

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*

STUDY ON THE INFLUENCE OF PROPERTY MISMATCH IN SANDWICHED SPECIMENS WITH CENTER CRACK ON MATERIAL CONSTRAINT EFFECT RANGE

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 200093)

(2. 思克莱德大学 机械与航空工程系, 格拉斯哥 G1 1XJ)

DAI Yue¹ YANG Jie¹ CHEN HaoFeng²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(2. Department of Mechanical & Aerospace Engineering, University of Strathclyde, Glasgow G1 1XJ, UK)

摘要 选择具有三明治型、含中心裂纹的不同性能失配的实验室常用三点弯曲 (SENB) 试样、紧凑拉伸 (CT) 试样、单边裂纹拉伸 (SENT) 试样和中心裂纹拉伸 (CCT) 试样为研究对象, 采用嵌含有 GTN 损伤模型的有限元法, 进一步针对性能失配对材料拘束约束范围的影响进行研究。研究表明: 材料拘束的作用范围同样受性能失配的影响。随着性能失配的增加, 材料拘束的作用范围增大。此外, 在性能失配结构中存在“短板效应”, 该效应在性能失配高的结构中更加明显。未来可尝试构建材料拘束作用范围与几何拘束、材料拘束相关参数间的关联, 研究结果可为性能失配结构的设计与完整性评定提供科学支持。

关键词 性能失配 作用范围 材料拘束 *J-R* 阻力曲线 结构完整性评定

中图分类号 TH114 O346

Abstract Different property mismatched laboratory specimens with sandwich structure and center crack that contain the single-edge-notched bend (SENB), compact tension (CT), single edge-notched tensile (SENT), and central-cracked tension (CCT) specimens were selected, and the FEM simulations based on GTN (Gurson-Tvergaard-Needleman) damage model were used to further investigate the influence of property mismatch on the effect range of material constraint. The results show that the numerical value of the effect range is also influenced by the property mismatch. The effect range increases with increasing of the property mismatch. In addition, the strength of property mismatched structure has buckets effect, and the buckets effect is more obvious in high property mismatched structure. In the future, the correlation of the effect range of material constraint with geometry constraint and material constraint should be established, and the results can provide scientific support for the structure integrity assessment and the design of property mismatched structures.

Key words Property mismatch; Effect range; Material constraint; *J-R* resistance curve; Structure integrity assessment

Corresponding author: YANG Jie, E-mail: yangjie@usst.edu.cn, Tel: +86-21-55272320, Fax: +86-21-55272376

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51975378).

Manuscript received 20200707, in revised form 20200727.

引言

拘束是指试样或结构抵抗塑性变形的能力, 可将

其分为几何拘束和材料拘束。几何拘束的大小由试样尺寸直接决定, 而材料拘束的大小则由不同材料间的

* 20200707 收到初稿, 20200727 收到修改稿。国家自然科学基金项目 (51975378) 资助。

** 戴悦, 女, 1996 年 11 月生, 湖北省荆门市沙洋县人, 汉族, 上海理工大学在读硕士研究生, 主要研究方向为机械强度。

*** 杨杰, 男, 1987 年 1 月生, 山东省菏泽市东明县人, 汉族, 上海理工大学副教授, 博士, 硕士生导师, 从事机械强度、断裂力学等方面的教学与研究工作。

性能失配所决定。无论是几何拘束还是材料拘束,均显著影响着试样或结构的断裂行为。

材料拘束的概念于 20 世纪 90 年代首先由 Joch J 等^[1]和 Burstow M C 等^[2]提出,用于表示滑移线场随母材屈服强度的变化。随后,Zhang Z L 等^[3]分析了裂纹位于界面位置时的双材料问题,并建立了一个材料拘束参数 M ,用来考察性能失配对裂尖应力场的影响,并基于 J - Q 理论提出双材料模型的裂尖应力场可以用 J - Q - M 理论进行表征。与之相似,基于 J - T 理论,Betegón C 等^[4]定义了另一个材料拘束参数 β_m 和一个总的拘束参数 β_r 。其中 β_m 用来表征过配焊接接头中材料拘束的大小, β_g 用来表征几何拘束的大小。近来,Yang J 等^[5-7]基于裂尖等效塑性应变等值线所围绕区域的面积提出了另一个统一拘束参数 A_p ,该统一拘束参数可以同时几何拘束和材料拘束进行表征。

