# 爆炸消除 921A 钢焊接残余应力试验

侯海量， 朱 锡， 刘润泉
（海军工程大学 船舶与海洋工程系，武汉 430033）

侯海量

摘 要：根据潜艇耐压壳焊接工艺制作了模拟焊接试板，并根据爆炸消除焊接残余应力基本原理和国内外实践经验，设计了爆炸消除模拟焊接试板残余应力的工艺，进行了爆炸消除 921A 钢焊接残余应力试验研究。结果表明，单、双面布药爆炸处理消除焊接残余应力，均能有效调整、消除焊接残余应力，使残余应力分布明显均匀化；接触爆炸处理效果优于非接触爆炸处理效果；爆炸冲击波的作用效果优于反射拉伸波作用；双面爆炸处理效果优于单面爆炸处理效果。

关键词：爆炸法；焊接残余应力；消除残余应力；潜艇耐压壳
中图分类号：TG404 文献标识码：A 文章编号：0253－360X(2004)01－119－05

## 0 序 言

潜艇耐压壳属于大型壳体结构，直径达 5～8 m，板厚达 20～35 mm，其材料通常为高强度低合金钢，焊接残余应力同时具有厚板焊接残余应力和壳体焊接残余应力的特征。焊接残余应力与工作应力交互作用，严重影响了耐压壳的强度、疲劳、屈曲等性能，此外，还会导致耐压壳产生变形、应力腐蚀开裂、脆性断裂等严重后果，是潜艇的一个安全隐患。为提高潜艇安全性，必须有效消除或减小耐压壳焊接残余应力[1]。

爆炸法消除残余应力快速简便，能耗低、价廉，而且不受构件和设备的限制，愈是大中型复杂构件，愈是特殊钢种（加热处理不能消除应力的不锈钢、耐热钢、耐磨钢、异种钢和调质钢等），愈能发挥其优越性。此外，还可提高焊接接头抗应力腐蚀能力、提高构件的疲劳寿命和结构抗脆断能力，特别是可以消除再热敏感材料的再热裂纹，消除特种调质钢焊接构件的残余应力，这两点是退火处理方法所达不到的[1～7]。

目前，爆炸消除焊接残余应力已得到一定规模的研究和应用，但将这一技术应用于船舶与海洋工程中的研究，还比较少见报道。作者通过模拟试验研究，探索应用爆炸法消除潜艇耐压壳焊接残余应力，探索将爆炸处理消除焊接残余应力技术应用于船舶与海洋工程中。

## 1 爆炸消除残余应力的基本原理

收稿日期：2003－04－25

金属在爆炸高压下呈现类似流体的规律，中性爆炸是金属材料达到流体状态的临界爆炸条件（见图 1）。在这种条件下，金属会在残余应力场的诱导（或者说是叠加作用的结果）下发生流变，在压应力区产生压缩塑性变形，反之在拉应力区产生伸长塑性变形。塑性变形越大，残余应力消除越多，残余应力消失了，塑性流变也随即停止。理想情况下，如果外加负载足够大，中性爆炸最终形成的塑性应变量 $\varepsilon_{pm}$，将正好等于初始存在的弹性应变量 $\varepsilon_{em}$。

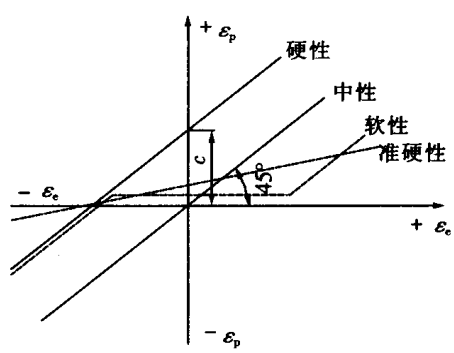


图 1 残余应力诱导塑性流变机制

**Fig. 1 Mechanism of plastic yield induced by residual stresses**

硬性爆炸是指比中性爆炸强度更大的爆炸条件，巨大冲击波压力除了使金属具有类似流体的变形之外，还可以使金属产生一定量的两度方向的平面流变 $C$（$C$ 是爆炸参数和被爆炸处理材料性能的函数，与初始金属内部存在的残余应力无关，在固定爆炸条件和金属材料的条件下，$C$ 是一个常数，被认定为正值）。因此，在硬性爆炸情况下，金属产生的总的塑性变形量 $\varepsilon_{ph}$ 由两部分组成，第一部分为残余应力诱导的塑性流变，是残余应力引起的弹性应

