

压痕应变法应力计算函数和低合金钢力学性能的关系

陈 静, 阚 盈, 姜云禄, 陈怀宁

(中国科学院金属研究所 核用材料与安全评价重点实验室, 沈阳 110016)

摘 要: 压痕应变法是一种新型无损的应力检测方法, 具有快捷方便、测试准确等优点, 影响该方法测量精度的主要因素之一就是应力计算函数(压痕应变增量 $\Delta\epsilon$)与弹性应变(ϵ)之间的关系)的确定. 文中在已有工作基础上, 基于有限元数值模拟计算, 结合试验标定结果, 探讨了 12 种不同力学性能的低合金钢类材料应力计算函数的存在规律. 结果表明, 在获得材料拉伸力学性能的情况下, 根据材料在零应力情况下的应变增量, 可以获得该材料的应力计算函数, 从而避免了应力计算函数确定时进行的复杂试验标定或模拟计算问题.

关键词: 压痕应变法; 应力计算函数; 数值模拟; 低合金钢; 力学性能

中图分类号: TG 441 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400195

0 序 言

压痕应变法^[1-3]是根据球形压痕诱导产生的应变变化信息(称为压痕应变增量 $\Delta\epsilon$), 通过事先获得的应力计算函数计算相应的残余弹性应变, 再利用广义胡克定律获得残余应力的一种近乎无损的应力测试方法. 其理论基础可以归结为两条基本规律: (1) 相同应力场中, 主应变方向上距压痕中心固定距离处产生的应变增量与压痕直径成正比; (2) 相同尺寸压痕直径, 在主应变方向产生的应变增量 $\Delta\epsilon$ 与弹性应变 ϵ 成正比. 依据第 (2) 条规律, 在施加不同应力水平的标定试板上, 通过粘贴应变片和制造一定尺寸的压痕, 获得应变增量与弹性应变的对应关系, 即压痕应变法的标定曲线, 通过曲线拟合方法获得相应的应力计算函数. 目前, 应力计算函数的获得主要通过试验标定的方法, 其首要条件就是用户能提供符合标定尺寸的试板, 而试板的原始应力状态和实际施加的应力水平又是影响标定结果准确性和稳定性的关键因素. 文献 [4-6] 曾采用模拟计算的方法, 研究材料性能参数对标定曲线的影响规律, 但是鉴于模型的局限性, 未能在实际测量中得到应用. 文献 [7-8] 建立了可以准确获得大部分金属材料标定曲线的通用模型, 并与标定结果进行了比对分析, 发现采用零应力条件下的简单压痕试验, 结合数值模拟计算就可以得到与试

验标定曲线十分一致的结果. 该方法不需要准备大尺寸试板和进行复杂的标定, 也避免了试板应力状态的不确定性给标定结果造成的影响.

基于已有结果, 文中进一步研究了不同强度类型的低合金钢类材料, 应力计算函数的存在形式及相应的应力计算常数与材料力学性能之间存在的规律性, 探讨在获得材料拉伸力学性能数据情况下, 如何通过零应力下的应变增量直接获得应力计算函数的方法, 进一步解决确定新材料应力计算常数时的非试验标定问题, 同时避免了复杂的数值模拟过程.

1 有限元模型建立

考虑到形成压痕的尺寸效应, 压头的良好接触, 准确的压痕形状和较经济的运算速度, 试板模型大小设为 $48\text{ mm} \times 48\text{ mm} \times 4\text{ mm}$, 压痕周围区域的单元划分较为密集, 最小单元尺寸 $0.04\text{ mm} \times 0.03\text{ mm} \times 0.004\text{ mm}$. 因为压头和试板均为对称结构, 取 1/4 建立标定模型进行计算, 见图 1 所示.

1.1 材料性能参数

为了研究不同强度低合金钢类材料压痕应变法应力计算函数的存在规律及相应的应力计算函数, 选取 12 种有代表性的工程结构钢材料, 具有较广的强度范围和屈强比数值. 12 种材料的弹性模量依据实际的弹性模量设置, 泊松比均取 0.28, 材料屈服采用 Von Mises 准则, 由实际拉伸试验获得的 12 种材料的屈服强度和抗拉强度见表 1 所示.