除了上述对材料拘束的表征所进行的研究外,更多的学者研究了材料拘束对性能失配结构 J - R 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。针对 J - R 阻力曲线,Wang H T 等^[8]¹⁰⁸⁻¹¹⁷^[9]研究了异种金属焊接接头中不同初始裂纹位置 and 不同材料拘束下的 J - R 阻力曲线;Sarikka T 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 K 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 M K 等^[14]和 Yang F Q 等^[15]分别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 S 等^[16]将其研究聚焦在断裂韧性随材料拘束的改变上面;Jang C 等^[17]重点研究了裂纹位于合金 82/182 异种金属焊接接头不同位置时的断裂韧性。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尖端三维应力状态的影响;Zhu Z 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 B 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 H 等^[21]研究了焊接接头力学不均

匀性对局部裂尖应力应变场的影响;Khan I A 等^[22-23]研究了性能失配焊缝中静态裂纹在平面应变模式 I 加载下的应力场结构。

上述研究的重点多集中在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。在性能失配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进行澄清。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,无论作用范围之外的材料是强是弱,断裂行为均不受这些材料的影响。之前研究表明^[24]¹⁻¹²^[25]^[26]¹⁻¹⁴;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均存在于所有性能失配的试样和结构中。试样和结构的 J - R 阻力曲线和裂纹扩展路径不受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的影响。

本文中,选择实验室常用三点弯曲 (SENB) 试样、紧凑拉伸 (CT) 试样、单边裂纹拉伸 (SENT) 试样和中心裂纹拉伸 (CCT) 试样为研究对象,设计不同性能失配的组合,进一步针对性能失配对材料拘束约束范围的影响进行研究。

1 材料与性能失配试样设计

1.1 材料

选用核电用低合金高强钢 A508 与镍基合金 Alloy52Mb,其室温下的弹性模量分别为 202 410 MPa 和 178 130 MPa,泊松比均为 0.3,真应力-真应变曲线如图 1 所示^[8]¹¹⁴⁻¹¹⁵。

为了得到不同程度的性能失配,保持 A508 材料真应力-真应变曲线不变,改变 Alloy 52Mb 的真应力-真应变曲线分别为真实值的 0.5 倍和 0.1 倍(以下简称 0.5 倍 52Mb 和 0.1 倍 52Mb),与 A508 组成不同性能失配的组合。

1.2 性能失配试样设计

选择实验室常用 SENB、CT、SENT 和 CCT 试样。每种试样包含两种材料,分别为 A508 和 0.1 倍 52Mb

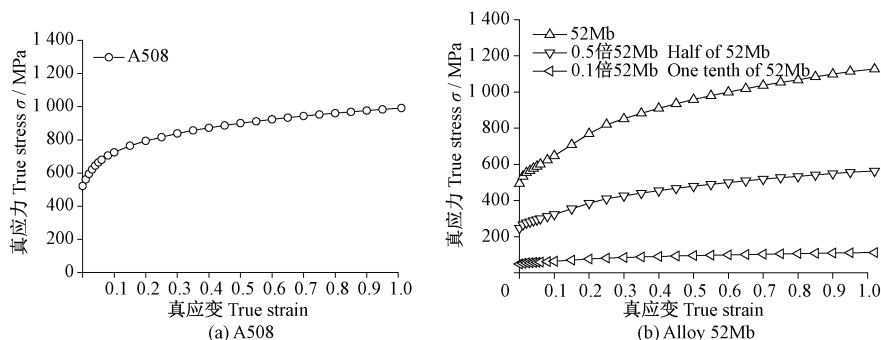


图1 A508 和 Alloy 52Mb 的真应力-真应变曲线

Fig.1 True stress-strain curves of the materials A508 and Alloy 52Mb

或 A508 和 0.5 倍 52Mb。其中 A508 位于试样的两侧, 0.1 倍 52Mb 或 0.5 倍 52Mb 位于试样的中心, 类似简单的焊接接头, 如图 2 所示。为直观起见, 可将其

