

文章编号: 1001-1455(2005)03-0239-05

爆炸自紧残余应力及对构件疲劳强度的影响^{*}

战人瑞¹, 陶春达¹, 韩林¹, 黄毅民², 韩敦信²

(1. 西南石油学院机电工程学院, 四川南充 637001;

2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: 用贴腻子炸药法和动液压法两种爆轰工艺对不同类型厚壁构件实施了爆炸自增强处理, 并对爆炸处理形成的残余应力进行了实验测定。对内壁有缺口和裂缝的厚壁圆环以及带缺口的超高压圆筒和四通构件进行了爆炸自紧处理并进行了疲劳实验检验, 结果是: 在高周疲劳阶段, 经爆炸处理的构件缺口根部疲劳裂纹萌生寿命可提高5倍, 内压疲劳开裂寿命可提高8~10倍。在低周塑性疲劳阶段构件的疲劳开裂寿命仍可提高1倍左右。由于用贴腻子炸药方法可使构件表面硬度增加从而获得更高的残余压应力, 故其自增强效果优于动液压法。

关键词: 爆炸力学; 自增强; 爆炸自紧; 疲劳强度; 残余应力; 超高压设备; 塑性变形

中图分类号: O389

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引言

高压和超高压构件在国民经济和国防建设的众多领域都有广泛的应用, 例如火炮的炮管、石油化工领域中的容器、管道、阀门及各类柱塞泵的液力端等。这类构件的主要失效形式是疲劳开裂^[1], 提高其静强度和疲劳强度的最佳措施是实施自增强(又称自紧, 超应变)处理。其原理是对服役前的设备施加比工作压力高得多的内压使其产生弹塑性变形, 由于塑性变形不可恢复而弹性变形可以恢复, 卸载后在器壁上形成有利的残余应力分布, 内壁面为较高的压应力而外表面为较低的拉应力。由于构件的危险部位在内表面的应力集中处, 故残余压应力的存在使构件的疲劳寿命大幅提高。

常规的自增强方法是静液压法, 即用超高压泵对设备施加足以产生所需要的弹塑性变形的内压。爆炸自增强是利用炸药的能量使构件获得所要求的弹塑性变形。我们研究了两种方法, 即贴腻子炸药法和动液压法。前一种方法类似于爆炸硬化^[2], 炸药爆炸后的冲击波通过防护层直接作用到构件内表面上, 在微秒级时间内完成。动液压法工艺类似于爆炸成型, 爆轰波通过水介质对构件施加冲击内压, 整个过程在毫秒级时间内完成^[2]。爆炸自增强与爆炸成型和爆炸胀型的不同, 前者属于弹塑性小变形, 依靠弹性变形的恢复和塑性变形的不可恢复而产生残余应力, 故无塑性变形不会产生残余应力, 但塑性变形太大时, 由于弹性约束力不足会使残余应力减小, 所以爆炸时应控制炸药量使构件内径的变形量控制在预定理想范围内。

与静液压法自增强工艺相比, 爆炸法不需要价格昂贵的加载设备系统。此外, 理论分析的结果表明^[3~4], 较高的超应变度才会获得更高的疲劳寿命, 爆炸自增强过程中材料是在高应变速率下完成弹塑性变形, 较之常规加载方式可以获得更大的变形而本身仍完好无损, 因此对构件更加安全。另外, 对于象柱塞泵液力端之类的三通或四通构件, 其危险部位在两孔的相贯线处, 故对这类构件进行爆轰自增强处理时, 不必象静液压法那样对所有的开孔部位进行封堵, 这就大大简化了自增强工艺。

自增强所用的炸药是特制的可塑性很好的安全高能炸药, 加热后可随意加工成任意的形状, 冷却后又有一定的强度。利用炸药的这种特性, 可根据变形量的需要将炸药做成各种复杂形状。

* 收稿日期: 2004-08-12; 修回日期: 2005-01-19

基金项目: 中石油科研项目; 西南石油学院科研基金项目

作者简介: 战人瑞(1946—), 男, 硕士, 教授。

爆炸实验研究所用构件的材质为 43CrNi₂MoVA 钢,取自 140 MPa 压裂泵阀箱的毛坯上,其常规机械性能指标是 $\sigma_b = 1\ 100\ \text{MPa}$, $\sigma_s = 980\ \text{MPa}$, $\delta_5 = 16\%$, $\Psi = 52\%$ 。

