

DOI: 10.11973/jxgccl230586

基于压入响应的异种金属焊接接头材料力学性能计算方法

薛河¹, 杨超¹, 张雨彪¹, 宁硕¹, 张嘉庆¹, 朱佳珺¹, 张建龙²

(1. 西安科技大学机械工程学院, 西安 710054; 2. 西安特种设备检测院, 西安 710065)

摘要: 通过ABAQUS有限元分析软件模拟压入试验并结合控制单一变量法, 在Hollomon本构模型的基础上, 分析了不同材料力学性能参数(屈服应力和应变硬化指数)与载荷-位移曲线加载段压入响应参数(加载曲率和加载指数)的关系, 建立由加载段压入响应参数反求材料力学性能参数的预测公式, 以有限元分析时输入的屈服应力和应变硬化指数作为约定真值, 验证预测方法的准确性; 通过该预测方法获得SA508钢/52M合金堆焊层/52M合金对接焊缝/316L钢异种金属焊接接头的材料力学性能参数分布。结果表明: 预测公式计算得到屈服应力和应变硬化指数的最大相对误差绝对值分别为10.5%, 6.29%, 所建立的公式可以较为准确地预测异种金属焊接接头局部区域的材料力学性能参数。计算得到异种金属焊接接头两侧热影响区的屈服应力和应变硬化指数变化明显, 随着距熔合线距离的增加, 屈服应力减小, 而应变硬化指数增大; 母材以及52M合金堆焊层和对接焊缝的屈服应力和应变硬化指数分布相对稳定。

关键词: 异种金属焊接接头; 载荷-位移曲线; 压入响应参数; 力学性能参数**中图分类号:** TG142.25; TH140.7**文献标志码:** A**文章编号:** 1000-3738(2025)03-0121-07

0 引言

焊接接头各区域具有力学性能不均匀性^[1], 通常是结构发生失效的薄弱部位^[2]。在压水堆核电一回路安全端中, 焊接接头大多为异种金属接头, 不同的焊接材料使用导致接头微观结构和力学性能存在分布不均匀的特点, 这对局部区域力学性能获取技术提出了更高的要求^[3]。传统的单轴拉伸试验存在诸多使用上的局限性, 难以准确全面地测定材料局部区域的力学性能^[4]。

压入测试方法是近些年来新兴的一种无损或微损的获取材料力学性能的技术, 具有操作方便、可原位测试、对试样破坏性小的优点^[5-7]。1951年, TABOR^[8]提出了表征应力和应变的概念, 以此关联材料的压痕响应参数与单轴应力-应变曲线之间的关系。1992年, OLIVER和PHARR^[9]提出了著名的“O-P”方法, 根据仪器化压入测试的载荷-位移曲线测试了材料的硬度和弹性模量。JOHNSON^[10-11]

提出了一种用来描述压痕底部材料变形状态的孔洞模型, 该模型能够较为准确地预测材料硬度和屈服应力之间的关系。ZHANG等^[12]和JIANG等^[13]在孔洞模型的基础上引入材料的凸起凹陷效应, 提出了一种用于识别材料塑性力学性能参数的新方法。目前, 通过分析压入响应参数建立的材料力学性能预测方法, 大多需要完整的载荷-位移曲线。但是, 在工程中由于位移检测对硬件和技术要求较高等原因, 所得压入载荷-位移曲线卸载段的误差较大, 通常仅使用加载段响应参数来建立材料力学性能预测方法^[14-15]。目前, 该方法尚未应用于异种焊接接头力学性能参数预测上。因此, 作者建立了由加载段压入响应参数反求材料力学性能参数的预测公式, 并对SA508钢/316L钢异种金属焊接接头的材料力学性能参数进行了预测。研究结果可为异种金属焊接接头裂纹扩展的预测提供指导。

1 有限元获取材料力学性能的原理

典型的单次球形压入载荷-位移曲线如图1所示, 其中: F_{\max} 为压入过程中的最大载荷; S 为被测试材料的接触刚度, 即卸载段曲线在最大载荷附近的斜率; C 为加载段曲线的加载曲率; h_{\max} 为最大压入