称之为“三明治型中心裂纹试样”。通过改变中间 0.1 倍 52Mb 或 0.5 倍 52Mb 区域的宽度进一步获得不同的性能失配组合。

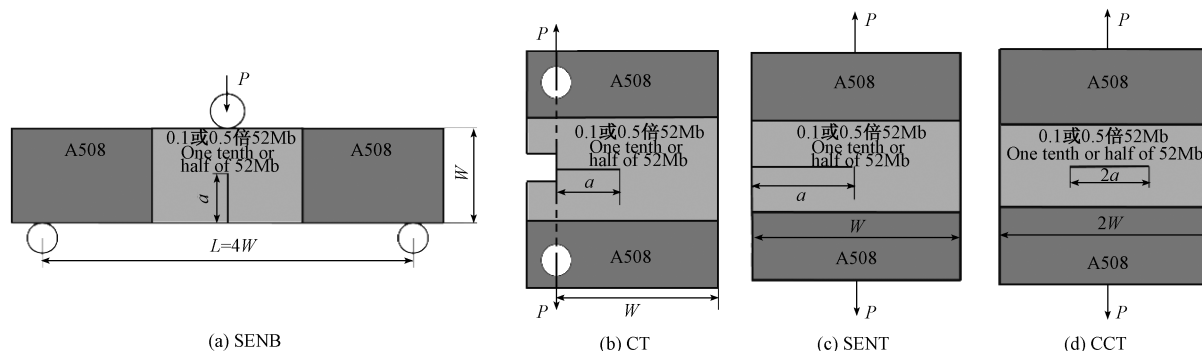


图 2 不同试样的加载方式和试样几何。

Fig.2 Loading configurations and geometries of different specimens.

SENB 试样宽度 W 为 14.4 mm, 加载跨距 L 为 57.6 mm ($L=4W$), 初始裂纹长度为 7.2 mm ($a/W=0.5$), 通过对试样上方刚体施加向下 6 mm 的位移控制载荷; CT 试样宽度 W 为 32 mm, 初始裂纹长度为 16 mm ($a/W=0.5$), 加载时将两个刚体分别嵌入上下两个加载孔内, 刚体与加载孔内表面之间定义面面接触, 并通过在刚体上施加位移的方式进行加载; SENT 和 CCT 试样宽度 W 为 32 mm, 初始裂纹长度为 16 mm ($a/W=0.5$), 通过在加载点施加位移的方式控制载荷, 其中加载点和试样进行刚性位移耦合。

2 GTN 损伤模型

为了得到不同性能失配下试样的 J - R 阻力曲线, 采用嵌含有 Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) 损伤模型的 Abaqus/Explicit 软件对各性能失配下不同试样的起裂和扩展进行有限元数值计算, 并计算 J - R 阻力曲线。

GTN 模型中包含九个参数: q_1 、 q_2 、 q_3 、 ε_N 、 S_N 、 f_N 、 f_0 、 f_C 和 f_F 。其中 q_1 、 q_2 和 q_3 为本构参数, ε_N 、 S_N 和 f_N 为孔洞形核参数, f_0 为初始孔洞体积分数, f_C 为孔洞开始聚合的临界孔洞体积分数, f_F 为失效孔洞体积分数。低合金高强度钢 A508 与镍基合金 Alloy 52Mb 的 GTN 参数如表 1 所示。

所有试样网格均采用平面应变减缩积分单元 (CPE4R), 裂纹扩展区域的最小网格尺寸为 0.1 mm×0.05 mm^[27]。SENB 试样的裂尖网格划分如图 3a 所

