

# 双周疲劳载荷作用下焊接接头线性累计损伤分析

张 涛, 王东坡, 邓彩艳, 吴良晨

(天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要: 采用自制的超声频分量双周疲劳(CCF)试验装置,对16Mn的焊接接头试件进行低频疲劳载荷与超声频分量(高频)载荷复合加载,采用线性累计损伤理论来估算双周疲劳载荷作用下16Mn对接接头的疲劳寿命,并计算两个疲劳载荷分量各自造成的累计损伤比例。结果表明,使用Miner法则计算双周疲劳试件的疲劳累积损伤时,如果高低周疲劳载荷只是简单按照比例计算,会严重低估两个分量疲劳载荷之间的耦合作用;而低周疲劳载荷按外包络线计算的方法则能够很好的考虑到高低周疲劳载荷间的耦合作用。

关键词: 焊接接头; 双周疲劳; 线性累积

中图分类号: TG404 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2014)03-0061-05

## 0 序 言

焊接结构被广泛应用于国民经济的各个部门,已成为工程结构中最主要的连接方式。然而由于焊接结构断裂造成的事故却频繁发生,80%以上的工程结构失效原因可归咎于疲劳断裂,对于承受循环载荷的焊接结构件,有90%以上的失效源于疲劳破坏<sup>[1,2]</sup>。国内外针对桥梁、水轮机、涡轮发动机等结构存在的双周疲劳(combined cycle fatigue,CCF)中高频振动载荷的影响已经进行了比较充分的研究<sup>[3,4]</sup>,而对于双周载荷下焊接结构疲劳性能的研究却处于起始阶段。目前国内仍然普遍采用常规疲劳试验技术来研究实际工程构件的机械损伤和断裂机理。使用的高周疲劳试验机均基于电磁激振方式,最大工作频率仅局限于100~300 Hz左右,与诸如水轮机叶片这类实际工程焊接结构所承受的高频振动载荷频率相差甚远,不仅不能很好地模拟研究这些工程构件实际工作状态下的疲劳断裂机理,而且完成整个疲劳试验所需时间太长,甚至无法实现。近年来人们越来越倾向于采用超声疲劳试验技术来完成超高周疲劳的研究<sup>[5,6]</sup>。

超声疲劳试验技术是指以超声频(15~22 kHz)的外加信号来激励试件谐振,在试件中生成谐振波,沿试件长度方向建立纵向位移、应力—应变场,从而实现超声频疲劳的加载。这项技术最早在1950年由Mason应用压电晶体和电磁共振技术使振动频率

达到20 kHz,开辟了超声疲劳试验技术在断裂力学研究领域的新阵地<sup>[7,8]</sup>。最近二十年,超声疲劳试验技术在欧美各国得到迅速发展,研究领域也逐渐拓宽,并且已经引起尖端科技特别是航空航天界的高度重视。

使用自制的超声频分量CCF试验装置,对16Mn的焊接接头试件进行低频疲劳载荷与超声频分量(高频)载荷复合加载,采用线性累计损伤理论来估算双周疲劳载荷作用下16Mn对接接头的疲劳寿命,并计算两个疲劳载荷分量各自造成的累计损伤比例。

## 1 试验方法

试件材料选用16Mn,采用CO<sub>2</sub>气体保护焊,焊接工艺参数见表1,焊丝牌号H08Mn2Si。试件采用薄板对接接头形式,中间为等截面段,两端各有一个螺纹孔用于试件与变幅杆的连接,如图1所示。试件两侧依次采用800,1 000和1 600号金相砂纸打磨以消除机械加工的影响。试验在室温下进行,试验过程中使用压缩空气冷却试件。

表1 焊接工艺参数  
Table 1 Welding parameters

焊条直径 <i>d</i> /mm	焊接电流 <i>I</i> /A	电弧电压 <i>U</i> /V	焊接速度 <i>v</i> /(mm·min <sup>-1</sup> )	气体流量 <i>q</i> /(L·min <sup>-1</sup> )
1.2	110	20	200	18

双周疲劳试验根据加载条件的不同分为固定应力比与固定最大应力值两组。固定应力比 $R$ 取

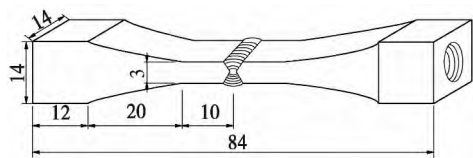


图 1 试件几何形状与尺寸 (mm)

