

表面强化及功能化

高频机械冲击处理的焊接接头疲劳强度评定

曾文杰, 胡振东, 高玉魁

(同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092)

摘 要: **目的** 研究结构应力法和缺口应力法评估经高频机械冲击处理的高强度钢焊接接头疲劳强度。**方法** 在名义应力法相关的研究基础上, 采用结构应力法和缺口应力法, 分析四种常见焊接接头经高频机械冲击焊后处理的疲劳测试数据, 通过统计分析得出各评估应力系统下合适的特征强度 FAT 值。将统计结果分别与各种焊接接头的疲劳测试数据对比, 分析其 FAT 值的适用性。**结果** 分别在结构应力系统和缺口应力系统下导出了特征疲劳强度推荐 FAT 值。它们采用随材料屈服强度变化的 FAT 等级和 $m=5$ 的 $S-N$ 斜率指数, 且与各种接头的疲劳数据符合较好。**结论** 经高频机械冲击处理后, 钢材的焊接接头疲劳强度对材料屈服强度有明显的统计差异, 需要采用随材料屈服强度变化的 FAT 等级。采用文中分析得出的结果, 可以在不失安全的情况下, 充分利用高强度钢材经高频机械冲击焊后处理的优异特性。

关键词: 高频机械冲击处理; 高强度钢; 焊接接头; 疲劳强度; 名义应力; 结构应力; 缺口应力; $S-N$ 曲线

中图分类号: TG111.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)08-0042-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.08.007

Fatigue Assessment of Welded Joints Treated by High Frequency Mechanical Impact

ZENG Wen-jie, HU Zhen-dong, GAO Yu-kui

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

ABSTRACT: The work aims to study the fatigue assessment of the welded joints made of high strength steel and treated by high frequency mechanical impact (HFMI) with the structural stress approach and notch stress approach. Based on the research for the nominal stress approach, the HFMI treated test data from four types of welded joint were analyzed by the structural stress approach and notch stress approach. Then the characteristic FAT values for the relevant stress system were statistically proposed. The applicability of proposed FAT values was checked by comparing the values with the relative test data series of welded joints. The characteristic FAT values for the structural stress system and notch stress system was proposed. $S-N$ curve of FAT classes and $m=5$ varying with the material strength was adopted. The proposed FAT values were in good agreement with the fatigue data for every type of welded joint. For the welded joints treated by HFMI, their fatigue strengths are statistically varying with the material strength. Thus a characteristic FAT value varying along with the material strength should be taken. The excellent properties of high strength steel treated by high frequency mechanical impact can be used fully by the analysis re-

收稿日期: 2018-05-22; 修订日期: 2018-06-28

Received: 2018-05-22; Revised: 2018-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11372226); 航空科学基金项目 (2014ZE38008); 中央高校基本科研业务费专项资金

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (11372226), Aeronautical Science Foundation of China (2014ZE38008) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities

作者简介: 曾文杰 (1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为疲劳断裂与表面处理。

Biography: ZENG Wen-jie (1988—), Male, Master graduate student, Research focus: fatigue and fracture, surface treatment.

通讯作者: 高玉魁 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为疲劳断裂与表层改性等。

Corresponding author: GAO Yu-kui (1973—), Male, Ph.D., Professor, Research focus: fatigue and fracture, surface layer modification.

sults without reducing the safety.

KEY WORDS: high frequency mechanical impact; high strength steel; welded joints; fatigue strength; nominal stress; structural stress; notch stress; $S-N$ curve

原焊状态下, 焊接结构的疲劳强度远低于未经焊接的母材, 而且不随着母材屈服强度的提高而提高^[1-2]。为了改善这种局面, 工程师通过引入焊后处理的方法来提高焊接结构的疲劳强度。常见的后处理方法有^[3]: 打磨、TIG 熔修、锤击、喷丸和高频超声冲击 (High frequency mechanical impact, HFMI) 等。

采用 HFMI 技术处理焊接结构, 起源于前苏联的科技工作者^[4-5]。该方法采用圆柱体外形的冲头, 高速、高频 ($f > 90 \text{ Hz}$) 地冲击焊接结构, 使得被冲击部位材料发生高度的塑性变形, 引起材料微观几何、焊缝局部外形的改善, 并引入较高的有益残余压应力^[6], 从而获得疲劳强度的显著提升。图 1 给出了用于 HFMI 处理的冲头尺寸和外形^[7], 图 2 给出了处理前后焊趾外形的变化对比^[8]。



图 1 用于 HFMI 处理的冲头外形
Fig.1 Examples of indenter configurations for HFMI treatment

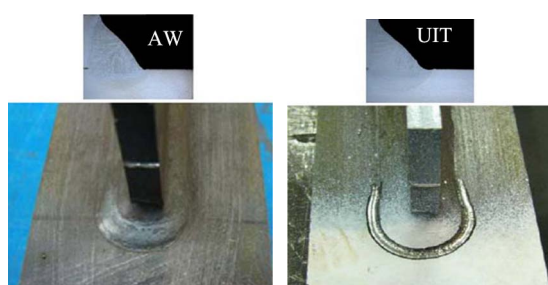


图 2 原焊状态 (AW) 和 HFMI 处理 (UIT) 后的焊趾外形对比

Fig.2 Typical weld toe profile in the as-welded condition and following HFMI treatment

显然, HFMI 这种提高作用具有十分可观的经济效益。研究发现, 对于焊接钢结构, 钢材等级越高, 疲劳强度提升效果越好, 有时甚至接近母材的疲劳强度水平^[6-7]。图 3 为 Yildirim 等^[5]通过实验数据分析给出的焊后处理的强度提升等级, 这为工程中大量使用的高强度钢材提供了一个充分发挥其优异特性的舞台。