自增强就是为了产生有利的残余应力,从而提高构件的静强度和疲劳强度。按照这一思路,我们首先对构件实施爆炸处理,然后对所形成的残余应力进行实验测定,最后对经爆炸处理和未经爆炸处理的构件进行疲劳试验,以检验自增强后疲劳裂纹萌生寿命 N_i 和构件的疲劳开裂寿命 N_f 所产生的变化。

2 爆炸自增强残余应力的实验测定

2.1 厚壁圆筒残余应力

所用厚壁圆筒尺寸为:外径 95 mm,内径 42 mm,长度 210 mm。用内孔贴腻子炸药法对其实施爆炸处理,测得内径残余变形量为 0.5 mm。对爆炸后的圆筒在镗床上用内层逐次剥层法^[1],测得了残余应力沿器壁的分布规律,如图 1 所示,可以看出,这是一条理想的残余应力分布曲线。

2.2 双孔洞构件不同起爆方式时的残余应力

许多柱塞泵的液力端是多缸的(最常见的是三缸体),因此对这类构件实施爆炸处理时有可能存在不同时起爆问题。利用图 2 所示厚度为 130 mm 的双孔洞长方体构件进行了同步、非同步但同药量的爆轰实验,用电阻应变法和 X 射线衍射法测得内孔表面所形成的残余应力为 450~520 MPa,与起爆顺序关系不明显(残余应力的实验测试误差约为 15%)。

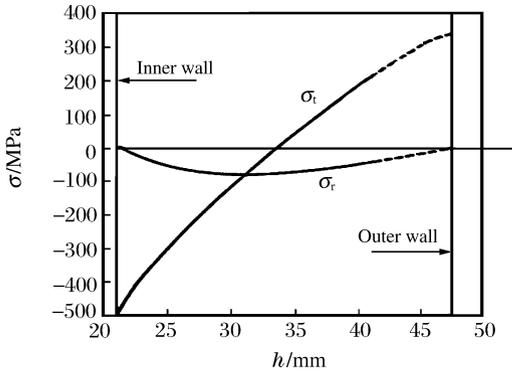


图 1 厚壁筒爆炸自紧残余应力分布曲线

Fig. 1 Residual stress of thick-wall cylinder after explosive autofrettage

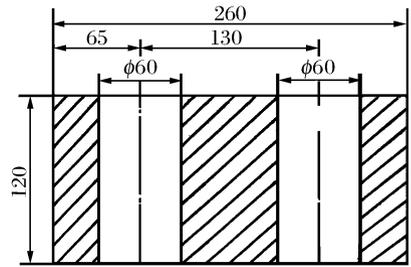


图 2 双孔洞构件

Fig. 2 Double holes component

3 爆炸自增强对疲劳裂纹萌生寿命的影响

采用内壁带 V 型缺口和裂缝两种厚壁圆环试件研究爆炸自紧对疲劳裂纹萌生寿命和扩展寿命的影响。

3.1 内壁带缺口的厚壁圆环疲劳实验

试件的横截面如图 3 所示,厚度为 13 mm,是将外径 137 mm、内径 60 mm、长度 130 mm 的带缺口厚壁圆筒在爆炸处理后再加工成的。将经爆炸和未爆炸处理的圆环在 MTS810 材料试验系统上进行对顶压缩疲劳实验,试验条件是 $F_{\max} = 64\ \text{kN}$, $F_{\min} = 6\ \text{kN}$,频率 $f = 30\ \text{Hz}$ 。用有限元法求得了缺口根部周向理论峰值应力为 1 185 MPa。若构件未自增强处理,则缺口根部已进入屈服但属于小范围屈服,是低周疲劳和高周疲劳的分界处。但对自增

