

提高焊接接头疲劳强度的超声波冲击法^{*}

王东坡 霍立兴 张玉凤 荆洪阳 杨新歧
(天津大学)

摘 要 通常采用打磨焊趾的方法来改善焊接接头的疲劳强度,而使用超声波冲击焊趾来提高焊接接头及结构的疲劳强度,是一种国际上刚刚出现的新方法。本文研制成功了一种基于压电陶瓷换能器的新型超声冲击试验装置。实际使用过程表明:其执行机构体积小、重量轻、噪音极小、耗能低、使用灵活方便,易于实施。利用该设备,采用 Q235 钢进行了冲击处理效果的验证性对比疲劳试验。试验结果表明:超声冲击方法对焊接接头疲劳强度的改善效果十分明显,能够提高疲劳寿命 20~30 倍以上,极具实用价值。同时发现,超声冲击处理能够有效地消除焊趾处浅层裂纹、夹渣等焊接缺陷,该作用也是其提高焊接接头疲劳强度的原因之一。

关键词: 疲劳强度 超声波 焊接接头 焊趾

0 序 言

疲劳断裂是金属结构失效的主要形式。尤其是一些受动载严重的重要结构。因此,在焊接结构制造过程中或完成后,采取有效的工艺措施,提高它们的疲劳强度意义重大。

大量研究和实践表明^[1,2],焊接接头的疲劳破坏一般起裂于焊接接头的焊趾部位。如果能改善焊趾处疲劳裂纹的起裂性能,将有效地提高焊接结构的疲劳强度。相关方法很多,如 TIG 熔修法、机械打磨焊趾法、爆炸法、喷丸法、过载法、局部压延法、局部加热法、锤击法。但这些方法有的仍停留在实验室阶段。

目前应用较多的是普通捶击法和 TIG 熔修法和喷丸法。但 TIG 熔修法施工工艺复杂,工艺不当反而会造成副作用。这种方法需要保护气体,因此露天采用气体保护难以保证,应用受到一定限制^[1]。喷丸法是实际应用较多的一种。但这种方法也存在着噪声大、设备庞大、一次投资量大、耗电量大,不利于节能、不能方便地移动作业、野外施工困难。由于丸粒反弹,存在安全防护问题,且丸粒需要回收清理^[3]。捶击法效率低、劳动强度大、可控性差、效果不稳定^[2];噪声也大,故而,如何改善焊接接头疲劳性能仍需大量研究。

用超声波冲击的方法来提高焊接接头及结构疲劳强度的研究,在国际上刚刚开始。该方法提高疲劳强度的机理与捶击和喷丸基本一致。但执行机构轻巧,可控性好,使用灵活方便、噪音极小、效率高、应用时受限少,适用于各种接头、成本低而且节能,是一种理想的焊后改善焊接接头疲劳性能的措施^[3]。因此,本文对该方法进行了详细研究。

1 超声波冲击方法的基本原理

制造普通焊接结构时,一般采用熔化焊接的方法,大多数情况下需要一定的填充金属,故而在接头部位留有余高、凹坑及各种焊接缺陷,造成严重的应力集中。同时,还产生一定数值的焊接残

* 国家自然科学基金资助项目,编号:59575061。

余拉应力。绝大多数情况下,残余拉应力对焊接结构疲劳强度的影响是不利的。大量研究表明^[2],在焊趾部位距离表面 0.5 mm 左右处一般存有熔渣等缺陷,该缺陷较尖锐,相当于疲劳裂纹提前萌生。焊接接头在应力集中、焊趾熔渣缺陷及焊接残余拉应力的联合作用下,导致疲劳强度严重降低。

如果在焊后能够采取一定的有效工艺措施,降低余高造成的应力集中及消除焊趾表面的缺陷;调节焊接残余应力场,消除其消极影响,使之朝有利于疲劳强度提高的方向转变。显然能够大幅度地改善焊接接头及结构的疲劳强度。而超声波冲击方法提高焊接接头与结构疲劳强度的机理就在于此。

提高焊接接头疲劳强度超声波冲击法的试验装置主要由三部分组成:即功率超声波发生器、声学系统与机架。

通过超声波发生器将电网上 50Hz 工频交流电转变成超声频的 20kHz 交流,用以激励声学系统的换能器。声学系统将电能转换成相同频率的机械振动,在自重及外界所施加的一定压力作用下,将这部分超声频的机械振动传递给工件上的焊缝,使以焊趾为中心的一定区域的焊接接头表面产生足够深度的塑变层。从而有效地改善焊缝与母材过渡区(焊趾)的外表形状,使其平滑过渡,降低了焊接接头的应力集中程度,使焊接接头附近一定厚度的金属得以强化,重新调整了焊接残余应力场,并由超声冲击形成较大数值的有利于疲劳强度提高的表面压应力,致使冲击处理后的接头疲劳强度得以提高。