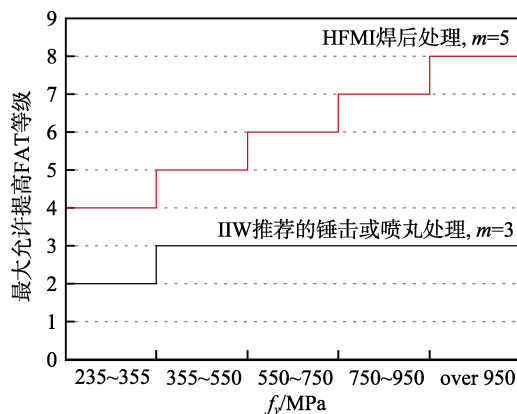


图 3 HFMI 的最大提升疲劳强度等级与屈服强度 f_y 的关系
Fig.3 Relation between the maximum increase in the FAT classes of HFMI and the yield strength of f_y

除了提升效果优异, 相比常规的焊后处理方法 (锤击和喷丸冲击处理), HFMI 处理还具有高效、可靠而又便于操作实施的优点。因而在过去的十多年间, 这种处理方法得到了快速发展, 其技术和设备不断升级。多种多样的冲击处理设备相继研发出来, 其中有超声速冲击 (UIT)、超声速喷丸 (UP)、气动冲击 (PIT)、高频冲击 (HiFiT) 等^[6-9]。

经过焊后处理的高强度钢材焊接结构, 由于局部几何和残余应力状态的改变, 其疲劳破坏机理与未处理的原焊状态有了很大的不同, 有时疲劳裂纹不再出现于焊趾或焊根处^[6,9]。在这种状态下, 已有的疲劳评估方法是否适用是一个值得深入研究的问题。现有的疲劳设计规范对此涉及较少, 或者仅采用比较简单的经验公式给予修正^[10]。经验公式往往过于保守, 使得经过后处理的高强度钢材优异的疲劳性能得不到充分发挥。因此需要引进新的疲劳评估方法, 能够合理地包含这种有益特性^[7]。基于此, 文中以工程中广泛采用的两种疲劳评估局部法 (结构应力法和缺口应力法) 为基础, 结合 Yildirim 的研究结果, 通过对文献中收集的相关测试结果开展疲劳统计分析, 给出了相对应的疲劳强度设计推荐值。

此外, 关于 HFMI 处理焊接接头需要指出的是, 除了钢材, 业界也开展了许多关于其他材料的测试研究, 如铝合金^[11-14]、镁合金^[15-16]和钛合金^[17-18]等。这些研究表明, 通过合理选择处理参数, HFMI 能够适用于这些材料, 同样可以获得较高度度的疲劳强度提升, 其提升机理也相类似。由于相关试验研究不如像钢材那么多, 不易获取足够的接头测试数据, 所以关于不同强度等级材料提升效果的差异还不清楚, 有待将来进一步研究。

1 结构应力法

结构应力,有时也称为几何应力。它考虑了焊缝引起的结构几何变化而导致的应力提升作用,但排除焊缝形状、裂纹、缺口等引起的强烈局部应力集中效应^[19]。换句话说,它只包含了焊缝部位结构宏观几何的影响,而不计及其他局部几何效应。

要理解结构应力的概念,需要将它与缺口应力相联系。如图4所示,焊缝缺口处的应力具有奇异性。利用结构力学原理,可将其分解成膜应力(σ_m)、弯曲应力(σ_b)和非线性应力(σ_{nlp})三部分^[10]。而相应的结构应力则由膜应力和弯曲应力两部分组成,如图5所示。

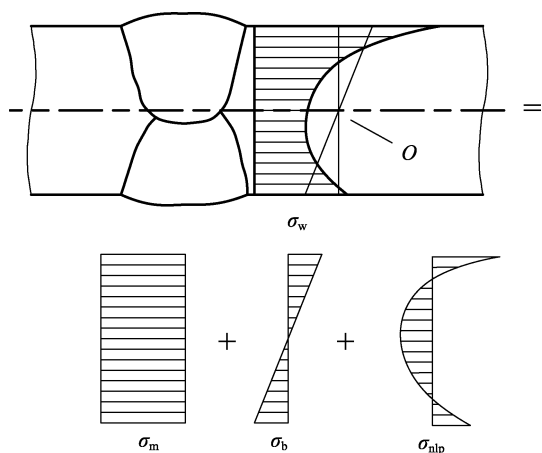


图4 缺口应力的分解^[10]
Fig.4 Decomposition of notch stress

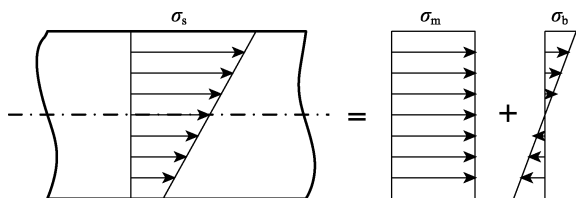


图5 结构应力的组成
Fig.5 Components of structural stress

结构应力与主板中名义应力的关系可写成式(1):

$$\sigma_s = K_s \cdot \sigma_n \quad (1)$$

式中: σ_s 为结构应力, $\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b$; σ_n 为主板的名义应力; K_s 为结构应力集中系数,可以通过基本的结构力学分析得出。

相比名义应力法,结构应力法的主要优点在于其评估参数考虑了焊缝宏观的应力提升作用。另一个优点在于,相比名义应力法,结构应力法评估所需的S-N曲线数目大大减少,只需要少数几条的特征S-N曲线和FAT等级^[10,20]。在原焊情况下,国际焊接学会(IIW)给出了两个结构应力的FAT级别^[10]:非承载型焊缝采用FAT100;承载型焊缝采用FAT90。

