

## GCr15 凹模淬火裂纹止裂处的显微组织分析\*

高殿奎 付宇明

(燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004)

白象忠

(燕山大学土木工程与力学系, 秦皇岛 066004)

**摘要** 对 GCr15 冷冲凹模淬火裂纹尖端进行脉冲放电止裂。放电时裂纹尖端熔化形成焊点和高压应力区, 使裂纹尖端钝化, 达到止裂目的。由于脉冲放电超快速加热和冷却, 在裂纹尖端处实现了冲击淬火, 得到了超细化的隐晶马氏体和细粒碳化物, 硬度提高到 HV900—1200。

**关键词** 脉冲放电, GCr15, 裂纹止裂, 显微组织, 凹模

**中图分类号** TG142.45, TG113.1 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2001)02-0135-04

## ANALYSIS ON MICROSTRUCTURE OF QUENCHING CRACK TIP PASSIVATED INSIDE A GCr15 STEEL CAVITY DIE

GAO Diankui, FU Yuming

College of Mechanical Engineering Yanshan University, Qinhuangdao 066004

BAI Xiangzhong

Department of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004

Correspondent: GAO Diankui, associate professor, Tel: (0335)8050159(H), (0335)8057031(O),

Fax: (0335)8057031, E-mail: zljfc@263.net

Manuscript received 2000-07-11, in revised form 2000-11-17

**ABSTRACT** The crack preventing has been executed around the quenching crack tip inside a cold punched cavity die of GCr15 steel through pulse current discharge. During discharge the crack tip is melted, and then a welded joint formed and a region with relatively big compressive stress appeared around the crack tip. The curvature of crack tip increased after the crack preventing, so the crack tip was passivated. Because of rapidly heating and cooling while pulse current is switching on, the crack tip was impulsively quenched, and the superfine cryptocrystal martensite and fine-grained carbon compound formed. The hardness near crack tip attains to HV900—1200.

**KEY WORDS** pulse current discharge, steel GCr15, crack preventing, cavity die

低合金工具钢(如 GCr15, 9SiCr 等)与高合金工具钢(如 Cr12, Cr12MoV 等)相比,其优点是价格便宜、锻造性能好、热处理后的碳化物均匀分布,并在冷作模具中得到了较为广泛的应用;其缺点是淬透性不如高合金钢,且在淬火时易出现淬火裂纹。

GCr15 钢制冷冲凹模(见图 1)经 850—860 °C 油冷淬火, 160—180 °C 回火,磨削加工后,在图 1 的 I 处出现淬火裂纹。如何修复已出现淬火裂纹的模具,是机械工

业生产中亟待解决的大问题。因为 GCr15 等冷作模具钢都是高碳钢,焊接性能差。焊补修复时,裂尖处的应力集中,可使裂纹分叉和扩展,使修复失效。本文正是针对这一问题,对 GCr15 冷冲凹模淬火裂纹进行了止裂实验,并分析和研究了止裂后裂纹尖端处的组织和性能。

### 1 淬火裂纹止裂实验

#### 1.1 止裂实验的理论依据

电磁热效应理论与热磁弹性理论的研究结果指出:带有裂纹的导体在通电瞬间,裂纹尖端处的电流密度高度集中,产生的热量足以使裂纹尖端处的金属熔化,形成局部焊点,增大了裂纹尖端处的曲率半径,使裂纹钝化<sup>[1-3]</sup>。

