior of bi-material interface regions [J]. *Mater. Design*, 2015, 68: 186
- [13] Fan K, Wang G Z, Xuan F Z, et al. Local fracture resistance behavior of interface regions in a dissimilar metal welded joint [J]. *Eng. Fract. Mech.*, 2015, 136: 279
- [14] Samal M K, Balani K, Seidenfuss M, et al. An experimental and numerical investigation of fracture resistance behaviour of a dissimilar metal welded joint [J]. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C*, 2009, 223(7): 1507
- [15] Yang F Q, Xue H, Zhao L Y, et al. Effects of Welded Mechanical Heterogeneity on Interface Crack Propagation in Dissimilar Weld Joints [J]. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2019, 2019: 6593982
- [16] Lindqvist S, Sarikka T, Ahonen M, et al. The effect of crack path on tearing resistance of a narrow-gap Alloy 52 dissimilar metal weld [J]. *Eng. Fract. Mech.*, 2018, 201: 130
- [17] Jang C, Lee J, Kim J S, et al. Mechanical property variation within Inconel 82/182 dissimilar metal weld between low alloy steel and 316 stainless steel [J]. *Int. J. Pres. Ves. Pip.*, 2008, 85(9): 635
- [18] Yang X Q, Qin H S, Huo L X, et al. 3D constraint state analysis near the crack tip in heterogeneous welded

- joints [J]. *J. Mech. Strength*, 2001, 23(3): 336
- (杨新岐, 秦红珊, 霍立兴等. 非匹配焊接接头中裂纹尖端三维拘束状态分析[J]. *机械强度*, 2001, 23(3): 336)
- [19] Zhu Z, Jing H, Ge J, et al. Effects of strength mis-matching on the fracture behavior of nuclear pressure steel A508-III welded joint [J]. *Mat. Sci. Eng A-Struct.*, 2005, 390(1-2): 113
- [20] Younise B, Rakinb M, Gubeljanc N, et al. Effect of material heterogeneity and constraint conditions on ductile fracture resistance of welded joint zones-Micromechanical assessment [J]. *Eng. Fail. Anal.*, 2017, 82: 435
- [21] Xue H, Ogawa K, Shoji T. Effect of welded mechanical heterogeneity on local stress and strain ahead of stationary and growing crack tips [J]. *Nucl. Eng. Des.*, 2009, 239(4): 628
- [22] Khan I A, Bhasin V, Chattopadhyay J, et al. An insight of the structure of stress fields for stationary crack in strength mismatch weld under plane strain mode-I loading – Part I: Pure bending specimen [J]. *Int. J. Mech. Sci.*, 2012, 62(1): 89
- [23] Khan I A, Bhasin V, Chattopadhyay J, et al. An insight of the structure of stress fields for stationary crack in strength mismatch weld under plane strain mode-I loading – Part II: Compact tension and middle tension specimens [J]. *Int. J. Mech. Sci.*, 2014, 87: 281
- [24] Yang J, Wang L. Effect range of the material constraint-I. Center crack [J]. *Materials*, 2019, 12(1): 67
- [25] Dai Y, Yang J, Wang L. Effect range of the material constraint-II. Interface crack [J]. *Metals*, 2019, 9(6): 696.
- [26] Dai Y, Yang J, Chen H F. Effect Range of the Material Constraint in Different Strength Mismatched Laboratory Specimens [J]. *Appl. Sci.*, 2020, 10(7): 2434
- [27] Dai Y, Yang J, Chen H F. Study on the influence of property mismatch in sandwiched specimens with center crack on material constraint effect range [J]. *J. Mech. Strength*, 2021, 43(1): 83
- (戴悦, 杨杰, 陈浩峰. 三明治型中心裂纹试样性能失配对材料拘束作用范围的影响研究[J]. *机械强度*, 2021, 43(1): 83)
- [28] Leak before break evaluation procedure [S]. US NRC. SRP. 3.6.3, 1987
- [29] R6: assessment of the integrity of structures containing defects [S]. British Energy Generation Report R/H/R6, Revision 4. Gloucester, UK: British Energy Ltd, 2007
- [30] Kocak M, Hadley I, Szavai S, et al. FITNET Fitness-for-Service (FFS) Procedure, Annex – Volume 2, Revision MK8, GKSS Research Centre, Geesthacht, 2008
- [31] Pan J B, Wang G Z, Xuan F Z, et al. FAD of different welded structures for joining safe end to pipe-nozzle of

nuclear pressure vessel [J]. Nucl. Tech., 2017, 40(5): 050605

(潘建宾, 王国珍, 轩福贞等. 核压力容器接管安全端不同焊接结构的失效评定图[J]. 核技术, 2017, 40(5): 050605)

[32] Yang J, Wang L. Effect and optimal design of the material constraint in the DMWJ of nuclear power plants [J]. Acta. Metall. Sin., 2020, 56(6): 840

(杨杰, 王雷. 核电站 DMWJ 中材料拘束的影响与优化[J]. 金属学报, 2020, 56(6): 840)

