

DOI: 10.7511/jslx20180329001

基于内聚力模型的白点萌生机理研究

范俊锴^{*1}, 彭波¹, 侯高杰¹, 杜凤山²

(1. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 焦作 454000;

2. 燕山大学 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 秦皇岛 066004)

摘要: 基于内聚力理论、氢压理论和应力作用下氢富集理论, 在以往孔洞锻合研究的基础上, 建立了白点萌生扩展的有限元分析模型。研究了初始氢浓度、裂纹长度以及多裂纹耦合作用等多种因素对白点萌生的影响, 确定了不同条件下白点萌生的临界氢浓度及其变化趋势。结果表明, 氢对白点萌生具有重要的影响, 在白点萌生过程中, 高浓度的氢聚集在裂纹端部, 极大地降低了钢的内聚力强度; 对于单裂纹, 随着裂纹长度的增加, 白点萌生的临界氢浓度逐渐减小并趋于稳定值; 当多个密集小裂纹同时存在时, 裂纹间的耦合效应会导致小裂纹有贯穿形成大裂纹的趋势, 而远端裂纹的耦合效应则相对较小; 对于多裂纹, 白点萌生临界氢浓度具有随裂纹个数的增加而线性递减的趋势。

关键词: 白点萌生; 内聚力理论; 应力作用下氢富集; 氢压理论; 多裂纹

中图分类号: O242.21

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2019)03-0407-07

1 引言

白点是一种钢内裂纹^[1], 白点的萌生会导致钢制工件的突然断裂, 造成严重的安全事故。因此, 对钢内白点问题的研究具有重要意义, 得到了国内外学者的广泛关注。

已有研究表明, 氢是影响白点萌生的重要因素^[2], 一方面高浓度的氢在微孔隙及微裂纹内部产生高强氢压, 另一方面高浓度的氢会降低材料的力学性能。同时, 在应力场作用下, 氢的上坡扩散效应^[3]也会对白点的萌生产生显著的影响。因此, 白点的萌生问题是一个由氢主导的多因素耦合作用问题。

受限于分析手段, 对于白点的研究多是基于氢浓度或夹杂等的单因素分析, 对于多因素下的耦合作用研究还很少涉及。近年来, 随着与氢相关的内聚力模型在模拟氢致裂纹中的应用, 氢致裂纹扩展的相关研究取得了明显进展, 同时也为探究多因素耦合条件下白点萌生临界氢浓度的研究提供了重要的理论依据。文献[4-6]分别基于内聚力模型, 采用有限单元法研究了高强度钢和 25%Cr 双相不锈钢中的氢致裂纹问题; 研究结果表明, 在多因素

耦合作用下, 采用内聚力模型能够准确地反映氢致裂纹的萌生扩展过程。王艳飞等^[7]基于有限元软件 ABAQUS, 利用内聚力模型和与氢相关的线性内聚力张开位移关系, 开发了顺次耦合的氢致滞后断裂有限元计算程序, 研究了 AISI4135 钢中的氢致裂纹问题。

虽然内聚力模型在氢致裂纹研究中得到了成功的应用, 但是对于以孔隙内氢压为驱动力的白点问题研究还鲜有涉及。本文基于内聚力理论、氢压理论和应力作用下氢富集理论, 建立了白点萌生扩展的多裂纹分析模型。综合考虑了材料氢浓度、氢对钢内聚力强度以及锻后多裂纹等多种因素对白点萌生的影响, 确定了多种因素影响条件下白点萌生的临界氢浓度及其变化趋势, 为预控白点萌生提供了重要的理论依据。

2 钢中氢行为

2.1 氢在应力作用下的富集

根据氢在应力作用下扩散行为的研究, 当金属中存在应力梯度时, 氢会自发的向高应力区聚集, 其中静水应力是氢扩散的驱动应力。在静水应力梯度作用下, 氢的扩散方程可表示为^[2]

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c - \frac{Dc}{RT} \bar{V}_H \nabla^2 \sigma_h - \frac{Dc}{RT} \nabla c \nabla \sigma_h \quad (1)$$

式中 c 为钢中溶解氢浓度, D 为氢的扩散系数, t 为氢扩散时间, $\bar{V}_H = 2.0 \times 10^3 \text{ mm}^3/\text{mol}$ 为偏摩

收稿日期: 2018-03-29; 修改稿收到日期: 2018-07-28.

基金项目: 国家自然科学基金(51405136); 河南理工大学博士基金(B2015-37)资助项目.