断裂力学的研究结果证明:增加裂纹尖端的曲率半径使裂纹钝化,可以达到裂纹止裂的目的。GCr15 凹模淬

\* 河北省自然科学基金 599255 和国家自然科学基金 19772046 资助项目

收到初稿日期: 2000-07-11, 收到修改稿日期: 2000-11-17

作者简介: 高殿奎,男,1944 年生,副教授

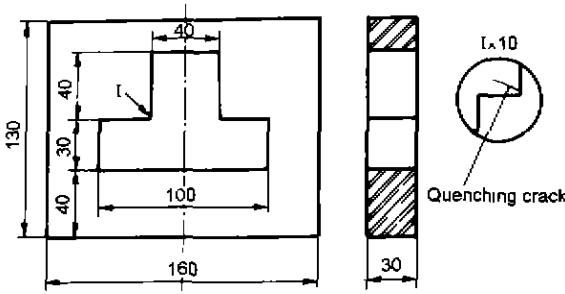


图1 GCr15 钢制凹模

Fig.1 Cavity die made of GCr15 steel

火裂纹尖端处脉冲放电止裂即是根据上述理论研究成果实施的。

1.2 裂纹止裂试验装置

止裂试验装置 ZL-1 型超强度脉冲电流发生器是自行设计制造的、其工作原理为：采用倍压整流电路为电容组充电。由可控硅 3CT 控制电容放电。串联试件在电容放电回路中、可使试件获得强大的瞬时电流。该电流可使裂纹尖端熔化形成焊点。通过调整充电电容容量和放电电压来改变试件被施加的能量。

1.3 试样的选取

选取磨削后出现淬火裂纹的 GCr15 钢制凹模为实验对象。经检验其硬度为 HRC65, 抽样进行化学分析, 平均成分见表 1。

表 1 凹模的化学成分

Table 1 Chemical composition of cavity die

| (mass fraction,%) |      |      |      |       |       |
|-------------------|------|------|------|-------|-------|
| C                 | Si   | Mn   | Cr   | P     | S     |
| 1.05              | 0.25 | 0.31 | 1.50 | 0.020 | 0.022 |

金相组织检验结果见图 2。由图可见：金相组织为回火马氏体 + 粒状碳化物 + 残余奥氏体。在淬火裂纹处经线切割割取试样, 使裂纹尖端基本位于试样的中部, 以便止裂后的观察分析。

1.4 计算确定止裂试验参数

根据电磁热效应理论, 对于具有边缘裂纹的导电薄板, 略去磁化、极化和位移电流的影响, 考虑到裂纹的不导电性。由于裂纹尖端附近电流密度的集中效应并伴有 Joule 热源功率的产生, 该热源沿板厚的平均密度为 [4]

$$Q(r, \tau) = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h \frac{1}{\sigma} (j_1^2 + j_2^2) dx_3 \approx \frac{\sqrt{\tau} J_0^2}{\sqrt{2\sigma\pi^2 r}} D_{-\frac{3}{2}}^2(0) \exp(-\frac{r^2}{4\tau}) \cdot \theta_0(\frac{1}{2}, \frac{2}{h^2}\tau) \quad (1)$$

式中:  $\theta_0(\frac{1}{2}, \frac{2}{h^2}\tau) = \frac{1}{2h} \int_{-h}^h \theta_0^2(\frac{x_3}{2h}, \frac{\tau}{h^2}) dx_3 = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-\frac{2n^2\pi^2\tau}{h^2})$ ,  $j_i (i=1,2)$  为裂尖附近沿  $x_1, x_2$  方

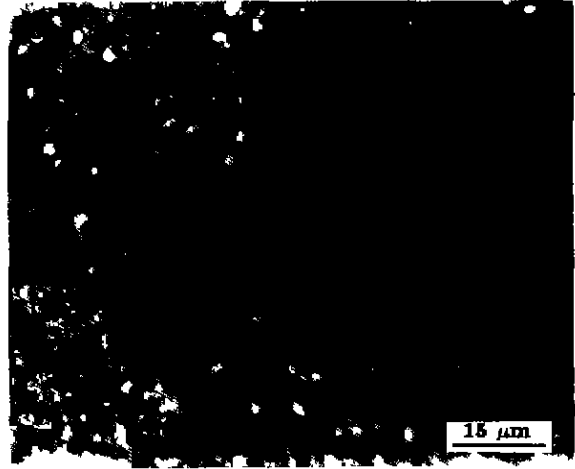


图 2 凹模的金相组织

Fig.2 Metallographic microstructure of cavity die

向的电流密度分量,  $J_0$  为通电电流密度,  $2h$  为板厚, 极坐标  $r = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$ , 变量  $\tau = t/l^2\sigma\mu$ ,  $t$  为放电时间,  $2l$  为裂纹长度,  $\mu$  和  $\sigma$  为材料的磁导率和电导率,  $D_{-\frac{3}{2}}(0)$  为  $r=0$  处的抛物柱面函数值。