2 缺口应力法

为了便于分析焊接接头对疲劳有效的缺口效应,Radaj^[21]把实际焊接接头简化为焊趾和焊根处虚拟缺口半径为 $\rho_f=1\text{ mm}$ 、承受面内荷载的横截面模型,如图6所示。缺口应力与主板中名义应力的关系可写成 $\sigma_w = K_w \cdot \sigma_n$ (σ_w 为缺口应力, σ_n 为主板的名义应力, K_w 为缺口应力集中系数)。由图6所示横截面模型得出,缺口应力具有合并不同结构疲劳强度的特性。对于原焊状态下的焊接接头,IIW^[22]给出了单一的特征疲劳强度FAT225。

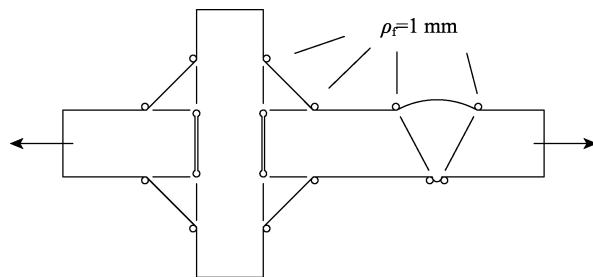


图6 计算有效缺口应力的横截面模型及疲劳有效半径
Fig.6 Cross section model and effective radius of fatigue to calculate the effective notch stress

3 HFMI 焊后处理的疲劳评估

3.1 常见焊接接头 HFMI 处理后的疲劳测试数据

针对不同强度等级的钢材,从相关文献中收集了四种常见焊接接头经过HFMI焊后处理的疲劳测试数据,见表1。这四种接头是对接接头、T形接头、非承载十字接头和纵向角接接头。数据一共23组,总计222个数据点。

关于收集的数据说明如下:

1) 焊接接头的钢材屈服强度范围为235~1100 MPa,其中82个数据为低强度钢($f_y \leq 355\text{ MPa}$),140个数据为高强度钢($f_y > 355\text{ MPa}$)。

2) 不讨论残余应力和应力比的影响,相应地只收集应力比 $R \geq 0$ 的数据。除了两组十字接头分别为 $R=0$ 和 $R=0.25$,其他组数据的 $R=0.1$ 。

3) 疲劳测试的接头板厚 t 都在5~20 mm之间,没有超过25 mm,不必进行厚度修正。

经过HFMI焊后处理的焊接接头,其疲劳裂纹发展规律不同于原焊状态下的情况,这表现为S-N曲线斜率指数 m 的差异。Yildirim^[6]和Weich^[23]等通过大量实验数据拟合分析,得出特征S-N曲线的斜率指数取 $m=5$ 是具有代表性的,这也被IIW最新的疲劳强度设计推荐所接受^[7]。因此在下面的疲劳统计分析中,假定 $m=5$ 。

表 1 HFMI 处理后的焊接接头疲劳试验数据
Tab.1 Fatigue test data for the welded joints treated by HFMI

Type	Data set	f_y /MPa	t /mm	K_s	K_w	R	Loading	Treatment	n
Butt joint	Q235B	235	8	1.201	1.871	0.1	Tension	UP	13
	16Mn	390	8	1.201	1.871	0.1	Tension	UP	6
	SS800	700	8	1.201	1.871	0.1	Tension	UP	10
	S355	355	5	1.191	1.693	0.1	Tension	HFMI	14
	S690	690	5	1.191	1.693	0.1	Tension	HFMI	10
	S960	960	5	1.191	1.693	0.1	Tension	HFMI	7
	1100 QC	1100	6	1.196	1.760	0.1	Tension	UP	14
T-joint	Gal-S355	355	6	1.061	1.782	0.1	Bend	UIT	13
	Gal-S700	700	5	1.052	1.716	0.1	Bend	UIT	12
	Stat-420	420	20	1.083	2.793	0.1	Bend	UIT	8
	S355	355	5	1.052	1.716	0.1	Tension	HFMI	12
	S690	690	5	1.052	1.716	0.1	Tension	HFMI	8
	S960	960	5	1.052	1.716	0.1	Tension	HFMI	11
	Domex700	700	6	1.061	1.782	0.1	Bend	UIT	10
Cruciform joint	Kud-260	260	20	1.381	3.102	0	Tension	UP	9
	Q235B	235	8	1.172	1.792	0.25	Bend	UP	6
	16Mn	390	8	1.365	2.377	0.1	Tension	UP	5
Longitudinal joint	Q235B	235	8	1.493	2.692	0.1	Tension	UP	7
	16Mn	390	8	1.493	2.692	0.1	Tension	UP	6
	SS800	700	8	1.493	2.692	0.1	Tension	UP	8
	S355	355	5	1.489	2.554	0.1	Tension	HFMI	12
	S690	690	5	1.489	2.554	0.1	Tension	HFMI	10
	S960	960	5	1.489	2.554	0.1	Tension	HFMI	11

注：结构应力集中系数 K_s 采用节点力的厚度线性法^[32]计算，缺口应力集中系数 K_w 采用最大主应力假定^[10]和 $\rho_f=1\text{ mm}$ 计算。