作者简介: 范俊锴*(1986-), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师 (E-mail: junkaifan@hpu.edu.cn).

尔体积, $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 为气体摩尔常数, T 为开氏温度, ∇c 为氢浓度梯度, $\nabla \sigma_h$ 为静水应力梯度。

氢在金属内部经过长时间扩散后会达到稳态, 此时 $t \rightarrow \infty, \partial c/\partial t=0$ 。由式(1)可推导出应力区氢富集公式为

$$c_s = c_0 \exp\left[\frac{\sigma_h \bar{V}_H}{RT}\right] \quad (2)$$

式中 c_0 为无应力时氢浓度, $\sigma_h = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ 为应力区静水应力。

2.2 钢内氢浓度与微孔隙氢压计算模型

根据氢压理论^[1], 钢内微孔隙中高强氢压是导致白点萌生扩展的主要原因。Kazinczy^[8] 在钢内晶格氢的溶解度和扩散能力研究的基础上, 通过理论推导和试验验证, 对 Phragmen^[9] 的氢压强度计算模型进行修正, 得到了钢内微孔隙氢压理论计算公式:

$$c_s = 1.767 \times 10^{-2} T \sqrt{p} \exp\left[\frac{5.313 \times 10^{-2} p - 2300}{T}\right] \quad (3)$$

式中 c_s 为工件中溶解的氢浓度, 单位为 $\text{cm}^3/100 \text{ g}$ ($1 \text{ cm}^3/100 \text{ g}=0.893 \text{ ppm}$), $T=293.15 \text{ K}$, p 为微孔隙氢压强度。

2.3 氢作用下内聚力强度模型

典型的内聚力强度模型如图 1 所示。其特点在于在裂纹尖端设置内聚力区 ρ , 将裂纹界面预设为粘结单元, 引入内聚力张应力-张开位移法则, 演化在法向应力作用下的裂纹扩展。图 1 开裂过程

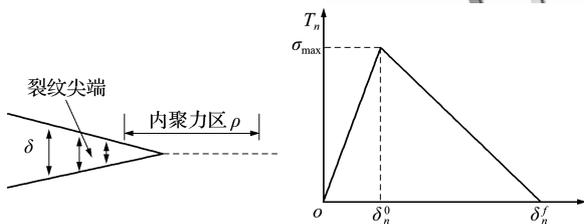


图 1 裂纹尖端的内聚力模型
Fig. 1 Cohesion zone model of crack expansion

中, 裂纹界面的粘结单元张开, 法向应力 σ 逐渐增大, 当张开位移达到 δ_n^0 时, 法向应力大于材料极限应力 σ_{\max} , 内聚力单元出现损伤; 随着外力作用下内聚力单元的进一步张开, 法向应力线性减小, 当张开位移达到临界值 δ_n^f 时, 裂纹界面粘结单元间的法向应力为 0, 粘结单元失效, 裂纹扩展。

图 1 所示内聚力张应力-张开位移关系为

$$G = \frac{K_C^2}{E(1-\nu^2)} = \frac{1}{2} \sigma_{\max} \delta_n^f \quad (4)$$

式中 G 为材料断裂能, K_C 为断裂韧性, E 为弹性模量, ν 为泊松比。

Jiang 等^[10] 使用周期密度泛函理论, 计算了在不同量的氢存在下 Fe 的理想断裂能(表面能), 表示为

$$\gamma(\theta) = (1 - 1.0467\theta + 0.1687\theta^2) \gamma(0) \quad (5)$$

式中 $\gamma(\theta)$ 为不同量的氢存在下金属材料的断裂能, $\gamma(0)$ 为不含氢时材料的断裂能, θ 为氢在材料表面的附着率^[11]。

$$\theta = \frac{C}{C + \exp(-\Delta g_b^0/RT)} \quad (6)$$

式中 C 为材料氢浓度, Δg_b^0 为材料内表面结合能。

由于氢对裂纹萌生极限张开位移的影响有限^[12], 可以认为裂纹萌生极限张开位移 δ_n^f 为定值, 材料断裂应力 σ_{\max} 与材料断裂能 γ 成正比。结合内聚力张应力-位移法则, 得到氢作用下材料的内聚力强度可以表示为

$$\sigma_{\max}(\theta) = (1 - 1.0467\theta + 0.1687\theta^2) \sigma_{\max}(0) \quad (7)$$