收稿日期: 2023-12-13; **修订日期:** 2024-09-26**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52075434); 陕西省重点研发计划项目(2021KW-36); 国家市场监督管理总局技术保障项目(2023YJ25)**作者简介:** 薛河(1961—), 男, 江苏扬州人, 教授, 博士

深度; h_r 为压头完全卸载后的残余压痕深度; h_c 为压头与被测试样的实际接触深度。载荷-位移曲线的加载段可由如下方程近似描述:

$$F = Ch^m \quad (1)$$

式中: F 为载荷; h 为位移; m 为加载段曲线的加载指数。

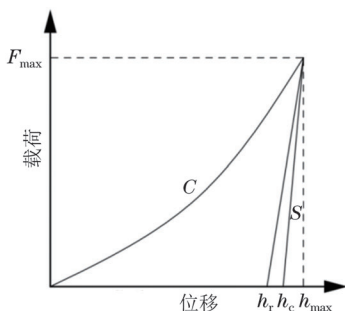


图1 典型球形压入载荷-位移曲线

Fig. 1 Typical spherical indentation load-displacement curve

通过有限元分析,可获得载荷-位移曲线加载段的压入响应参数(C, m)与材料力学性能参数之间的关系,并以此建立由压入响应参数反求材料力学性能的数值模型。

为了获取异种金属焊接接头材料力学性能与压入响应参数之间的关系,并以此关系为基础建立由压入响应参数预测材料力学性能参数的数学模型,需要使用控制变量法对单一材料特性发生变化时载荷-位移曲线的变化情况进行分析。查阅文献[16-18]可知,核电一回路安全端异种金属焊接接头各部分组成材料的弹性模量约为200 GPa。由于弹性模量是材料抵抗弹性变形能力的力学性能指标,对材料的组织不敏感^[19],焊接过程对其影响较小,因此在后续的分析过程中将弹性模量固定为200 GPa。对于大多数金属材料,其弹塑性力学性能可由Hollomon模型^[20]近似描述,具体模型如下:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & (\sigma \leq \sigma_y) \\ K\varepsilon^n = E\varepsilon_y^{1-n}\varepsilon^n & (\sigma \geq \sigma_y) \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ 为应力; E 为弹性模量; σ_y 为屈服应力; ε 为应变; K 为应变硬化系数; n 为应变硬化指数。

通过查阅文献[5]确定焊缝及附近区域材料的屈服应力取值为200, 300, 400, 500, 600 MPa, 应变硬化指数取值为0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5。

2 压入试验的有限元模型

使用ABAQUS软件建立压入试验的有限元模型,采用二维模型以便提高分析速率。考虑到试样

及压入载荷均具有对称性,建立轴对称模型。压头材料为碳化钨,弹性模量远高于试样,变形可忽略不计,因此将压头设置为刚体,半径为0.5 mm。为缩短计算时间,建立试样的局部模型,将试样尺寸设置为3 mm×3 mm。在后续的压入模拟中,将压入深度统一为0.1 mm。在压入过程中,试样的变形主要集中在与压头接触的局部区域,而远离接触的区域几乎没有变形,因此为了将压入响应更加精确地表现出来,采用8节点二次轴对称四边形单元(CAX8)对压头下方的局部区域进行网格划分,并对最小网格尺寸进行了无关性验证。其他区域同样采用CAX8单元进行网格划分,网格尺寸由最小网格尺寸逐渐过渡到最大网格尺寸0.15 mm;中心区域采用结构化网格,利用扫掠网格进行网格放大,最外侧均采用自由化网格,该划分可实现良好的网格过渡。有限元网格模型如图2所示。

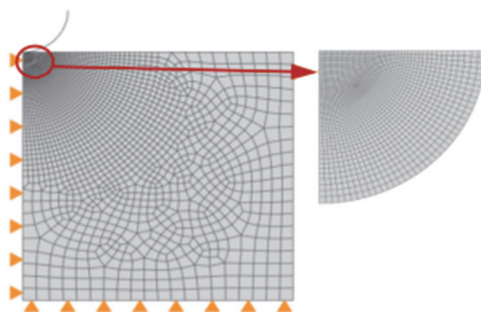


图2 压入试验有限元网格模型

Fig. 2 Finite element mesh model for indentation test

采用不同尺寸的网格对压头下方局部区域进行网格无关性验证,网格最小尺寸分别设置为0.006, 0.005, 0.004, 0.003 mm,选择的力学性能参数分别为屈服应力200 MPa、应变硬化指数0.1,屈服应力300 MPa、应变硬化指数0.2,屈服应力500 MPa、应变硬化指数0.4。由图3可知,当局部区域的网格尺寸小于0.006 mm时,模拟得到的载荷-位移加载段曲线基本重合。因此,在满足计算精度的前提下,为提高计算效率,在后续计算中将压头下方局部区域的网格尺寸确定为0.005 mm。

