

荷载频率对结构钢及其焊接节点疲劳寿命的影响

童乐为^{1,2}, 袁一鑫¹, 牛立超¹, 郁琦桐¹, 颜阳³

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学浙江学院, 浙江嘉兴 314051; 3. 中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070)

摘要: 钢结构的高周疲劳试验研究采用低频、中频和高频加载, 疲劳寿命是否会有差别或者有怎样的差别一直是试验者希望找到答案的问题。以结构钢及其焊接件为对象, 对低频(30Hz以内)与中高频(100Hz左右)加载的疲劳试验数据(包括作者和其他学者成果)进行分析对比, 研究低频与中高频加载对疲劳寿命的影响, 疲劳试验涉及高强度钢Q460板材及其对焊节点、普钢Q345对焊节点。研究发现, 低频与中高频加载的疲劳寿命有很大的差别, 无论是钢材还是对焊节点, 低频加载比中高频加载的疲劳寿命长或疲劳强度高。对这种现象的机理进行解释。建议对承受低频疲劳荷载的工程钢结构, 其疲劳试验应符合实际采用低频疲劳试验机加载。若采用高于低频的疲劳试验机加载, 则会显著地低估疲劳寿命。

关键词: 高强度钢; 普钢; 低频; 中高频; 疲劳试验

中图分类号: TU502⁺.6

文献标志码: A

Effect of Loading Frequency on Fatigue Life of Structural Steel and Welded Connection

TONG Lewei^{1,2}, YUAN Yixin¹, NIU Lichao¹, YU Qitong¹, YAN Yang³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tongji Zhejiang College, Jiaxing 314051, China; 3. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: Is there any difference or what difference is in fatigue life between high-cycle fatigue tests of steel structures at the loading with low, medium, and high frequencies has always been a question for experimenters to find an answer to. Comparative analysis of fatigue test data (including tests conducted by the authors of the present paper and other scholars) was performed for structural steel as well as weldment at loadings between

low frequency (below 30Hz) and medium-high frequency (around 100Hz). The effects of low and medium-high frequency loadings on fatigue life was investigated. The fatigue tests dealt with high strength steel Q460 and its butt-welded joints, as well as butt-welded joints of normal strength steel Q345. It was found that there was substantial difference in fatigue life between low and medium-high frequency loadings. The former had a longer fatigue life or higher fatigue strength than the latter, whether it was steel or butt-welded joints. The mechanism for this phenomenon was also explained. It is suggested that for engineering steel structures subjected to low frequency fatigue loadings, fatigue tests should be conducted using low frequency fatigue testing machine. It may significantly underestimate fatigue life if a fatigue testing machine with a frequency higher than low frequency is used.

Key words: high strength steel; normal strength steel; low frequency; medium-high frequencies; fatigue tests

钢结构在建筑、桥梁、铁路、公路、水工、海工、港口等各类工程结构中的应用已经非常普遍。在动力荷载、交变荷载的作用下, 钢结构发生累积损伤、裂纹形成、裂纹扩展、最终断裂这一过程的高周疲劳问题, 是工程结构日常服役中常见的破坏形式。为确保钢结构耐久地使用, 研究其高周疲劳问题具有重要的现实意义。应力工作在弹性范围、寿命(应力循环次数)通常在 $1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4$ 以上的疲劳问题称为高周疲劳(简称疲劳)。鉴于钢结构疲劳问题的复杂性, 目前还主要依赖于试验进行研究。

对于结构钢母材及其小尺度焊接件的疲劳试验, 可采用标准试样在疲劳试验机上进行。目前国

收稿日期: 2020-08-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778457); 浙江省嘉兴市公益性研究计划项目(2020AY10030); 中铁上海院集团科研计划(集-20-63)