Fig. 1 Geometrical characteristics of specimens

0.5, 用来研究高数值焊接残余拉应力对接头疲劳性能的影响; 固定最大应力值取 420 MPa. 每组试件按高低周载荷振幅比例的不同又分成若干小组, 其中纯低周和纯高周加载方式可以看作高低周振幅比分别为零和无穷大的两种特殊情况. 双周疲劳载荷的加载方式, 即在大幅低频疲劳载荷  $\Delta\sigma_L$  之上叠加一个较小高频疲劳载荷  $\Delta\sigma_H$ , 所施加的高低周载荷均为轴向拉伸载荷, 低周疲劳载荷加载频率约为 75 Hz, 高周疲劳载荷加载频率约为 19 kHz, 波形均为正弦波.

## 2 疲劳累积损伤理论

疲劳损伤是指材料承受高于疲劳极限的交变应力时, 每一循环都使材料产生一定量的损伤, 导致疲劳强度下降的现象. 当材料承受高于疲劳极限的应力时, 每一个循环都使材料产生一定的损伤, 每一个循环所造成的平均损伤为  $1/N$  ( $N$  为疲劳寿命), 这种损伤是可以积累的.  $n$  次恒幅载荷所造成的损伤等于其循环比  $C = n/N$ ; 变幅载荷的损伤  $D$  等于其循环比之和, 即

$$D = \sum_{i=1}^l \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

式中:  $l$  为变幅载荷的应力水平级数;  $n_i$  为第  $i$  级载荷的循环次数;  $N_i$  为第  $i$  级载荷下的疲劳寿命.

当损伤积累达到临界值  $D_f$  时, 即  $D = D_f$ , 会发生疲劳破坏. 其中  $D_f$  为临界损伤和, 简称损伤和.

人们根据对累积损伤方式的不同假设, 提出了不同的疲劳累积损伤理论. 到目前为止, 已提出的疲劳累积损伤理论多达几十种. 主要有线性疲劳累积损伤理论、双线性累积损伤理论、非线性累积损伤理论等.

1924 年 Palmgren 首次提出线性疲劳损伤累积的假设, 是最早进行疲劳累积损伤理论研究的人. 其后的 1945 年, Miner 将 Palmgren 的假设进行理论公式化, 形成了著名的 Palmgren-Miner 线性累积损伤法则, 简称 Miner 法则. Miner 法则由于形式简单, 使用方便, 被广泛应用于工程实践中.

Miner 法则作了如下假设: 试件在载荷作用下吸收的能量达到极限值时会产生疲劳破坏. 从这一假设出发, 如破坏前可吸收的能量极限值为  $W$ , 试样破坏前的总疲劳寿命为  $N$ , 在某一循环数  $n_i$  时试样吸收能量约为  $W_i$ , 则由于试件吸收的能量与其循环次数成正比, 因此有

$$\frac{W_i}{W} = \frac{n_i}{N} \quad (2)$$

这样, 若试样的加载历史由  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_l$  这样的  $l$  个不同的应力水平构成, 各应力水平下的疲劳寿命依次为  $N_1, N_2, \dots, N_l$ , 各应力水平下的循环次数依次为  $n_1, n_2, \dots, n_l$ , 则损伤值为

$$D = \sum_{i=1}^l \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (3)$$

此时试样吸收的能量达到极限值  $W$ , 试样发生疲劳破坏.

## 3 线性累积损伤分析方法

由于双周疲劳载荷中的两个分量载荷是同时作用的, 为了使用 Miner 法则来估算试件的疲劳寿命, 文中假设这两个分量载荷分别单独作用于试件.

用于计算分量载荷下疲劳断裂寿命的 S-N 曲线如图 2 所示. 采用以下两种方法分别计算双周疲劳线性累积损伤值以及高低周疲劳载荷各自造成的累积损伤比例.

(1) 高周疲劳载荷  $\Delta\sigma_H$  和低周疲劳载荷  $\Delta\sigma_L$  的大小按振幅比例分别计算.