变转变来的，其值为 $\varepsilon_e$；第二部分为过强的冲击波压力本身促使金属发生流变形成的塑性应变 $C$，因而 $\varepsilon_{ph}$应满足

$$\varepsilon_{ph}=\varepsilon_e+C。$$

软性爆炸是比中性爆炸强度小的爆炸条件，由于不足的冲击波压力的作用，金属尚未达到流体形态，形变能力较小，当外载应力数值低于临界值 时，塑性流变终止。

## 2 模拟试板及爆炸处理工艺设计

### 2.1 模拟试板的设计

模拟焊接试板长 1 300 mm，宽 400 mm，厚 24 mm，开 60°对称 X 形坡口，采用双面交替焊接（其中先焊面为试板正面），焊接道数以填满坡口为准，焊接工艺与潜艇耐压壳焊接工艺相同，同时焊好焊缝Ⅰ、Ⅱ，间隔足够长时间后焊接焊缝Ⅲ，再间隔足够长时间后焊接焊缝Ⅳ、Ⅴ。焊缝Ⅰ、Ⅱ长 400 mm，焊缝Ⅳ、Ⅴ长 200 mm，各焊缝之间间距为 5 mm（见图 2）。焊缝Ⅰ、Ⅱ可认为是自由焊缝，焊缝Ⅳ、Ⅴ是拘束焊缝。焊接试板材料采用 921A 钢，其力学性能见表 1。

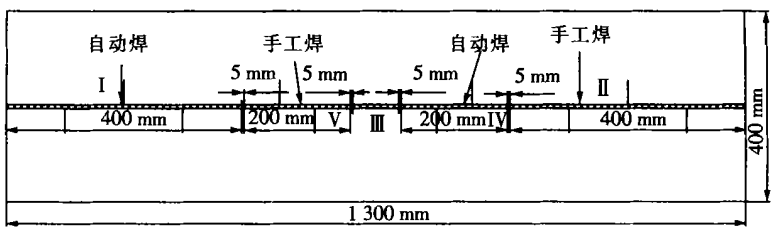


图 2 焊接试板

**Fig. 2 Welding specimen**

表 1 921A 钢力学性能

**Table 1 Mechanical property of steel 921A**

| 规格 | 杨氏弹性模量 $E$/MPa | 泊松比 $\upsilon$ | 屈服压力 $\sigma_s$/MPa | 伸长率 $\delta$(%) | 断面收缩率 $\Psi$(%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 10～35 mm 板 | $2.1\times10^5$ | 0.3 | 590 | ＞16 | ＞50 |

### 2.2 爆炸处理工艺设计

影响爆炸法消除焊接残余应力效果的基本因素包括炸药性能、药条形状与尺寸、布药方式、引爆方式和每批次引爆药量控制等。根据国内外实践经验，采用沿焊缝条形布药对纵向、横向残余应力的消除均有较理想的效果，对中厚板均可采用。

#### 2.2.1 炸药选择

采用沿焊缝条形布药，存在的问题是药条直径必须大于炸药的临界爆炸直径 $d_K$（见表 2 几种炸药在装药密度为 0.9～1.0 g/cm$^3$，薄玻璃管内爆炸时的临界直径）。试验中，药条直径在 10 mm 左右，直径过大，爆炸处理效果接近于沿焊缝均匀布药，消除残余应力效果不明显；直径过小，爆炸能量不足，不能使焊接构件内部发生足够塑性流变，消除残余应力效果同样不明显。因而，爆炸消除残余应力所使用的炸药应具有良好的传爆能力，中等爆炸强度、合适的爆速范围和良好的安全性及稳定性。经过比较决定采用钝化黑索金（是由黑索金粉末与钝化剂组成的粒状混合炸药，通常由黑索金和蜡等组成，试验中采用的是 A3 炸药，其化学成分的质量分数为黑索金 91%，石蜡 9%。黑索金化学分子式为 $C_3H_6N_6O_8$，代号 RDX，黑索金（晶体）和钝化黑索金性能见表 3。

#### 2.2.2 炸药布置

将钝化黑索金装入内径为 8 mm、外径为 10 mm 的薄壁橡胶管内，再将装好炸药的橡胶管平行布置在焊缝上，药条中心间距 20 mm（见图 3、4），这样装药既有利于炸药稳定传爆，且安装方便、安全，便于在工程实际中应用。