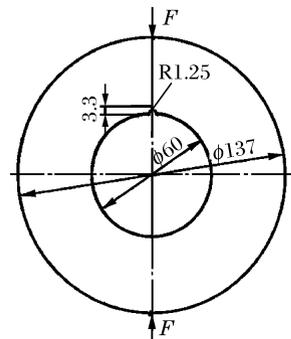


图 3 内壁带 V 型缺口的厚壁圆环

Fig. 3 Thick-walled circle with a V-notch at the inner wall

强构件,残余应力的存在使构件处于弹性状态,属于高周疲劳。疲劳实验的部分数据列入表1。表中, Δd 为内径变形量, N 为循环数, l_c 为裂纹长度。从表中可以看到,经爆炸处理后,疲劳裂纹的萌生扩展寿命得到大幅度提高,约3~5倍,贴腻子炸药法的效果优于动液压法。

3.2 内壁带裂缝的厚壁圆环疲劳实验

该试件的外形与图3完全相同,只是将缺口处改为深3 mm的裂缝,裂缝是用线切割机的0.2 mm钼丝加工的,与前面的构件不同的是先爆炸处理后加工裂缝,以研究内壁层3 mm深处的残余应力对疲劳裂纹萌生的影响。实验条件是 $F_{\max}=60$ kN, $F_{\min}=6$ kN。疲劳裂纹萌生寿命 N_i 是指产生0.5 mm长的宏观裂纹所对应的循环数。实验结果见表2。可以看到,未爆炸处理时,裂缝尖端由于严重的应力集中导致疲劳裂纹迅速萌生,属低周疲劳。但爆炸后的 N_i 提高幅度极大,40倍以上。

4 爆炸自紧对超高压构件疲劳开裂寿命的影响

在波动的超高内压作用下,超高压设备的失效形式主要是疲劳开裂破坏。爆炸自紧残余应力无疑会提高这类构件的疲劳寿命。为此利用内壁带缺口的超高压厚壁筒和厚壁四通对这一问题进行研究。

4.1 内壁带缺口厚壁筒的超高压高周疲劳实验

圆筒长度222 mm,外径100 mm,内径40.5 mm,中部的内径有部分加工成V形缺口,缺口深度 $t=3.0$ mm,根部半径 $r=1.25$ mm,圆筒的两端部分是为进行内压疲劳实验而设计的。疲劳实验在MTS810上利用往复运动的柱塞压缩钠基润滑脂给圆筒施加5~185 MPa超高波动内压,用有限元法求得缺口根部的周向应力 $\sigma_{\max}=1278$ MPa, $\sigma_{\min}=34.6$ MPa,对于未爆轰处理的构件,缺口根部进入小范围屈服,故属于低周疲劳。但对于爆炸处理的构件,残余应力的存在使构件处于弹性

表1 内壁带缺口厚壁圆环爆炸处理前后的疲劳裂纹萌生及扩展寿命

Table 1 Initiation and progress life of a thick-wall cirque with a notch in the inner wall before and after explosive autofrettage

爆炸方式	件号	$\Delta d/\text{mm}$	$N/10^4$	l_c/mm	
未爆炸处理	1~6	0	9.2	5.02	
	1	0.40	50	1.2	
	2	0.80	51	1.8	
	3	0.60	30	1.2	
	贴腻子炸药法	4	0.88	50	2.8
		5	0.86	50	2.6
		6	0.78	50	1.2
		7	0.26	30	3.2
动液压法	8	0.76	30	2.5	
	1	0.66	30	5.5	
	2	0.88	30	4.5	
	3	1.44	22.9	5.0	
	4	0.28	30	2.8	
5	0.72	50	3.5		

表2 内壁含裂缝厚壁圆环爆炸处理前后的疲劳裂纹萌生寿命

Table 2 Initiation life of a thick-wall cirque with a crack in the inner wall before and after explosive autofrettage

爆炸方式	件号	$\Delta d/\text{mm}$	$N_i/10^4$	备注
未爆炸处理	1	0	1.002	$a_i=0.5$ mm
	2	0	1.042	$a_i=0.5$ mm
	3	0	1.101	$a_i=0.5$ mm
贴腻子炸药法	1	0.66	40	无裂纹
	2	0.70	40	无裂纹
	3	0.80	40	无裂纹

表3 爆炸自紧前后超高压厚壁筒的疲劳开裂寿命

Table 3 Progress life of a super-high pressure thick-wall cylinder before and after explosive autofrettage