第一作者: 童乐为(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢结构和组合结构。

E-mail: tonglw@tongji.edu.cn

通信作者: 颜阳(1987—), 男, 工程师, 工学硕士, 主要研究方向为钢结构和组合结构研发与设计。

E-mail: yanyang@sty.sh.cn



论文
拓展
介绍

内外生产的疲劳试验机由于设备工作原理的不同,按照加载频率可分为低频、中频、高频和超高频等疲劳试验机。一般而言,加载频率 $f \leq 30\text{Hz}$ 的称为低频疲劳试验机,采用电液伺服工作原理; $30 < f \leq 100\text{Hz}$ 的称为中频疲劳试验机,采用机电驱动工作原理; $100 < f \leq 300\text{Hz}$ 的称为高频疲劳试验机,采用电磁谐振工作原理; $f > 300\text{Hz}$ 的称为超高频疲劳试验机,采用气动和声学工作原理^[1]。在我国,对服务于工程结构研发、检测的试验室,通常配备的是低频(一般在30Hz以内)或者中高频(一般在100Hz左右,为便于叙述统称中高频)疲劳试验机。由于疲劳试件多、试验时间长和费用高,不少研究者为了节省成本,采用中高频疲劳试验机进行试验。例如,以200万次疲劳寿命的一个试件为例,分别采用低频15Hz和中高频100Hz的疲劳试验机,前者需要37h,后者仅需要5.6h。疲劳试验通常按时间收费,在试件数量多的情况下,采用中高频疲劳试验机就更突出显示试验时间短、花费少的优势。

然而,工程结构服役期间所受到的日常疲劳荷载属于低频范畴,那么采用中高频疲劳试验机进行试验获得的疲劳寿命结果是否会受到中高频加载的影响?如果没有影响,那么采用高于低频的疲劳试验机是值得优先选择的;如果疲劳寿命偏高或偏低,那么就不适合采用高于低频的疲劳试验机?这是长期困扰研究者如何选择疲劳试验机的问题,迫切需要予以研究来回答。

至今为止,国内外有关加载频率对结构钢及其焊接疲劳寿命影响的研究很少,1979年Gurney指出低频范围内的不同加载频率对钢结构的疲劳性能没有什么影响^[2]。2006年Tian等^[3]对比研究了频率10Hz与700Hz对316型加氮低碳不锈钢在空气中以及在水银中的疲劳性能影响,得到低频比超高频的疲劳寿命长的试验结果。2007年张真源^[4]针对高速铁路车辆结构的零件进行了超高频20kHz的Q345钢材的疲劳试验,然后与1995年出版的机械工程材料手册上16Mn钢材的频率30Hz的疲劳试验数据比较,发现30Hz的疲劳寿命比20kHz的疲劳寿命长,最后在结构钢超高周疲劳性能研究中总结了不同晶体形态的金属对于频率效应不同的敏感程度。2014年Nonaka等^[5]研究了加载频率10Hz、400Hz、19.8kHz对火车车轴钢Gr70疲劳强度的影响,结果是频率19.8kHz的疲劳寿命显著高于10Hz、400Hz的疲劳寿命,而频率10Hz与400Hz两者的疲劳寿命差别不大。2017年Pessoa等^[6]针对加载频率1Hz与

50Hz以及100Hz与1000Hz对亚稳态奥氏体不锈钢AISI 304疲劳性能的影响进行对比试验,指出频率低的疲劳寿命都比频率高的疲劳寿命长。

综上所述,可见现有的研究不仅少,而且得出的结论各不相同。为此,本文分别从国产的结构钢母材和焊接节点2个层面开展低频(30Hz以内)与中高频(100Hz左右)加载对疲劳寿命影响的对比研究,研究涉及的钢材有近年来结构工程师希望发展应用的国产Q460高强度钢材及其对焊节点,也有传统的国产Q345普通强度钢材及其对焊节点;有作者自己的试验数据对比,也有文献的试验数据对比,也有作者试验数据与其他学者的试验数据对比,以期对比研究结果尽可能具有宽泛性。

1 结构钢的低频与中高频疲劳试验对比

1.1 Q460C钢材的低频与中高频疲劳试验对比

比较试验针对的是厚度10mm的Q460C高强钢板材,在进行低频与中高频疲劳试验前,先进行了材性测试,依据国标《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法:GB/T 228—2010》^[7],加工了3个标准试样,试样厚度以及表面状况与原钢板实况相同,材性测试数据(平均值)如表1所示。表中, f_y 为屈服强度, f_u 为抗拉强度, δ 为延伸率。

表1 Q460C材性测试数据

Tab. 1 Test data of mechanical performance of Q460C

f_y/MPa	f_u/MPa	屈强比	$\delta/\%$
481	710	0.68	22.2

Q460C钢材的低频与中高频疲劳试验采用同一块钢板切割的试样,试样几何尺寸和加工完全一样,按照国标《金属材料疲劳试验轴向力控制方法:GB/T 3075—2008》^[8]加工成标准试样,如图1所示。