表 2 几种炸药的临界直径

**Table 2 Critical diameter of several explosive**

| 炸药 | 临界直径 $d_K$/mm | 炸药 | 临界直径 $d_K$/mm |
|---|---|---|---|
| $C_5H_8N_4O_{12}$ | 1.0～1.5 | TNT | 8～10 |
| RDX | 1.0～1.5 | $NH_4NO_3$ | 100 |
| TNT 21%/ $NH_4NO_3$ 79% | 10～12 | $NH_4NO_3$ 80%/ Al（粉末）20% | 10～12 |

表 3　黑索金基本性能

**Table 3　Basic property of RDX**

| 炸药 | 密度 $\rho_0$/(g·cm$^{-3}$) | 爆燃点 $T_D$/℃ | 冲击感度 λ(%) | 爆速 $D$/(m·s$^{-1}$) | 爆力 $\Delta V$/mL | 猛度 $\Delta h$/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| RDX(晶体) | 1.7 | 230 | 70～80 | 8 400 | 520 | 29 |
| 钝化 RDX | 1.1 | — | — | 6 390 | — | — |

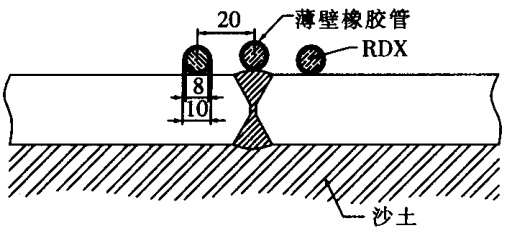


图 3　装药布置示意图

**Fig. 3　Abridged general view of explosives arrangement**

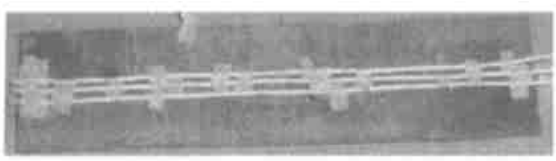

图 4　装药布置实物图

**Fig. 4　Photo of explosives arrangement**

## 3　模拟焊接试板残余应力测试及爆炸处理

### 3.1　焊接残余应力测试

采用盲孔法测量了模拟试板焊接残余应力，并对盲孔孔边产生塑性变形的测点进行塑性修正[8]，测试结果如表 4 所示(各测试点编号的第 1 个字母代表焊缝拘束情况：F 为自由，L 为拘束；第 2 个字母代表焊接方式：A 为自动，H 为手工；第 3 个字母代表试板的正反面：F 为正面，B 为反面，数字 1 和 4、2 和 5、3 和 6 分别表示测点距焊缝中心线距离为 0、10 mm、20 mm)。