爆炸方式	件号	$N_i/10^4$	裂纹萌生部位
未爆炸处理	1~6	8.58	缺口根部
贴腻子炸药法	1	79.99	与缺口成 90°
	2	>100	未萌生裂纹
动液压法	1	>50	未萌生裂纹
	2	>50	未萌生裂纹

状态,属高周疲劳。表3列出了实验数据,可见经爆炸处理后疲劳开裂寿命 N_f 可以提高10倍,这里的 N_f 是指疲劳裂纹萌生并扩展到外表面形成泄漏时的载荷循环数。表中的后三件做到一定循环数后未开裂,解剖后仍未发现裂纹萌生。

4.2 相贯线处带缺口的厚壁四通超高压低周疲劳实验

厚壁四通的形状如图4所示,是油田用100 MPa压裂泵阀箱单缸体的比例模型,为了加速疲劳开裂实现低周疲劳,在相贯线处加工V形缺口,缺口深度 $t=2.5$ mm,根部半径 $r=1.5$ mm。缺口根部的理论峰值应力可用三维有限元法求得,无缺口时相贯线处的应力为 $\sigma=6.362p$, p 为内压。缺口所引起的理论应力集中系数^[5]约为 $\alpha_K=1+2\sqrt{t/r}=3.58$,于是缺口根部的理论应力 $\sigma_{\max}=22.77p$ 。实验时的内压波动范围为42.5~127.4 MPa,则缺口根部的理论应力为 $\sigma_{\max}=2900$ MPa, $\sigma_{\min}=967$ MPa,显然,无论是否自增强处理均已产生较大的塑性变形,属于典型的低周疲劳。

疲劳实验的结果见表4。表中的开裂寿命是这样规定的:裂纹由缺口根部萌生并扩展,当扩展长度超过O型密封圈后,液压油大量泄漏导致试验难以进行时的寿命,O形圈距缺口处约为10 mm。由表中可以看到,在低周疲劳阶段爆轰后疲劳寿命仍有一程度提高,但由于较大塑性变形的反复出现会导致残余应力大幅度快速释放,故自紧效果远不及高周疲劳阶段。

由表1、表3和表4中可以看到,在相同超应变度情况下,贴腻子炸药法的效果优于动液压法。这是因为前一种工艺类似于爆炸硬化,爆炸后构件表层组织的硬度会相应提高,从而使材料的屈服极限提高,而屈服极限愈高则残余应力也愈高。图5给出了爆炸处理后材质表层硬度的变化情况。

表4 爆炸自紧前后超高压四通的疲劳开裂寿命

Table 4 Progress life of a super-high pressure thick-wall four-ways before and after explosive autofrettage

爆炸方式	件号	$N_f/10^4$	$\bar{N}_f/10^4$
未爆炸处理	1	9.290	8.987 0
	2	8.684	
贴腻子炸药法	1	19.072	21.147 5
	2	23.223	
动液压法	1	17.547	15.868 5
	2	14.190	

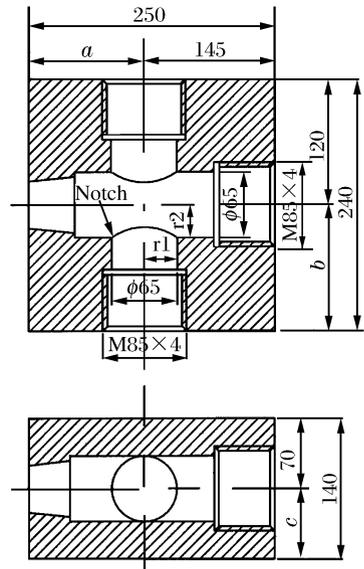


图4 厚壁四通示意图

Fig. 4 Schematic diagram for thick-wall four-ways

由表1、表3和表4中可以看到,在相同超应变度情况下,贴腻子炸药法的效果优于动液压法。这是因为前一种工艺类似于爆炸硬化,爆炸后构件表层组织的硬度会相应提高,从而使材料的屈服极限提高,而屈服极限愈高则残余应力也愈高。图5给出了爆炸处理后材质表层硬度的变化情况。