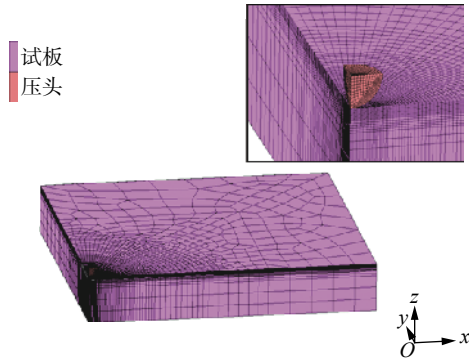


图1 模拟标定用模型

Fig. 1 Model for calibration

表1 12种材料的强度特性

Table 1 Mechanical characters for twelve materials

序号	屈服强度 σ_y /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	屈强比 σ_y/σ_b
1号	250	419	0.597
2号	318	631	0.504
3号	336	532	0.632
4号	415	567	0.732
5号	555	618	0.898
6号	485	572	0.911
7号	747	807	0.926
8号	705	731	0.964
9号	303	516	0.587
10号	556	675	0.824
11号	619	741	0.835
12号	751	1135	0.662

制造压痕的压头材料采用碳化钨材料参数,弹性模量 534 GPa,泊松比 0.22,屈服强度设为 2 000 MPa.

1.2 边界条件确定

在模型对称位置设置了位移约束,同时为了消除模型的刚体位移,将试板模型底部单元节点的 z 向位移设置为 0. 压痕制造通过给压头施加一定大小的载荷来控制,而试板中的残余应力通过施加单元面力来实现.

1.3 压痕制造

实际压痕制造时采用的动载冲击形式,即给压头一个固定初始速度的动能,在应变片的特定位置(即应变测点)制造压痕.文献[6-7]研究表明,对于相同大小的压痕,采用较低速度的动载方式和施加静载方式获得的应变增量几乎没有差别.为方便起见,采用静力加载的方法获得材料的应变响应.对

于不同强度的材料,为施加准确的静载压力,还需要参照该材料实际标定时获得的零应力条件下应变增量大小,以此为基准,进而获得该材料在各种应力场条件下应变增量与弹性应变之间的具体关系,即应力计算函数和相应的应力计算常数.

2 应变增量与材料性能的力学讨论

压痕应变法测量残余应力时,压痕周围形成弹性应变场,而应变片粘贴区始终处于弹性变形区,如图2所示.

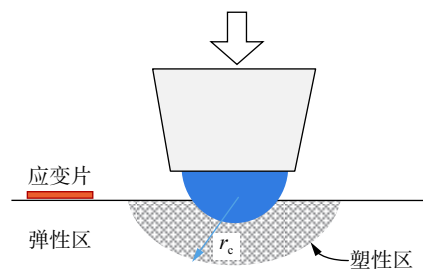


图2 压痕应变法压入形变示意图

Fig. 2 Schematic of indentation deformation by indentation strain method

主应力方向上的应变增量 ($\Delta\varepsilon$) 实际上由两部分组成:与残余应力无关的、由材料和压痕系统决定的压缩应变 ($\Delta\varepsilon_0$) 和压痕产生的塑性区诱导残余应力松弛而形成的释放应变 ($\Delta\varepsilon_r$),即

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon_r \quad (1)$$

在无应力的准静态条件下,根据 Johnson 的空腔模型^[9],压痕外弹性区的径向应力 (σ_r) 和切向应力 (σ_θ) 表达式为

$$\sigma_r = -\frac{2}{3}\left(\frac{r_c}{r}\right)^3 \sigma_y; \sigma_\theta = \frac{1}{3}\left(\frac{r_c}{r}\right)^3 \sigma_y \quad (2)$$

式中: r_c 是弹塑性边界; σ_y 为材料的静态屈服强度; r 为弹性区范围内某点到压痕中心距离.虽然公式(2)的获得是基于理性弹塑性材料,但是,由于避开了塑性区问题,对于弹性区来说,即使在 Hollomon 幂次硬化模型或线性硬化模型的情况下,该式依然成立.对应的径向应变,即 $\Delta\varepsilon_0$ 为

$$\Delta\varepsilon_0 = \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu\sigma_\theta) = -\frac{(2+\nu)\sigma_y}{3Er^3} \cdot r_c^3 \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量; ν 为泊松比.

