

爆炸法消除金属焊接残余应力

中国科学院力学研究所 陈维波

前言

金属构件焊接时, 构件局部加热而随之不均冷却, 导致焊接区周围有残留应力。当金属构件处于交变载荷、低温及腐蚀介质中时, 产生不利的影响。为了消除残余应力, 过去广泛采用退火, 但对大型构件如桥梁、舰船、大型输油管道等很难进行整体退火。因此必须寻找其它方法来消除或调整焊接构件的残余应力, 以提高构件抗疲劳, 抗脆断的能力。

本文介绍用爆炸法消除金属焊接残余应力的新工艺, 并介绍其原理、方法、药量计算公式及对金属焊接构件疲劳、脆断的影响。

此法优点是工艺简单、效率高、不需要复杂设备。对消除大型构件焊接残余应力有广泛的前景。用爆炸法在管道环焊构件上消除残余应力具有独特的优点, 爆炸后管接头内壁可实现双轴残留压应力的状态, 对管道抗应力腐蚀开裂十分有利。国外已将此方法用于天然气管道及其它接触腐蚀介质管道的处理。经过爆炸法消除应力焊接接头, 疲劳强度可提高40-110%, 抗应力腐蚀和抗脆断能力明显提高。脆性转变温度降低约30°C。

爆炸消除残余应力, 国外开始于六十年代后期, 苏联、日本及英国都曾做过报导。此后南斯拉夫与苏联合作, 把实验研究成果推广到生产中。到1981年为止, 南斯拉夫比拉奇铝厂用此法已处理了总长150km以上的焊缝和两万多件各种尺寸的管接头。

一、爆炸处理及其物理过程分析

关于爆炸法消除残余应力的物理过程, 目前有塑性变形、振动松弛和表面强化三种说法。前两种机理较为流行。

塑性变形机理: 爆炸法消除残余应力的关键在于选用爆炸载荷与加载方法, 保证沿焊缝

区周围产生适当的拉伸塑性变形。

炸药在焊缝区表面接触爆炸后, 材料由于冲击压缩产生的残余应力与焊缝区原有的残余应力相互作用, 使焊接应力降低。苏联学者把冲击波压缩在材料中产生的残余应力和残余应变称为“应力应变迹”, 并试图找出降低焊接残余应力所需“应力应变迹”的大小及相应的击波强度间的关系。

振动松弛机理: 构件受到脉冲载荷时, 产生共振, 内部各点产生阻尼强迫振荡的弹性应力。此应力与焊接残余应力叠加, 超过材料屈服应力时, 产生塑性变形, 从而使原有的残余应力降低。

爆炸法消除和调整残余应力时, 材料与构件中由于波的来回反射, 同时引起振动, 振幅远比一般振动消除残余应力处理时的大, 就有可能在毫秒或秒级的时间内达到振动松弛。所以不与炸药直接接触的部分也能观察到有冲击波的振动作用。多次的间接冲击波振动作用对应力松弛有很大的效果。

二、参数的确定

主要靠实验和近似计算来确定参数。现行的经验公式是在统计处理实验数据的基础上, 间接估计炸药在焊缝周围爆炸的动力特性。最大残余应力下降值 $\Delta\sigma$ 为:

$$\Delta\sigma = \frac{Q_0}{P \cdot K \cdot \delta} \cdot m \quad (1)$$

式中 P ——给定工艺条件下, 由实验测出的效率系数(见附表)。表示最大残余应力降低 $1 \text{ kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2$ 时炸药的特性能量效率;

Q_0 ——炸药的爆热;

K 、 δ ——无量纲参数。考察材料强度和厚度对应力消除效果的影响;

