

爆炸处理提高16Mn钢疲劳性能

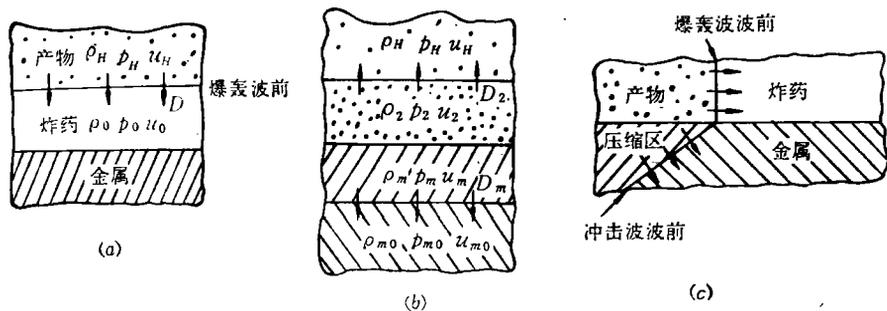
高桦* 褚瑶 陈维波 李禾

(中国科学院力学研究所)

1. 引言 为了改善焊接残余应力的分布, 国外^[1,2]已开始采用爆炸法调整内应力以代替花费昂贵的退火处理. 焊接试件经过合理的爆炸处理, 室温空气介质中 10^6 次疲劳持久强度有明显提高^[3]: 18Ni 马氏体时效钢提高40%; 0.12%C、0.52%Mn、0.3%Mo 钢提高50%; 中强度 Al-Zn-Mg 合金提高20%. 但是, 实际构件中常存在裂纹样的宏观缺陷, 为了进行损伤容限设计和安全寿命估算, 必须了解爆炸处理对宏观缺陷有何影响? 经处理后, 自缺陷处开始疲劳裂纹扩展的门槛限以及裂纹扩展速率有什么变化? 本文对上述问题进行了研究, 并就爆炸处理提高疲劳性能的原因作了讨论.

2. 疲劳试验及爆炸处理简介 试验选用16Mn 热轧正火钢板, 板厚28mm, 疲劳试验在 Amsler 2T 疲劳试验机上进行. 室温空气介质、频率80~100赫兹, 循环载荷比 $R=0.5$. 四点弯曲试样的尺寸($L \times W \times B$)为 $180 \times 30 \times 15$ (裂纹沿板宽方向扩展)和 $180 \times 23 \times 15$ (沿板厚方向扩展). 裂纹的扩展用读数显微镜监测, 试件表面经粒度 1μ 的研磨膏抛光后测量精度可达0.02mm. 电火花切割狭缝的端部曲率半径在工具显微镜下量测 $\rho=0.09\text{mm}$. 为了模拟生产实际中经长期运行后疲劳裂纹从缺陷端部起始扩展的情况, 本实验采用升载法测裂纹起始扩展. 人为规定: 循环 5×10^5 次自切口根部出现0.05mm长的裂纹为疲劳裂纹起始扩展的门槛限, 记作 ΔK_{th0} . 如果试件经 5×10^5 次循环仍未见裂纹扩展, 则将在更高的载荷下继续试验.

爆炸处理时, 在被处理金属的表面贴敷一层挠性橡胶炸药, 然后用雷管引爆. 在正面冲击的情况下(图1, a和b), 引爆后, 爆轰波从炸药上部开始以爆速 D 向下传播, 设 ρ_0 、 p_0 、 u_0 为炸药的初始密度、压强和质点速度, 其中 $u_0=0$, p_0 为一个大气压; ρ_H 、 p_H 、 u_H 为爆轰波通过后爆炸产物的参量. 由质量、动量守恒定律得到



(a) 爆轰波到达金属板以前 (b) 爆轰波与金属板碰撞处 (c) 掠过爆轰

图1 爆轰过程示意图

本文于1984年7月10日收到.