基于体积守恒、压痕几何相似性及 Johnson 的扩展球腔模型 (ECM),小的球压比 a/R (a -压入半径, R -压头半径) 下球形压头产生的塑性区半径计算公式为^[10]

$$\left(\frac{r_c}{a}\right)^3 = \frac{E}{4\sigma_y} \cdot \frac{a}{R} \quad (4)$$

如果考虑加工硬化情况,将初始屈服 σ_y 用流动应力代替即

$$r_c = a \cdot \left(\frac{a}{4R} \frac{E}{k\epsilon^n}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

式 (4) 和式 (5) 没有考虑卸载时的回弹和残余应力的作用. 对于特定的压痕系统和被测材料,卸载回弹较小,且有稳定规律^[5],并不影响式 (5) 的形式. 当存在残余应力 σ_{re} 时,残余应力会影响塑性区半径 r_c ,假设修正函数为 $f(\sigma)$ ^[4],则

$$r'_c = r_c \cdot f(\sigma) = r_c \cdot \left[1 + m_1 \left(\frac{\sigma_{re}}{\sigma_y}\right) + m_2 \left(\frac{\sigma_{re}}{\sigma_y}\right)^2 + m_3 \left(\frac{\sigma_{re}}{\sigma_y}\right)^3\right] \quad (6)$$

式中: $0 < f(\sigma) < 1$, 则 $\sigma_r > 0$; $f(\sigma) > 1$, 则 $\sigma_r < 0$.

对于压痕诱导的释放应变 $\Delta\epsilon_r$,显然与材料中的残余弹性应变 (ϵ) 有关,可表示为

$$\Delta\epsilon_r = \eta\epsilon = g\left(r_c, \frac{1}{r}\right)\epsilon, 0 < \eta < 1 \quad (7)$$

对于特定的压痕测量系统,释放系数 (η) 与塑性区半径 (r_c) 和应变测点到压痕中心距离 (r) 有关.

综上所述,可以认为在压痕测量系统确定的情

况下 (压入载荷和应变测点位置一定),影响压痕外弹性区应变增量的主要因素除了残余弹性应变,与材料力学性能相关的特征变量就是屈服强度/弹性模量 (即屈服应变 ϵ_y) 和硬化指数 n . 而应变硬化作为材料塑性变形引起的硬度和强度增加的度量,如果试样拉伸过程中由屈服到发生颈缩的形变强化规律满足 Hollomon 方程,根据文献 [11],硬化指数 n 也可表示为屈服强度 σ_y 和抗拉强度 σ_b 比值 (屈强比) 相关的函数,即

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_b} = 0.998 \frac{e^n}{n^n} \ln(1.002 + \epsilon_y) \quad (8)$$

式中: e 为自然对数.

3 模拟计算结果与分析

3.1 12 种低合金钢材料的传统应力计算函数

材料的标定试验采用 KJS-3 型压痕应力测试仪,参照文献 [12-13] 进行. 根据 12 种材料试验标定时获得的零应力条件下的应变增量,首先确定 12 种材料模拟标定时静载压力,进而得到各材料传统形式下的应力计算函数,即应变增量和弹性应变的关系. 图 3 给出部分材料模拟和试验标定曲线