Q460C钢材的低频疲劳试验在同济大学力学试验室的低频疲劳试验机(型号为200KN MTS Landmark 809)上进行,试样数量16个,加载频率15~16Hz。

Q460C钢材的中高频疲劳试验分别在上海英格尔结构检测公司中高频疲劳试验机(型号QBG-100KN-4)和上海材料研究所中高频疲劳试验机(型号Zwick/Roell Vibrophore100)上进行。试样数量前者10个,后者5个,合计15个。2个中高频疲劳试

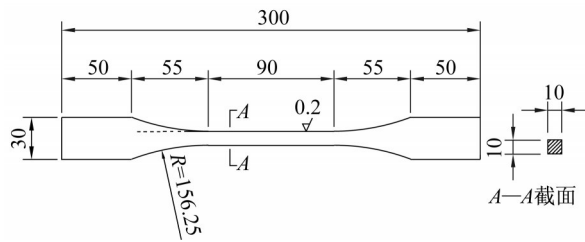


图1 Q460C 钢材低频、中高频疲劳试验的试样(单位: mm)

Fig. 1 Test specimen of Q460C steel at low and medium-high frequency fatigue loadings (unit: mm)

验机的加载频率设定在100Hz,但是实际加载时大致会有±10Hz范围的变化,因为每个试样具体施加的荷载会对频率有一定的影响。

无论是低频还是高频疲劳试验,都是常幅疲劳加载,采用正弦交变波形,均为拉力,取应力比 $\rho = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0.1$,其中 σ_{\min} 、 σ_{\max} 分别为最小应力和最大应力。每个试样施加不同的最大应力 σ_{\max} ,其控制在钢材的弹性范围内,且不超过0.8倍的屈服强度 f_y ,最小应力按照 $\sigma_{\min} = 0.1\sigma_{\max}$ 比例施加。表2和表3分别为Q460C 钢材低频与中高频疲劳施加的应力幅 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 和疲劳断裂寿命 N ,断裂的位置均发生在试样直线段区域,表明试验有效。表中 f 为频率。

表2 Q460C 钢材低频疲劳试验结果

Tab. 2 Fatigue test results of Q460C steel at low frequency loading

试样编号	$\Delta\sigma/\text{MPa}$	f/Hz	$N/\text{万次}$
Q460C-1	396.0	15	48.50
Q460C-2	387.0	15	42.04
Q460C-3	378.0	15	39.87
Q460C-4	369.0	16	69.20
Q460C-5	365.4	16	53.60
Q460C-6	362.7	16	78.50
Q460C-7	361.8	15	52.09
Q460C-8	360.9	16	165.10
Q460C-9	355.5	15	73.30
Q460C-10	352.8	15	64.10
Q460C-11	342.0	15	75.60
Q460C-12	333.0	15	84.30
Q460C-13	331.2	15	62.86
Q460C-14	328.5	15	129.00
Q460C-15	324.0	15	141.20
Q460C-16	319.5	15	78.20

低频与中高频疲劳试验在不同单位和型号的疲劳试验机上进行,加载时由于设备荷载输出有一定差别,因此,施加的应力幅数值有些完全相同、有些稍微有点差别,但是这并不影响低频与中高频疲劳

表3 Q460C 钢材高频疲劳试验结果

Tab. 3 Fatigue test results of Q460C steel at high frequency loading

检测设备	试样编号	$\Delta\sigma/\text{MPa}$	f/Hz	$N/\text{万次}$
高频疲劳机A	Q460C-1	396.0	100	10.6
	Q460C-2	378.0	103	10.0
	Q460C-3	365.4	113	18.9
	Q460C-4	362.7	112	16.9
	Q460C-5	360.9	104	20.0
	Q460C-6	355.5	104	19.8
	Q460C-7	333.0	103	22.2
	Q460C-8	331.2	100	32.8
	Q460C-9	328.5	102	27.2
	Q460C-10	324.0	113	23.6
高频疲劳机B	Q460C-11	355.5	93	20.1
	Q460C-12	333.0	93	17.6
	Q460C-13	331.2	93	30.2
	Q460C-14	328.5	93	22.2
	Q460C-15	324.0	93	20.8