* 现调至上海工程技术大学材料系.

$$\rho_0 D = \rho_H (D - u_H) \quad (1)$$

$$p_H - p_0 = \rho_0 D u_H \quad (2)$$

爆轰波传到炸药与金属的分界面, 即在界面处形成两个方向相反的冲击波: (1) 传入金属的冲击波 D_m ; (2) 传至爆炸产物的反射冲击波 D_2 , 如图 1、b 示。设 ρ_{m0} , p_{m0} , u_{m0} 为金属的初始参数, 其中 $u_{m0} = 0$, p_{m0} 为一个大气压; ρ_m , p_m , u_m 为冲击波通过后金属的参数, 则有

$$\rho_{m0} D_m = \rho_m (D_m - u_m) \quad (3)$$

$$p_m - p_{m0} = \rho_{m0} D_m u_m \quad (4)$$

对于沿爆炸产物传播的反射冲击波 D_2 , 则有

$$\rho_H (D_2 + u_H) = \rho_2 (D_2 + u_2) \quad (5)$$

$$p_m - p_H = \rho_H (D_2 + u_H) (u_H - u_m) \quad (6)$$

其中 ρ_2 , p_2 , u_2 为冲击波 D_2 通过后产物的参量。

在金属与炸药分界面上, 压力和质点速度连续, $p_2 = p_m$, $u_2 = u_m$; 又 p_0 , p_{m0} 与 p_H , p_m 相比可以忽略; 此外 D_2 为弱扰动, $c_H - u_H \approx c_2 - u_2$ 。经以上一系列简化, 由 (1) 至 (6) 式可得到

$$\frac{p_m}{p_H} = \frac{2\rho_{m0} D_m}{\rho_{m0} D_m + \rho_0 D} \quad (7)$$

如果爆轰波不是正面撞击金属, 即冲击波不是正入射而是斜入射, 则金属中冲击波前的倾斜角以及形状将取决于爆速与冲击波在金属中波速之比(图 1, c 示)。此时, 金属中冲击波的压力 p_m 将低于按 (7) 式计算的结果。材料不同, p_m 减小的程度亦不同。

由于爆炸产物的膨胀, 爆压将迅速降低。虽然初始爆压与药层厚度无关, 但是压力持续的时间却随药层加厚而增长。

在爆炸处理时, 为了控制金属中冲击波的压力 p_m , 就必须选择适当的爆压 p_H , 由 (7) 式可见, 在金属材料已确定的情况下, 可通过调整炸药的密度 ρ_0 和爆速 D 来实现。而为了控制冲击波 p_m 的作用时间, 则须调整炸药层的厚度。

3. 疲劳试验结果

(1) 16Mn 热轧正火钢板, 裂纹沿板宽方向扩展的门槛限如图 2 示。在疲劳裂纹扩展过程中, 由于裂端塑性区受压于周围弹性区, 引起闭合效应。

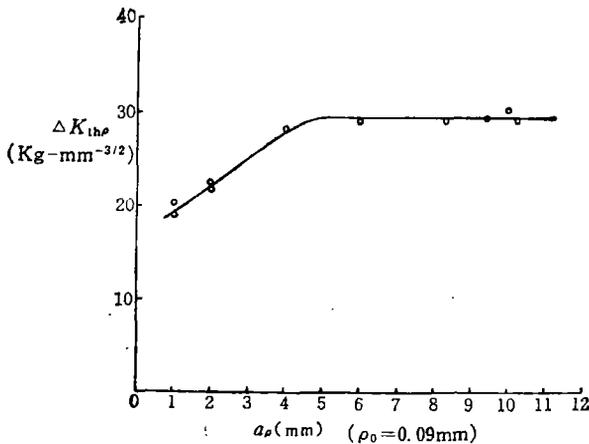


图 2 16Mn 热轧正火钢板的 ΔK_{thp}

它对疲劳裂纹低速阶段的扩展影响较大。本试验 ΔK_{thp} 所对应的扩展速率是循环 5×10^5 次扩展 0.05 mm, 当切口 a_p 较浅时, 疲劳裂纹在 $(a_p + 0.05)$ mm 长度以内扩展, 裂端塑性区离开自由表面相对较近, 由于自由表面应力释放, 塑性区的受压程度降低, 有效 ΔK_{eff} 增大, 所以表观门槛限降低。只有当切口深度超过一

定值以后, 门槛限才趋于定值。

(2) 爆炸处理后门槛限有所提高(表 1), 尤其是先有切缝, 再经爆炸者。表中所列数值不是单个试件的测量值, 而是同种试件在多次重复试验中的最可几数值, 因此, 表 1 所示数据反映了各种不同处理的系统差别。