式中 $\sigma_{\max}(\theta)$ 为不同氢浓度作用下材料的内聚力强度, $\sigma_{\max}(0)$ 是氢浓度为 0 时材料的内聚力强度。

3 分析模型

图 2 为锻件内部孔洞愈合过程^[13-15], 在热锻过程中, 孔洞内表面闭合形成接触, 在高温下沿接触面形成新晶粒, 并逐步增长完成焊接。由于局部焊接条件不同, 在压力加工后, 仍会有相当一部分的孔隙没有焊接, 处于闭合未焊接的空隙必然会

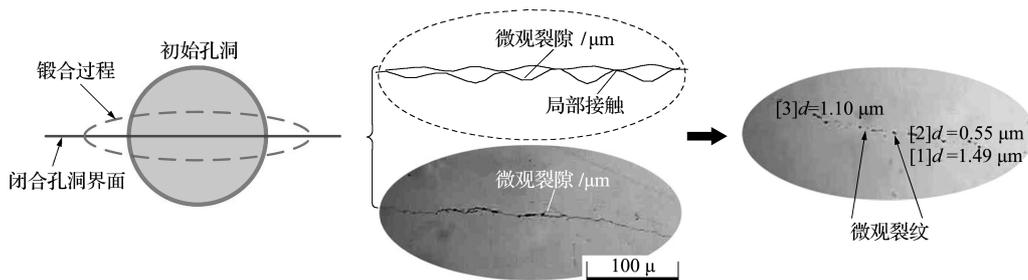


图 2 钢内部孔洞缺陷锻合修复过程
Fig. 2 Sketch for healing process of internal void defects by deformation and welding

形成连续性共线微观裂纹,残留于钢内部成为锻后缺陷。这些残留缺陷极有可能形成内应力场^[2],为白点萌生提供场所。因此,本文以此作为研究对象,进行多裂纹白点萌生特性分析。

根据以往学者对相关问题的研究^[16-17],结合微观裂纹在钢内的应力特征,本文采用平面应变模型进行分析。结合焊后残留多裂纹的形态,取钢内平面切片,建立了如图3(a)所示的分析模型。模型外部尺寸为5 cm×5 cm,共线多裂纹位于模型中心部位,其中裂纹长度为L,裂纹间距离为a,裂纹个数为N。由于分析模型位于钢内,其边界变形受周围金属的约束,因此在模型边界上均施加固定约束。

图3(b)为分析模型的有限元网格,整个几何采用自由剖分三角形网格的方式划分,考虑孔隙尖端的应力集中以及粘结单元上的计算精度,对裂纹周围以及内聚力区粘结层进行局部网格细化。其中最小单元尺寸为 3.75×10^{-3} mm,最小网格单元位于裂纹端部。

本文以Cr5VMo钢作为研究材料,其弹性模量为210 GPa,屈服极限为1015 MPa,泊松比为0.3。根据文献[4],对Cr5VMo钢取 $\sigma_{\max}(0) = 4\delta_s$,即4060 MPa,钢表面吸附能 Δg_b^0 设定为30 kJ/mol。根据文献[18],在平面应变状态下,室温20℃时取Cr5VMo钢的断裂韧性为 $48.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,因此在已知断裂韧性和内聚力强度的情况下,由式(4)得到钢内裂纹扩展的最大张开位移为 $\delta_n^f = 5.0227 \times 10^{-3}$ mm。

图4给出有限元分析流程。以氢浓度 C_0 作为初始变量,通过氢浓度来控制裂纹内部氢压,形成氢压应力场,实现氢的再分布,基于再分布后的氢浓度计算内聚力单元粘结强度,通过物理场分析预测白点的萌生。

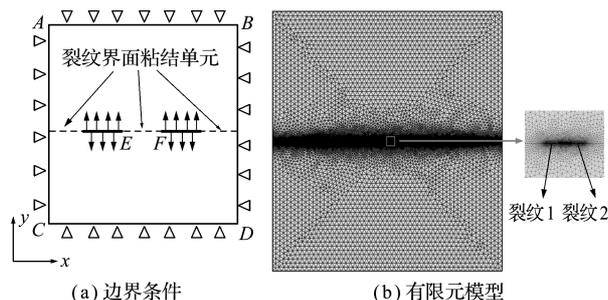


图3 有限元分析模型
Fig.3 Analysis model

4 结果分析

4.1 单裂纹白点萌生分析

图5给出单裂纹附近氢浓度及内聚力强度的变化情况。可以看出,受裂纹内部氢压的影响,氢在裂尖附近实现了再分布,裂纹尖端附近的氢浓度远高于钢内平均氢浓度。从图5内聚力强度线可以看出,氢对钢内聚力强度的影响非常大,高浓度的氢聚集直接导致内聚力强度降低,内聚力强度低谷与氢浓度峰值保持一致。