寿命的比较。从表2与表3的比较容易判断低频与中高频的疲劳寿命有很大的差别,前者比后者疲劳寿命长得多。

另外,从表3可见,虽然在不同单位和型号的中高频疲劳机上试验,但是,在一台疲劳机所做的5个试样Q460C-11~Q460C-15与在另一台疲劳机做的5个试样Q460C-6~Q460C-10,一一对应施加的应力幅是一样的,显示出对应的疲劳寿命是非常接近的,这说明虽然采用不同单位、不同型号的高频疲劳机,但是结果是一样的、可靠的。

为了更有说服力地说明问题,采用数理统计方法来回归应力幅-荷载循环次数($S-N$)曲线,以期比较低频与中高频疲劳寿命的差别。图2是根据最小二乘法获得的双对数 $S-N$ 曲线(平均值),水平坐标为疲劳寿命 N ,竖向坐标为应力幅 $\Delta\sigma$ 。

由图2可见,低频加载的 $S-N$ 曲线明显高于中高频加载的 $S-N$ 曲线,这再次说明低频加载比中高频加载具有长的疲劳寿命(即循环次数 N)或者大的疲劳强度(即应力幅 $\Delta\sigma$),且随着荷载循环次数的增加,差别更大。例如,分别以100万次和200万次疲劳寿命为例,由表4可见,低频加载的疲劳强度比高频加载的疲劳强度分别提高了27%和33%。表中 $\Delta\sigma_L$ 、 $\Delta\sigma_H$ 分别为低频疲劳强度、中高频疲劳强度。

1.2 Q460D 钢材的低频与中高频疲劳试验对比

西安理工大学郭宏超等和清华大学施刚等曾经分别进行了低频和中高频加载的Q460D 钢材疲劳试验,引用他们分别在2018年^[9]和2014年^[10]发表的文献数据,来比较低频与中高频Q460D 钢材疲劳寿命的差别。

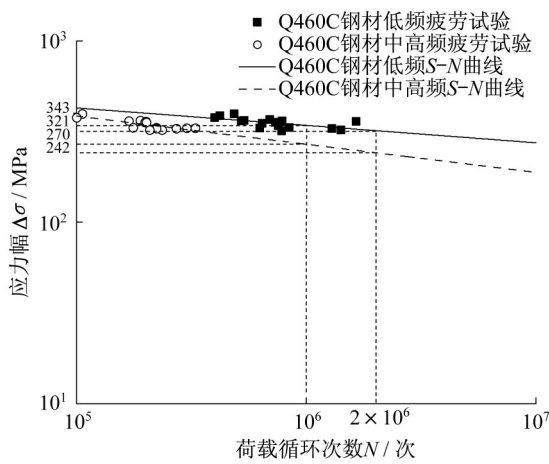


图2 Q460C 钢材低频与中高频加载 S-N 曲线对比

Fig. 2 Comparison of S-N curves of Q460C steel at low and medium-high frequency loadings

表4 Q460C 钢材低频与中高频疲劳强度比较

Tab. 4 Comparison of fatigue strength of low and medium-high frequency loadings

寿命/万次	$\Delta\sigma_L/\text{MPa}$	$\Delta\sigma_H/\text{MPa}$	$\Delta\sigma_L/\Delta\sigma_H$
100	343	270	1.27
200	321	242	1.33

西安理工的疲劳试样为板材厚度 8mm 的 Q460D 钢,标准试样的几何尺寸类似图 1。表 5 为其 Q460D 钢材的材性测试数据,表 6 为 10 个发生疲劳断裂试样的低频 (30Hz) 加载的应力幅、疲劳寿命试验数据,试样编号按照应力幅从大到小排列。

表5 西安理工 Q460D 材性测试数据^[8]

Tab. 5 Test data of mechanical performance of Q460D of Xi'an University of Technology^[8]

f_y/MPa	f_u/MPa	屈强比
505	592	0.85

表6 西安理工 Q460D 钢材低频疲劳试验结果^[8]

Tab. 6 Fatigue test results of Q460D steel at low frequency loading of Xi'an University of Technology^[8]