(3) 爆炸处理后, 在表层相当深的范围内裂纹扩展速率有不同程度的降低。从图 3 所示之沿板宽方向扩展的试验结果可见, 大约在表层 12~13mm 范围内爆炸处理后裂纹扩展速率均低于未处理者。开始时, 扩展速率约降低 100~80%, 随着深度增加, 冲击波的作用衰减, 爆炸处理的影响逐渐减弱, 超过 12~13mm 以后, 不再有差别。

经过同样的爆炸处理, 原始切口较深者裂纹的初始扩展速率更低。

(4) 使材料表现各向异性的热轧带状组织和层状分布的夹杂物对疲劳裂纹扩展的影响十分严重。在厚度方向有较高的门槛值和较低的扩展速率。

金相观察表明, 每当裂纹前缘遇到层状夹杂物, 裂纹即会受阻, 改变原来的扩展方向, 或者在夹杂物的端头重新起始一条新的裂纹再朝前扩展。当 ΔK 较高时, 常常会自夹杂处同时起始两条甚至更多的裂纹, 形成裂纹的分叉扩展。裂纹的转向和分叉使有效的裂纹驱动力大大降低, 因而沿厚度方向扩展速率较低。

4. 爆炸处理提高疲劳强度的原因分析

(1) 与表面滚压、机械锤击及喷丸处理相仿爆炸处理可以使表面层金属塑性变形、形变硬化、形成宏观残余压应力层, 从而使疲劳强度提高。试验表明, 经爆炸处理后在离表面 5~6mm 层深范围内可见形变双晶, 显微硬度也有所提高; 超过此深度, 金相组织与显微硬度即无明显变化。但是, 疲劳裂纹扩展速率却在距表面 12~13mm 范围内均有降低, 此深度明显超过表面形变

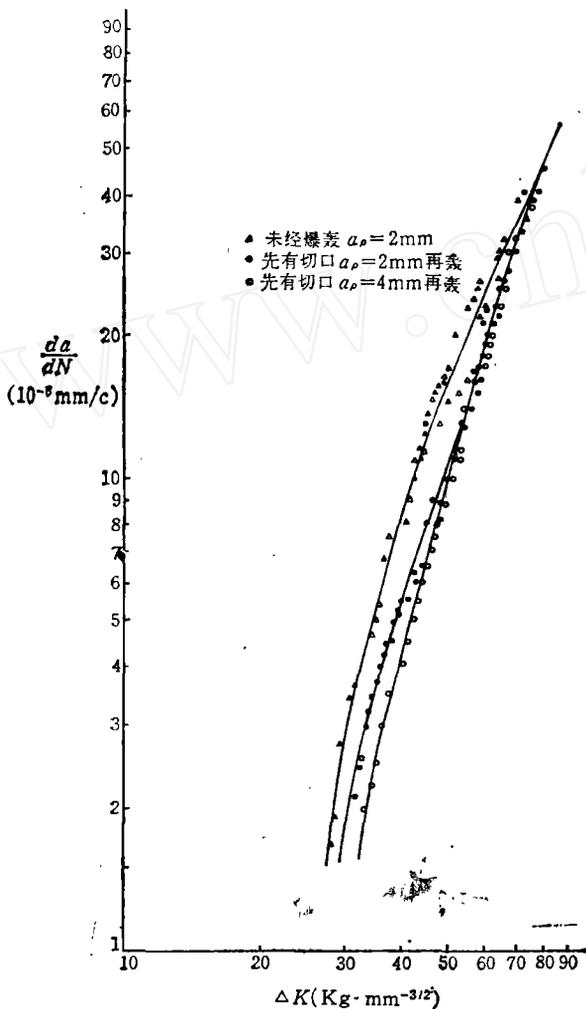


图 3 疲劳裂纹沿板宽方向扩展

强化层的深度。所以, 表面层的塑性变形和形变强化不是爆炸强化的主要原因。

(2) 炸药贴敷在金属表面, 当板的横向尺寸与板厚相比足够大时, 爆炸引起的冲

表 1 爆炸处理对疲劳门槛限的影响

		不同切缝深度的 ΔK_{thp} ($\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$)		
		$a_p = 1\text{mm}$	$a_p = 2\text{mm}$	$a_p > 5\text{mm}$
裂纹沿板宽方向扩展	原始材料	19.5	22	29
	先爆炸再开切缝	21	23.5	
	先有切缝再爆炸	22	25	
裂纹沿板厚方向扩展	原始材料	21.5	24	31
	先爆炸再开切缝	21.8	25	
	先有切缝再爆炸	23	26	