表 4　焊接残余应力测试结果

**Table 4　Results of residual stresses measurement**

| 测点 | 应力分量 σ/MPa | 说明 | 测点 | 应力分量 σ/MPa | 说明 | 测点 | 应力分量 σ/MPa | 说明 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| FAF－1 | $\sigma_x$ 148.8<br>$\sigma_y$ 376.3 | $>0.5\sigma_s$ | LAF－5 | $\sigma_x$ －23.6<br>$\sigma_y$ 569.3 | $>0.8\sigma_s$ | FAB－3 | $\sigma_x$ －242.1<br>$\sigma_y$ 224.3 | |
| FAF－2 | $\sigma_x$ 168.1<br>$\sigma_y$ 501.9 | $>0.8\sigma_s$ | LAF－6 | $\sigma_x$ －55.2<br>$\sigma_y$ 435.3 | $>0.5\sigma_s$ | LAB－1 | $\sigma_x$ －185.1<br>$\sigma_y$ －21.4 | |
| FAF－3 | $\sigma_x$ 384.8<br>$\sigma_y$ 394.5 | $>0.5\sigma_s$<br>$>0.5\sigma_s$ | LHF－1 | $\sigma_x$ 9.9<br>$\sigma_y$ 281.3 | $>0.5\sigma_s$ | LAB－2 | $\sigma_x$ 319.5<br>$\sigma_y$ 367.8 | $>0.5\sigma_s$<br>$>0.5\sigma_s$ |
| FAF－4 | $\sigma_x$ －354.7<br>$\sigma_y$ －271.5 | $>0.5\sigma_s$ | LHF－2 | $\sigma_x$ －317.6<br>$\sigma_y$ 91.7 | | LAB－3 | $\sigma_x$ －281.5<br>$\sigma_y$ 98.3 | |
| FAF－5 | $\sigma_x$ －375.4<br>$\sigma_y$ －242.5 | $>0.5\sigma_s$ | LHF－3 | $\sigma_x$ －58.5<br>$\sigma_y$ 217.1 | | FHB－1 | $\sigma_x$ －58.1<br>$\sigma_y$ 222.1 | |
| FAF－6 | $\sigma_x$ －575.4<br>$\sigma_y$ －187.8 | $>0.8\sigma_s$ | FHF－1 | $\sigma_x$ 200.2<br>$\sigma_y$ 455.3 | $>0.5\sigma_s$ | FHB－2 | $\sigma_x$ 144.4<br>$\sigma_y$ 187.4 | |
| LAF－1 | $\sigma_x$ 19.3<br>$\sigma_y$ 183.2 | | FHF－2 | $\sigma_x$ 459.2<br>$\sigma_y$ 570.3 | $>0.5\sigma_s$<br>$>0.8\sigma_s$ | FHB－3 | $\sigma_x$ －103.3<br>$\sigma_y$ 108.5 | |
| LAF－2 | $\sigma_x$ 144.9<br>$\sigma_y$ 392.7 | $>0.5\sigma_s$ | FHF－3 | $\sigma_x$ 391.8<br>$\sigma_y$ 440.6 | $>0.5\sigma_s$<br>$>0.5\sigma_s$ | LHB－1 | $\sigma_x$ －86.7<br>$\sigma_y$ 147.6 | |
| LAF－3 | $\sigma_x$ －425.1<br>$\sigma_y$ 110 | $>0.5\sigma_s$ | FAB－1 | $\sigma_x$ 79.2<br>$\sigma_y$ 317 | $>0.5\sigma_s$ | LHB－2 | $\sigma_x$ －143.1<br>$\sigma_y$ 446.4 | $>0.5\sigma_s$ |
| LAF－4 | $\sigma_x$ －107.5<br>$\sigma_y$ 376.6 | $>0.5\sigma_s$ | FAB－2 | $\sigma_x$ －89<br>$\sigma_y$ 116.7 | | LHB－3 | $\sigma_x$ －145.6<br>$\sigma_y$ －22.4 | |

由表 4 可知，模拟焊接试板焊接残余应力普遍较大，多数测点残余应力分量超过 0.5$\sigma_s$，个别测点残余应力分量超过 0.8$\sigma_s$ 接近屈服应力，焊接残余应力主要表现为拉应力。由于模拟焊接试板采用对称X 形坡口，双面交替焊接，先焊面会受到后焊面累积纵、横向收缩积累的影响，因此先焊面在纵、横两个方向上的残余应力均比后焊面稍大。由此可知，潜艇耐压壳也存在较大的焊接残余应力，是潜艇的一个安全隐患。

### 3.2 模拟试板的爆炸处理

试验中，先在模拟试板正面布药对试板进行爆炸处理，进行焊接残余应力测试（可视为单面爆炸处理），再在模拟试板反面布药进行爆炸处理，再进行焊接残余应力测试（可视为双面爆炸处理）。为了方便准确地评价爆炸处理消除焊接残余应力效果，焊后、单面爆炸处理后以及双面爆炸处理后三次的应力测点分别位于同一区域，且相互间距均为20 mm 左右。