示, CT、SENT 和 CCT 试样的裂尖网格划分如图 3b 所示。

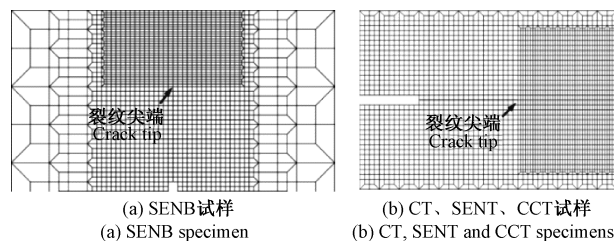


图 3 SENB 试样的裂尖网格划分和 CT、SENT、CCT 试样的裂尖网格划分

Fig.3 The mesh at crack tip in SENB specimen and CT, SENT, CCT specimens

3 结果与讨论

3.1 SENB 试样

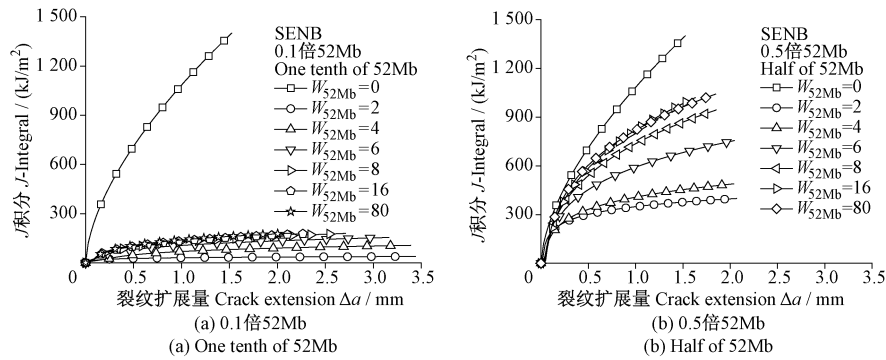
不同性能失配下 SENB 试样的 J - R 阻力曲线如图 4 所示。其中图 4a 为当中间区域为 0.1 倍 52Mb 时, 改变中间区域宽度所得到的 J - R 阻力曲线; 图 4b 为当中间区域为 0.5 倍 52Mb 时, 改变中间区域宽度所得到的 J - R 阻力曲线。

从图 4 中首先可以明确发现的是, 当中间区域材料为 0.1 倍 52Mb 和 0.5 倍 52Mb 时, 与均质 A508 ($W_{52Mb}=0$ mm 时) 试样相比, SENB 试样的 J - R 阻力曲线均出现了大幅度的降低, 尤其是当中间区域材料为 0.1 倍 52Mb 时。在两种 SENB 试样中, 当 $W_{52Mb}=2$

表 1 A508 和 Alloy 52Mb 的 GTN 参数

Tab.1 The GTN parameters of the materials A508 and Alloy 52Mb

材料 Material	q_1	q_2	q_3	ε_N	S_N	f_N	f_0	f_C	f_F
A508	1.5	1	2.25	0.3	0.1	0.002	0.000 08	0.04	0.25
52Mb	1.5	变量 Variable	2.25	0.3	0.1	0.002	0.000 001	0.04	0.25

图4 不同性能失配下 SENB 试样的 J - R 阻力曲线。Fig.4 The J - R resistance curves of SENB specimens under different property mismatches.

mm 时,均得到了最低的 J - R 阻力曲线,因为此时中间薄弱区域的宽度仅为 2 mm,而两侧高强度 A508 区域的宽度为 78 mm,通常认为材料的整体强度并不弱,然而却得到了最低的 J - R 阻力曲线。这说明在性能失配的材料中存在着“短板效应”,材料的承载能力由最薄弱区域材料的性能来决定。

其次,当中间区域材料为 0.1 倍 52Mb 时,随着中间薄弱区域宽度的增加(从 2 mm 增加到 80 mm),SENB 试样的 J - R 阻力曲线持续增加;当中间区域材料为 0.5 倍 52Mb 时,随着中间薄弱区域宽度的增加,SENB 试样的 J - R 阻力曲线先增加(从 2 mm 增加到 16 mm)后保持稳定(从 16 mm 增加到 80 mm)。这说明对于两侧区域材料为 A508、中间区域材料为 0.5 倍 52Mb 的 SENB 试样而言,材料拘束作用范围为 16 mm。当超出该作用范围后,试样的断裂行为不再改变。而对于中间区域材料为 0.1 倍 52Mb 的试样而言,材料拘束作用范围超过了 80 mm,所以 J - R 阻力曲线并没有达到稳定。对比中间区域材料为 52Mb 时 SENB 试样的研究结果,材料拘束的作用范围为 8 mm^{[24]5-6},可以发现随着性能失配的增加,材料拘束的作用范围增大。之前研究表明材料拘束的作用范围与裂尖塑性区面积有关^{[24]6-7},性能失配的增加加大了裂尖塑性区的不对称性,从而导致材料拘束作用范围的