图6给出不同长度单裂纹的裂纹尖端内聚力区的张开位移,虚线均为白点萌生的最大张开位移。可以看出,随着氢浓度的增加,内聚力单元间的张开位移和扩展距离都在增加。当裂纹 $L = 1$ mm时,白点萌生的氢浓度在1.5 ppm~2 ppm之间;当 $L = 1.5$ mm时,白点萌生的氢浓度在

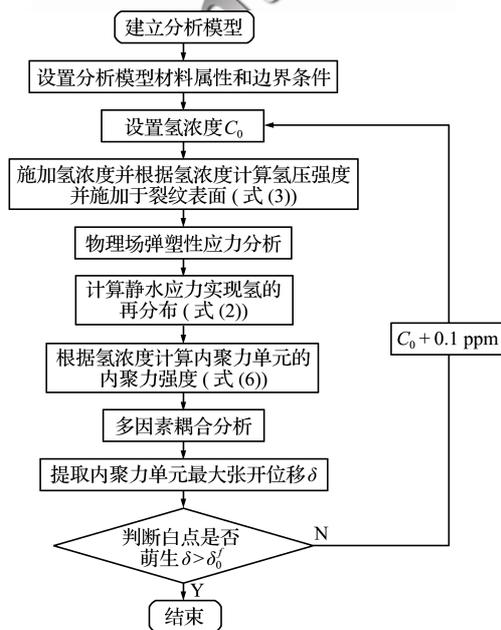


图4 有限元分析流程
Fig.4 Analysis flow chart

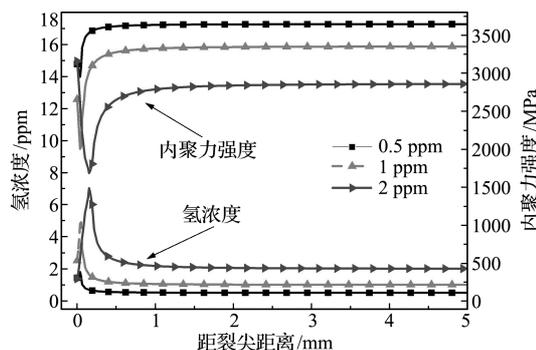


图5 沿裂纹尖端氢浓度分布及其内聚力强度($N=1, L=1$ mm)
Fig.5 Hydrogen concentration distribution and its cohesive strength along crack tip ($N=1, L=1$ mm)

1 ppm左右;当 $L=2\text{ mm}$ 时,白点萌生的氢浓度在 $0.5\text{ ppm}\sim 1\text{ ppm}$ 之间。表明裂纹越长,白点萌生的临界氢浓度越低。

图7给出单裂纹在不同裂纹长度下,白点萌生的临界氢浓度变化趋势。可以看出,随着裂纹长度的增大,白点萌生所需要的最小氢浓度迅速减小并逐渐趋于平稳;当裂纹长度大于 4 mm 时,白点萌生的氢浓度基本稳定在 0.4 ppm 左右。这表明裂纹长度对白点萌生影响极大,如果钢内存在大裂纹,氢浓度很低时就会萌生白点。

4.2 多裂纹白点萌生分析

图8给出多裂纹法向应力耦合云图。可以看出,裂纹尖端为法向应力集中点,氢压作用下裂纹尖端受到的影响最大。存在多个裂纹的情况下,裂纹之间的应力相互影响,形成耦合应力场。裂纹

之间耦合应力场的干涉源在裂纹尖端,并由裂纹尖端向周围辐射。

图9给出裂纹长度为 0.5 mm ,不同间距条件下两裂纹间内聚力区的张开位移。从图9(a)可以看出,间距 $a=0.2\text{ mm}$ 时,白点萌生的氢浓度为 1.6 ppm ;氢浓度为 2 ppm 时,两裂纹完全贯通,形成一个 1.2 mm 的大裂纹,白点已经扩展。从图9(b~d)可以看出, $a=0.4\text{ mm}$ 时,白点萌生的氢浓度为 3.2 ppm ; $a=0.8\text{ mm}$ 时,白点萌生的临界达到 4 ppm ;当裂纹间的距离为 2 mm ,且氢浓度达到 4 ppm 时,白点没有萌生。可以看出,随着裂纹间的距离增加,诱发白点萌生的氢浓度在增加。说明两裂纹距离较近时,裂纹间的耦合因素会加剧白点