(2) 低周疲劳载荷大小按外包络线  $\Delta\sigma_T$  计算, 如图 2a 所示, 在每个低周疲劳载荷的波峰和波谷上分别叠加一个高周疲劳载荷的波峰和波谷, 以  $\Delta\sigma'_L$  来计算试件断裂时低周疲劳载荷造成的累积损伤; 高周疲劳载荷大小  $\Delta\sigma_H$  仍按原比例计算.

图 2b 中的 S-N 曲线有两条, 分别是用应力比  $R = 0.5$  时的纯低周疲劳数据和纯高周疲劳数据作出的, 用来计算应力比  $R = 0.5$  的试验中各分量载荷作用下试件的疲劳寿命. 计算分量载荷的循环周次 (试件断裂) 时, 分量循环周次低于  $5 \times 10^6$  的以纯低周的 S-N 曲线为准, 分量循环周次高于  $5 \times 10^6$  的以纯高周的 S-N 曲线为准.

图 2c 中的 S-N 曲线是根据最大应力值  $\sigma_{\max} = 420$  MPa 时的纯高周疲劳数据得出的, 用来计算  $\sigma_{\max} = 420$  MPa 的试验中各分量载荷作用下试件的疲劳寿命. 采用应力比  $R = 0.5$  与最大应力值  $\sigma_{\max} = 420$  MPa 的试验条件都是为了模拟焊接接头中的高值残余应力的影响, 并比较在这两种条件下焊接

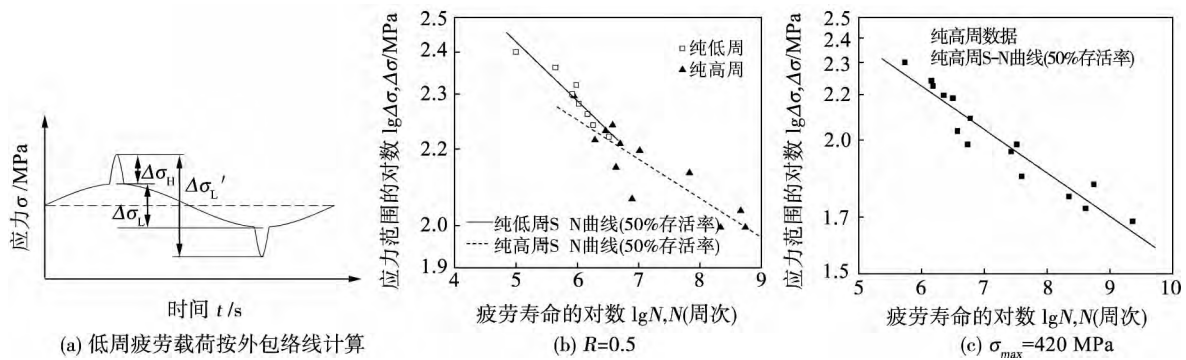


图2 用于计算线性累积损伤的 S-N 曲线

Fig. 2 S-N curves for calculating linear damage

接头双周疲劳行为有何不同之处。

#### 4 试验结果与分析

分别计算应力比  $R=0.5$  和  $\sigma_{\max}=420 \text{ MPa}$  时

的试件疲劳断裂累积损伤值以及高低周疲劳载荷分别造成的累积损伤比例, 计算结果见图3和图4。横坐标为线性累积损伤值, 纵坐标为分量载荷造成的累积损伤比例。HCF 为高周疲劳, LCF 为低周疲劳。