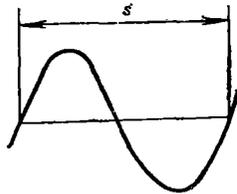
附表 P 值的大小

加载方式	炸药	密度 (g/cm ³)	直径 (mm)	爆热 (MJ/kg)	P (J·mm/kg·f)	
蛇形布药	两根	导火索	1.4	3	5.86	62.8~83.7
	单根	导火索	1.4	3	5.86	75.3~104.6
	单根	RDX	1.4	3.5	5.44	62.8~104.6
	两根 (两面加载)	RDX	1.4	3.5	5.44	83.7~113
药包	三根	RDX	1.4	3.5	5.44	125.5~167.4
	单根	TNT	1.1	16	4.18	292.9~376.6
	硝铵炸药	1.0	16	4.31	334.7~418.4	
条形药包	RDX	0.5	厚5	3.77	104.6~146.4	

m ——单位长度的焊缝上,炸药的质量。在蛇形布药时,需要折算。此时式中的 $m = L \cdot m_0 / s$ 。

其中 s ——蛇形布药的波长;

m_0 ——曲线单位长度的炸药质量;



L ——药包曲线长度。

试验指出,式(1)可以预测厚度16mm以下的钢板对接接头拉应力下降值,误差20%。

上述公式是在板焊件实验结果上得出的。如果构件是焊接容器,薄壁柱壳内部受对称爆炸载荷作用时,可把壳体看作自由振动系统。

三、爆炸处理对构件疲劳与脆断性的影响

爆炸处理可提高焊接构件抗疲劳破坏的能力。其原因是在焊缝周围残余应力得到消除,确切地说是得到调整,焊缝表面得到强化。图1表示爆炸前后的疲劳曲线。

实验表明,爆炸处理后焊接试件的寿命延长8~10倍;在对称与脉动循环条件下疲劳极限值分别提高了80%和45%。

英国学者M.D.Chadwick得到了相同的结果,并提出对疲劳有益的作用有以下几个方面:

爆炸处理后形成压应力,拉伸残余应力的幅值变小、原始缺陷变钝、应变时效和硬度、以及原始缺陷变化等。

残余应力对疲劳裂纹扩展速率也有显著影

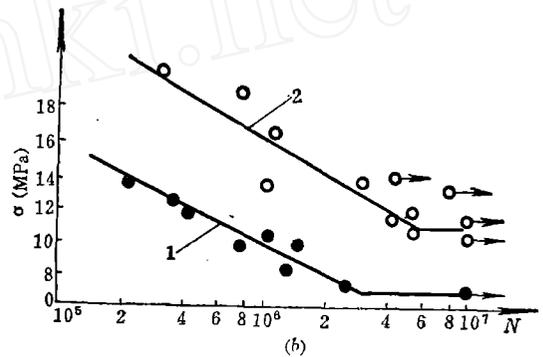
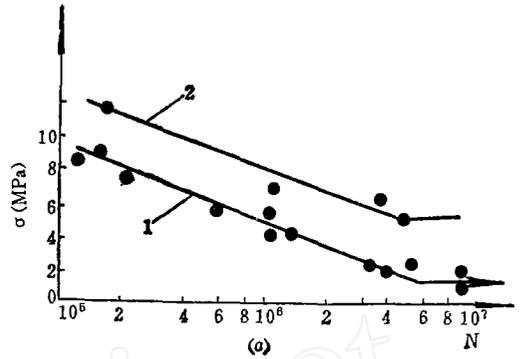


图1 爆炸处理前后的疲劳曲线
(a) 对称循环; (b) 脉动循环。
1—处理前; 2—处理后。

响。众所周知,拉伸残余应力会导致疲劳裂纹的扩展速率增加。而经过爆炸处理以后,焊接构件由于压应力使疲劳裂纹的扩展速率明显减缓。

焊接工艺缺陷,尤其是裂纹型的缺陷是焊接件脆性破坏的主要原因。苏联学者Лемуш-КОВ选用三种平面试件来模拟裂纹状缺陷,研究爆炸加工对切口尖端的影响。图2为低温拉伸实验结果