2 超声波冲击处理方法的试验装置

所研制的超声冲击试验装置的实物图见图 1。结构框图见图 2。装置配有自行研制成功的世界上第一台适用于压电超声冲击处理设备的专用超声波电源。

功率超声波电源是激励源,提供冲击处理所需的能量。要求当声学系统固有谐振频率有变化时,功率发生器具有跟踪其频率改变自动调整输出频率与之保持一致的功能。另外还要求能够控制声学系统的输出振幅使之恒定,控制冲击处理质量,保证系统安全,并且能够使声学系统与发生器在工作过程中良好匹配^[3]。

超声冲击试验装置研制的关键在于声学系统的建立^[3]。由于声学系统需要把超声频的电能转换成同样频率的机械振动,所以要有一个能量转换装置即换能器。作者在超声冲击试验装置中采用的是压电陶瓷式换能器。在世界上首次将压电陶瓷换能器引入到超声波冲击装置中。冲击试验装置的研制结果与冲击试验结果表明,该换能器在工作过程中的温升很小,不需要循环水冷却,输



图 1 超声冲击装置实物图

Fig. 1 Ultrasonic collision device

输出功率大,性能稳定,并能满足冲击处理的苛刻要求。

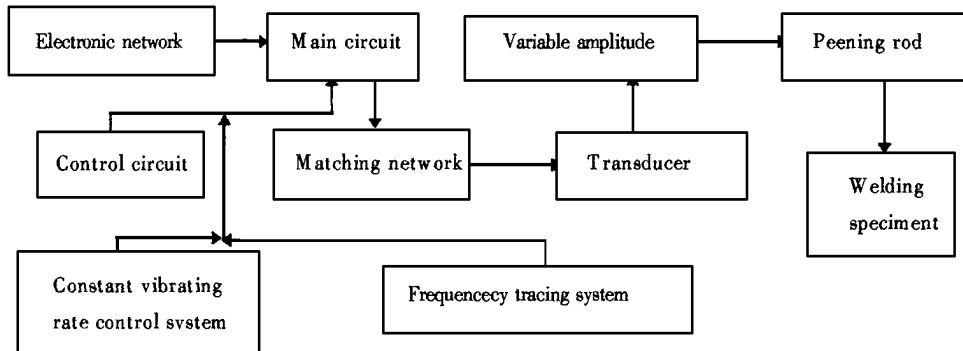


图 2 超声冲击装置的结构框图

Fig. 2 Structure diagram of ultrasonic peening device

超声冲击的处理对象是焊缝金属,如果要使它的表面产生一定厚度的塑性变形层,不仅需要输入很大的冲击能量,而且要求由冲击装置传来的机械振动具有足够大的振幅。根据计算及有关资料表明^[3,5],对于一般的结构钢要求输入到被冲击表面的机械振动幅度达到 $30\ \mu\text{m}$ 左右时,效果较为明显。而超声换能器的输出振幅较小,一般不超过 $10\ \mu\text{m}$ ^[4,6]。因此,需要在输出端接一变幅杆将振幅放大来满足冲击处理的要求。因此,我们设计制做了一二分之一波长、带圆锥形过渡段的阶梯型复合变幅杆。测试结果与实际冲击试验表明,所设计的变幅杆性能满足要求。

为了让超声波能够很好地作用被冲击的焊趾表面,需要接一加工工具头。加工工具头由一组相同形状的冲击针组成,并称之为针状冲击头。而提高焊接接头与结构疲劳强度的超声冲击方法装置的执行部分由声学系统、外壳及握手构成。根据所设计的外形与用途,将其称之为超声波冲击枪。

将各执行机构各部分组装后,经实际冲击试验检验,结果表明,所研制的超声冲击枪具有重量轻(不足 $4\ \text{kg}$),使用灵活方便、效率高、冲击力大等特点,基本满足对焊趾部位进行冲击处理的要求。

3 冲击效果验证性对比试验

3.1 试验方法

为了证实超声冲击处理方法对提高焊接接头疲劳强度的良好效果,本文进行了验证性对比疲劳试验。由于得到某一寿命下的疲劳强度需较多试件,研究其分散性则更加复杂。因此,本文采用在某一典型应力水平下,用疲劳寿命对比的方式,来验证冲击方法对提高焊接接头疲劳强度的效果。

将试件分为三组,每组 3 个试件。第一组试件不采用超声冲击处理;第二组试件在焊缝四道焊趾全部进行超声冲击处理。第三组试件只对焊缝一侧的两道焊趾进行冲击处理。将第一组与第二组试验结果进行对比;考察第三组试件的疲劳断裂位置,进行补充验证。三组试件形状及几何尺寸见图 3。