## 4 爆炸处理效果分析

爆炸处理结果如表 5 所示。

表 5 爆炸处理结果

**Table 5 Results of welding residual stress relieving**

| 测点 | 应力分量 σ/MPa | 焊后 | 单面处理 | 双面处理 | 测点 | 应力分量 σ/MPa | 焊后 | 单面处理 | 双面处理 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| FAF－4 | $\sigma_x$ | －354.7 | －115.6 | －161.2 | FAB－1 | $\sigma_x$ | 79.2 | －29.4 | －62.7 |
| | $\sigma_y$ | －271.5 | －18.2 | －85.6 | | $\sigma_y$ | 317 | 162.9 | 87.7 |
| FAF－5 | $\sigma_x$ | －375.4 | －139 | －147.4 | FAB－2 | $\sigma_x$ | －89 | －102.4 | －35.7 |
| | $\sigma_y$ | －242.5 | －102.5 | 188.6 | | $\sigma_y$ | 116.7 | －48.6 | －33.2 |
| FAF－6 | $\sigma_x$ | －575.4 | －148.4 | 23.3 | FAB－3 | $\sigma_x$ | －242.1 | －91.2 | 80.5 |
| | $\sigma_y$ | －187.8 | 295 | 183 | | $\sigma_y$ | 224.3 | 107.8 | 141.6 |
| LAF－4 | $\sigma_x$ | －107.5 | －210.4 | －200.9 | LAB－1 | $\sigma_x$ | －185.1 | 138.4 | 107.7 |
| | $\sigma_y$ | 376.6 | －82.1 | －18.7 | | $\sigma_y$ | －21.4 | 271.8 | 143.9 |
| LAF－5 | $\sigma_x$ | －23.6 | 41 | 96.8 | LAB－2 | $\sigma_x$ | 319.5 | 111.3 | －33.1 |
| | $\sigma_y$ | 569.3 | 301.7 | 265.9 | | $\sigma_y$ | 367.8 | 225.3 | 90.2 |
| LAF－6 | $\sigma_x$ | －55.2 | －166.9 | －251.1 | LAB－3 | $\sigma_x$ | －281.5 | 180.3 | －116.4 |
| | $\sigma_y$ | 435.3 | 278.8 | 265.7 | | $\sigma_y$ | 98.3 | 450.2 | 143.9 |
| LHF－1 | $\sigma_x$ | 9.9 | －209 | 24.5 | FHB－1 | $\sigma_x$ | －58.1 | －216.4 | －167.8 |
| | $\sigma_y$ | 281.3 | －52.4 | 205.5 | | $\sigma_y$ | 222.1 | 83.2 | 154.7 |
| LHF－2 | $\sigma_x$ | －317.6 | －127.5 | －177.9 | FHB－2 | $\sigma_x$ | 144.4 | －116.7 | －34.8 |
| | $\sigma_y$ | 91.7 | －94.3 | －32.9 | | $\sigma_y$ | 187.4 | 36.7 | 67.3 |
| LHF－3 | $\sigma_x$ | －58.5 | －28.8 | －126.7 | FHB－3 | $\sigma_x$ | －103.3 | －58.1 | 28.5 |
| | $\sigma_y$ | 217.1 | －2.2 | 22.7 | | $\sigma_y$ | 108.5 | 113.9 | 63.4 |
| FHF－1 | $\sigma_x$ | 200.2 | －185.7 | －168.1 | LHB－1 | $\sigma_x$ | －86.7 | －170.3 | －30.1 |
| | $\sigma_y$ | 455.3 | －155.3 | 108.1 | | $\sigma_y$ | 147.6 | 154.3 | －21 |
| FHF－2 | $\sigma_x$ | 459.2 | 52 | －164.3 | LHB－2 | $\sigma_x$ | －143.1 | －190.5 | －45.4 |
| | $\sigma_y$ | 570.3 | 147.6 | 36.2 | | $\sigma_y$ | 446.4 | 130.2 | －0.7 |
| FHF－3 | $\sigma_x$ | 391.8 | －78.2 | －156.3 | LHB－3 | $\sigma_x$ | －145.6 | －207.8 | －14.8 |
| | $\sigma_y$ | 440.6 | 33.8 | －46.1 | | $\sigma_y$ | －22.4 | －111.6 | －14.2 |

由表 5 可知，单、双面布药爆炸处理消除焊接残余应力，均能有效调整、消除焊接残余应力、使残余应力分布明显趋于均匀化。单面爆炸处理时，布药面残余应力最大值减小 60％左右，原拉应力位置形成反向压应力，未炸面爆炸处理效果没有布药面明显，残余应力消除规律性不明显；双面爆炸处理时，残余应力减小幅度均在 60％左右。

接触爆炸处理效果优于非接触爆炸处理效果。由于在测量焊后残余应力时，为便于粘贴应变片，需将试板测量区焊缝磨平，从而造成焊缝纵向凹陷，药

条在这些位置上未能与试板紧密接触，属于非接触爆炸处理，作用于焊接试板上的爆炸冲击波小于接触爆炸作用于试板上的冲击波，属于软性爆炸条件，因而爆炸处理效果不如接触爆炸处理效果，残余应力减小幅度在 40％左右(如焊接试板上应力测试点 LAF－1，LAF－2，LAF－3)。