增大。

3.2 CT 试样

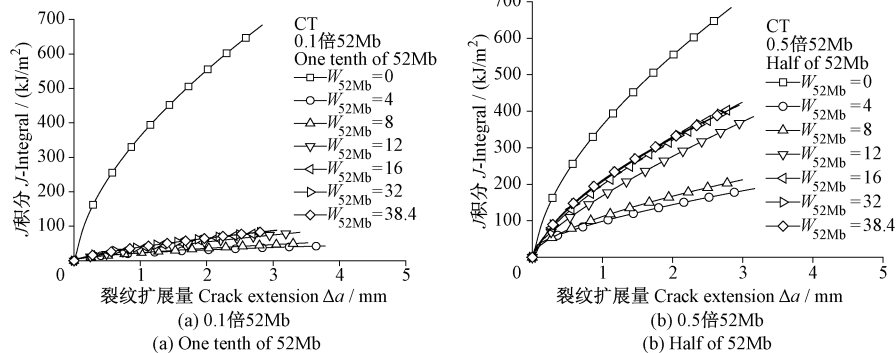
不同性能失配下 CT 试样的 J - R 阻力曲线如图 5 所示。其中图 5a 为当中间区域为 0.1 倍 52Mb 时,改变中间区域宽度所得到的 J - R 阻力曲线;图 5b 为当中间区域为 0.5 倍 52Mb 时,改变中间区域宽度所得到的 J - R 阻力曲线。

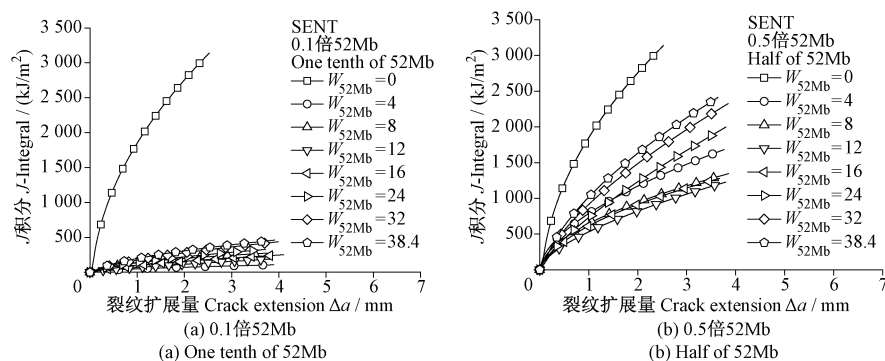
从图 5 中可以发现,与 SENB 试样一致,性能失配的 CT 试样中同样存在着“短板效应”。当中间区域材料为 0.1 倍 52Mb 和 0.5 倍 52Mb 时,试样的 J - R 阻力曲线均出现了大幅度的降低,当 $W_{52Mb} = 4$ mm 时, J - R 阻力曲线最低。

此外,无论中间区域材料为 0.1 倍或 0.5 倍 52Mb,随着中间薄弱区域宽度的增加,CT 试样的 J - R 阻力曲线均呈现先增加(从 4 mm 增加到 16 mm)后不变(从 16 mm 增加到 38.4 mm)的趋势。这说明材料拘束的约束范围同样存在,且均为 16 mm。当中间区域材料为 52Mb 时,CT 试样材料拘束的作用范围也为 16 mm^{[26]6-7},材料拘束的作用范围未受到性能失配的影响,这或许与 CT 试样的高几何拘束有关。

3.3 SENT 试样

不同性能失配下 SENT 试样的 J - R 阻力曲线如图 6 所示。其中图 6a 为当中间区域为 0.1 倍 52Mb 时,

图5 不同性能失配下 CT 试样的 J - R 阻力曲线。Fig.5 The J - R resistance curves of CT specimens under different property mismatches.

图 6 不同性能失配下 SENT 试样的 J - R 阻力曲线。Fig.6 The J - R resistance curves of SENT specimens under different property mismatches.

改变中间区域宽度所得到的 J - R 阻力曲线;图 6b 为当中间区域为 0.5 倍 52Mb 时,改变中间区域宽度所得到的 J - R 阻力曲线。

从图 6a 中可以发现,当中间区域为 0.1 倍 52Mb 时,SENT 试样中的“短板效应”比较明显。当 $W_{52Mb} = 4$ mm 时, J - R 阻力曲线最低,且随着中间区域宽度的增加,试样的 J - R 阻力曲线大致呈现增加的趋势。而当中间区域为 0.5 倍 52Mb 时,如图 6b 中所示,随着中间区域宽度的增加,试样的 J - R 阻力曲线呈现先降低(从 4 mm 增加到 12 mm)后增加(从 12 mm 增加到 38.4 mm)的趋势,试样中的“短板效应”不太明显,试样的 J - R 阻力曲线更多受整个试样强度的影响。这或许与试样的加载方式和性能失配的大小有关。对于 SENB 和 CT 试样,裂纹以承受弯曲载荷为主,对于 SENT 试样,裂纹更多承受的是剪切载荷,“短板效应”在弯曲载荷下比在剪切载荷下更加明显。另一方面,“短板效应”在性能失配高(中间区域为 0.1 倍 52Mb)的试样中也比在性能失配低(中间区域为 0.5 倍 52Mb)的试样中更加明显。

