

爆炸加工降低残余应力的机理

[苏]乌克兰科学院巴东电焊研究所 В. Т. Пегушков

文献[1]曾以冲击波加载时金属中产生应力痕迹为前提来解释爆炸加工降低残余应力的效应。应力痕迹的出现取决于切向应力松弛。进一步的研究[2]则可以使应力应变痕迹(HLIC)的概念更加全面。这个HLIC与爆炸远区中的残余应力应变场相互作用导致整个焊接件中残余应力和应变的减小。

对理想弹塑性金属半无限空间平面冲击波加载的最简单情况,我们定量估计了HLIC中的应力和应变,定量估计了为造成给定强度的HLIC所必须的冲击压缩的压力。但同时所得的结果却具有更普遍的性质,并在一定程度上符合实际工艺中[4,5,11]遇到的松弛材料非一维加载下的情况[1,3]。

用 σ_1 - ϵ_1 坐标系中的冲击绝热曲线来研究HLIC的形成过程[6],这里 σ_1 是应力, ϵ_1 是在冲击波阵面法线方向上的应变。图1中 OhH_1 线对应于加载时金属的状态, OS 为流体静力压缩直线, m^*r_1 和 R_1r_1 分别为弹性和塑性卸载线。

如果在加载和卸载阶段满足单轴变形条件,则由于冲击波中切向应力的松弛,在卸载以后($\sigma_1^0 = 0$)金属的应力应变状态将与原始状态大不相同。在 $\sigma_1^0 = 0$ 时,金属中存在由残余压应变 ϵ_1^0 (当冲击波压力为 σ_1^* 时)引起的残余压力 p^0 ,并且由于 $\sigma_1^0 = 0$, $\sigma_2^0 = \sigma_3^0$,有

$$p^0 = \frac{\sigma_1^0 + \sigma_2^0 + \sigma_3^0}{3} = \frac{2}{3} \sigma_2^0 \quad (1)$$

因为 $p^0 = K \epsilon_1^0$,所以

$$\epsilon_1^0 = \frac{2}{3} \frac{\sigma_2^0}{K} \quad (2)$$

这里 K 为体积压缩模量, σ_2^0 为在冲击波平面内的残余应力。

残余应变值 ϵ_1^0 同样可以从卸载直线 m^*r_1 的方程得到[6],这时

$$\sigma_2^0 = \sigma_3^0 = \sigma_T^0 \quad (3)$$

这里 σ_T^0 对应于加载和卸载阶段的特征应变率的动态屈服极限。

这样,一维压缩波通过金属和随后的一维卸载¹⁾,就在与波阵面正交的两平面上产生了残余压应力,其值与动态屈服极限相当。

在冲击波阵面和卸载波阵面上的应变率 $\dot{\epsilon}$ 达到相当大的值时[7],金属表现出显著的粘性性质[8]。但是在卸载完成后 $\dot{\epsilon} \approx 0$,因而状态(3)是不稳定的,材料处于过应力状态,而应该进行相对缓慢的后续切向应力松弛过程,在这个过程中

$$\sigma_2^0 \rightarrow \sigma_2^1 = \sigma_T \quad (4)$$

1) 原文为加载。——译者

(图 2 上的轨迹 r_2, r_2')。这就在半无限空间自由表面的方向上引起附加的金属塑性流动, 金属膨胀, 这表现为点 r_1 (图 1) 向纵坐标轴“漂移”, 直到残余应变等于下式时为止:

$$\varepsilon_1^{00} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_T}{K} \quad (5)$$