由图3可知, 在应力比  $R=0.5$  的情况下, 对于

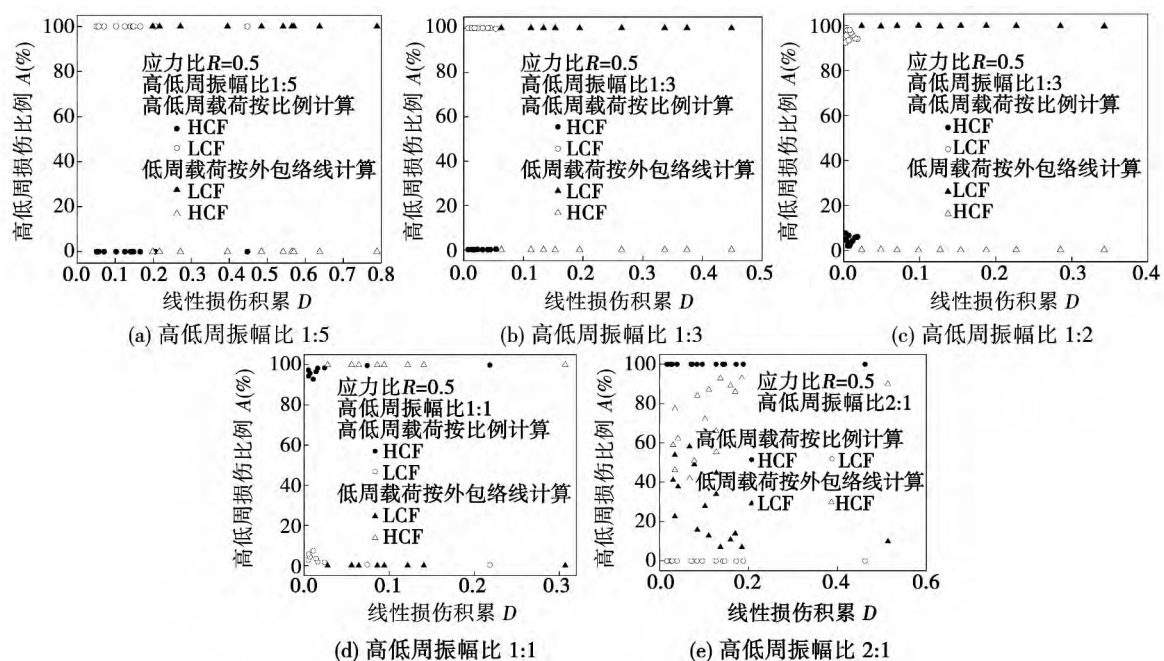
图3 双周疲劳线性累积损伤 ( $R=0.5$ )

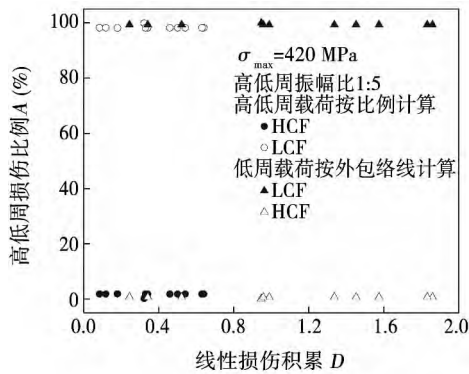
Fig. 3 Linear damage of CCF

同一个疲劳数据, 由高低周疲劳载荷按比例分别计算而得出的线性累积损伤值低于低周疲劳载荷按外包络线  $\Delta\sigma_T$  计算得到的线性累积损伤值, 但二者均远小于1。其中高低周振幅比为1:1和2:1, 这两组结果中高周分量载荷造成的损伤比例占主要部分。然而在高低周振幅比为1:5, 1:3, 1:2时, 高周分量载荷造成的损伤比例都很小。其中振幅比1:5和1:3这两组结果中高周分量载荷造成的损伤比例都

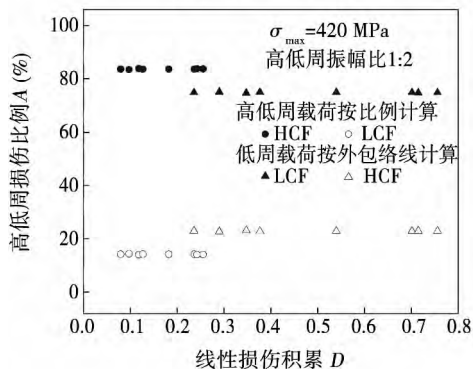
低于1%, 而振幅比为1:2情况下其比例则介于1%~10%。

从图4中可以看出, 在最大应力值  $\sigma_{\max}=420 \text{ MPa}$  的情况下, 对于高低周振幅比相同的数据, 其线性累积损伤值比在应力比  $R=0.5$  的情况下得到的线性累积损伤值大, 且更加趋近于1。两种不同方法得到的线性累积损伤值之间的差距也明显降低了。高低周振幅比为1:5时低周分量载荷造成的损伤占