设导电薄板表面与周围介质之间存在按 Newton 定律的热交换, 则因热源  $Q(r, \tau)$  而在裂纹尖端附近产生的温度场为

$$T(r, \tau) = \frac{\sqrt{a\tau} J_0^2 h}{4\sqrt{2\sigma\lambda\pi}\Gamma^2(5/4)} \int_0^1 \frac{\sqrt{1-\gamma^2} \exp(-a\alpha r \gamma^2)}{\sqrt{1-(1-a)\gamma^2}} \exp\left\{-\frac{[1-(1-2a)\gamma^2]r^2}{8a\tau\gamma^2[1-(1-a)\gamma^2]}\right\} I_0\left\{\frac{(1-\gamma^2)r^2}{8a\tau^2[1-(1-a)\gamma^2]}\right\} d\gamma \quad (2)$$

式中:  $T(r, \tau)$  为沿板厚的平均温度,  $\alpha = \frac{c}{\rho h}$ ,  $a = a_0\sigma\mu$ ,  $a_0 = \frac{\lambda}{c\rho}$  为导温系数,  $\alpha_0$  为表面热扩散系数,  $\lambda$  为热传导系数,  $c$  为热容量,  $\rho$  为材料密度,  $\tau - \tau_1 = \tau\gamma^2$ ,  $\Gamma(\dots)$  为 Gamma 函数。带有半无限长裂纹的 GCr15 薄板, 其电导率  $\sigma=7.8 \times 10^7 (\Omega \cdot m)^{-1}$ , 磁导率  $\mu=1.5 \times 10^{-3} H/m$ , 热传导系数  $\lambda=35 W/(m \cdot C)$ , 表面热扩散系数  $\alpha_0=30 W/(m^2 \cdot C)$ , 导温系数  $a_0 = 1.0 \times 10^{-5} m^2/s$ , 密度  $\rho=7850 kg/m^3$ , 板厚  $2h=1 \times 10^{-3} m$ 。

按式 (2) 计算, 当取时间  $t=50 \mu s$ ,  $r=1 mm$  时, 在不同通电条件下裂纹尖端的温度值如表 2 所示。

表 2 裂纹尖端处的温度值

Table 2 Temperature around a crack tip

| Discharge voltage, V        | 500  | 600  | 700  |
|-----------------------------|------|------|------|
| Temperature of crack tip, C | 1600 | 2080 | 2360 |

由表 2 可知, 当选取的电压数值超过 500 V 时, 裂纹尖端的温度超过了 GCr15 的熔点 (1490 °C)。

### 1.5 脉冲放电实验

根据计算结果选取电压数值进行试验, 所得到的实验结果与计算结果相符, 并且观察到, 通电电压愈高, 熔化区范围愈大, 在 600 V 放电条件下, 裂纹尖端熔化后的宏观形貌如图 3 所示。

## 2 止裂裂纹尖端的钝化

### 2.1 止裂处的宏观面貌

由图 3 可见, 止裂后裂纹尖端膨大圆钝, 边缘光滑整齐, 无锯齿状的凸起和凹陷, 没有出现二次裂纹, 实现了钝化, 止裂效果良好, 可将图 3 大致分为如下几个区域:

(1) A 区为熔化区, 图中可见到该区内熔化了金属向外喷射的边缘。

(2) B 区为白斑区, 该区的特点是在基体上分布着密密麻麻的白色斑点, 由于放电时, 裂尖处的电流密度极高, Joule 热将金属熔化, 并且迸发爆炸形成焊口, 放电发生在空气介质环境下, 电离产生的氮离子和氧离子与试样材料重新化合成新的化合物, 称为电蚀产物, 电蚀产物熔融和汽化后喷射, 并在空气中急剧冷却凝固形成了 B 区域的形貌。