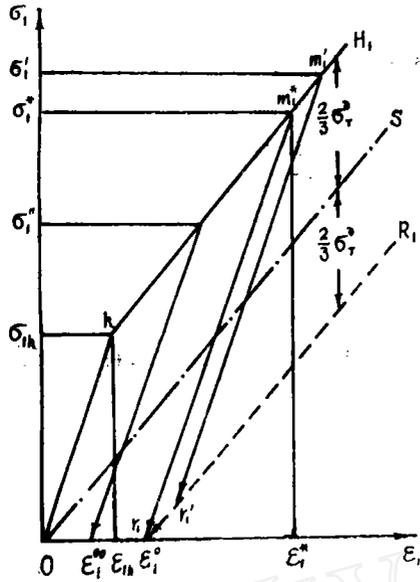


图 1 沿平面冲击波阵面法线方向材料由雨贡尼奥绝热曲线卸载的轨迹

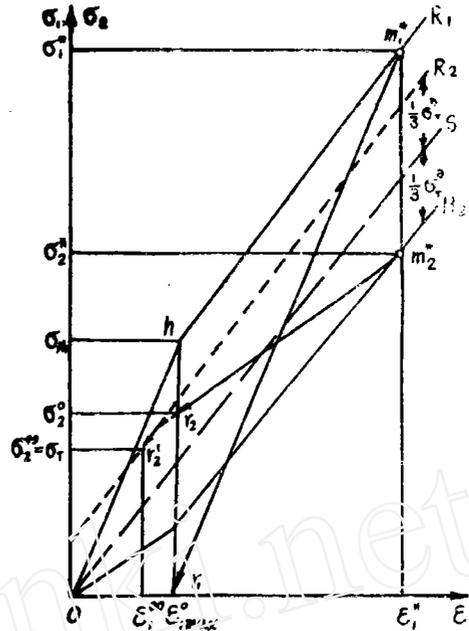


图 2 沿冲击波阵面平面材料由雨贡尼奥绝热曲线卸载的轨迹

因此, 在半无限空间中形成 HDC 的过程由两个阶段组成: 瞬间的应力应变状态的建立和导致金属静态平衡状态的后续松弛。对有限尺寸的物体, 包括物体的局部爆炸加载, 还存在着第三个阶段——平衡的 HDC 或者与物体的边界相互作用而使 σ_1^0 减小并形成横向伸长变形, 或者(如果卸载受约束)与爆炸区附近的残余应力相互作用而形成整个物体的应力平衡。

回到图 1, 表达式 (2) 是假设冲击波压力 $\sigma_1 = \sigma_1^*$ 时得到的, 这里 σ_1^* 是卸载为弹性并具有最大幅度 $\Delta\sigma_{1max}$ 时的压力^[6]。显然, 当 $\sigma_1 = \sigma_1' > \sigma_1^*$ 时卸载分两阶段, 其中包括塑性段 r_1', r_1 , 但瞬间的最终状态仍可写成同样的表达式 (2)。当 $\sigma_1 < \sigma_1^*$ 时 HDC 中瞬间残余应变与冲击波压力成正比, 由弹性卸载直线方程可以得出^[6]:

$$\sigma_1' - \sigma_1 = (\lambda + 2\mu)(\varepsilon_1'' - \varepsilon_1) \quad (6)$$

其中 λ, μ 为拉梅常数。当 $\sigma_1 = 0$ 时有

$$\varepsilon_1^0 = \varepsilon_1'' - \frac{\sigma_1'}{\lambda + 2\mu} \quad (7)$$

采用显而易见的关系式 (图 1)

1) 实际上式 (2) 并不依赖于卸载过程, 式 (3) 是在 $\sigma_1 > \sigma_1^*$ 时才成立的。——校者

$$\varepsilon_1^0 = \varepsilon_1 h + \frac{\sigma_1^* - \sigma_1 h}{K} \quad (8)$$

表达式(7)可以写成更方便的形式(略去“h”号)

$$\varepsilon_1^0 = \frac{4\mu}{3K(\lambda + 2\mu)}(\sigma_1 - \sigma_{1h}) \quad (9)$$

HDC中的瞬间残余应变值可由雨贡尼奥屈服极限值 σ_{1h} 确定,而 σ_{1h} 又和冲击波阵面上的应变率有很大关系^[6]。

其次,我们研究与冲击波阵面正交的平面上的卸载过程(图2)。R₁, R₂, OS, H₂, m₂*r₂线分别表示 $\sigma_1 - \varepsilon_1$ 绝热曲线的塑性段,应力 $\sigma_2 (= \sigma_3)$ 的塑性卸载线,静水压轴线, $\sigma_2 - \varepsilon_1$ 绝热曲线的塑性段,应力 $\sigma_2 (= \sigma_3)$ 的弹性卸载线。m₁*r₁线与前一样对应于应力 σ_1 的弹性卸载,为计算简单起见取应力 σ_1 等于 σ_1^* 。

应力 σ_2 的弹性卸载线的方程具有以下形式^[6]:

$$\sigma_2^* - \sigma_2 = \frac{\nu}{1 - \nu}(\sigma_1^* - \sigma_1) \quad (10)$$