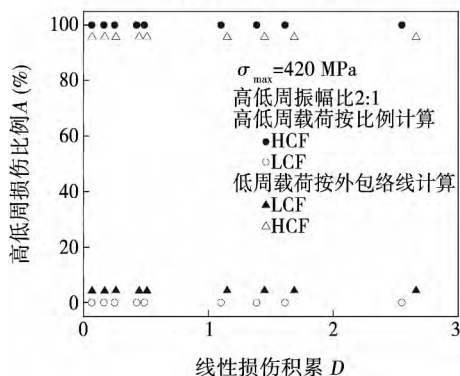
绝对比例;而振幅比为 2:1 时高周分量载荷造成的损伤占绝对比例。在振幅比为 1:2 时,高低周疲劳载荷按比例计算的结果中高周分量载荷造成的损伤比例达到了 80%,而低周疲劳载荷按外包络线计算时这一比例降低到了约 27%。



(a) 高低周振幅比 1:5



(b) 高低周振幅比 1:2



(b) 高低周振幅比 2:1

图 4 双周疲劳线性累积损伤 ( $\sigma_{\max} = 420$  MPa)

Fig. 4 Linear damage of CCF

前面进行的关于累积损伤的计算是建立在两个分量载荷不同时加载的假设基础上的。在这种假设下两个分量载荷的平均载荷是不变的,然而实际应用中高低周疲劳载荷是同时作用在试件上的,而且两个分量的平均载荷并不是一个常数,而是时刻变化的。上述计算结果表明平均载荷的变化对焊接接

头疲劳寿命产生了不利的影响,具体来说,是加速缩短了焊接接头的疲劳寿命。文中将这种因平均载荷变化而对焊接接头疲劳寿命产生的不利影响称为耦合作用。两个分量载荷彼此间都有耦合作用,都会引起额外的累积损伤。

将各组断裂累积损伤的平均值列于表 2。以下结合表 2 来具体分析。

表 2 线性累积损伤平均值

Table 2 Average linear damage

高低周 振幅比	高低周疲劳载荷按比例		低周疲劳载荷按外包络线	
	应力比 $R = 0.5$	最大应力 $\sigma_{\max} = 420$ MPa	应力比 $R = 0.5$	最大应力 $\sigma_{\max} = 420$ MPa
1:5	0.151	0.377	0.581	1.096
1:3	0.028	—	0.231	—
1:2	0.008	0.168	0.157	0.496
1:1	0.038	—	0.106	—
2:1	0.105	0.895	0.135	0.935

从表 2 中可以看出,使用同一种计算方法,最大应力值  $\sigma_{\max} = 420$  MPa 条件下得到的断裂损伤值总是大于应力比  $R = 0.5$  条件下得到的断裂损伤值。这是由于两种情况下用于计算分量载荷理论疲劳寿命  $S-N$  曲线存在差异的原因造成的。在最大应力值  $\sigma_{\max} = 420$  MPa 条件下,通过纯单周  $S-N$  曲线算出的分量疲劳寿命比理论疲劳寿命偏小,得出的累积损伤值就会偏大;而应力比  $R = 0.5$  的情况相反。

高低周疲劳载荷按比例进行计算的方法得到的断裂损伤值远小于 1,而低周疲劳载荷按外包络线计算时得到的断裂损伤值大于前者。这是因为第一种方法没有考虑两个分量载荷之间的耦合作用,所计算出的断裂损伤值只是两个分量载荷单独加载时造成的损伤值之和。第二种方法,如图 2a 所示的低周疲劳载荷按外包络线进行计算的方法在某种程度上考虑了高周分量对低周分量的耦合作用,因而得到的断裂损伤值更准确。

耦合作用的大小与高低周振幅比有密切关系。在应力比  $R = 0.5$  及  $\sigma_{\max} = 420$  MPa 条件下断裂损伤值都有一个显著的趋势,即无论按照何种方法计算,两个分量载荷的振幅接近时得到的试件疲劳断裂累积损伤值更小些,并且如果其中一个分量载荷明显大于另一个分量载荷,试件疲劳断裂累积损伤值则要相应的变大。这是因为两个分量载荷振幅接近时,其中一个分量载荷对另一个的耦合作用会十分强烈,因耦合作用而造成的疲劳损伤在总的累积损伤中所占的比例比较大,忽略耦合作用必然会造成较大的累积损伤计算误差。而当其中一个分量载

荷明显大于另一个时,其造成的累积损伤在总累积损伤中会占更大的比例,所以忽略耦合作用而造成的计算误差会降低。

## 5 结 论

(1) 使用 Miner 法则计算双周疲劳试件的疲劳累积损伤,如果高低周疲劳载荷只是简单按照比例计算,会严重低估两个分量疲劳载荷之间的耦合作用;低周疲劳载荷按外包络线计算的方法则能够很好的考虑到高低周疲劳载荷间的耦合作用。