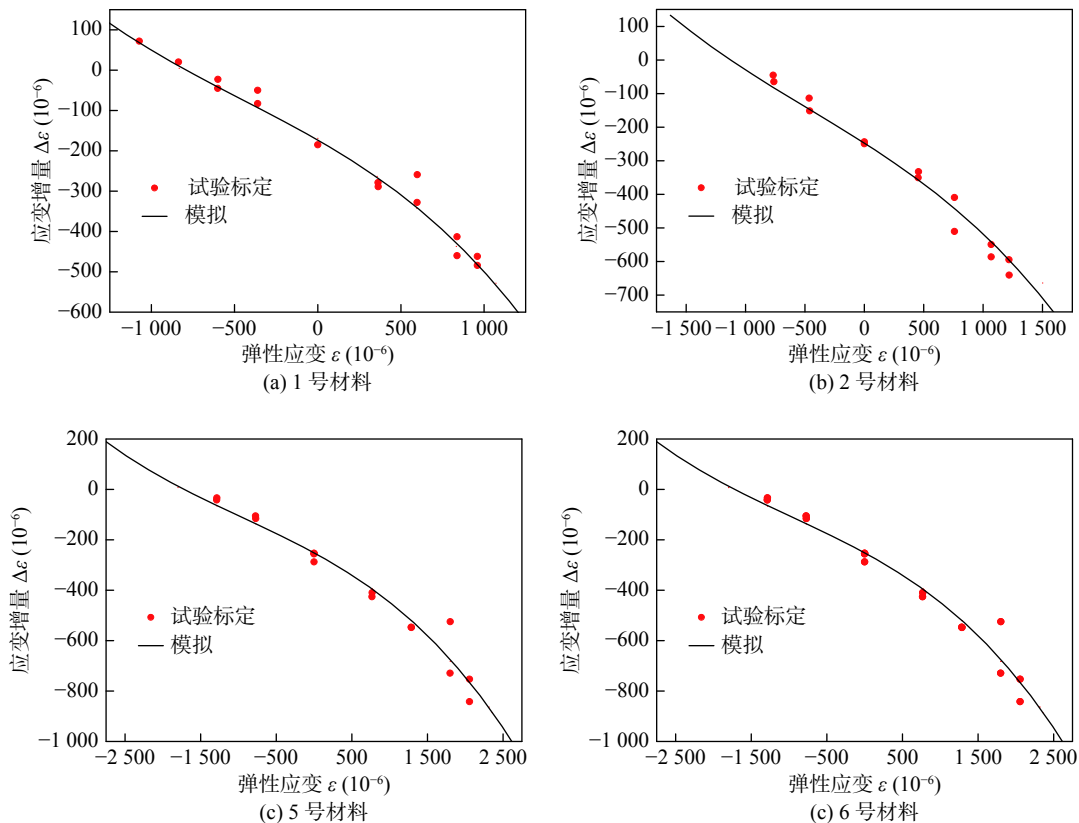


图 3 4 种材料模拟和试验标定结果对比

Fig. 3 Comparison of calibration results between simulation and experiment for 4 materials

比较结果(限于篇幅,其它材料从略),可以看出,模拟值和试验值符合得很好,应力计算函数为典型的3次方多项式关系^[12],即

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_0 + A_1\varepsilon + A_2\varepsilon^2 + A_3\varepsilon^3 \quad (9)$$

式中: $A_1 \sim A_3$ 为应力计算系数,对于某一确定材料,采用特定的压痕系统时, $A_1 \sim A_3$ 是一常数,故也可称为其压痕应变法应力计算常数; $\Delta\varepsilon_0$ 零应力下的应变增量。

3.2 基于各材料 $\Delta\varepsilon_0$ 确定的应力计算函数与力学性能的关系

选取 12 种材料作为应力计算函数与力学性能关系的研究对象. 考虑到不同强度的材料由于硬度不同,在相同冲击动能下压痕直径有所差别,导致零应力下的应变增量不同,而有应力下的应变增量与材料强度又有着密切关系,结合前面分析和模拟数据,按照有应力下的应变增量 $\Delta\varepsilon$ 与零应力下的应变增量 $\Delta\varepsilon_0$ 之比 $\Delta\varepsilon/\Delta\varepsilon_0$ 随无量纲弹性应变 $\varepsilon/\varepsilon_y$ 的变化规律作图,结果见图 4. 根据图 4 结果,如果将 12 种材料的屈强比 σ_y/σ_b 作为材料自身的