3 材料力学性能与压入响应相关性分析

3.1 压入响应反求材料力学性能的预测公式

在ABAQUS软件中使用控制变量法分析不同材料力学性能参数对压入响应造成的影响。在保持200, 600 MPa屈服应力不变的条件下模拟得到的不同应变硬化指数条件下的载荷-位移曲线如图4所

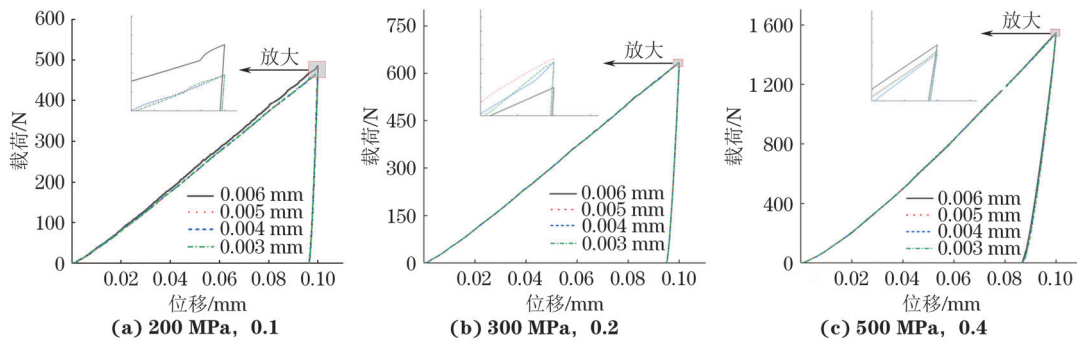


图3 不同局部区域网格尺寸条件下模拟得到不同屈服应力和不同应变硬化指数下接头的载荷-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves of joints under different yield stresses and different strain hardening exponents by simulation under different local area mesh size

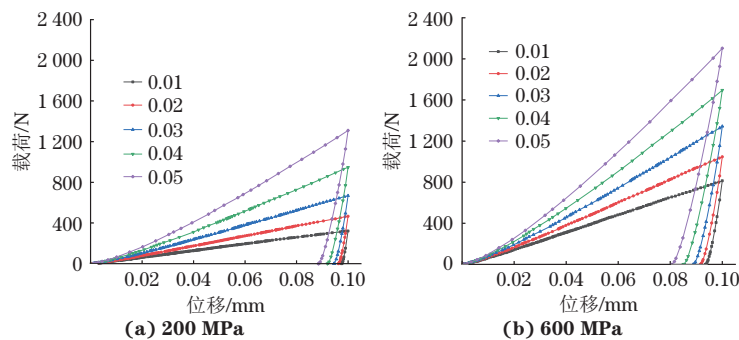


图4 模拟得到不同屈服应力和不同应变硬化指数下接头的载荷-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of joints under different yield stresses and different strain hardening indexes by simulation

示。由图4可以看出:在固定屈服应力不变时,应变硬化指数增大会使载荷-位移曲线的加载曲率增大;在保持应变硬化指数不变时,加载曲率随着屈服应力的增大而增大。

对载荷-位移曲线的加载段按照式(1)进行拟合,得到不同屈服应力和不同应变硬化指数下的加载曲率和加载指数。使用Origin软件对不同应变硬化指数下的加载曲率和加载指数数据点进行拟合,拟合曲线如图5所示,拟合公式如下:

$$C = an^2 + bn + d \quad (3)$$

$$m = en + f \quad (4)$$

式中: a, b, d, e, f 均为拟合参数,拟合结果如表1所示。

式(3)和式(4)只体现了压入响应参数与应变硬化指数之间的关系,但在有限元分析过程中,材料的屈服应力和应变硬化指数同时决定了压入响应参数,因此还需建立上述公式中各拟合参数与屈服应力之间的关系。通过Origin软件采用二次函数的形式对拟合参数与屈服应力数据点进行拟合,拟合结果如图6所示,拟合公式如下:

$$a = -0.04297\sigma_y^2 + 59.966\sigma_y + 102776.143 \quad (5)$$

$$b = -0.046\sigma_y^2 + 90.17533\sigma_y - 32503.05 \quad (6)$$

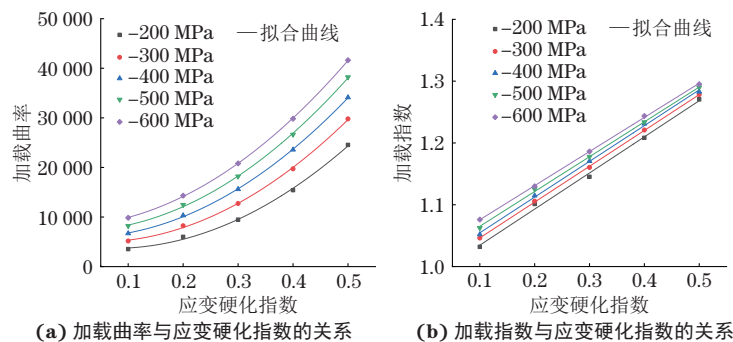


图5 不同屈服应力下载入曲率和加载指数与应变硬化指数的关系

Fig. 5 Relationship between loading curvature (a) and loading index (b) and strain hardening index under different yield stresses

表1 不同屈服应力下加载曲率和加载指数与应变硬化指数的拟合参数

Table 1 Fitting parameters between loading curvature and loading index and strain hardening index under different yield stresses

屈服应力/MPa	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
200	112 878.245	-16 291.832	4 258.866	0.584 33	0.976 15
300	117 946.322	-10 037.172	5 162.260	0.579 50	0.988 44
400	117 779.420	-2 563.466	5 871.541	0.578 02	0.996 82
500	123 780.779	-119.329	7 162.056	0.563 19	1.008 83
600	122 757.020	5 428.674	8 150.501	0.551 86	1.020 59

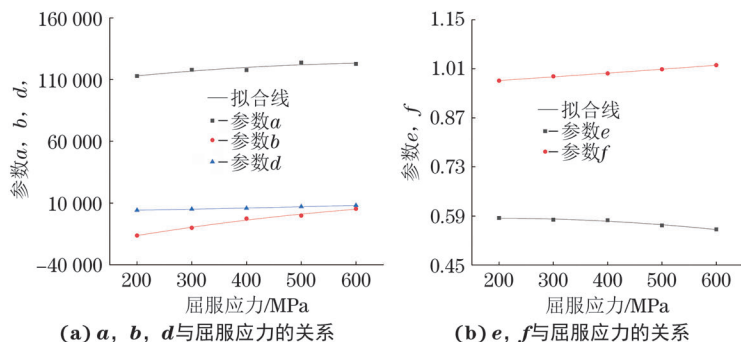


图6 拟合参数与屈服应力之间的关系

Fig. 6 Relationship between fitting parameters and yield stress

$$d = 0.005\,37\sigma_y^2 + 5.489\,72\sigma_y + 2\,959.154\,4 \quad (7)$$

$$e = -1.88 \times 10^{-7}\sigma_y^2 + 6.93 \times 10^{-5}\sigma_y + 0.578 \quad (8)$$

$$f = 1.835\,7 \times 10^{-8}\sigma_y^2 + 9.46 \times 10^{-5}\sigma_y + 0.957\,03 \quad (9)$$