(2) 分量载荷之间的耦合作用与分量振幅比例有很大关系。两个分量载荷大小相差较多时,耦合作用相对比较小;两个分量载荷大小接近时,两个分量载荷之间的耦合作用比较大,因耦合作用造成的额外疲劳损伤更大。

(3) 使用 Miner 法则来估算承受双周疲劳载荷焊接接头的疲劳寿命时,低周疲劳载荷按外包络线计算的方法是可行的。

## 参考文献:

- [1] 王东坡,霍立兴,张玉凤,等. 提高焊接接头疲劳强度的超声波冲击法[J]. 焊接学报,1999,20(3): 158-163.  
Wang Dongpo, Huo Lixing, Zhang Yufeng, *et al.* Ultrasonic peening method to improve fatigue strength of welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1999, 20(3): 158-163.
- [2] 丁彦闯,兆文忠. 焊接结构抗疲劳优化设计方法及应用[J].

焊接学报,2008,29(6): 29-32.

Ding Yanchuang, Zhao Wenzhong. Anti-fatigue optimization design of welded structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(6): 29-32.

- [3] 吴良晨,王东坡,王胜,等. 超声频分量双周疲劳载荷作用下焊接接头疲劳行为[J]. 焊接学报,2009,30(5): 9-12.  
Wu Liangchen, Wang Dongpo, Wang Sheng, *et al.* Fatigue behavior of welded joints under combined cycle fatigue with ultrasonic component[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(5): 9-12.
- [4] Dungey C, Bowen P. The effect of combined cycle fatigue upon the fatigue performance of Ti-6AL-4V fan blade material[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153: 374-379.
- [5] Zettl B, Mayer H, Stanzl-Tschegg S. Fatigue properties of Al-1Mg-0.6Si foam at low and ultrasonic frequencies[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(7): 565-573.
- [6] Stanzl-Tschegg S. Fatigue crack growth and thresholds at ultrasonic frequencies[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(11): 1456-1464.
- [7] Marines I, Dominguez G, Baudry G, *et al.* Ultrasonic fatigue tests on bearing steel AISI-SAE 52100 at frequency of 20 and 30 kHz[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(9): 1037-1046.
- [8] Ebara Ryuchiro. The present situation and future problems in ultrasonic fatigue testing-mainly reviewed on environmental effects and materials' screening[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(11): 1465-1470.

**作者简介:** 张涛,男,1988年出生,硕士研究生. 主要从事焊接结构疲劳延寿技术和超声冲击处理技术等方面的研究. Email: eric-zhang297@gmail.com

**通讯作者:** 邓彩艳,女,副教授. Email: dengcy@tju.edu.cn

posite using Cu-25Sn-10Ti filler alloy. The interfacial microstructure of joint was analyzed and its formation mechanism was discussed , and also the impact of interfacial microstructure on shear strength of joints at different holding time was studied. Results show that continuous interfacial reaction layer has been formed at both sides of the base materials at brazing temperature 880 °C and holding time for 15 min , while the typical interfacial microstructure was Invar alloy/ $\text{Fe}_2\text{Ti} + \text{Cu}(\text{s}, \text{s}) + (\text{Ni}, \text{Fe}, \text{Cu})_2\text{TiSn}/\text{Cu}(\text{s}, \text{s}) + \text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11} + \text{CuTi}/\text{TiSi} + \text{Ti}_2\text{O}_3/\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$  composite. Holding time increasing would enlarge the thickness of  $\text{TiSi} - \text{Ti}_2\text{O}_3$  layer near  $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$  composite , and  $\text{Fe}_2\text{Ti}$  particles would turn into blocks. The shear strength of joint would also change with increasing of holding time. The shear strength of the joints reaches a maximum of 11.86 MPa when the temperature is 880 °C and the holding time is 15 min.