影响因素,将无量纲应变 $\varepsilon/\varepsilon_y$ 作为应力场的影响因素,经过数据处理,可以得到如下形式的公式(相关系数 $R = 0.999$),即

$$z = \frac{p_1 + p_2x + p_3x^2 + p_4x^3 + p_5p_{12}\ln(y) + p_6(p_{12}\ln(y))^2}{1 + p_7x + p_8x^2 + p_9p_{12}\ln(y) + p_{10}(p_{12}\ln(y))^2 + p_{11}(p_{12}\ln(y))^3} \quad (10)$$

式中: z 为 $\Delta\varepsilon/\Delta\varepsilon_0$; x 为 $\varepsilon/\varepsilon_y$; y 为 σ_y/σ_b ; $p_1 \sim p_{12}$ 为公式系数,具体数值见表 2.

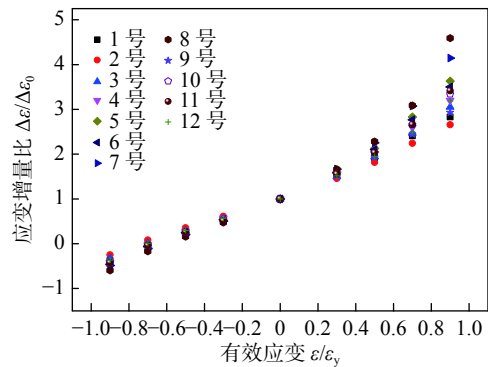


图 4 12 种材料标定数据变化规律
Fig. 4 Calibration laws of 12 materials

表 2 式 (10) 中的系数
Table 2 Coefficients in formula (10)

p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}	p_{11}	p_{12}
1.026	0.695	-1.229	0.973	-0.900	-0.513	-1.309	0.544	-1.210	-1.904	-1.281	1.149

由于 ε_y 和 σ_y/σ_b 为已知的材料力学性能参数,式 (10) 可直接变换成应变增量 $\Delta\varepsilon$ 与弹性应变 ε 的关系,即获得了一种新的应力计算函数,即

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_0 \cdot \frac{B_0 + B_1\varepsilon + B_2\varepsilon^2 + B_3\varepsilon^3}{B_4 + B_5\varepsilon + B_6\varepsilon^2} \quad (11)$$

式中: B_0 和 B_4 由材料的屈强比和表 2 中的系数决定; B_1, B_2, B_3, B_5 和 B_6 取决于材料的屈服应变和表 2 中的系数. 利用该公式,可以计算与弹性应变对应的应变增量(获得标定曲线),也可以通过已知应变增量求解相应的弹性应变(求解残余应力).

式 (11) 成立的条件是各种材料的应变测点位置必须一致,但是压痕制造时采用的压入力大小不尽相同. 事实上,由于该式包含了各自材料零应力状态下的应变增量 $\Delta\varepsilon_0$,而该值与材料的力学性能和压入力大小同时有关.

3.3 基于某种材料 $\Delta\varepsilon_0$ 确定的应力计算函数与力学性能的关系

基于上述分析,启示如果零应力试样获取困难,只能得知其拉伸性能,如果此时利用某一已知

材料的零应力下的应变增量 $\Delta\varepsilon_0$,是否也有可能直接确定新材料的应力计算函数. 假设已知 1 号材料的应力计算函数,在获得其它 2 号~12 号材料的力学性能的情况下,12 种材料应变增量比值 $\Delta\varepsilon/\Delta\varepsilon_{01}$ 与无量纲应变 $\varepsilon/\varepsilon_y$ 的关系如图 5 所示. 经过数据处理,可用式 (10) 完全相同的形式来表示(相关系数