击波 D_m 可近似地看作一维应变平面波, 即外载均匀作用在与平面波传播方向垂直的平面边界上, 所有的应力、应变分量均为 x, t 的函数, 这时平面纵波即为轴向应变 ε_x 扰动的传播, 侧向应变 $\varepsilon_y, \varepsilon_z$ 均为零. 但是有起横向约束作用的侧向正应力 σ_y 和 σ_z . 由于对称, $\sigma_y = \sigma_z = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_x = \frac{\lambda}{\lambda+2\mu} \sigma_x$; $\lambda > 0, \mu > 0$, 所以 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 必同号. 即当一维应变波在介质中传播时, 介质处于三轴压力或三轴拉力状态. 爆炸处理时, 一维应变压缩波在金属中传播, 使金属承受很高的三轴压力, 这时, 材料中一些已存在的缺陷可能被闭合. 本实验采用电火花切割狭缝 (深 1~2mm, 宽 0.18mm) 经爆炸处理后, 近表面处切口形状被歪扭; 表层以下, 切口被压拢. 但是, 如上弥合部分在疲劳载荷下会再度豁开, 并休止在原来的切割长度. 待交变载荷增大到一定值以后才又继续扩展.

(3) 冲击波通过金属材料造成的变形条件与静载极不相同. 爆轰波以高速掠过金属表面, 使之瞬间受到高压, 并随即形成冲击波波前和三轴压力状态. 在冲击波波前, 即已变形和未变形材料的分界处, 存在着极高的局部应力, 随着冲击波的传播, 材料受到强烈的扰动, 点阵缺陷增加. 尤其因为过程的速度很高, 点阵缺陷来不及运动到合适的位置以形成亚稳定结构, 从而使材料获得了比静变形更高的强化效应^[4]. 冲击波引起的扰动可以深入到表面以下相当的深度. 本实验表明在表层以下 12mm 范围内裂纹的扩展速率均有降低, 与此论断吻合.

(4) 冲击波通过时与材料中已存在的宏观缺陷相作用, 在其顶端引起集中的强扰动和变形, 与过载效应相仿, 在缺陷端部形成压应力区, 引起闭合效应, 遂使疲劳裂纹扩展的有效驱动力降低. 本试验设计了两组不同的程序: a) 先有切缝再爆炸; b) 先爆炸再开切缝. 其差别就在于爆炸时前者有缺陷与冲击波的相互作用而后者则没有. 比较这两组试验结果可见: 前者的门槛限更高, 裂纹扩展速率更慢; 而且原始切缝较深者, 由于冲击波在切缝顶端附近引起的扰动更强烈, 致使裂纹扩展速率更低.

5. 讨论 国内外广泛采用滚压、机械锤击、喷丸、表面淬火和化学热处理等方法来提高疲劳强度。但是,随着海洋工程、石油化工、等的发展,大量承受疲劳载荷的构件、容器由于尺寸大,数量多,上述常规处理方法均难以适应需要。爆炸处理可以明显提高疲劳抗力;对于焊接件,经爆炸处理改善残余应力的分布后还可以进一步提高构件的疲劳强度。本方法需要的设备简单,工作效率高,特别适用于大型构件的局部处理,是一种值得研究推广的新工艺。

本工作是郑哲敏教授、赵士达副教授领导的“爆炸调整焊接残余应力”课题的一部分。他们曾对本工作提出极其宝贵的意见。在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] Б. П. Беатовиц, I Meeting on Explosive Working of Materials, USSR Novosibirsk, Sep. (1981), 127.
- [2] В. И. Труфяков, Автоматическая Сварка, 9 (1978), 29.
- [3] Chadwick M. D., Metal Construction and British Welding Journal, Oct. (1971), 374.
- [4] Murr L. E. et. al., Acta Metallurgica, Vol. 26(1978), 847.

ENHANCING 0.16% C, 1.4% Mn STEEL FATIGUE RESISTANCE BY EXPLOSION TREATMENT

Gao Hua, Chu Yao, Chen Weibo, Li He

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)