3.2 超声冲击处理的实施方法

将超声冲击枪对准试件焊趾部位,且基本垂直于焊缝。冲击头的冲击针阵列沿焊缝方向排列。

略施加一定的压力,使其基本在执行机构(冲击枪)自重的条件下,进行冲击处理。处理时,激励电流为 0.5A。

为了获得较好的改善疲劳强度的效果,以 0.5m/min 的处理速度,来回冲击处理 4 次。冲击处理过程中,冲击枪在垂直于焊缝的方向做一定角度的摆动,以便使焊趾部位获得更好的光滑过渡外形。

3.3 试验材料及试件的制做方法

采用平板对接接头形式。试验材料为低碳钢 Q235 板材,力学性能见表 1。试件的制备:采用刨削加工出“X”型坡口,然后利用手工电弧焊采用 J422 焊条进行双面焊接。在焊缝两面都形成明显的余高。焊后用铣床裁成条状试样。

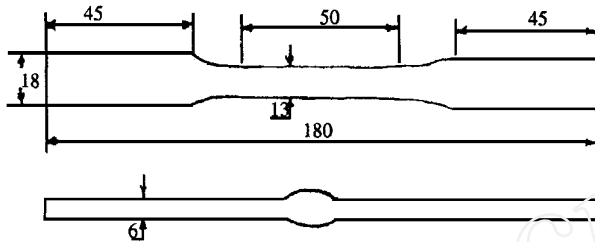


图 3 试件尺寸

Fig. 3 Size of specimen

表 1 Q235 钢的力学性能

Steel	σ_s / MPa	σ_b / MPa	(%)
Q235	237	374.36	27

为了防止和减小在焊接试件时出现的角变形和错位,加工“X”型坡口时,采用在一个整体试件上两面刨削成“V”型而中心留有一定厚度的母材。且两个“V”型坡口一面略大,另一面略小。

为了获得较明显的余高,及进一步防止出现角变形,施焊时,采用小规范进行焊接。先焊小的一面,并且采用两面分层交替焊,翻转两次。焊接结果表明:除个别试件出现轻微角变形外,未发现有错位现象,形成了较明显的余高。

试验是在 10t 高频疲劳试验机上进行的。试验机静载精度为满量程 $\pm 0.2\%$,动载振幅波动度满量程为 $\pm 2\%$,加载频率为 101Hz。施加载荷的情况:载荷类型为拉伸载荷,循环比 $R = 0.05$,最大载荷 $\sigma_{max} = 210$ MPa。

4 试验结果与分析

试验结果见表 2。从对比试验可以看出,在各组试件中,含轻微角变形试件的疲劳寿命相对于同组其它试件并没有明显降低,且三组试件都存在有轻微角变形试件,所以可以认为在本试验中某些试件带有轻微角变形对冲击效果对比结果影响不大。

有关文献[1,2]表明,诸多改善焊接接头疲劳强度工艺方法的效果均随所施加应力水平的提高,疲劳寿命提高的程度不断地降低。一些方法应力水平在达到材料屈服强度时,与未经处理的原始焊态接头寿命基本相同,其改善焊接接头疲劳强度的作用被完全削弱,即较高应力水平时,改善效果一般较差。

本验证试验的所加最大应力为 210 MPa,接近 Q235 钢的屈服强度,即所施加载荷较高。而试验结果表明:未经过超声冲击处理的试件疲劳寿命都远低于 10^6 次且起裂于焊趾处,而两侧都经过超声冲击处理的试件,在相同载荷下,试件疲劳寿命均超过 10^7 ,有的试件未断、有的试件则断于母材,疲劳寿命获得 20~30 倍的提高。

因此足以说明:使用超声冲击的方法提高焊接接头的疲劳寿命,其效果是十分明显。该方法可

以很大程度地提高接头的疲劳强度,能够使焊接接头与母材具有相同的疲劳强度,甚至高于母材。所以,设计合理、接头质量良好且经超声冲击处理过的承受低应力动载的焊接结构,焊接接头将不再是薄弱环节。

在实施冲击处理的过程中,个别试件焊趾部位暴露出小段浅裂纹(未熔合),经冲击处理后,裂纹消失。虽然截面积相对有所减少,但并没有影响该试件的疲劳寿命的数值。说明对位于表面或埋藏不深的小尺寸缺陷,能够通过超声冲击处理的方法予以消除。这种作用对提高焊接接头疲劳寿命与强度有一定的贡献。