爆炸冲击波的作用效果优于反射拉伸波作用。单面布药爆炸消除焊接残余应力能调整、消除未炸面焊接残余应力，部分测点应力分量值变大，甚至形成反向应力，爆炸处理效果没有布药面明显，残余应力消除规律性也不明显。由于试验中焊接试板板厚达 24 mm，在焊缝熔合线内厚度达 28～32 mm，焊接试板直接放置于沙土上，单面布药爆炸处理爆炸产生的冲击波传播到未炸面时产生反射拉伸波，应力波在构件中反复作用，与构件焊接残余应力共同作用，使金属发生塑性流变，从而调整或减小残余应力，因此未炸面主要靠反射拉伸波作用消除残余应力；而在布药面，金属除受到反射拉伸波作用外，还受强烈爆炸冲击波的作用，因此，爆炸处理效果较明显。

双面爆炸消除焊接残余应力效果优于单面爆炸处理，其中后炸面爆炸处理效果稍优于先炸面。先炸面在经过第二次爆炸冲击波作用后，残余应力得到再次调整，部分测点应力值略微变大，并在原拉应力位置易形成反向应力。这是由于先炸面第二次爆炸冲击波作用过程中，受到界面反射拉伸波作用的结果。后炸面先经过第一次爆炸冲击波作用过程中的界面反射拉伸波作用，残余应力得到一次调整，再经过第二次爆炸冲击波作用，焊接残余应力消除效果明显，二次爆炸后残余应力分布均匀。

根据爆炸消除残余应力原理，对焊接试板进行多次爆炸处理，能使金属材料进一步产生塑性流动，使残余应力进一步减小、分布更均匀，这方面有待进一步深入研究。由于多次爆炸处理，工艺复杂，且处理效果改善程度不明显，工程中对于薄板一次爆炸处理即可，对于厚板可采用双面布药爆炸处理。

## 5　结　　论

(1) 模拟焊接试板焊接残余应力普遍较大，多数测点残余应力分量超过 $0.5\sigma_s$，个别测点残余应力分量超过 $0.8\sigma_s$ 接近屈服应力，由此可知，潜艇耐压壳也存在较大的焊接残余应力，是潜艇的一个安全隐患。

(2) 采用钝化黑索金作为爆炸消除焊接残余应力的炸药，布药方式为沿焊缝条形布药，将钝化黑索金装入内径为 8 mm、外径为 10 mm 的薄壁橡胶管内，再将装好炸药的橡胶管平行布置于焊缝上，采用电雷管于一端多条同时引爆，对于厚板可采用双面布药爆炸处理。

(3) 单、双面布药爆炸消除焊接残余应力，均能有效调整、消除焊接残余应力，使残余应力分布明显趋于均匀化；单面爆炸处理时，布药面残余应力最大值减小 60％左右，原拉应力位置形成反向应力，未炸面爆炸处理效果没有布药面明显，残余应力消除规律性不明显；双面爆炸处理时，残余应力减小幅度均在 60％左右。

(4) 接触爆炸处理效果优于非接触爆炸处理效果；爆炸冲击波的作用效果优于反射拉伸波作用；双面爆炸处理效果优于单面爆炸处理效果，其中后炸面稍优于先炸面。

参考文献：


[1] 侯海量，朱　锡. 爆炸处理消除焊接残余应力[J]. 船海工程，2002，(5)：8～14.

[2] 李荣锋. 爆炸处理消除焊接残余应力对奥氏体不锈钢焊接接头力学性能的影响[J]. 钢铁研究，1994，(1)：43～45.

[3] 王严岩，祝时昌. 爆炸处理对焊接接头应力腐蚀开裂的影响[J]. 焊接，1986，(12)：9～10.

[4] 陈亮山，赵铁民，斯重遥，等. 爆炸冲击波强度对 16MnR 钢焊缝疲劳性能的影响[J]. 焊接学报，1993，14(2)：84～90.

[5] 陈怀宁. 弹性和塑性爆炸冲击波对材料疲劳性能的影响[D]. 沈阳：中国科学院金属研究所，1990.

[6] 龙　昕，陈亮山，陈怀宁. 爆炸消除应力处理对焊接接头中残留裂纹行为的影响[J]. 金属学报，1999，35(5)：531～535.

[7] 斯重遥，陈亮山，董秀中，等. 爆炸法消除再热裂纹研究[J]. 焊接，1986，(12)：1～4.

[8] 侯海量，朱　锡，刘润泉. 盲孔法测量 921A 钢焊接残余应力的应变释放系数研究[J]. 船舶工程，2003，25(1)：57～60.



作者简介：侯海量，男，1977 年 7 月出生，博士研究生，主要从事爆炸加工和复合装甲等方面的研究工作，发表论文 9 篇。

**Email**：hou9611104@163.com