此外,与 SENB 和 CT 试样不同,在 SENT 试样中,随着中间区域宽度的增加, J - R 阻力曲线并没有达到稳定,这是由于低几何拘束试样材料拘束的作用范围更大的缘故^{[26]12}。而在之前的研究中,当中间区域材

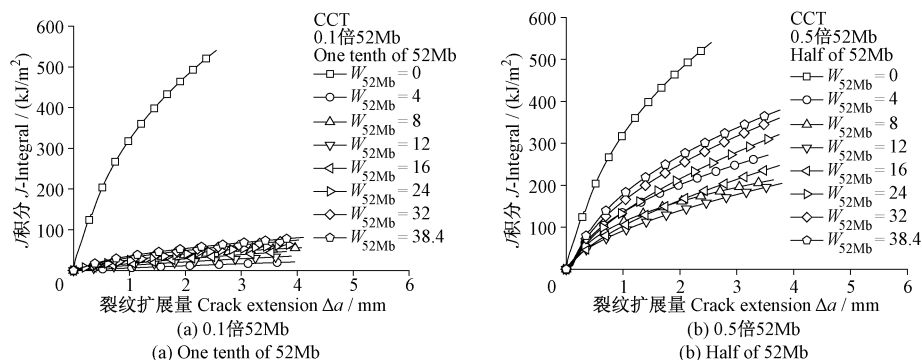
料为 52Mb 时,材料拘束的作用范围为 32 mm^{[26]8-9},再次说明材料拘束的作用范围会随着性能失配的增加而增大。

3.4 CCT 试样

不同性能失配下 CCT 试样的 J - R 阻力曲线如图 7 所示。其中图 7a 为当中间区域为 0.1 倍 52Mb 时,改变中间区域宽度所得到的 J - R 阻力曲线;图 7b 为当中间区域为 0.5 倍 52Mb 时,改变中间区域宽度所得到的 J - R 阻力曲线。

从图 7 中可以发现,CCT 试样中 J - R 阻力曲线的变化规律与 SENT 试样非常相似。当中间区域为 0.1 倍 52Mb 时,CCT 试样中的“短板效应”比较明显;当中间区域为 0.5 倍 52Mb 时,CCT 试样中的“短板效应”不太明显。“短板效应”在弯曲载荷下比在剪切载荷下更加明显,在性能失配高的试样中比在性能失配低的试样中更加明显。且随着中间区域宽度的增加, J - R 阻力曲线并没有达到稳定,材料拘束的作用范围随着性能失配的增加而增大。

总的来说,图 4~图 7 所有结果表明材料拘束的作用范围确实存在,且该作用范围不仅受几何约束(四种试样的几何拘束不同)的影响,同样受性能失配的影响。随着性能失配的增加,材料拘束的作用范围增大(中间区域为 0.1 倍 52Mb > 中间区域为 0.5 倍

图 7 不同性能失配下 CCT 试样的 J - R 阻力曲线。Fig.7 The J - R resistance curves of CCT specimens under different property mismatches.

52Mb>中间区域为 52Mb)。此外,在性能失配试样中存在着“短板效应”,材料的承载能力由最薄弱区域材料的性能来决定。该“短板效应”与试样的加载方式和性能失配的大小有关。在弯曲载荷下(SENb 和 CT 试样中)比在剪切载荷下(SENT 和 CCT 试样中)更加明显,在性能失配高的试样中(中间区域为 0.1 倍 52Mb)比在性能失配低(中间区域为 0.5 倍 52Mb)的试样中更加明显。

材料拘束的作用范围与几何拘束的相关参数(如初始裂纹尺寸/剩余韧带尺寸、试样/结构整体尺寸、试样/结构厚度)和材料拘束的相关参数(如屈服强度比值、不同区域宽度)密切相关,在未来的工作中,可以尝试构建材料拘束作用范围与这些参数间的关联,使得材料拘束作用范围的具体数值可以直接得到,而不是仅能通过实验或有限元数值模拟才能获得。如此以来,研究结果可以为性能失配结构的设计与完整性评定提供科学支持。