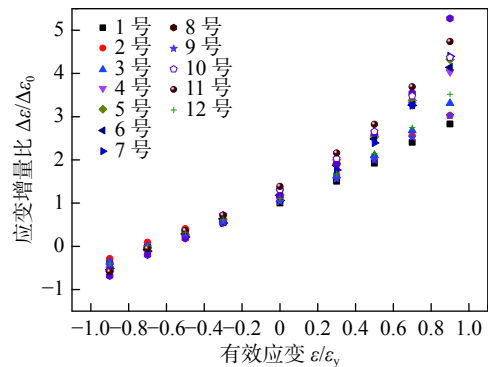


图 5 以 1 号材料为基准获得的各种材料标定数据变化规律

Fig. 5 Calibration laws for different materials based on 1th material

$R = 0.995$), 式中系数 $p_1 \sim p_{12}$ 见表 3. 需要指出的是, 此时式中 z 为 $\Delta\varepsilon/\Delta\varepsilon_{01}$, $\Delta\varepsilon_{01}$ 为已知的 1 号材料零应力下的应变增量. 同样, 可以得到和式 (11) 类似的应力计算函数, 即

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_{01} \cdot \frac{C_0 + C_1\varepsilon + C_2\varepsilon^2 + C_3\varepsilon^3}{C_4 + C_5\varepsilon + C_6\varepsilon^2} \quad (12)$$

表 3 对应 1 号材料式 (10) 中的系数

Table 3 Coefficients in formula (10) of the material

p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}	p_{11}	p_{12}
1.103	1.208	-0.698	1.007	3.908	-8.640	-0.843	0.338	-0.220	21.727	-56.766	0.383

3.4 两种应力计算函数的误差对比

若已知新材料零应力下的应变增量和屈服比, 可依据式 (11) 计算该材料不同弹性应变下的应变增量数值; 若条件有限, 只知新材料的屈服比和其它某一材料 (如 1 号材料) 零应力下的应变增量, 则可依据式 (12) 进行该材料应变增量的计算. 图 6 选取 9 号和 11 号两种屈服强度和屈服比相差较大材料, 采用模拟标定和依据式 (11) 和式 (12) 计算得到的应变增量与弹性应变关系的对比结果. 可以看出, 采用公式直接计算得到的结果与模拟

式中: C_0 和 C_4 取决于材料的屈服比和表 3 中的系数; 而 C_1, C_2, C_3, C_5 和 C_6 则取决于材料的屈服应变和表 3 中的系数. 和式 (11) 一样, 公式 (12) 成立的条件除了各种材料的应变测点位置必须一致外, 对于实际压痕制造采用的压入力大小也要求完全一样.

标定值非常接近. 比较而言, 采用式 (11) 比式 (12) 误差更小.

对于其它不同类型的金属材料, 如铝合金、钛合金等, 式 (11) 和式 (12) 是否适用, 精度如何, 还有待进一步试验和分析研究.

4 结 论

(1) 对于低合金钢类材料, 以屈服比和屈服应变为材料特征变量, 可以获得压痕应变增量与弹性应变之间新的应力计算函数, 实现无需通过复杂的试验标定或专业的模拟计算确定应力计算函数的方法.

(2) 在获得零应力下的应变增量和材料拉伸性能条件下, 可依据新的应力计算函数式 (11), 计算出对应应变增量的弹性应变来求解残余应力, 或在给定的应力计算函数式 (12), 同样可以计算出对应应变增量的弹性应变来求解残余应力, 或在给定弹性应变情况下, 获得传统的标定曲线.

(3) 在仅仅已知材料拉伸性能的条件下, 可依据新的应力计算函数式 (12), 同样可以计算出对应应变增量的弹性应变来求解残余应力, 或在给定弹性应变情况下, 获得传统的标定曲线.

参考文献:

[1] 陈亮山, 董秀中, 潘 兴. 冲击压痕测定残余应力研究 [C]//第七次全国焊接学术会议论文集. 哈尔滨, 1993: 21 - 24.
 [2] 林丽华, 陈立功, 顾明元. 球面压痕测残余应力试验方法研究 [J]. 机械强度, 1998, 20(4): 303 - 307.