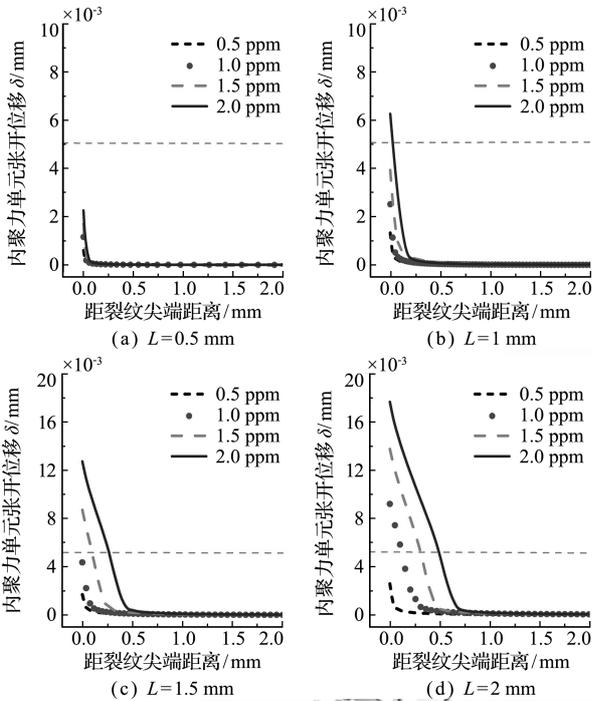


图6 不同裂纹长度裂纹尖端张开位移 ($N=1$)
Fig. 6 Separate displacement of cohesive elements under different crack length ($N=1$)

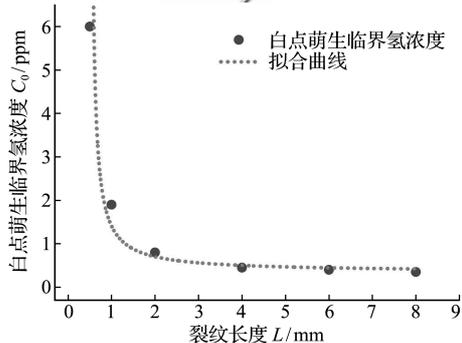


图7 不同裂纹长度下白点萌生临界氢浓度 ($N=1$)

Fig. 7 Critical hydrogen concentration of flakes under different crack lengths ($N=1$)