(3) C 区为热影响区, 是放电加热引起相变的区域。

(4) D 区为基体区, 是未发生相变的区域。

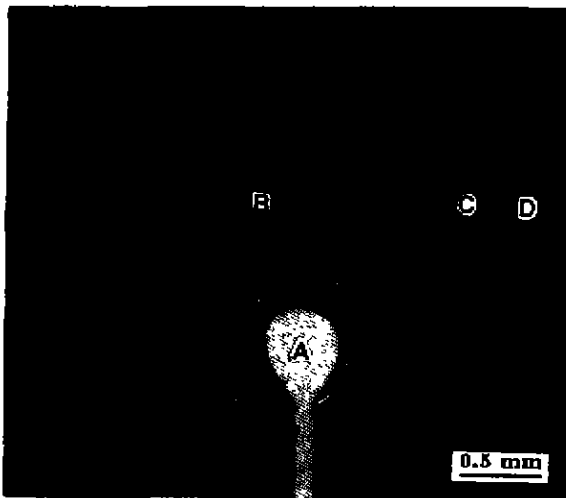


图 3 止裂后裂纹尖端宏观形貌

Fig.3 Macroscopical appearance around the crack tip after crack preventing

止裂后, 由于裂纹尖端圆钝, 曲率半径增大, 消除了应力集中, 显著地提高了裂纹扩展功, 止裂效果良好。

### 2.2 裂纹尖端产生的压应力阻止裂纹扩展

放电瞬间, 在裂纹尖端处产生高压<sup>[5]</sup>, 由于温度急剧升高, 高温处的金属体积急剧膨胀, 受周围金属作用产生非常大的热压应力, 放电高压和热压应力共同作用, 使

裂纹尖端处在高压下熔化和结晶, 这不但保证了裂尖处变得圆滑, 避免了二次裂纹的产生, 同时也使结晶的晶粒细化, 提高了常温状态下的力学性能。

## 3 止裂处的微观组织

### 3.1 极细组织区

淬火裂纹尖端止裂后的微观组织见图 4, 图中 A 区 (对应图 3 的 A 区) 为紧靠裂纹边缘的黑色部分, 称为极细组织区, 由极细的隐晶马氏体和细粒状碳化物构成, 该区内没有白亮层, 是熔化金属喷射时未被覆盖的部分, 这个区域的存在说明了不需剥层试验, 即可证明白亮层所覆盖的基体也是极细的组织。

### 3.2 白亮组织区

图 4 中 B 区 (对应图 3 的 B 区) 为白亮组织区, 白亮组织由放电时被熔化的金属元素及其化合物以及氧化物、氮化物组成, 白亮组织耐腐蚀性极高, 不易被硝酸酒精溶液腐蚀而呈白亮状态, 由电子显微镜分析知: GCr15 白亮区组织中的碳化物为 CrC, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> 和 (Fe, Cr)<sub>3</sub>C 等, 由于它们的存在使白亮组织区具有高硬度 (显微硬度为 HV<sub>0.03</sub> 1200—1400), 具有高的耐磨性和热稳定性, 将止裂试样沿裂纹处断开, 经断面硬度测试知: 裂尖附近没有因放电熔化而出现软化现象, 而且普遍出现了淬火组织的高硬度。

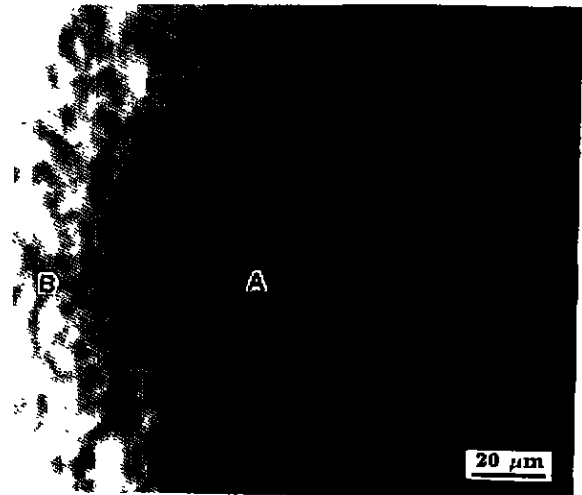


图 4 止裂处微观组织

Fig.4 Microstructure at crack preventing place

### 3.3 过热区

图 5 为离裂纹稍远部位的微观组织, 图中 A' 区 (对应图 3 的 B 区) 主要是白亮组织, 其间不规则的黑色环为极细的马氏体组织, 但因离裂尖稍远而没有被白亮组织完全覆盖, 图中 B' 区 (对应图 3 的 C 区) 为过热区, 该区没有白亮组织, 也没有被熔化, 属于白亮组织的外围, 由极细的隐晶马氏体和细粒状碳化物构成, 区中散布的几

