

104345

脉冲电流作用下碳钢淬火裂纹的愈合*

周亦宵¹⁾ 肖素红¹⁾ 甘阳¹⁾ 高明¹⁾ 何冠虎^{1,2)} 周本濂^{1,2)}

1) 中国科学院金属研究所, 沈阳 110015

2) 中国科学院国际材料物理中心, 沈阳 110015

摘要 对有淬火裂纹的 45 钢试样进行脉冲电流处理, 通过 SEM 观察处理前后试样的变化. 结果表明, 在脉冲电流作用下, 裂纹能够在无熔化的情况下出现愈合, 且愈合是在极短时间内发生的. 愈合过程不改变材料的原有结构. 快速温升引起的瞬时热压应力可能是造成裂纹愈合的重要因素之一.

关键词 脉冲电流, 裂纹愈合, 热压应力, 淬火裂纹

中图法分类号 TG142.31

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2000)01-0043-03

碳钢

TG161.3

TG142.3

THE HEALING OF QUENCHED CRACK IN CARBON STEEL UNDER ELECTROPULSING

ZHOU Yizhou¹⁾, XIAO Suhong¹⁾, GAN Yang¹⁾, GAO Ming¹⁾, HE Guanhu^{1,2)}, ZHOU Benlian^{1,2)}

1) Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015

2) International Center for Materials Physics, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015

Correspondent: ZHOU Yizhou, Tel: (024)23843531-55156, Fax: (024)23891320,

E-mail: zhouyizhou@hotmail.com

Manuscript received 1999-06-11, in revised form 1999-09-21

ABSTRACT The specimens of 45 steel with the quenched crack were treated under electropulsing, SEM was employed to examine the change of specimens before and after the treatment. The results show that the crack can be healed under electropulsing without melting, and the healing of crack can be produced within very short time. The original microstructure of specimens is not changed during the healing. It is thought that the transient thermal compressive stress caused by high-rate heating is an important factor causing the healing of crack.

KEY WORDS electropulsing, healing of crack, thermal compressive stress, quenched crack

关于脉冲电流对一些金属材料物理性能的影响已有众多报道, 并形成了电迁移、电致塑性等一些理论^[1-5], 但采用脉冲电流来使裂纹愈合的实验工作却少见报道. 本工作力图通过材料对脉冲电流的快速响应来达到裂纹在无熔化情况下的愈合.

1 实验方法

实验材料为 45 钢, 其化学成分(质量分数, %)为: C 0.46, S 0.016, P 0.022, Si 0.26, Mn 0.62. 将试样加热至 840 ℃ 后淬火, 使之出现裂纹. 把带有裂纹的淬火试样制成宽度为 2.5 mm, 厚度为 0.2 mm 的薄片. 裂纹沿着试样的宽度方向延伸, 并贯穿整个试样. 将试样表面抛光. 以脉冲电流对裂纹试样进行处理. 脉冲电流通过电容器放电产

生, 电容器的最大充电电压为 2000 V, 脉冲宽度为 200 μs. 实验选用的电压为 1350 V. 用 JSM-6301F 场发射扫描电镜观察脉冲电流处理前后试样的变化.

2 实验结果

图 1a, b 为脉冲电流处理前、后裂纹的全貌. 从图可见, 脉冲电流处理后, 环绕裂纹的区域颜色有改变, 裂纹两侧面的面间距减小, 且裂纹在 A 处有愈合, 愈合长度接近 100 μm. 裂纹愈合部分的显微组织如图 2, 可见仍保持着马氏体组织形态.

电流通过试样时, 试样温度会升高, 其平均升高温度可由下式求得^[6]

$$\Delta\theta = \rho j^2 t_p (c_p d)^{-1} \quad (1)$$

式中, ρ 为电阻率; j 为电流密度, 本实验中 $j = 5.3 \text{ GA/m}^2$; t_p 为脉冲时间; c_p 为比热容; d 为试样密度. 计算求得平均温升 $\Delta\theta \approx 200 \text{ }^\circ\text{C}$. 这一温升不足以引起马氏体