试样编号	$\Delta\sigma/\text{MPa}$	f/Hz	$N/\text{万次}$
Q460D-1	363.5	30	43.94
Q460D-2	354.4	30	43.13
Q460D-3	345.3	30	124.55
Q460D-4	340.8	30	107.22
Q460D-5	336.4	30	38.32
Q460D-6	329.0	30	78.12
Q460D-7	319.9	30	75.42
Q460D-8	318.1	30	47.64
Q460D-9	313.5	30	125.86
Q460D-10	304.5	30	72.95

清华的疲劳试样为板材厚度 14mm 的 Q460D 钢,标准试样几何尺寸也类似图 1。表 7 为其 Q460D

钢材的材性测试数据,表 8 为 12 个发生疲劳断裂试样的高频 (100~105Hz 范围) 加载的应力幅、疲劳寿命试验数据,试样编号按照应力幅从大到小排列。

表7 清华 Q460D 材性测试数据^[9]

Tab. 7 Test data of mechanical performance of Q460D steel of Tsinghua University^[9]

f_y/MPa	f_u/MPa	屈强比
465	560	0.83

表8 清华 Q460D 钢材中高频疲劳试验结果^[9]

Tab. 8 Fatigue test results of Q460D steel at medium-high frequency loading of Tsinghua University^[9]

试样编号	$\Delta\sigma/\text{MPa}$	f/Hz	$N/\text{万次}$
Q460D-1	331.1	102	8.95
Q460D-2	289.9	103	37.92
Q460D-3	289.3	100	14.29
Q460D-4	282.9	102	48.64
Q460D-5	270.0	102	27.12
Q460D-6	270.0	105	23.52
Q460D-7	266.8	102	24.20
Q460D-8	266.1	100	64.66
Q460D-9	266.0	102	37.23
Q460D-10	265.8	101	6.44
Q460D-11	265.8	101	17.97
Q460D-12	265.8	100	71.09

鉴于西安理工与清华的疲劳试验具体施加的荷载有所不同,难以直接对比,为此,采用前述的数理统计回归 S-N 曲线的方法来比较其低频与中高频疲劳寿命或疲劳强度的差别,如图 3 所示。由图 3 可见,西安理工低频加载的 S-N 曲线也明显高于清华中高频加载的 S-N 曲线,这说明对 Q460D 钢材而言,低频加载仍旧具有比中高频加载长的疲劳寿命或者大的疲劳强度的特点。由表 9 可见,当 100 万次和 200 万次疲劳寿命时,低频加载的疲劳强度比中高频加载的疲劳强度都提高了 23%。

2 焊接节点的低频与中高频疲劳试验对比

2.1 Q460C 对焊节点低频与中高频疲劳试验对比

Q460C 钢板对焊节点试样的加工,是先由 2 块 10mm 厚度的、大的钢板对接焊,然后再切割成一根根所需数量的板条,再按照国标《金属材料疲劳试验轴向力控制方法:GB/T 3075—2008》^[8]加工成如图 4 所示的标准试样。试样由中冶上海钢构有限公司加工,焊接采用 CO₂ 气体保护焊结合埋弧焊,V 形坡

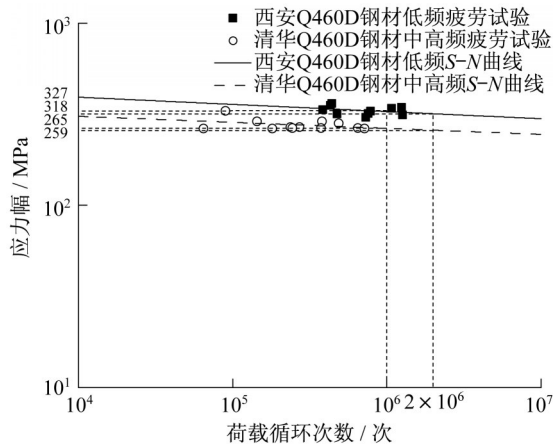


图 3 Q460D 钢材西安理工低频与清华中高频加载 S-N 曲线对比

Fig. 3 Comparison of S-N curves of Q460D steel between Xi'an University of Technology and those of Tsinghua University

表 9 Q460D 钢材西安理工低频与清华中高频疲劳强度比较

Tab. 9 Comparison of fatigue strength of Xi'an University of Technology and that of Tsinghua University

寿命/万次	$\Delta\sigma_L$ /MPa	$\Delta\sigma_H$ /MPa	$\Delta\sigma_L/\Delta\sigma_H$
100	327	265	1.23
200	318	259	1.23