3.2 名义应力法评估

图 7 给出了在名义应力下，四种接头疲劳数据的

S-N 图。图中以不同颜色区分钢材强度等级，颜色越深表示钢材强度等级越高。

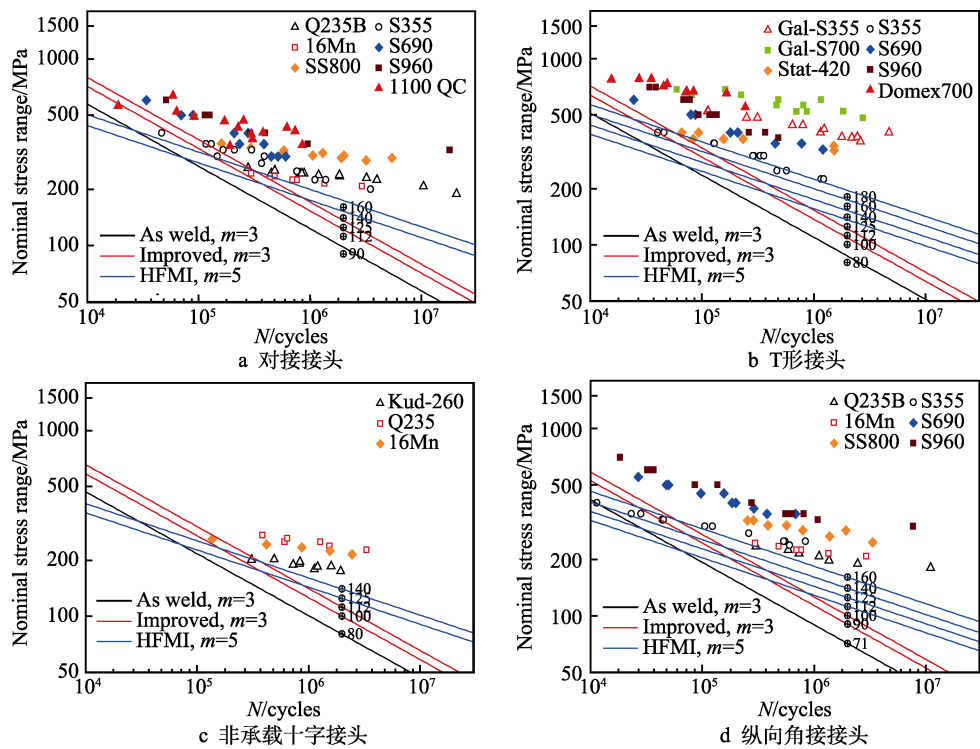


图 7 名义应力下收集的各种焊接接头的疲劳数据

Fig.7 Collected fatigue test data for each joint type in the nominal stress system: a)butt joint; b)T-joint; c)cruciform joint; d)longitudinal joint

从图 7 中可以看出,不同颜色数据点的分布具有明显差异。随着钢材强度等级的提升,相应数据点的分布越靠上。这表明了 HFMI 焊后处理的疲劳提升效果随钢材强度等级升高而有加大的趋势。在名义应力下,假定斜率指数 $m=5$, Yildirim 在大量实验数据分

析基础上,提出了依据钢材屈服等级的疲劳强度提升推荐^[5],见表 2。该提升推荐提出,钢材屈服强度每提高 200 MPa,经 HFMI 焊后处理的疲劳强度提升一个 FAT 等级。作为对比,表 2 中还给出了 IIW 对锤击和喷丸冲击处理的提升强度。

表 2 Yildirim 给出名义应力下 HFMI 的提升疲劳强度等级 (FAT)
Tab.2 FAT classes proposed by Yildirim for the HFMI treated joints in the nominal stress system

	f_y/MPa	Longitudinal joint	Cruciform and T-joint	Butt joint
As weld, $m=3$	All f_y	71	80	90
Hammer and peening, $m=3$	$f_y \leq 355$	90	100	112
	$355 < f_y$	100	112	125
HFMI treated, $m=5$	$235 < f_y \leq 355$	112	125	140
	$355 < f_y \leq 550$	125	140	160
	$550 < f_y \leq 750$	140	160	180
	$750 < f_y \leq 950$	160	180	
	$950 < f_y$	180		

图 7 中也相应地给出了表 2 中的推荐疲劳强度 FAT 等级 $S-N$ 曲线。可以看出,所收集的疲劳测试数据与该推荐强度 $S-N$ 曲线符合较好,全部位于相应的强度等级曲线以上。IIW 对原焊状态、锤击和喷丸冲击处理的强度推荐 $S-N$ 曲线,由于假定 $m=3$,在高周区域 ($N \geq 10^5$) 给出的特征强度太低,不再适合评估 HFMI 焊后处理的接头。采用与屈服强度等级相关的疲劳强度 FAT 等级和 $m=5$ 的斜率指数,可以在不失安全的情况下,充分利用高强度钢材 HFMI 焊后处理的优异特性。

3.3 结构应力法评估

采用结构应力法评估,需要利用结构应力集中系数 K_s ,将名义应力幅转换为结构应力幅。采用焊趾截面线性化的结构应力计算方法^[32],得出各组接头的结构应力集中系数,仍列于表 1。所以有结构应力幅 $\Delta\sigma_s = K_s \cdot \Delta\sigma_n$,由此可以作出四种接头在结构应力系统下的总体 $S-N$ 图,如图 8 所示。

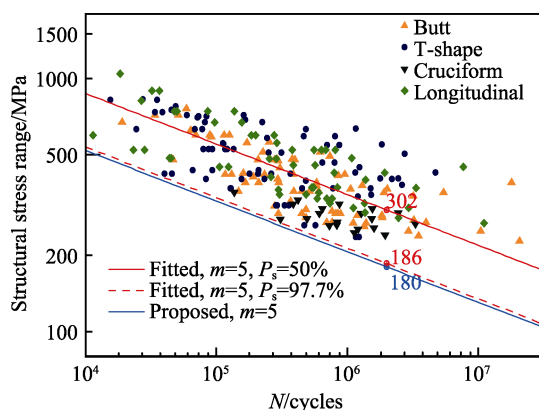


图 8 结构应力下所有焊接接头的疲劳数据集合
Fig.8 Collected fatigue data for all welded joints in the structural stress system