这里 ν 为泊桑系数。在卸载完成时刻 $\sigma_1 = 0$,而应力 σ_2 则卸载到r₂点,其坐标为 $\sigma_2^0, \varepsilon_1^0$ 。

从米塞斯屈服条件可得

$$\sigma_1^* - \sigma_2^* = \sigma_T^0 \quad (11)$$

合并上面两式并注意到

$$\frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} = \frac{c_T^0}{\sigma_1 h} \quad (12)$$

可得出

$$\frac{\sigma_2^0}{\sigma_T^0} = \frac{\sigma_1^*}{\sigma_1 h} - 1 \quad (13)$$

从式(13)得出形成HDC的条件

$$\sigma_1 > \sigma_{1h} = \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} \sigma_T^0 \quad (14)$$

此条件给出冲击波压力最小值的估计。因为当 $\sigma_1 > \Delta\sigma_{1max}$ 时除了弹性卸载阶段之外还存在着塑性卸载阶段,这使金属达到用r₁和r₂点的坐标所表征的状态,所以冲击波有效压力的范围为 $1 < \sigma_1 / \sigma_{1h} \leq 2$ 或

$$\frac{1 - \nu}{1 - 2\nu} < \frac{\sigma_1}{\sigma_T^0} \leq \frac{2(1 - \nu)}{1 - 2\nu} \quad (15)$$

为了确定(例如,CT3钢)最大瞬间强度的HDC所必需的压力值的数量级,我们采用了文献[8,9]的数据,其中,对应于接触爆炸加载应变率 $\dot{\varepsilon} \approx 1 \times 10^4 \text{秒}^{-1}$, σ_T^0 值约为900兆帕(9千巴)。采用 $\nu = 0.28$,得

$$1500 < \sigma_1 \leq 3000 \text{兆帕} \quad (16)$$

如果从上述分析中减去HDC中在它形成的第二阶段按表达式(4)松弛的那部分应力

(下转第182页)

(上接第 254 页)

$$\sigma_1^* = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1h}} - 1 \right) \sigma_1^0 = \sigma_1 \quad (17)$$

则此压力范围的上限可以进一步降低, 引入符号 $\sigma_1^0 = \alpha \sigma_T$, 从式 (17) 和 (15) 得

$$1 \leq \sigma_1 / \sigma_{1h} \leq (1 + \alpha) / \alpha \quad (18)$$

由此对 C_T3 钢: $1500 \leq \sigma_1 \leq 2000$ 兆帕。

这样, 为了得到最大平衡强度的 H/IC, 平面波的压力应比雨贡尼奥弹性极限高 ~25—50%。对大多数金属来说, 雨贡尼奥弹性极限的值为 1000—2000 兆帕^[6]。

我们来估计金属中以这样的加载所造成的应变的量级。考虑式 (15), 由式 (8) 有¹⁾

$$\varepsilon_{i \max}^* = \varepsilon_{1h} + \frac{\sigma_{1h}}{K} \quad (19)$$

而从式 (9), 有

$$\varepsilon_{i \max}^0 = \frac{4\mu\sigma_{1h}}{3K(\lambda + 2\mu)} \quad (20)$$

对 C_T3 钢取 $K = 1.52 \times 10^5$ 兆帕, $\lambda = 1 \times 10^5$ 兆帕, $\mu = 0.78 \times 10^5$ 兆帕, $\alpha = 4$, $\sigma_{1h} = 1400$ 兆帕, 得到 $\varepsilon_{i \max}^* = 1.47\%$, $\varepsilon_{i \max}^0 = 0.92\%$ 。从式 (8)²⁾ 也可得到由一维冲击压缩所造成的应变中塑性分量的值

$$\varepsilon_{i p}^* = \frac{\sigma_{1h}}{K} \approx 0.9\%, \quad \varepsilon_{i p}^0 = \frac{1}{2} \varepsilon_{i p}^* \approx 0.45\% \quad (21)$$

H/IC 与焊接残余应力场的相互作用可用文献[1,10]中的关系式进行分析。

因此, 本文所述方法可以在一维近似的基础上得到计算冲击波加载所造成的 H/IC 中应力和应变的关系式, 它们可用来确定为了消除各种类型材料焊接接头中残余应力所需的炸药药量参数。

参 考 文 献 (略)

程屏芬译自: Автоматическая сварка, 4 (1982): 1—4. (赵士达校)

1) 原文为“考虑式(17), 由式(7)有”。——校者

2) 原文为“式(7)”。——校者