处白亮块状物并非碳化物而是少许的白亮组织。

图中 A' 区、B' 区界限分明,说明两区间发生了温度陡降。显微分析没有发现微观二次裂纹,可见裂尖因周围过大的压应力也抑制了微观裂纹(二次裂纹)的产生。

### 3.4 止裂后组织对凹模性能的影响

脉冲放电过程是在微秒级时间内完成的,裂尖处金属加热和冷却速度极高,实现了冲击淬火,致使奥氏体晶粒超细化,得到极微细的隐晶马氏体组织。淬硬层硬度可达 HV900—1200 的高硬度,淬火层不显脆性且具有高的韧性<sup>[6]</sup>,可显著地提高凹模的使用寿命。

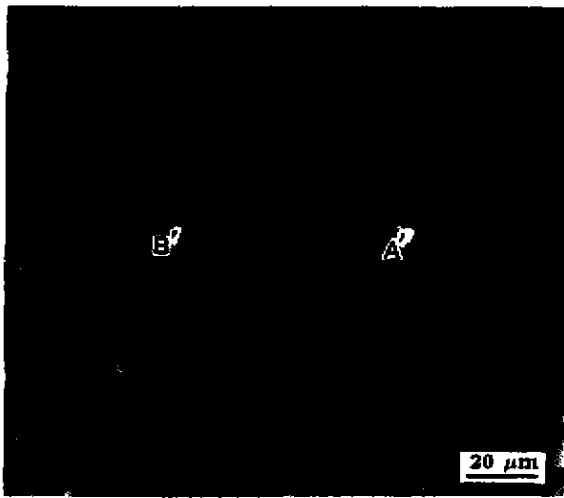


图 5 过热区的微观组织

Fig.5 Microstructure of overheated zone

### 4 止裂后低温回火可减弱残余拉应力

脉冲放电瞬间,不同区域之间的温度梯度极大,同时发生组织转变,必然会产生残余应力。熔化的金属冷却收缩时受到基体金属的约束产生残余拉应力,马氏体相变时体积增大产生残余压应力,二者叠加形成裂尖处的残余应力。残余应力与疲劳极限之间的关系为

$$\sigma = -q(\sigma_m + \sigma_r) + \sigma_0 \quad (3)$$

式中  $\sigma_0$  为无残余应力、且  $\sigma_m=0$  时的疲劳极限;  $\sigma_m$  为平均应力;  $\sigma_r$  为残余应力;  $q$  为系数。可见,残余应力为压应力可提高凹模的疲劳极限。为松弛和减弱残余拉应力的不利影响,可在止裂后进行 180—200 °C 低温回火,由此来提高凹模止裂后的力学性能。

### 5 结论

GCr15 凹模淬火裂纹止裂后裂尖钝化,没有出现宏观和微观的二次裂纹。止裂处实现了冲击淬火,获得了极微细的隐晶马氏体和极细的碳化物组织,提高了止裂处的强韧性和耐磨性。止裂后的低温回火可减弱残余拉应力,使止裂效果更加良好。脉冲放电裂纹止裂在国内外还都处于试验室研究阶段,如果能够 ZL-1 型超强度脉冲电流发生器的基础上,通过增加电容量和放电电压来提高脉冲电流发生器的功率,同时配备可通过超强度电流的电缆,完善工件装卡装置,就可将这一技术应用于模具淬火裂纹止裂中,可产生良好的经济效益。

### 参考文献

- [1] Финкель В. М., Головин Ю. И., Слесков А. А. О Возможности Торможения Быстрых Трещин Импульсами Тока. ДОКЛ. АН СССР, 1976; 227, 848
- [2] Bai X Z. *Mech Prog.* 1996; 26(3): 389  
(白象忠, 力学进展, 1996; 26(3): 389)
- [3] Kovalenko V S, Lutay A M, Anyakin M S. *Gas-Powder Laser Cladding with Electro-Magnetic Agitation*. Laser Inst of America, Orlando: FL, USA, 1997: F21-F26
- [4] Bai X Z, Hu Y D. *J Yanshan Univ.* 1999, 23(3): 196  
(白象忠, 胡宇达, 燕山大学学报, 1999; 23(3): 196)
- [5] Liu Y W. *Met Heat Treat.* 1979, (7): 1  
(刘益武, 金属热处理, 1979; (7): 1)
- [6] Kishimoto H. *Cast Forg.* 1974, 4: 17  
(岸本浩子, 铸造, 1974; 4: 17)