根据结构应力系统下的总体 $S-N$ 图,采用文献[6]所述的统计分析方法,给定 $m=5$,得到具有 $P_s=97.7\%$ 安全概率的特征 $S-N$ 强度曲线为 FAT186,如图 8 所示。为了 FAT 等级相一致,取整为 FAT180,这就可以作为结构应力法评估 HFMI 处理接头的基准 FAT 值。根据表 2 中 f_y 提高 200 MPa,特征疲劳强度提升一个 FAT 等级的规律,可以将此 FAT180 作为 $355 < f_y \leq 550$ 等级接头的特征强度。相邻的 FAT160、FAT200 和 FAT225,则分别作为其他 f_y 等级的特征强度,见表 3。与表 2 类似,表 3 中也给出了原焊状态和锤击喷丸冲击处理提高的特征疲劳 FAT 值作为对比。

表 3 结构应力下各种处理状态焊接接头的特征强度 FAT
Tab.3 Characteristic FAT classes for the welded joints under different treating status in the structural stress system

	f_y/MPa	Load-carrying	Non-load-carrying
As weld, $m=3$	All f_y	90	100
Hammer and peening, $m=3$	$f_y \leq 355$	112	125
	$355 < f_y$	125	140
HFMI treated, $m=5$	$f_y \leq 355$		160
	$355 < f_y \leq 550$		180
	$550 < f_y \leq 750$		200
	$750 < f_y \leq 950$		225

由此,可以得出四种接头在该结构应力系统下各自的 $S-N$ 图,如图 9 所示。从图 9 中可以得出以下结论:

- 1) 四种接头各自的疲劳数据分布与给出的结构应力推荐强度 $S-N$ 曲线符合较好,不同强度等级的数据全部位于相应的强度等级曲线以上。
- 2) 这里给出的特征疲劳强度,虽然没有像原焊

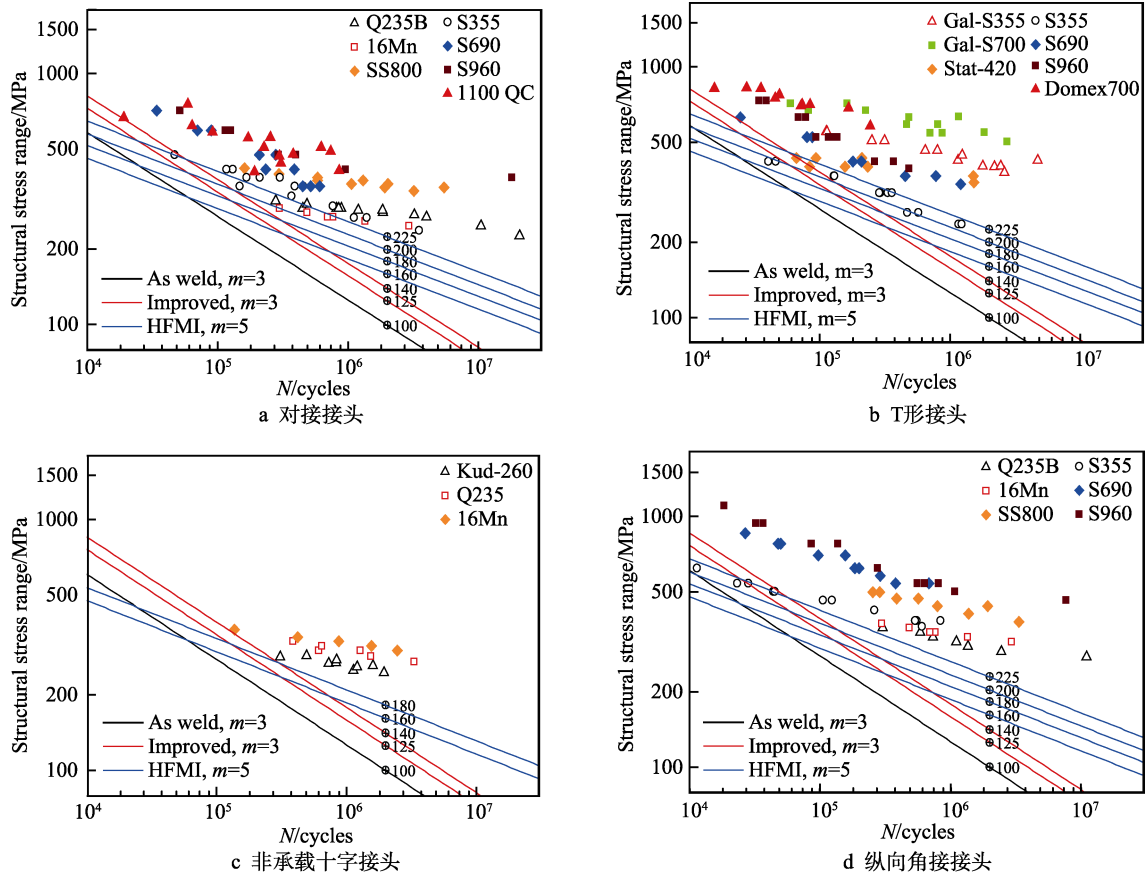


图 9 结构应力下各种接头的疲劳数据

Fig.9 Collected fatigue data for each joint type in the structural stress system:
a)butt joint; b)T-joint; c)cruciform joint; d)longitudinal joint