* 国家自然科学基金重点资助项目 59889101

收到初稿日期: 1999-06-11, 收到修改稿日期: 1999-09-21

作者简介: 周亦宵, 男, 彝族, 1972 年生, 博士生

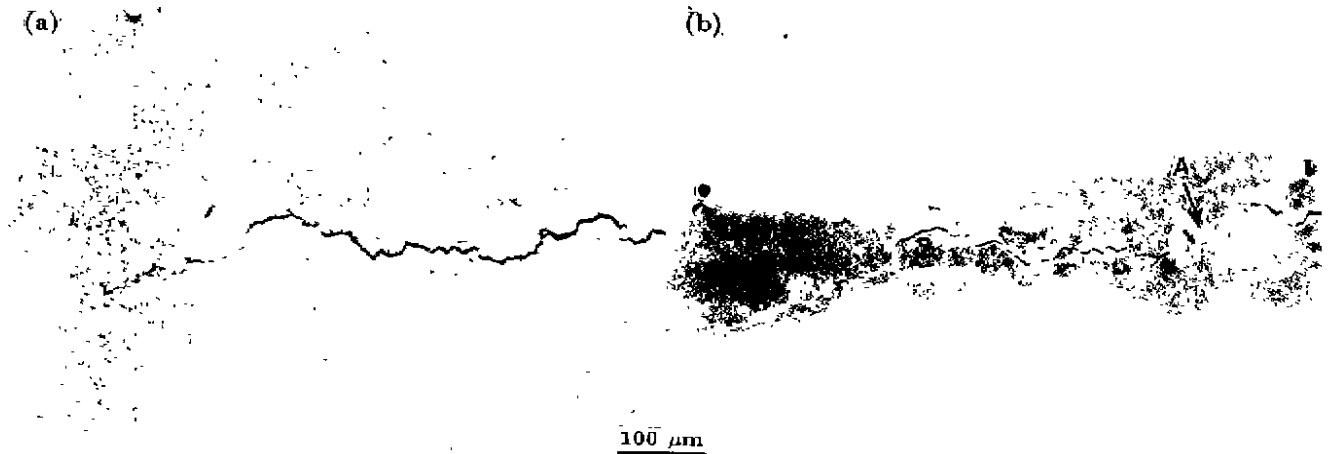


图1 脉冲电流处理前、后的裂纹全貌

Fig.1 SEM micrographs of crack before (a) and after (b) electropulsing

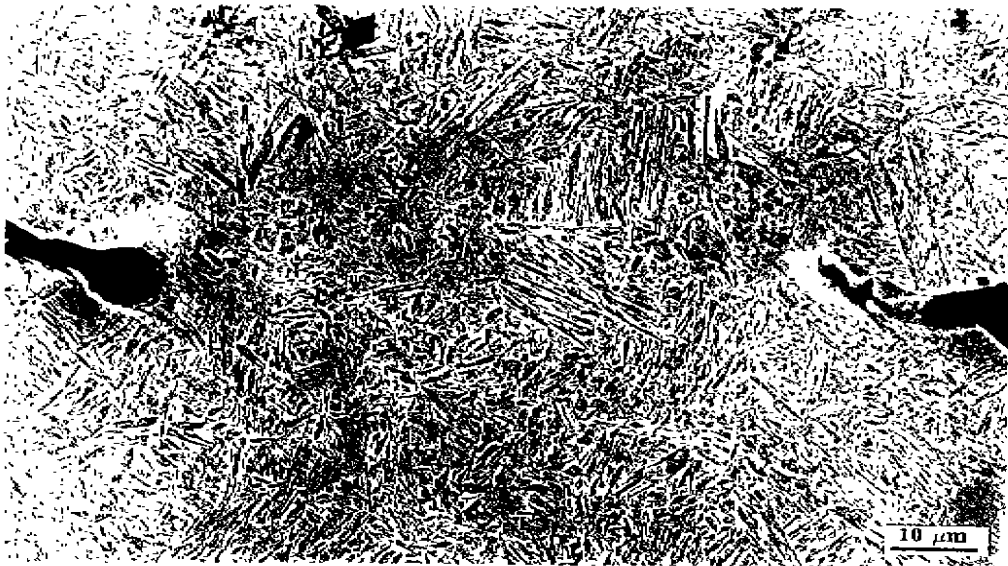


图2 裂纹愈合部分的显微组织

Fig.2 SEM micrograph of healing part of crack

的相转变。在裂纹周围区域，由于局部电阻率的增大^[6]，其局部温度会高于试样的平均温度，图1b中环绕裂纹的区域颜色改变说明了该局部有较高的温升。但是由于在愈合部分未出现任何熔化的迹象(图2)，因此可以认为裂纹周围的局部温度并未达到材料的熔点。电流密度过大，则裂纹周围出现局部熔化现象，形成的凝固组织形貌见图3a，此时熔化处出现了孔洞(图3b)，其尺寸通常远大于裂纹的宽度，不利于愈合。

3 讨论

尽管脉冲电流作用下裂纹愈合的机制尚不清楚，但是本文作者认为快速温升引起的瞬时热压应力可能是造成裂纹愈合的一个重要因素。高密度脉冲电流通过试样时，试样温升速

度非常快(本实验中达到 10^6 °C/s)。试样在快速加热时，其膨胀过程与温升过程不同步，表现为膨胀滞后于温升，这样即便是在自由边界条件下也会在试样中产生热压应力。由热膨胀滞后温升而产生的热压应力由下式给出^[7]

$$\sigma(t) = E\alpha\Delta\theta_{\max}[\Theta(t) - l(t)] \quad (2)$$

式中， E 为弹性模量； α 为膨胀系数； $\Theta(t)$ 是任一时刻 t 的无因次温升， $\Theta(t) = \Delta\theta(t)/\Delta\theta_{\max}$ ，其中 $\Delta\theta(t)$ 是瞬时的温度变化， $\Delta\theta_{\max}$ 是最大温度变化； $l(t)$ 是无因次膨胀长度， $l(t) = \Delta L(t)/\Delta L_{\max}$ ，其中 $\Delta L(t)$ 是瞬时长度变化， ΔL_{\max} 是最大长度变化。最大可能热压应力 $\sigma_{\max} = E\alpha\Delta\theta_{\max}$ 。对Al箔的研究表明，当温度变化为