口,焊后将余高磨平。正式焊接前进行了焊接工艺

表 10 Q460C 对焊节点低频与中高频疲劳试验结果对比

Tab. 10 Comparison of fatigue test results of Q460C butt-welded joint at low and medium-high frequency loadings

低频试样编号	中高频试样编号	$\Delta\sigma$ /MPa	疲劳寿命/万次		低频与中高频寿命之比
			低频(15Hz)	中高频(100Hz)	
Q460C-1	Q460C-1	288	200.00 *	13.36	14.97
Q460C-2	Q460C-2	297	200.00 *	43.97	4.55
Q460C-3	Q460C-3	306	33.28	11.93	2.79
Q460C-4	Q460C-4	315	112.00	77.79	1.44

注: *表示应力循环施加到 200 万次仍旧没有疲劳断裂而停止试验。

2.2 Q345 对焊节点低频与中高频疲劳试验对比

进行了普通强度的 Q345B 钢板对焊节点的低频疲劳试验,板厚 10mm,试样几何形状和尺寸类似图 4,由钢结构厂家加工,加工方法与前述的 Q460C 钢板对焊节点的试样相同。由于 Q345 类钢材是常规钢材,其材料力学性能和焊接等事宜不再赘述。Q345B 钢板对焊节点的低频疲劳试验在上海轨道交通检测技术有限公司低频疲劳试验机 MTS LandMark 370.25 上进行,试样数量 7 个,加载频率 20Hz,表 11 为试验结果。

评定,并获得验收通过。

疲劳试验方法与前述的 Q460C 钢材疲劳试验方法一致。低频与高频对焊节点的疲劳试样数量相同,各为 4 个,前者在同济大学力学试验室的低频疲劳试验机上进行,后者在上海材料研究所中高频疲劳试验机上进行。采用低频(15Hz)与中高频(100Hz 左右)疲劳试样所施加的应力幅完全一样的方式以便进行直接比较。疲劳断裂的位置都发生在焊缝或焊接热影响区,疲劳试验施加的应力幅、疲劳寿命列于表 10。

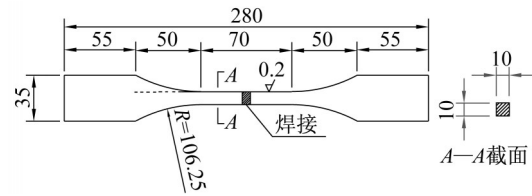


图 4 Q460C 钢板对焊节点低频、中高频疲劳试样(单位: mm)

Fig. 4 Fatigue test specimen of Q460C butt-welded joint at low and medium-high frequency (Unit: mm)

由表 10 可见,针对 Q460C 钢板的对焊节点,低频加载的疲劳寿命仍旧与中高频加载的疲劳寿命有很大差别,前者显著高于后者,两者之比在 1.44 ~ 14.97 之间。

表 11 Q345B 对焊节点低频疲劳试验结果

Tab. 11 Fatigue test results of Q345B butt-weld joint at low frequency loading

试件编号	$\Delta\sigma$ /MPa	f/Hz	N/万次
Q345B-1	288	20	34.46
Q345B-2	279	20	24.30
Q345B-3	270	20	49.56
Q345B-4	261	20	50.21
Q345B-5	257	20	84.78
Q345B-6	252	20	34.04
Q345B-7	250	20	67.18

长安大学张晓君^[11]2013年对Q345qD钢板对焊节点进行了中高频加载的疲劳试验,引用文献[11]的试验数据来与本文同类等级的Q345B钢板对焊节点的低频试验数据进行比较。长安大学的试样与图4类似,也是V形坡口对接焊。中高频加载频率在80~250Hz范围内,表12为试验结果,试样8个,其编号按照施加的应力幅从大到小排列。

表12 长安大学Q345qD对焊节点中高频疲劳试验结果^[10]
Tab.12 Fatigue test results of Q345qD butt-weld joint at medium-high frequency loadings of Chang'an University^[10]

编号	$\Delta\sigma/\text{MPa}$	f/Hz	$N/\text{万次}$
Q345qD-1	252	80~250	23.19
Q345qD-2	222	80~250	50.00
Q345qD-3	222	80~250	36.75
Q345qD-4	222	80~250	133.66
Q345qD-5	192	80~250	66.14
Q345qD-6	182	80~250	138.63
Q345qD-7	182	80~250	29.38
Q345qD-8	162	80~250	262.80