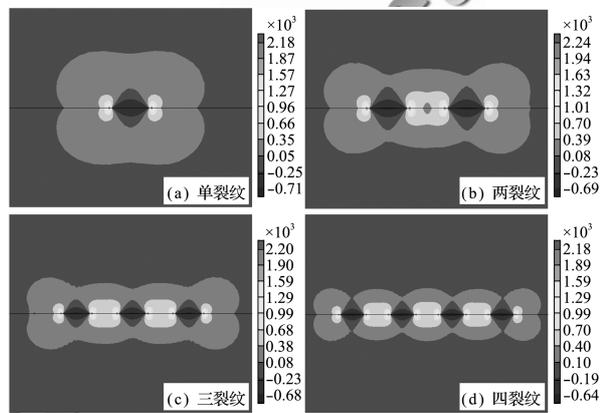


图8 多裂纹法向应力耦合云图

Fig. 8 Normal direction stress coupling cloud image of Multi-crack

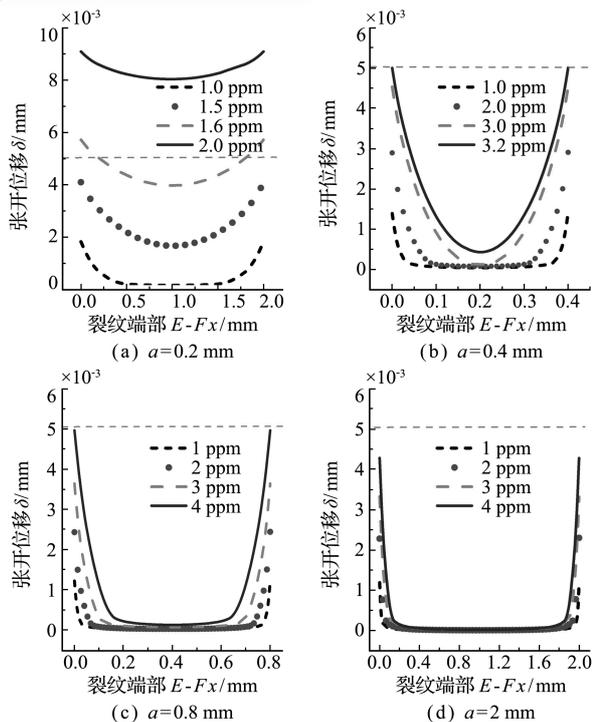


图9 裂纹端部 E-F 间内聚力单元张开位移 ($N=2, L=0.5\text{ mm}$)
Fig. 9 Separate displacement of cohesive elements between crack tips E-F ($N=2, L=0.5\text{ mm}$)

萌生,有贯通形成大裂纹的可能;随着裂纹间的距离增加,白点萌生受裂纹间的耦合因素的影响逐渐减小。

图 10 给出共线两裂纹连通距离对白点萌生临界氢浓度的影响。可以看出,随着裂纹间距离的增加,共线两裂纹白点萌生的临界氢浓度迅速增加,而后逐渐趋于相应单裂纹的白点萌生临界氢浓度;且当长度为 0.5 mm 的共线两裂纹连通距离极小时,白点萌生的氢浓度小于长度为 1.0 mm 时的单裂纹白点萌生氢浓度。说明对于密集的共线多裂纹,受耦合因素的影响,会降低白点萌生临界氢浓度,增大白点萌生可能性;随着裂纹间距的增加,裂纹间的耦合影响逐渐减小。

图 11 给出裂纹长度为 0.5 mm,连通距离为

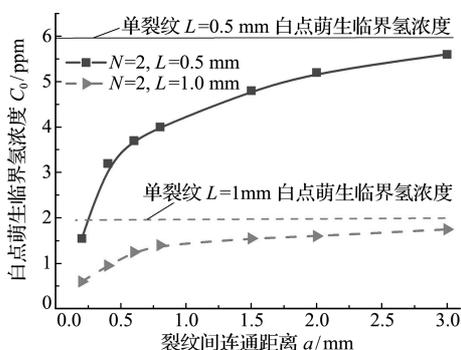


图 10 不同裂纹间距下白点萌生临界氢浓度 (N=2)

Fig. 10 Critical hydrogen concentration of flakes under different crack space (N=2)

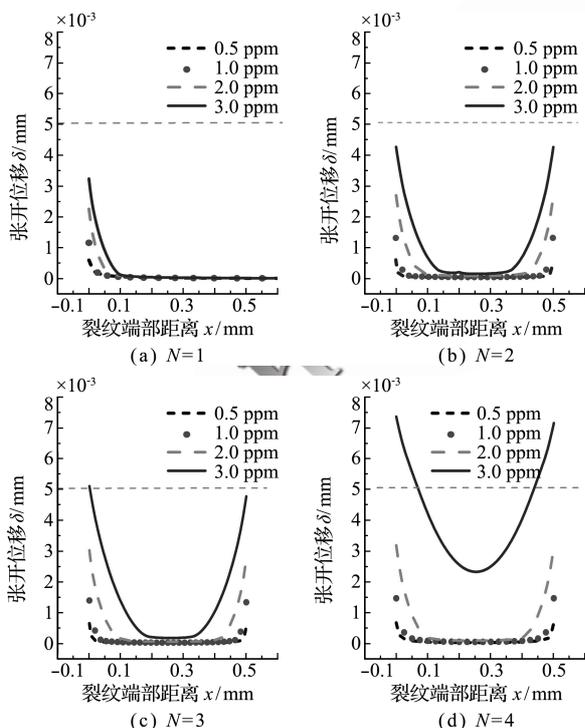


图 11 裂纹长度 $L=0.5$ mm, 裂纹间距 $a=0.5$ mm 时裂纹间内聚力区张开位移

Fig. 11 Separate displacement of cohesive elements under different cracks number ($L=0.5$ mm, $a=0.5$ mm)

0.5 mm 条件下,裂纹个数对白点萌生的影响。可以看出,随着裂纹个数的增多,裂纹间内聚力区的张开位移逐渐增大。钢内氢浓度达到 3 ppm 时, $N=1$ 和 $N=2$ 没有萌生白点, $N=3$ 时达到白点萌生临界氢浓度, $N=4$ 时白点扩展且裂纹有贯通的趋势。表明对于共线多裂纹,随裂纹个数的增多,裂纹之间的耦合影响增大,增加了白点萌生的可能。