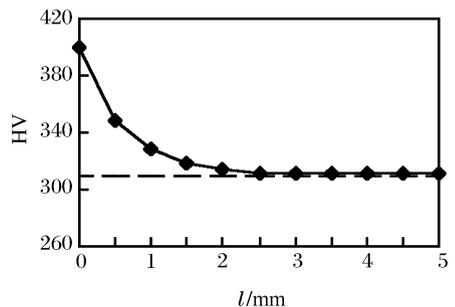


图5 爆炸处理后表层的硬度分布曲线

Fig. 5 Rigidity curve of surface after explosive autofrettage

5 结论

用贴腻子炸药和动液压法均可成功地对高压和超高压构件实施爆轰自增强处理。与静液压法相比,爆炸法不需特殊设备,成本较低。合适的炸药量可使器壁形成极有利的残余应力分布,对于多缸泵体,起爆顺序对内孔壁的残余应力影响不大。

爆轰自紧残余应力可以使构件的疲劳裂纹萌生寿命 N_i 和疲劳开裂寿命 N_f 大幅度的提高。对含裂缝的厚壁圆环, N_i 可提高数十倍,对内壁含缺口圆环, N_f 可提高3~5倍。

爆炸自增强处理可以使超高压构件的疲劳开裂寿命 N_f 得到大幅度提高。若未自紧构件在工作内压作用下产生小塑性变形, 则爆炸自紧残余应力会使 N_f 提高 5~10 倍。若爆炸自紧前后构件在工作内压作用下均属于低周疲劳, 则由于塑性变形的反复会使残余应力迅速的大幅度松弛, 构件的疲劳开裂寿命提高幅度会大幅度下降, 但仍为未处理的 1.8~2.3 倍。

贴腻子炸药工艺会使构件表面的硬度增加, 从而使残余应力增加, 故自增强效果更好, 但该工艺的实施比动液压法要复杂。

参考文献:

- [1] 化工设备设计全书编辑委员会. 超高压容器设计[M]. 上海: 上海科学出版社, 1983: 143.
- [2] 郑哲敏, 扬振声. 爆炸加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [3] 战人瑞, 陶春达. 自增强设备最佳超应变度研究[J]. 石油学报, 1996, 17(4): 128-136.
ZHAN Ren-rui, TAO Chun-da. Study on optimum overstrain extent of autofrettaged thick-walled cylinder[J]. Acta Petrolei Sinical, 1996, 17(4): 128-136.
- [4] 战人瑞, 陶春达. 自增强容器最佳超应变数值分析[J]. 石油化工设备, 2003, 32(6): 23-26.
ZHAN Ren-rui, TAO Chun-da. Investigation in optimum-overstrain of autofrettaged equipment with a notch[J]. Petrol-Chemical Equipment, 1996, 25(3): 7-12.
- [5] Neuber H Z. 应力集中[M]. 赵旭生, 译. 北京: 科学出版社, 1958: 125.

The residual stress and its influence on the fatigue strength induced by explosive autofrettage

ZHAN Ren-rui^{1*}, TAO Chun-da¹, HAN Lin¹,
HUANG Yi-ming², HAN Dun-xin²

(1. South-west Petroleum Institute, Nanchong 637001, Sichuan, China;
2. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: With two different explosion methods, different super-high pressure components were autofrettaged, one is the dynamic liquid explosion, the other is sticking oily explosion. The super-high pressure component includes thick wall circles with a crack or notch on the inner wall, super-high pressure thick wall cylinders and fours-ways were chosen to conduct autofrettage. The residual stress was measured, and then the fatigue test was carried out. The test results show that the fatigue initiation life N_i can be increased by 5 times, the fatigue progress life N_f can be increased by 8~10 times in the high cycle fatigue period. In the low cycle plastic fatigue period, the fatigue progress life N_f can also be increased by 1 time. The sticking oily explosion is better than the dynamic liquid explosion because of the increasing of the rigidity of the surface.

Key words: mechanics of explosion; autofrettage; residual stress; fatigue strength; super high-pressure equipment; plastic deformation

* Corresponding author: ZHAN Ren-rui
Telephone: 0817-2642290