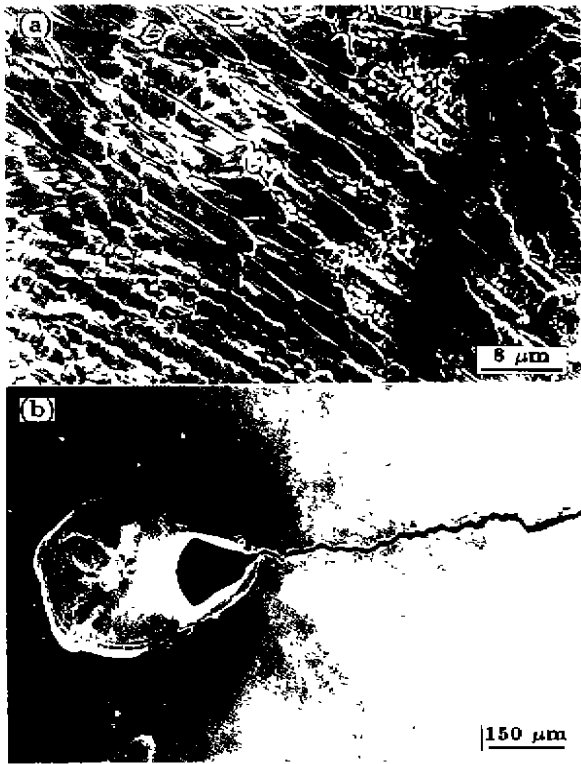


图 3 局部熔化形成的凝固组织形貌及孔洞

Fig.3 The morphologies of solidification (a) and the hole (b) made by local melting

80 ℃ 时, 试样内产生的热压应力最大可达 150 MPa^[7]. 本实验中, 试样的最大平均温升 $\Delta\theta_{\max} \approx 200$ ℃, 则最大平均热压应力 $\sigma_{\max} \approx 520$ MPa. 在裂纹周围区域, 由于局部温升会高于试样的平均温升, 其局部热压应力亦会高于平均热压应力. 在压应力的作用下, 裂纹两侧面有相互靠近的趋势, 当其面间距减小到一定程度时, 加之一定温度的作用,

裂纹就可能愈合.

电流最初通过样品时, 裂纹受到压应力作用而产生愈合效应; 随后冷却时裂纹受到拉应力影响, 则产生撕裂效应. 假定原长为 a 的裂纹, 温升时由于压应力与温度的共同作用, 裂纹愈合了长度为 a' 的一段; 冷却使愈合部分又撕裂的长度为 a'' . 但由于以下因素使得 $a' > a''$, 裂纹最终的效应是愈合. (1) 电流通过样品时, 温升速度很快(约为 10^6 ℃/s) 远大于电流过后样品整体的冷却速度(钢水淬的冷却速度一般为 10^2 — 10^3 ℃/s, 空冷冷速则更低), 所以温升产生的压应力远大于冷却产生的拉应力. (2) 温度升高对裂纹愈合有利, 而对撕裂不利.

4 结论

(1) 在脉冲电流作用下, 45 钢中的淬火裂纹能够在未熔化的情况下出现愈合, 且愈合是在极短时间内发生的.

(2) 对具有贯穿裂纹的试样, 裂纹周围如果出现局部熔化, 熔化处通常形成较大尺寸的孔洞, 不利于愈合.

(3) 采用脉冲电流愈合裂纹时, 可以不改变材料的原有结构.

参考文献

- [1] Bosvieux C, Friedel J. *J Phys Chem Solids*, 1962; 23: 123
- [2] Ho P S, Kwok T. *Rep Prog Phys*, 1989; 52: 301
- [3] Okazaki K, Kagawa M, Conrad H. *Scr Metall*, 1978; 12: 1063
- [4] Sprecher A F, Mannan S L, Conrad H. *Acta Metall*, 1986; 34: 1145
- [5] Conrad H, Sprecher A F. In: Nabarro F R N ed., *Dislocations in Solids*, Amsterdam: Elsevier, 1989: 497
- [6] Qin R S, Su S X, Guo J D, He G H, Zhou B L. *Biomimetics*, 1996; 4: 121
- [7] Tang D W, Zhou B L, Cao H, He G H. *J Appl Phys*, 1993; 73: 3749