图 12 给出裂纹间连通距离 $a=0.5$ mm 条件下,裂纹长度分别为 0.5 mm 和 1.0 mm 时,共线多裂纹个数对白点萌生临界氢浓度的影响。可以看出,两个共线裂纹白点萌生的临界氢浓度是单裂纹的 1/2,当裂纹个数为 2 个以上时,白点萌生的临界氢浓度随裂纹个数增加而线性递减。裂纹越长,随裂纹个数增加白点萌生临界氢浓度递减值越小。

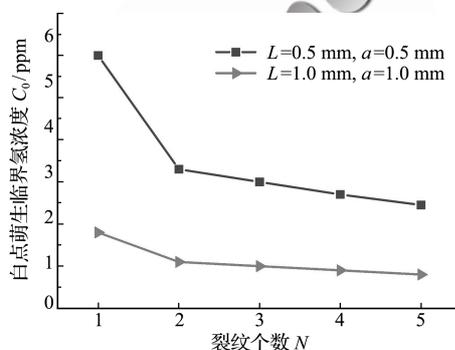


图 12 不同裂纹个数条件下白点临界氢浓度 ($a=0.5$ mm)

Fig. 12 Critical hydrogen concentration of flakes under different crack numbers ($a=0.5$ mm)

5 结 论

(1) 研究表明,受裂纹内部氢压作用,法向应力最大位置在裂纹尖端处,多裂纹之间的法向应力存在着耦合影响;裂纹间应力耦合的干涉源在裂纹尖端;受裂纹氢压应力场的影响,氢在钢内再分布,高浓度的氢聚集在裂尖附近,降低了裂尖附近的内聚力强度。

(2) 随着裂纹长度增大,白点萌生的临界氢浓度指数降低并趋近于稳定值;密集的共线多裂纹有贯通形成大裂纹的趋势,裂纹之间的耦合影响随裂纹尖端连通距离增加而减小。

(3) 共线两裂纹白点萌生的临界氢浓度随着连通距离的增加而减小,裂纹间距较远时白点萌生氢浓度趋近于单裂纹;在给定情况下,两裂纹白点萌生的临界氢浓度是单裂纹的 1/2,裂纹个数为 2 个以上时,白点萌生临界氢浓度随裂纹个数增加而线性递减。

参考文献(References):