将式(5)~式(9)与式(3)和式(4)进行联立,得到压入响应参数 C , m 与屈服应力和应变硬化指数的关系如下:

$$C = (-0.0429\,7\sigma_y^2 + 59.966\sigma_y + 102\,776.143)n^2 + (-0.046\sigma_y^2 + 90.175\,33\sigma_y - 32\,503.05)n + 0.005\,37\sigma_y^2 + 90.175\,33\sigma_y + 2\,959.154\,4 \quad (10)$$

$$m = (-1.88 \times 10^{-7}\sigma_y^2 + 6.93 \times 10^{-5}\sigma_y + 0.578)n + 1.835\,71 \times 10^{-8}\sigma_y^2 + 9.46 \times 10^{-5}\sigma_y + 0.957\,03 \quad (11)$$

3.2 预测公式的准确性验证

通过压入试验获取加载段曲线的加载曲率和加载指数,代入式(10)和式(11)使用数值分析软件1stOpt可以反求出材料的屈服应力和应变硬化指数,再结合Hollomon本构模型可进一步求得材料的应力-应变曲线。将有限元分析时输入的屈服应力和应变硬化指数作为约定真值,将反求得到的屈服应力和应变硬化指数与约定真值进行对比,计算相对

误差。在反求屈服应力和应变硬化指数的过程中,使用Levenberg-Marquardt优化算法,收敛指标设置为 1×10^{-10} ,最大迭代数设置为1 000,算法模式选择为标准LM+通用全局优化法。预测结果的相对误差分布如图7所示。由图7可知,在作者所考虑的材料力学性能参数范围内,使用压入响应参数结合上述反求材料力学性能参数的预测屈服应力和应变硬化指数的最大相对误差绝对值分别为10.5%和6.29%。可知,通过压入试验获得的载荷-位移曲线加载段压入响应参数结合所建立的公式可以较准确地预测异种金属焊接接头的材料力学性能。

4 异种金属焊接接头的材料力学性能参数

试验材料为中国科学院金属研究所提供的AP1000型压水堆核电站一回路安全端异种金属焊接接头,试样尺寸为60 mm×25 mm×10 mm。焊接工艺流程:先采用钨极氩弧焊(GTAW)在SA508钢管嘴(压力容器端)堆焊隔离层,焊材为52M镍基合金,堆焊后进行焊后热处理以消除焊接残余应力;然后再次采用GTAW工艺,以52M镍基合金为填充金属与316L不锈钢安全端过渡管进行对接焊。依次使用600#,800#,1000#水砂纸将试样打磨至表面光滑^[5],采用由UTM-6103型万能试验机改装的压入试验平台进行压入试验,球压头直径为1 mm,压

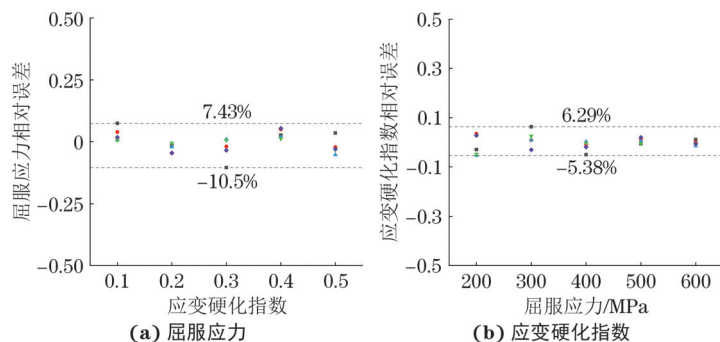


图7 预测得到屈服应力和应变硬化指数相对误差分布

Fig. 7 Relative error distribution of yield stress (a) and strain hardening index (b) by prediction

头材料为碳化钨,压入深度设置为 0.1 mm ,压入速度和卸载速度为 $0.1\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,试验温度为室温。为更加准确地获取焊缝及其附近的材料力学性能分布,采用两行测试点交错分布的方法来增加测试点的密度,根据GB/T 22458—2008《仪器化纳采压入试验方法通则》,将相邻压入点之间的距离设置为 2 mm ,两行测试点之间的距离设置为 5 mm 。焊接接头试样压入位置如图8所示,共46个测试点。

借助Origin软件将试验获得的载荷-位移曲线加载段按照式(1)进行拟合,得到49组压入响应参数 C , m ,结合式(10)和式(11)可计算得到测试区域的材料力学性能参数分布,如图9所示,图中虚线为熔合线。由图9可知:SA508钢、316L钢母材和52M