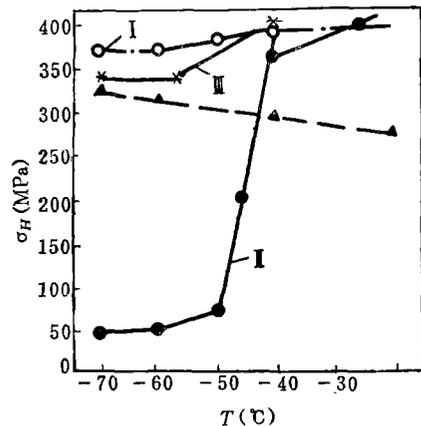


图2 低温拉伸实验结果

乳化炸药水分含量的控制

兵器工业部第五设计院 杨佩璐

间断生产乳化炸药, 普遍存在着各批质量有差异的问题。其主要原因是氧化剂在保温槽中蒸发水量的变化而使炸药中水含量不同。我们做过试验: 将氧化剂水溶液放在烧杯内, 在水浴上加热 40 分钟。若烧杯有盖, 则水分蒸发量为 10%; 若烧杯无盖, 则水分蒸发量达 33%。生产乳化炸药时, 氧化剂溶液在保温槽中的停留时间为 2~4 小时。为了防止水分蒸发, 需在保温槽的排气管上装设回流冷凝器。冷凝器的设计计算如下:

1. 蒸汽冷凝热

100°C 的蒸汽降至 100°C 的水; 100°C 的水再冷却至保温操作温度 93°C; 冷却水入口温度为 29°C; 出口温度为 34°C。

根据 RJ-2 型乳化炸药氧化剂溶液的浓度得到近似的硝酸铵浓度为 88.54%。95.6°C 时, 其饱和水蒸汽分压为 23465Pa。

室温下 (24.5°C) 水的蒸汽压为 3066Pa。

单位面积蒸发量为 5.9kg/m²·h。

保温槽直径为 1500mm, 相应的蒸发面积为 $F=1.77\text{m}^2$ 。因此, 蒸汽冷凝热 Q_1 为:

$$Q_1 = 2259 \times 5.9 \times 1.77 = 23493 \text{KJ/h}$$

其中 2259KJ/kg——水在 100°C 时的汽化能。

水由 100°C 冷却至 93°C 放出的能量 Q_2 为:

$$Q_2 = 4.18 \times 5.9 \times 1.77 \times (100 - 93) \\ = 304.6 \text{KJ/h}$$

由于冷凝和冷却过程的传热系数 K 值不同, 故需分段进行计算传热面积。

2. 冷凝段

K_1 按经验值取为 2092KJ/m²·h·°C。

$$\Delta t_1 = \frac{(100 - 29) - (100 - 34)}{\ln \frac{100 - 29}{100 - 34}} = 68.5^\circ\text{C}$$

$$F_1 = \frac{Q_1 \times 1.15}{K_1 \times \Delta t_1} = \frac{23493 \times 1.15}{2092 \times 68.5} \\ = 0.19 \text{M}^2$$

3. 冷却段

K_2 按经验值取为 1046KJ/m²·h·°C。

$$\Delta t_2 = \frac{(100 - 29) - (93 - 34)}{\ln \frac{100 - 29}{93 - 34}} = 64.8^\circ\text{C}$$

$$F_2 = \frac{Q_2 \times 1.15}{K_2 \cdot \Delta t_2} = \frac{304.6 \times 1.15}{1046 \times 64.8} = 0.005 \text{M}^2$$

式中 1.15——安全系数。

所以冷凝器的传热面积 F 应不小于:

$$F = F_1 + F_2 = 0.195 \text{m}^2$$

若冷凝器内管取 $\phi 108 \times 4$, 套管取 $\phi 133 \times 4$, 套管有效长度为 600mm, 则冷却面积为 0.2m²。

4. 冷却水量的计算

$$W = \frac{23493 + 304.6}{(34 - 29) \times 4.18} \approx 1.14 \text{T/h}$$

伸实验结果。 σ_H 为拉伸净应力。图中 I 代表基本金属试件; II 为面堆焊试件, 在切口制成后再堆焊; III 为堆焊试件, 在切口顶端附近进行爆炸处理。处理的目的是为了显著减少拉伸残余应力。

当温度 $T = -40^\circ\text{C}$ 时, 试件 II 出现脆断,

σ_H 值降低晶状断口; 当温度 $T = -50^\circ\text{C}$ 时, σ_H 急剧变小; 即使温度降到 -70°C , I 与 III 也未发生脆断。

实验结果表明, 经过爆炸处理, 大大降低了试件的脆性转变温度。