- [1] Zapffe C A, Sims C E. Hydrogen embrittlement, internal stress and defects in steel[J]. *Trans. AIME*, 1941, **145**(22):225-271.
- [2] 褚武扬, 乔利杰, 李金许, 等. 氢脆和应力腐蚀[M]. 北京: 科学出版社, 2013. (CHU Wu-yang, QIAO Li-jie, LI Jin-xu, et al. *Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking* [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese))
- [3] Yokobori A T, Kushida T, Ohmi T. The stress induced hydrogen diffusion behavior and the sensitivity of hydrogen embrittlement at the heat affected zone of weld part based on analytical solution [J]. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 2006, **70**(6):489-494.
- [4] Serebrinsky S, Carter E A, Ortiz M. A quantum mechanically informed continuum model of hydrogen embrittlement [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2004, **52**(10):2403-2430.
- [5] Olden V, Thaulow C, Johnsen R, et al. Application of hydrogen influenced cohesive laws in the prediction of hydrogen-induced stress cracking in 25% Cr duplex stainless steel [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, **75**(8):2333-2351.
- [6] Scheider I, Pfuff M, Dietzel W. Simulation of hydrogen assisted stress corrosion cracking using the cohesive model [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, **75**(15):4283-4291.
- [7] 王艳飞, 巩建鸣, 蒋文春, 等. 基于内聚力模型的 AISI4135 高强钢氢致滞后断裂数值模拟 [J]. *金属学报*, 2011, **47**(5):594-600. (WANG Yan-fei, GONG Jian-ming, JIANG Wen-chun, et al. Numerical simulation of hydrogen induced delayed fracture of AISI4135 high strength steel using cohesive zone modeling [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011, **47**(5):594-600. (in Chinese))
- [8] de Kazinczy F. On the pressure of hydrogen in cavities of steel [J]. *Acta Metallurgica*, 1959, **7**(7):525-527.
- [9] Phragmen G. On the relation between the hydrogen proportion in iron, the temperature and the hydrogen equilibrium pressure [J]. *Jemkontorets Ann*, 1944, **128**:537-553.
- [10] Jiang D E, Carter E A. First principles assessment of ideal fracture energies of materials with mobile impurities: Implications for hydrogen embrittlement of metals [J]. *Acta Materialia*, 2004, **52**(16):4801-4807.
- [11] Hondros E D, Seah M P. The theory of grain boundary segregation in terms of surface adsorption analogues [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1977, **8**(9):1363-1371.
- [12] van der Ven A, Ceder G. Impurity-induced van der Waals transition during decohesion [J]. *Physical Review B*, 2003, **67**(6):060101.
- [13] 黄华贵, 杜凤山, 臧新良. 大型零件 M 锻造法及其孔洞缺陷锻造过程的数值模拟 [J]. *锻压技术*, 2005, **30**(s):34-37. (HUANG Hua-gui, DU Feng-shan, ZANG Xin-liang. Numerical simulation of bulk ingot upsetting and void fault closing with M method [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2005, **30**(s):34-37. (in Chinese))
- [14] 韦东滨, 韩静涛, 谢建新, 等. 热塑性变形条件下钢内部裂纹愈合的实验研究 [J]. *金属学报*, 2000, **36**(6):622-625. (WEI Dong-bin, HAN Jing-tao, XIE Jian-xin, et al. Experimental study on inner crack healing in steel during hot plastic deforming [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2000, **36**(6):622-625. (in Chinese))
- [15] 唐 鼎, 张卿卿, 方文利, 等. 基于空洞演化理论的挤压焊合描述模型 [J]. *机械工程学报*, 2014, **50**(22):34-41. (TANG Ding, ZHANG Qing-qing, FANG Wen-li, et al. Modeling of the extrusion seam welding based on the void evolution [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, **50**(22):34-41. (in Chinese))
- [16] 刘文辉, 刘龙飞, 唐建国. FCC 晶体中孔洞长大行为的研究 [J]. *工程力学*, 2010, **27**(6):228-231, 251. (LIU Wen-hui, LIU Long-fei, TANG Jian-guo. The study of void growth behavior in FCC crystal [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, **27**(6):228-231, 251. (in Chinese))
- [17] 周 航, 孔纲强, 曹兆虎, 等. 椭圆形孔扩张弹性分析 [J]. *固体力学学报*, 2015, **36**(1):85-91. (ZHOU Hang, KONG Gang-qiang, CAO Zhao-hu, et al. Elastic analysis of elliptical cavity expansion [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2015, **36**(1):85-91. (in Chinese))
- [18] 姜晶晶, 林卓英, 冯森林, 等. 温度对 Cr₅ 冷轧钢断裂韧性影响的试验研究 [J]. *锻压技术*, 2012, **37**(4):135-139. (JIANG Jing-jing, LIN Zhuo-ying, FENG Miao-lin, et al. Experimental study on temperature influence to fracture toughness of Cr₅ cold roll steel [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2012, **37**(4):135-139. (in Chinese))

Study on mechanism of flake initiation based on the cohesion method

FAN Jun-kai^{*1}, PENG Bo¹, HOU Gao-jie¹, DU Feng-shan²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling,

Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Based on the previous experimental studies, a finite element model of flake initiation was established. The theories of cohesive strength, hydrogen pressure and stress induced hydrogen diffusion were coupled in this model. The effects of hydrogen content, crack length and multi-crack coupling on flake formation were studied. Meanwhile, the critical hydrogen concentration and its changing trends for flake formation under different conditions were determined. The results show that hydrogen is of important effect on the initiation of flakes. During the process of flake formation, a high concentration of hydrogen was accumulated at the crack tip, which is greatly reduces the cohesive strength of steel. As for a single crack, the critical hydrogen concentration of the flake initiation gradually decreases and tends to a steady value with the crack length increasing. When a plurality of dense small cracks are present at the same time, the small cracks tend to form large cracks because of the effect of stress coupling, while the distal cracks has less influence on the flake initiation. For multiple cracks, the critical hydrogen concentration at the flake initiation tends to decrease linearly with the increase of the number of cracks.

Key words: flakes initiation; the theory of cohesion zone modelling; hydrogen accumulation under the stress gradient; hydrogen pressure theory; multi-crack

引用本文/Cite this paper:

范俊锴,彭波,侯高杰,等.基于内聚力模型的白点萌生机理研究[J].计算力学学报,2019,36(3):407-413.

FAN Jun-kai, PENG Bo, HOU Gao-jie, et al. Study on mechanism of flake initiation based on the cohesion method[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2019, 36(3): 407-413.