基于低频与中高频疲劳试验施加的应力幅不同,难以进行直接比较,为此,采用前述最小二乘法回归S-N曲线(平均值)的方法来比较。图5为本文低频与长安大学中高频的对焊节点疲劳试验数据回归的S-N曲线(平均值)比较,可见,对Q345类钢板对焊节点而言,低频加载的S-N曲线明显地在中高频加载的S-N曲线之上,反映前者与后者有很大的差别,前者比后者的疲劳寿命长或疲劳强度高。如表13,以100万次和200万次寿命为例,低频的疲劳强度比中高频的疲劳强度提高了29%和32%。

3 加载频率对钢结构疲劳寿命影响的机理解释

前述的研究结果已表明对高强度Q460类、普通强度Q345类等的钢材及其焊接件,低频与中高频加载对它们的疲劳寿命或强度有重要的影响,表现出低频的疲劳寿命显著地比中高频的疲劳寿命长的特性。究其原因,非常复杂,机理可能有以下几个方面。尽管如此,还需要金属材料领域的专家更深入的研究来揭示规律。

(1)加载频率提高会导致钢材自热、温度上升,引起疲劳强度下降、疲劳寿命缩短,以往不锈钢超高频加载的疲劳研究已反映了这一现象^[3]。

(2)以往研究反映不同晶体结构的金属及合金,疲劳性能对于频率的敏感程度不尽相同,体心六方

金属(本文研究的钢材属于此类金属)对于频率较敏感,密排六方金属对频率不敏感,面心立方金属在中高频加载条件下对频率不敏感;同时,Q345、Q460等具有由片状铁素体和片状渗碳体交替排列成带状组织的微观结构,渗碳体为强杂的斜方晶体结构,脆性很大,塑性及冲击韧性几乎为零,没有冲击韧度的渗碳体提早断裂,相当于材料中产生了微孔洞,微孔洞聚合形成微裂纹,裂纹萌生且容易沿着带状珠光体区扩展,这种材料脆性特征在中高频荷载条件下会放大,从而导致疲劳强度的下降^[4]。

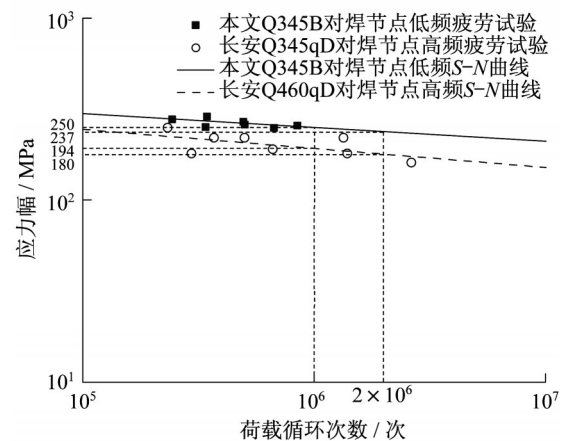


图5 Q345钢板对焊节点本文低频与长安中高频S-N曲线对比

Fig.5 Comparison of S-N curves of Q345 butt-welded joint between the present paper and those of Chang'an University

(3)低频与中高频疲劳试验机的在工作原理上的差别造成的影响。低频疲劳试验机依靠液压作动缸的反复运动施加荷载,而中高频疲劳试验机是通过调节配重质量使整个试验系统产生共振来实现对试件施加动力效应剧烈的荷载,共振时激励输入机械系统的能量大,会导致系统相对非共振系统更易处于疲劳破坏的状态,造成疲劳寿命的降低。

表13 Q345对焊节点本文低频与长安中高频疲劳强度比较
Tab.13 Comparison of fatigue strength of Q345 butt-welded joint between the present paper and that of Chang'an University

寿命/万次	$\Delta\sigma_L/\text{MPa}$	$\Delta\sigma_H/\text{MPa}$	$\Delta\sigma_L/\Delta\sigma_H$
100	250	194	1.29
200	237	180	1.32

4 结论

通过作者成果以及现有文献的低频(30Hz以

内)与中高频(100Hz左右)加载的疲劳试验结果比较,研究了荷载频率对高强度 Q460 钢材及其对焊节点、普通强度 Q345 钢材对焊节点疲劳寿命的影响,得到以下结论:

(1)无论是钢材还是对焊节点,低频加载的疲劳寿命与中高频加载的疲劳寿命有很大的差别,前者显著地比后者的疲劳寿命长或者疲劳强度高。

(2)对 Q460C 钢材,100 万次和 200 万次寿命的低频加载的疲劳强度(应力幅)分别比中高频加载的疲劳强度提高了 27% 和 33%。

(3)对 Q460D 钢材,100 万次和 200 万次寿命的低频加载的疲劳强度比中高频加载的疲劳强度均提高了 23%。

(4)对 Q460D 钢板对焊节点,低频加载的疲劳寿命是中高频加载的疲劳寿命的 1.44 ~ 14.97 倍。

(5)对 Q345 钢板对焊节点,100 万次和 200 万次寿命的低频加载的疲劳强度分别比中高频加载的疲劳强度提高了 29% 和 32%。

(6)对承受低频的疲劳荷载的工程钢结构,当其疲劳性能试验研究选择疲劳试验机时要慎重,应切合实际地采用低频加载的疲劳试验机加载,不应采用大于低频的疲劳试验机加载,否则,会显著地低估钢结构的疲劳寿命或疲劳强度。若要采用中高频加载,应得到低频与中高频加载的测试数据的验证。

作者贡献申明:

童乐为:本课题国家自然科学基金项目负责人,本研究方案制定者、指导试验人员开展研究。

袁一鑫:试验人员之一,试验数据分析人员。

牛立超:试验人员之一。

郁琦桐:试验人员之一。

颜 阳:本课题研究组织者、问题与研究思路提出者。

参考文献:

- [1] 孙东, 接勤, 胡大鹏. 疲劳试验机的发展研究[J]. 科技经济市场, 2017(9):8.
SUN Dong, JIE Meng, HU Dapeng. Research on the development of fatigue testing machine [J]. Science and Technology, Economic and Market, 2017 (9): 8.
- [2] GURNEY T R. Fatigue of welded structures [M]. London: Cambridge University Press, 1979.

- [3] TIAN H, LIAW P K, FIELDEN D E, *et al.* Effects of frequency on fatigue behavior of type 316 low-carbon, nitrogen-added stainless steel in air and mercury for the spallation neutron source [J]. Metallurgical and Materials Transactions A (Physical Metallurgy and, Materials Science), 2006, 37 (1):163.
- [4] 张真源. 结构钢超高周疲劳性能研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007.
ZHANG Zhenyuan. Study on ultra-high cycle fatigue properties of structural steel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [5] NONAKA I, SETOWAKI S, ICHIKAWA Y. Effect of load frequency on high cycle fatigue strength of bullet train axle steel [J]. International Journal of Fatigue, 2014, 60:43.
- [6] PESSOA D F, KIRCHHOFF G, ZIMMERMANN M. Influence of loading frequency and role of surface micro-defects on fatigue behavior of metastable austenitic stainless steel AISI 304[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 103:48.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228—2010 [S]. Beijing: China Standard Press, 2011.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料疲劳试验轴向力控制方法: GB/T 3075—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Axial force control method for fatigue tests of metal materials: GB/T 3075—2008 [S]. Beijing: China Standards Press, 2009.
- [9] 郭宏超, 郝李鹏, 李炎隆, 等. Q460D 高强钢及其焊缝连接疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(8):157.
GUO Hongchao, HAO Lipeng, LI Yanlong, *et al.* Experimental study on fatigue performance of Q460D high-strength steel and its welded joints [J]. Journal of Architectural Structure, 2018, 39 (8):157.
- [10] 施刚, 张兴建. 高强度结构钢材 Q460D 的疲劳性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2014, 44(3):6.
SHI Gang, ZHANG Jianxing. Fatigue performance test study on high strength steel Q460C and its welded connection [J]. Industrial Buildings, 2014, 44(3):6.
- [11] 张晓君. Q345qD 钢焊接接头疲劳强度和疲劳裂纹扩展性能试验研究[D]. 西安:长安大学, 2013.
ZHANG Xiaojun. Experimental study on fatigue strength and fatigue crack growth performance of Q345qD steel welded joint [D]. Xi'an: Changan University, 2013.