状态下区分承载和非承载的情况,但从承载的对接接头的图可以看出,统一地采用与非承载接头一样的 FAT 值,并没有丢失特征强度曲线的安全度。

3) 类似名义应力下,结构应力下 IIW 对原焊状态、锤击和喷丸冲击处理的强度推荐曲线,由于假定 $m=3$,在高周区域 ($N \geq 10^5$) 给出的特征强度曲线太低,不适合评估 HFMI 焊后处理的接头。

4) 在结构应力下,采用与屈服强度等级相关的疲劳强度 FAT 等级和 $m=5$ 的斜率指数,可以在不失安全的情况下,充分利用高强度钢材 HFMI 焊后处理的优异特性。

3.4 缺口应力法评估

类似结构应力法评估的程序,首先利用缺口应力集中系数 K_w ,将名义应力幅转换为缺口应力幅。采用 $\rho_f=1\text{ mm}$ 缺口圆的计算方法和最大主应力假设^[10],得出的各组接头焊趾的缺口应力集中系数 K_w 列于表 1。对应缺口应力幅为: $\Delta\sigma_w=K_w \cdot \Delta\sigma_n$ 。然后作出四种接头在结构应力系统下的总体 S-N 图,如图 10 所示。

根据缺口应力系统下的总体 S-N 图,同样采用文献[6]的统计分析方法,给定 $m=5$,得到具有 $P_s=97.7\%$ 安全概率的特征 S-N 强度曲线为 FAT322,如图 10 所示。

为了 FAT 等级相一致,取整为 FAT320,作为缺口应力法评估 HFMI 处理接头的基准 FAT 值。根据表 2 中“ f_y 提高 200 Mpa,特征疲劳强度提升一个 FAT 等级”的规律,将 FAT320 作为 $235 < f_y \leq 355$ 等级接头的特征强度。相邻的 FAT360、FAT400 和 FAT450,则分别作为其他 f_y 等级的特征强度,见表 4。与表 2 类似,表 4 中还给出了 IIW 在原焊状态下的疲劳特征 FAT 值作为对比。

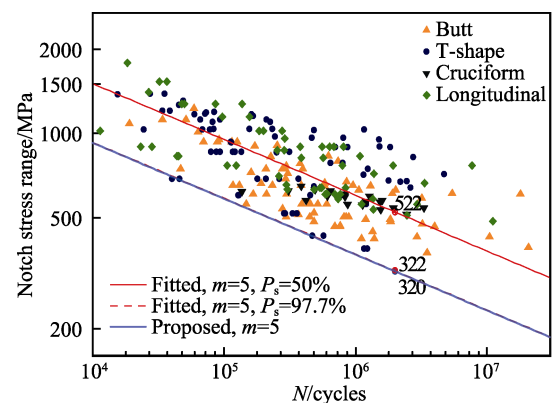
图 10 缺口应力下所有接头的疲劳数据集合
Fig.10 Collected fatigue data for all welded joints
in the notch stress system

表 4 缺口应力下各种处理状态下焊接接头的特征强度 FAT

Tab.4 Characteristic FAT classes for the welded joints under different treating status in the notch stress system

	f_y /MPa	The FAT classes for the notch stress system
As weld, $m=3$	All f_y	225
	$235 < f_y \leq 355$	320
HFMI treated, $m=5$	$355 < f_y \leq 550$	360
	$550 < f_y \leq 750$	400
	$750 < f_y \leq 950$	450

由此,可以得出四种接头在该缺口应力系统下各自的 $S-N$ 图,如图 11 所示。从图 11 中可以得出以下结论:

1) 四种接头各自的疲劳数据分布与统计给出的推荐强度曲线符合较好,不同强度等级的数据全部位于相应的强度曲线以上。

2) 类似名义应力下,缺口应力下 IIW 对原焊状态假定 $m=3$,在高周区域 ($N \geq 10^5$) 给出的特征强度曲线太低,不能充分评估 HFMI 焊后处理的接头。

3) 在缺口应力下,采用与屈服强度相关的疲劳强度 FAT 等级和 $m=5$ 的斜率指数,可以在不失安全的情况下,充分利用高强度钢材 HFMI 焊后处理的优异特性。