由于初始裂纹位于中间区域,材料拘束作用范围的具体数值与初始裂纹尺寸应最为相关。特尝试以初始裂纹尺寸 a 为基准,将中间区域宽度 W_{52Mb} 进行无量纲化,将材料约束作用范围用 W_{52Mb}/a 表示。经无量纲化后发现,当中间区域为 0.1 倍 52Mb 时,SENb、CT、SENT 和 CCT 四种试样的材料约束作用范围分别为: >11 、 >2.4 和 >2.4 ;当中间区域为 0.5 倍 52Mb 时,SENb、CT、SENT 和 CCT 四种试样的材料约束作用范围分别为: 2.2 、 >2.4 和 >2.4 ;当中间区域为 52Mb 时,SENb、CT、SENT 和 CCT 四种试样的材料约束作用范围分别为: 1.1 、 1.2 和 2 。

4 结论

采用嵌含有 GTN 损伤模型的有限元法,选择具有三明治型、含中心裂纹的 SENb、CT、SENT 和 CCT 试样为研究对象,设计不同性能失配的组合,进一步针对性能失配对材料拘束作用范围的影响进行研究。所得主要结果如下:

1) 与几何拘束的增加会降低材料拘束的作用范围不同,随着性能失配的增加,材料拘束的作用范围增大。

2) 性能失配结构中存在“短板效应”,结构的承载能力由最薄弱区域材料的性能决定。“短板效应”与结构的加载方式和性能失配的大小有关。“短板效应”在弯曲载荷下比在剪切载荷下更加明显,在性能失配高的结构中比在性能失配低的结构中更加明显。

3) 可以尝试构建材料拘束作用范围与几何拘束、材料拘束相关参数间的关联,使得材料拘束作用范围的具体数值可以直接得到。研究结果可以为性能失配

结构的设计与完整性评定提供科学支持。

参考文献 (References)

- [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 & Fracture of Engineering Material & Structures*, 1993, 16(10): 1061-1079.
- [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 & Fracture of Engineering Material & Structures*, 1995, 18(2): 221-234.
- [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]. *International Journal of Fracture*, 1996, 79(1): 65-83.
- [4] Betegón C, Peñuelas I. A constraint based parameter for quantifying the crack tip stress fields in welded joints [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2006, 73(13): 1865-1877.
- [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 & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2013, 36(6): 504-514.
- [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 & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2014, 37(2): 132-145.
- [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]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014 (115): 296-307.
- [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]. *Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2013(568): 108-117.
- [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]. *Materials & Design*, 2013(44): 179-189.
- [10] Sarikka T, Ahonen M, Mouginot R, et al. Effect of mechanical mismatch on fracture mechanical behavior of SA508-Alloy 52Mb narrow gap dissimilar metal weld [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2017(157): 30-42.
- [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]. *International Journal of Fracture*, 2016, 201(2): 143-155.
- [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]. *Materials & Design*, 2015(68): 186-194.
- [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]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015(136): 279-291.
- [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]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*,

- 2009, 223(7): 1507-1523.
- [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]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019: 6593982.
- [16] Lindqvist S, Sarikka T, Ahonen M, et al. The effect of crack path on tearing resistance of a narrow-gap Alloy 52Mb dissimilar metal weld [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018(201): 130-143.
- [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]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, 85(9): 635-646.
- [18] 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): 336-340.
- YANG XinQi, QIN HongShan, HUO LiXing, et al. 3D constraint state analysis near the crack tip in heterogeneous welded joints [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2001, 23(3): 336-340 (In Chinese).
- [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]. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, 390(1/2): 113-117.
- [20] Younise B, Rakinb M, Gubeljake N, et al. Effect of material heterogeneity and constraint conditions on ductile fracture resistance of welded joint zones-micromechanical assessment [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017(82): 435-445.
- [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]. *Nuclear Engineering and Design*, 2009, 239(4): 628-640.
- [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]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2012, 62(1): 89-102.
- [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]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014(87): 281-296.
- [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]. *Applied Sciences*, 2020, 10(7): 2434.
- [27] Østby E, Thaulow C, Zhang Z L. Numerical simulations of specimen size and mismatch effects in ductile crack growth-part I: Tearing resistance and crack growth paths [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2007, 74(11): 1770-1792.