一侧两面焊趾受冲击处理试件(试件 7、8、9)的疲劳寿命均高于未受冲击处理试件(试件 4、5、6)。且疲劳裂纹均起裂于未受冲击处理的焊趾处。同一焊缝单面两侧焊趾外形基本相同,可以忽略焊趾外形的变化对试验结果的影响。该组试件的起裂和断裂位置均为未受冲击处理的焊趾部位,又一次证实了超声冲击处理所具有的良好效果。

表 2 试验结果

Table 2 Results

No.	Treatment mode	Cycle ($\times 10^3$)	Fracture position and if surface of weld toe exist cracks
1	Peening on both side of weld toe	10500	Fracturing in base material
2	As also	11000	Not fracturing
3	As also	11050	Not fracturing, but finding shallow crack
4	Not treating	778	Fracturing in weld toe
5	As also	392	As also
6	As also	419	As also
7	Peening on one side of weld toe	784	Fracturing in untreatment weld toe
8	As also	824	Fracturing in untreatment weld toe
9	As also	1366	Fracturing in untreatment weld toe

相对于未处理试件,该组试件的疲劳寿命提高近两倍。这是由于该组试件一侧焊趾受冲击处理后,该侧焊趾疲劳性能得以改善,不再是影响接头疲劳强度的薄弱部位。

大量试验表明:对于原始焊态的接头,疲劳破坏一般起裂于焊缝两侧的焊趾处^[1,2]。具体断于哪一侧,则取决于该侧疲劳强度的高低,理所当然地断于疲劳强度更差的一侧焊趾处。而受冲击处理一侧焊趾,在未处理前可能为强度最低部位,而处理后疲劳性能大幅度改善。断裂位置将转移到焊态疲劳强度更高的另一侧焊趾部位。

因此,接头疲劳寿命有理由获得一定程度的提高。但这并不能充分解释一侧焊趾受冲击处理试件的疲劳寿命均高于未受冲击处理试件这一试验结果。可能是因为试验量较少,得到的结果具有一定的偶然性造成的。

5 结 论

(1) 在超声波冲击试验装置中,声学系统的研制至关重要,声学系统由换能器、变幅杆与针状冲击头组成。通过实际冲击试验,证明所研制声学系统能满足设计要求。

(2) 首次成功地将压电陶瓷换能器引入超声冲击处理装置中,实际冲击处理试验表明,所研制的冲击处理执行机构(冲击枪)体积小,使用灵活。

(3) 对比疲劳试验结果表明:在相同载荷与试验条件下,受到全面超声处理的焊接接头疲劳寿

命高于未受冲击处理接头几十倍。因此说明,使用超声冲击法改善焊接接头与结构的疲劳强度其效果十分明显。该方法实施方便容易,具有很高的实际应用价值。

(4) 超声冲击处理方法能够有效地消除焊趾处浅层微小裂纹、夹杂等焊接缺陷,初步认定该作用能够对焊接接头疲劳强度有较大改善。

(1999 - 02 - 22 收到初稿,1999 - 07 - 02 收到修改稿)

参 考 文 献

- 1 霍立兴. 焊接结构工程强度. 北京:机械工业出版社,1995.
- 2 Gurney T R. Fatigue of welded Structures. Cambridge University Press,1979.
- 3 王东坡. 改善焊接接头疲劳强度超声冲击方法实验装置的研制:[硕士学位论文]. 天津:天津大学,1997.
- 4 陈桂生. 超声换能器设计. 北京:海洋出版社,1984.
- 5 , , ,1992.
- 6 林仲茂. 超声变幅杆的原理和设计. 北京:科学出版社,1987.

Ultrasonic Peening Method to Improve Fatigue Strength of Welded Joint

Wang Dongpo, Huo Lixing, Zhang Yufeng, Jing Hongyang, Yang Xinqi
(Tianjin University)

Abstract As known to all, to improve the fatigue strength of welded joints, it is necessary to polish the weld toe. Recently it has been found that the fatigue life of welded joint can be increased dramatically by ultrasonic peening the weld toe. In this paper, a ultrasonic peening device based on piezoelectric ceramic transducer is firstly developed successfully. This equipment is convenient because of its small size, light weight, low power consumption as well as other merits. In order to study the effectiveness of peening treatment with the equipment, the fatigue tests has been carried out in Q235 steel. The results show that the fatigue life of the peened joint is 20 ~ 30 times as long as the as-welded joints. Therefore, the improvement of the fatigue strength of welded joints by ultrasonic peening is remarkable. It is seen that the weld defects such as shallow cracks and slags at the welded toes can be removed effectively during the ultrasonic peening process. That is a reason for improving the fatigue strength of welded joints with this technique.

Key words fatigue strength, ultrasonic wave, welded joint, weld toe

作者简介 王东坡,男,汉族,1972年出生,现为天津大学材料科学与工程学院博士研究生。研究课题为:改善焊接接头疲劳强度超声波冲击方法的研究。