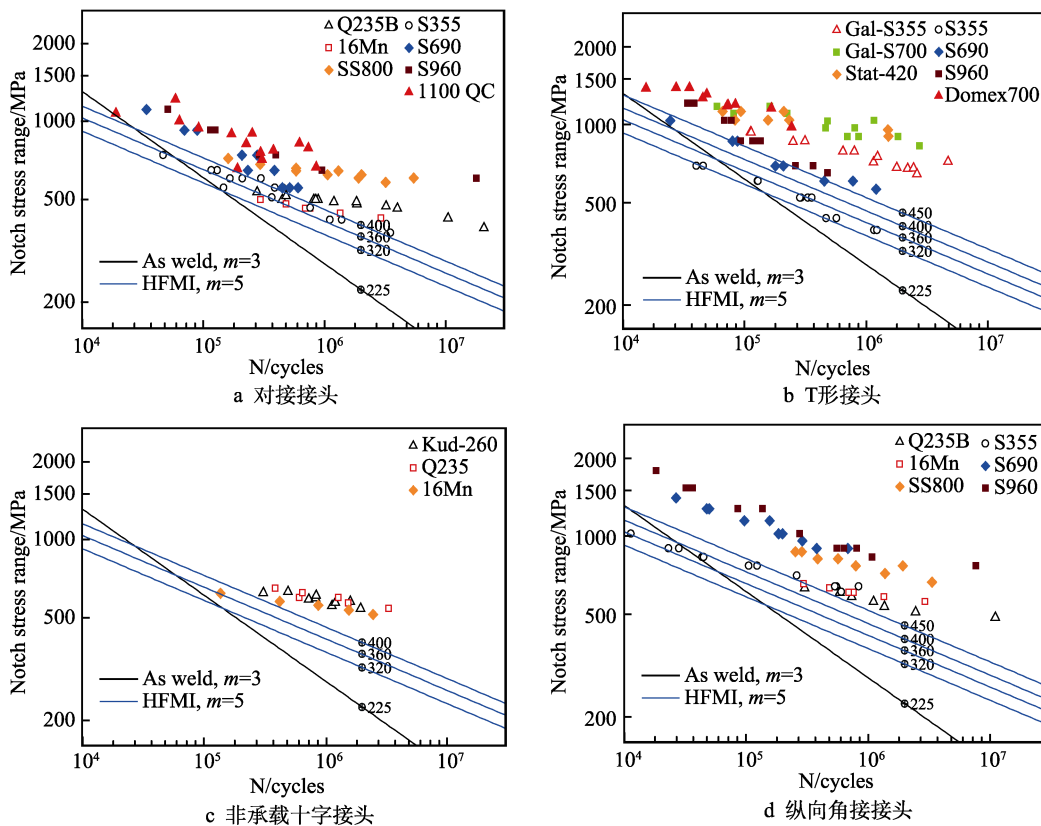


图 11 缺口应力下各种焊接接头的疲劳数据

Fig.11 Collected fatigue data for each joint type in the notch stress system: a) butt joint; b) T-joint; c) cruciform joint; d) longitudinal joint

3.5 HFMI 焊后处理疲劳评估推荐

根据分析结果,可以给出 HFMI 处理后的焊接接头在结构应力法和缺口应力法下的特征强度 FAT,见

表 5。特征强度曲线的斜率指数 $m=5$ 。另外,所收集的实验数据在三种应力系统下的统计均值和分散指标,见表 6。

表 5 统计分析给出的结构应力和缺口应力下的特征强度 FAT ($m=5$)

Tab.5 Characteristic FAT classes ($m=5$) proposed by the statistical analysis for the structural stress system and the notch stress system

Yield strength f_y /MPa	Structural stress system	Notch stress system
$f_y \leq 355$	160	320
$355 < f_y \leq 550$	180	360
$550 < f_y \leq 750$	200	400
$750 < f_y \leq 950$	225	450

表 6 各种应力系统下的统计结果
Tab.6 Statistical results for each stress system

Results	Nominal stress system	Structural stress system	Notch stress system
$\Delta\sigma_{50\%}/\text{MPa}$	248	302	522
$\Delta\sigma_{97.7\%}/\text{MPa}$	142	186	322
SD of lg C	0.606	0.530	0.526
$1/T_\sigma$	2.04	1.87	1.86
$1/T_N$	35.7	22.8	22.4

4 结论

1) 经过 HFMI 焊后处理, 不同强度等级钢材的焊接接头疲劳强度有明显统计差异, 随着钢材的屈服强度增加而增加。

2) 根据 Yildirim 在名义应力法的研究基础上, 结合结构应力法和缺口应力法的疲劳评估方法, 经过统计分析, 给出了在相应应力系统下的特征疲劳强度推荐。四种接头各自的数据都与之符合较好。

3) 采用与屈服强度等级相关的疲劳强度 FAT 等级和 $m=5$ 的斜率指数, 可以在不失安全的情况下, 充分利用高强度钢材 HFMI 焊后处理的优异特性。

4) 根据表 6 的统计分散带结果, 相比名义应力系统, 结构应力系统和缺口应力系统缩小了疲劳数据的分散度。但是 HFMI 处理后接头数据的分散性总体较大, 因此预测其疲劳强度的精度将会较低。

参考文献:

[1] MADDOX S J. Fatigue strength of welded structures[M]. Cambridge: Abington Publishing, 1991.

[2] SCHIJVE J. Fatigue of structures and materials [M]. 2nd edition. New York: Springer, 2009.

[3] 高玉魁. 表面完整性理论与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.

GAO Yu-kui. Surface Intefrity theory and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.

[4] STATNIKOV E S, TRUFIKOV V I, MIKHEEV P P, et al. Specification for weld toe improvement by ultrasonic impact treatment [M]. Paris: International Institute of Welding IIW Doc XIII-1617, 1996.

[5] YILDIRIM H C, MARQUIS G B. Fatigue strength improvement factors for high strength steel welded joints treated by high frequency mechanical impact[J]. International journal of fatigue, 2012, 44: 168-176.

[6] YILDIRIM H C, MARQUIS G B. Overview of fatigue data for high frequency mechanical impact treated welded joints[J]. Welding in the world, 2012, 56(7-8): 82-96.

[7] MARQUIS G B, MIKKOLA E, YILDIRIM H C, et al. Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed fatigue assessment guidelines[J]. Welding in the world, 2013, 57(6): 803-822.

[8] PEDERSEN M M, MOURITSEN O O, HANSEN M R, et

al. Comparison of post-weld treatment of high-strength steel welded joints in medium cycle fatigue[J]. Welding in the world, 2010, 54(7-8): R208-R217.

[9] 王东坡. 改善焊接接头疲劳强度超声冲击方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2000.

WANG Dong-po. Investigation on improvement of the fatigue strength of welded joints by ultrasonic peening method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2000.

[10] HOBACHER A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components[R]. New York: Welding research council bulletin 520, 2009.