Lin Lihua, Chen Ligong, Gu Mingyuan. A new method for determining residual stress-a spherical indenter pressed on the struc-

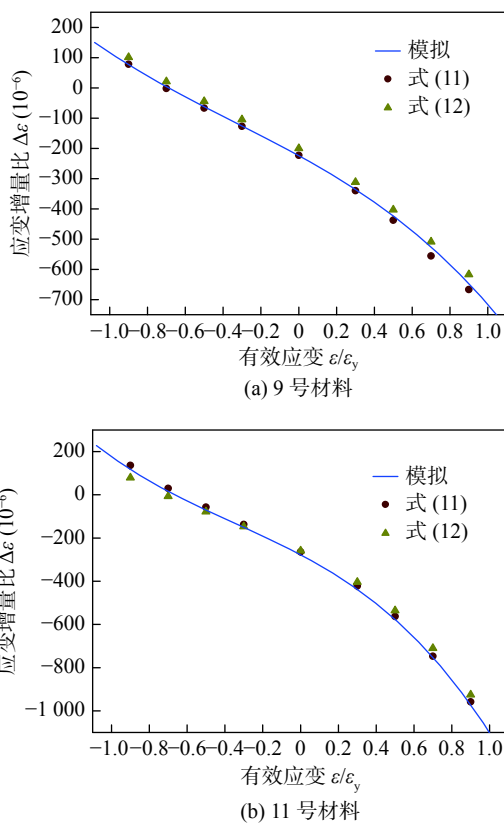


图 6 2 种材料模拟和公式计算结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation and formula calculation results of 2 materials

- ture surface and added a additional stress field[J]. Journal of Mechanical Strength, 1998, 20(4): 303 – 307.
- [3] 孙 渊, 王庆明, 夏凤芳, 等. 残余应力测量法中压痕标定实验的分析 [J]. 机械制造, 2006, 44(504): 70 – 72.
Sun Yuan, Wang Qingming, Xia Fengfang, *et al.* Analysis of indentation calibration experiment in residual stress measurement[J]. Machinery, 2006, 44(504): 70 – 72.
- [4] 曲鹏程. 屈服强度对压痕应变法测量残余应力的影响 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2006.
- [5] 孟宪陆. 不同应力场中压痕应变法的数值模拟 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2007.
- [6] 刘 生. 材料性能和方向性对压痕应变法测量残余应力的影响 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2013.
- [7] 陈 静, 阚 盈, 姜云禄, 等. 压痕应变法应力计算常数的数值模拟 [J]. 焊接学报, 2019, 40(1): 147 – 150.
Chen Jing, Kan Ying, Jiang Yunlu, *et al.* Numerical simulation of stress determination coefficients for indentation strain-gage method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(1): 147 – 150.
- [8] 陈 静, 阚 盈, 姜云禄, 等. 一种基于有限元模拟确定压痕应变法应力测量常数的方法: 201711277423.8[P]. 2017 – 11 – 27.
- [9] Johnson K J. Contact mechanics[M]. Cambridge University Press, 1985.
- [10] Gao X L. An expanding cavity model incorporating strain-hardening and indentation size effects[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43: 6615 – 6629.
- [11] 郑学斌, 尚鹏举. 应变硬化指数与屈服强度和抗拉强度关系的研究 [J]. 机械工程师, 2017, 5: 102 – 105.
Zheng Xuebin, Shang Pengju. Study on influence of strain hardening exponent on yield strength and tensile strength[J]. Mechanical Engineer, 2017, 5: 102 – 105.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料残余应力测定压痕应变法: GB/T 24179-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [13] 陈 静, 黄春玲, 陈怀宁. 三点弯曲标定实验中双向主应变之间的关系 [J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 31(6): 37 – 40.
Chen Jing, Huang Chunling, Chen Huaining. Relationship between the two principle strains in the three-point bending calibration experiment[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2008, 31(6): 37 – 40.

第一作者简介: 陈静, 女, 1976 年出生, 硕士, 副研究员. 主要从事焊接力学的数值模拟和接头性能研究. 发表论文 10 余篇. Email: cj@imr.ac.cn