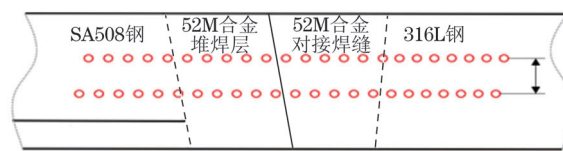


图8 异种金属焊接接头试样压入试验的测试点位置

Fig. 8 Testing point position of dissimilar metal welded joint specimen during indentation test

镍基合金堆焊层及对接焊缝的屈服应力和应变硬化指数分布相对稳定;热影响区(HAZ)变化明显,随着距熔合线距离的增加,热影响区的屈服应力减小,而应变硬化指数增大。在靠SA508钢一侧,屈服应力的最大值和应变硬化指数的最小值均出现在熔合线附近;在靠316L钢一侧,屈服应力和应变硬化指数的最大值均出现在热影响区中。

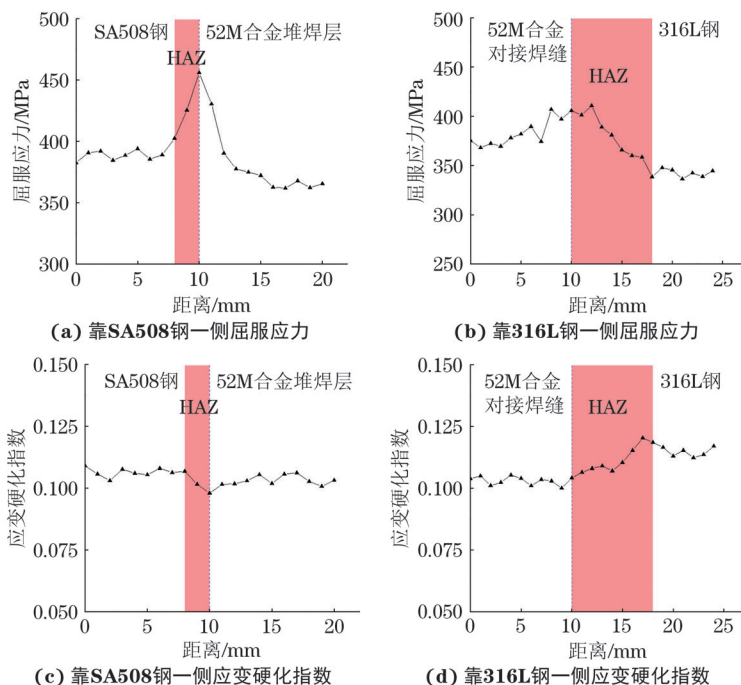


图9 计算得到异种金属焊接接头不同位置的屈服应力和应变硬化指数分布

Fig. 9 Distribution of yield stress (a-b) and strain hardening index (c-d) at different positions of dissimilar metal welded joints by calculation: (a, c) near SA508 steel side and (b, d) near 316L steel side

5 结 论

(1) 在 200~600 MPa 屈服应力和 0.1~0.5 应变硬化指数范围内,利用通过压入加载响应参数反求材料力学性能参数的预测公式计算得到的屈服应力和应变硬化指数的最大相对误差绝对值分别为 10.5%, 6.29%。所建立的公式可以较为准确地预测异种金属焊接接头局部区域的材料力学性能参数。

(2) 利用预测公式计算得到 SA508 钢/52M 合金堆焊层/52M 合金对接焊缝/316L 钢异种金属焊接接头两侧热影响区的屈服应力和应变硬化指数变化明显,随着距熔合线距离的增加,屈服应力减小,而应变硬化指数增大;母材、52M 镍基合金堆焊层和对接焊缝的屈服应力和应变硬化指数分布相对稳定。

参考文献:

- [1] YE D Y, MI F, LIU J Z, et al. Use of instrumented indentation testing to study local mechanical properties of 304L SS welded joints subjected to low-cycle fatigue loadings[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 564: 76-84.
- [2] XUE H, WANG Z, WANG S, et al. Characterization of mechanical heterogeneity in dissimilar metal welded joints[J]. Materials, 2021, 14(15): 4145.
- [3] DONG W C, GAO D B, LU S P. Numerical investigation on residual stresses of the safe-end/nozzle dissimilar metal welded joint in CAP1400 nuclear power plants[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 32(5): 618-628.
- [4] ZOU B, GUAN K S, WU S B. Determination of area reduction rate by continuous ball indentation test[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2016, 139: 220-227.
- [5] 张泰华. 微/纳米力学测试技术: 仪器化压入的测量、分析、应用及其标准化[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [6] 黄礼洋, 关凯书. 球压痕试验法评价金属材料的强度[J]. 机械工程材料, 2021, 45(1): 85-91.
- [7] SNEDDON I N. The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile[J]. International Journal of Engineering Science, 1965, 3(1): 47-57.
- [8] TABOR D. The hardness of metals[M]. Oxford: Clarendon Press, 1951.
- [9] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [10] JOHNSON K L. Contact mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.
- [11] JOHNSON K L. The correlation of indentation experiments[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1970, 18(2): 115-126.
- [12] ZHANG T H, CHENG W Q, PENG G J, et al. Numerical investigation of spherical indentation on elastic-power-law strain-hardening solids with non-equibiaxial residual stresses[J]. MRS Communications, 2019, 9(1): 360-369.
- [13] JIANG P, ZHANG T H, FENG Y H, et al. Determination of plastic properties by instrumented spherical indentation: Expanding cavity model and similarity solution approach[J]. Journal of Materials Research, 2009, 24(3): 1045-1053.
- [14] 张志杰, 蔡力勋, 陈辉, 等. 金属材料的强度与应力-应变关系的球压入测试方法[J]. 力学学报, 2019, 51(1): 159-169.
- [15] 陈辉, 蔡力勋, 彭晖. 预测铝合金单轴力学性能的复合型双锥压入法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(20): 79-88.
- [16] 范凯. 核电异种金属焊接接头材料界面区的局部断裂行为研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2018.
- [17] DE BEULE M, MORTIER P, BELIS J, et al. Plasticity as a lifesaver in the design of cardiovascular stents[J]. Key Engineering Materials, 2007, 340/341:

- 841-846.
- [18] WANG H T, WANG G Z, XUAN F Z, et al. Local mechanical properties of a dissimilar metal welded joint in nuclear powersystems[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 568: 108-117.
- [19] 王磊. 材料的力学性能[M]. 3版. 沈阳: 东北大学出版社, 2014.
- WANG L. Mechanical properties of materials[M]. 3rd ed. Shenyang: Northeast University Press, 2014.
- [20] HOLLOMON J H. Time-temperature relations in tempering steel[J]. Transaction of AIME, 1945, 162: 223-249.

Calculation Method of Material Mechanical Properties of Dissimilar Metal Welded Joint Based on Indentation Response

XUE He¹, YANG Chao¹, ZHANG Yubiao¹, NING Shuo¹, ZHANG Jiaqing¹, ZHU Jiajun¹, ZHANG Jianlong²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Xi'an Special Equipment Testing Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on the Hollomon constitutive model, the relationship between different mechanical property parameters of materials (yield stress and strain hardening index) and the indentation response parameters (loading curvature and loading index) of the loading section of the load-displacement curve was analyzed by indentation test simulation by ABAQUS finite element analysis software and the method of controlling single variable. The prediction formula of the mechanical property parameters of the materials derived from the response parameters of the loading section was established, and the yield stress and strain hardening index entered in the finite element analysis were used as the conventional truth values to verify the accuracy of the prediction method. The material mechanical property parameter distribution of SA508 steel/52M alloy surfacing layer/52M alloy butt weld/316L steel dissimilar metal welded joint was obtained by this prediction method. The results show that the absolute relative errors of yield stress and strain hardening index calculated by the prediction formula were 10.5% and 6.29%, respectively. The formula could accurately predict the material mechanical property parameters of the local area of the dissimilar metal welded joint. The yield stress and strain hardening index of the heat affected zone on both sides of the dissimilar metal welded joint by calculation changed obviously, and the yield stress decreased while the strain hardening index increased with the increase of the distance from the fusion line. The yield stress and strain hardening index distribution of base metal and 52M alloy surfacing layer and butt weld were relatively stable.

Key words: dissimilar metal welded joint; load-displacement curve; indentation response parameter; mechanical property parameter