[11] 王东坡, 霍立兴, 张玉凤, 等. 超声冲击法改善 LF21 铝合金焊接接头的疲劳性能[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 754-759.

WANG Dong-po, HUO Li-xing, ZHANG Yu-feng, et al. Fatigue properties improvement of welded joints for LF21 aluminum alloy by ultrasonic peening method[J]. Chinese journal of nonferrous metals, 2001, 11(5): 754-759.

[12] YANG Q L, WANG D P, WU S P, et al. Research on the effect of ultrasonic impact peening on the fatigue property of 7075-T651 aluminum alloy[J]. Manufacturing science and technology, 2011, 295-297: 1896-1900.

[13] GHAREMANI K, RANJAN R, WALBRIDGE S, et al. Fatigue strength improvement of aluminum and high strength steel welded structures using high frequency mechanical impact treatment[J]. Procedia engineering, 2015, 133: 465-476.

[14] 李占明, 朱有利, 辛毅. 超声冲击处理对 2A12 铝合金焊接接头疲劳性能的影响 [J]. 航空材料学报, 2011, 31(2): 28-32.

LI Zhan-ming, ZHU You-li, XIN Yi. Influence of ultrasonic impact treatment on fatigue properties of 2A12 aluminum alloy welded joints[J]. Journal of aeronautical materials, 2011, 31(2): 28-32.

[15] 江民华. 超声冲击对 MB8 镁合金对接接头疲劳性能影响研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2014.

JIANG Min-hua. Study on the fatigue property of MB8 magnesium alloy butt weld by ultrasound impacting [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2014.

[16] 雷思涌. 超声冲击对 MB8 镁合金十字接头性能影响的研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2015.

LEI Si-yong. Study on the effect of property for ultrasonic impact MB8 cross welded joint[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2015.

[17] 王东坡, 霍立兴, 张玉凤. 超声冲击法对钛合金焊接接头疲劳性能的改善[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(6): 1456-1460.

WANG Dong-po, HUO Li-xing, ZHANG Yu-feng. Improvement of fatigue properties of welded joints for titanium alloy by ultrasonic peening method [J]. Chinese journal of nonferrous metals, 2003, 13(6): 1456-1460.

[18] 赵小辉, 王东坡, 王惜宝, 等. 承载超声冲击提高 TC4 钛合金焊接接头的疲劳性能[J]. 焊接学报, 2010, 31(11): 57-60.

ZHAO Xiao-hui, WANG Dong-po, WANG Xi-bao, et al. Improvement of fatigue performance of TC4 Ti-alloy welded joints by loading ultrasonic peening[J]. Transactions of the China welding institution, 2010, 31(11): 57-60.

- [19] RADAJ D, SONSINO C M, FRICKE W. Fatigue assessment of welded joints by local approaches [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006.
- [20] NIEMI E. Stress determination for fatigue analysis of welded components [M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 1995.
- [21] RADAJ D. Design and analysis of fatigue resistant welded structures [M]. Cambridge: Abington Publishing, 1990.
- [22] FRICKE W. IIW Recommendations for the fatigue assessment of welded structures by notch stress analysis: IIW-2006-09[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.
- [23] WEICH I, UMMENHOFER T, NITSCHKE-PAGEL T, et al. Fatigue behaviour of welded high-strength steels after high frequency mechanical post-weld treatments[J]. Welding in the world, 2009, 53(11-12): R322-R332.
- [24] HUO Li-xing, WANG Dong-po, WANG Wen-xian, et al. Ultrasonic peening and low transformation temperature electrodes used for improving the fatigue strength of welded joints[J]. Welding in the world, 2004, 48(3-4): 34-39.
- [25] 王东坡, 霍立兴, 葛宝文, 等. 超声冲击法改善高强度钢焊接接头的疲劳性能[J]. 中国造船, 2003, 44(4): 86-92.
WANG Dong-po, HUO Li-xing, GE Bao-wen, et al. Fatigue performance improvement of high strength steel welded joints by ultrasonic peening[J]. Shipbuild China, 2003, 44(4): 86-92.
- [26] LEITNER M, STOSCHKA M, EICHLSEDER W. Fatigue enhancement of thin-walled, high-strength steel joints by high-frequency mechanical impact treatment[J]. Welding in the world, 2014, 58(1): 29-39.
- [27] NYKANEN T, BJORK T, LAITINEN R. Fatigue strength prediction of ultra high strength steel butt-welded joints[J]. Fatigue & fracture of engineering materials & structures, 2013, 36(6): 469-482.
- [28] GALTIER A, STATNIKOV E S. The Influence of ultrasonic impact treatment on fatigue behaviour of welded joints in high-strength steel[J]. Welding in the world, 2004, 48(5-6): 61-66.
- [29] STATNIKOV E S, MUKTEPAVEL V O, BLOMQVIST A. Comparison of ultrasonic impact treatment (UIT) and other fatigue life improvement methods[J]. Welding in the world, 2002, 46(3-4): 20-32.
- [30] KUDRYAVTSEV Y, KLEIMAN J, LUGOVSKOY A, et al. Rehabilitation and repair of welded elements and structures by ultrasonic peening[J]. Welding in the world, 2007, 51(7-8): 47-53.
- [31] HUO L X, WANG D P, ZHANG Y F. Investigation of the fatigue behaviour of the welded joints treated by TIG dressing and ultrasonic peening under variable-amplitude load[J]. International journal of fatigue, 2005, 27(1): 95-101.
- [32] POUTIAINEN I, TANSKANEN P, MARQUIS G. Finite element methods for structural hot spot stress determination — A comparison of procedures[J]. International journal of fatigue, 2004, 26(11): 1147-1157.