**Key words:**  $\text{SiO}_{2f}/\text{SiO}_2$  composite; Invar alloy; brazing; interfacial microstructure; shear strength

**In-situ observation of cracking in wollastonite coatings and effect of powder size on fracture** WANG Lubin , WANG Weize , CHEN Yufan , XUAN Fuzhen ( Key Laboratory of Pressure Systems and Safety , Ministry of Education , East China University of Science and Technology , Shanghai 200237 , China) . pp 57 – 60

**Abstract:** Fracture analysis of coatings has an important role on the investigation of coating's failure mechanism , the optimization of the processing parameters and the design. The fracture of plasma sprayed wollastonite coatings was observed in-situ by using a scanning electron microscope ( SEM) during the tapered double cantilever beam ( TDCB) specimens were pulled open. Additionally , the effect of powder size on the coating's fracture toughness is investigated based on the observation of the microstructure , fracture morphology and cracking propagation of coatings. It was found that the cracking path was mainly influenced by the applied stress. The original pores in the coatings , including the large pores , cracks and non-bounded interfaces could guide the cracking somewhat. The fracture toughness of coatings increased and fracture paths were more curved with the decreasing of powder size

**Key words:** coating fracture; in-situ observation; wollastonite; plasma spraying

**Linear cumulative damage analysis of welded joints under combined cycle fatigue** ZHANG Tao , WANG Dongpo , DENG Caiyan , WU Liangchen ( School of Material Science and Engineering , Tianjin University , Tianjin 300072 , China) . pp 61 – 65

**Abstract:** 16Mn steel welded joints are tested to fail under low cycle fatigue , high cycle fatigue and combined cycle fatigue using an apparatus that is capable of providing interactive loading. A linear cumulative damage theory is used to estimate the fatigue life of the butt joints. The proportion of each of the two fatigue load components which cause the cumulative damage is calculated. The research indicate that high cycle fatigue loads and low cycle fatigue loads simply calculated as proportion would seriously underestimate the coupling between the two components

of the fatigue load when we use Miner rule to calculate the fatigue cumulative damage of specimens. However , we can take into account of the coupling between the high and low cycle fatigue loads when we turn to the outsourcing envelope of the low cycle fatigue loads.

**Key words:** welded joints; combined cycle fatigue; linear cumulative damage

**Characteristic of temperature distributions in stirring tools during friction stir welding** LI Jingyong , ZHAO Yangyang , KANG Xiaoliang ( Advanced Welding Technology Provincial Key Laboratory , Jiangsu University of Science and Technology , Zhenjiang 212003 , China) . pp 66 – 70

**Abstract:** The temperature distribution in stirring tools was measured by experimental method. It is shown that the characteristic of temperature distribution in stirring tools is much different from that in workpieces. At the beginning stage of friction stir welding , the softening in stirring zone reduces the friction coefficient and the friction heat between the stirring pin and the workpiece , so the temperature in stirring tools stops rising , whereas decreases in the exterior margin of the tool before the shoulder touches the workpiece. At the steady welding stage , equilibrium exists between the heat quantity delivered to and dissipated through the stirring tool , and its temperature keeps little fluctuation. The surface of the high-speed rotating tool has intensive heat exchange with the air around it , so the temperature near its axis is higher than that on the exterior margin. The stirring tools made of metal with lower specific heat capacity and higher coefficient of heat transfer lead to heat within the welding area dissipating faster.

**Key words:** friction stir welding; stirring tool; temperature field

**A novel composite control strategy for plasma cutting power supply based on arc control** SUN Qiang , CHEN Long , CHEN Guitao , WANG Huamin ( Automation & Information Engineering College , Xi'an University of Technology , Xi'an 710048 , China) . pp 71 – 75

**Abstract:** This paper analyzes static characteristics of plasma arc with the derivation of plasma arc mathematical model according to the application of low-frequency( LF) pilot arc technology in the plasma cutting power supply , and integrates with the control requirements in low-frequency( LF) pilot arc , arc transferring and arc energy transferring , and proposes a novel composite control strategy. In order to meet the power's control requirements of rapidity and stability with the load of low-frequency( LF) pilot arc , the inner loop of this strategy builds up voltage loop composite control with feed-forward arc voltage and feedback arc voltage , and the current outer loop controls the energy of plasma arc , forming a control method of feed-forward composite control of double closed-loop. Simulations and experiments were given to verify that the mentioned control strategy not only improved system's stability and robustness , but also had excellent dynamic responsibility. The power had well non-linear resilience , meeting requirements for plasma cutting power supply.

**Key words:** plasma cutting power supply; arc control;