

DOI:10.11784/tdxbz202403014

## 焊接构造细节疲劳试验数据统计特征分析

刘衡<sup>1</sup>, 宗亮<sup>1,2</sup>, 丁阳<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350;

2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350)

**摘要:** 疲劳试验是钢结构疲劳设计的基础, 由于疲劳试验数据的高离散性, 应结合数理统计分析建立具有可靠度保证的失效概率-可靠度指标-应力幅-疲劳寿命 ( $P$ - $\alpha$ - $S$ - $N$ ) 曲线。本文对现有国内外主流规范中疲劳试验数据统计分析方法进行汇总, 并对容限系数  $k$  的计算方法与概率假设进行对比, 分析容限系数  $k$  随可靠度指标  $\alpha$  及失效概率  $P$  的分布情况以及有效数据个数  $n$  对其影响情况。对现有文献中对接焊缝、传力十字接头及非传力十字接头 3 类典型焊接构造细节疲劳试验数据进一步开展了统计分析, 建立了可靠度指标  $\alpha$  分别为 0.95、0.75 和 0.50 时的焊接构造细节  $P$ - $\alpha$ - $S$ - $N$  疲劳设计曲线。结果表明: 现有规范中 3 种焊接构造设计曲线均偏于安全且与本文数据统计分析结果较为接近; 相较于样本数量充足的情况, 当试验样本数较小时可靠度指标  $\alpha$  及失效概率  $P$  对容限系数  $k$  的影响更为显著; 焊接构造细节疲劳试验数据拟合标准差  $SD$  集中在 0.12~0.19, 随疲劳试验样本数量减少, 数据整体标准差  $SD$  倾向于增加, 单侧容限系数  $k_{(P,\alpha,v)}$  及疲劳设计曲线与中值  $S$ - $N$  曲线偏移量  $k_{(P,\alpha,v)}$   $SD$  均呈上升趋势; 当样本数量充足时, 可靠度指标取值对焊接构造细节疲劳设计曲线影响较小, 而当样本数量较小时 (小于 272), 可靠度指标取值对焊接构造细节疲劳设计曲线影响增大。本文所建立的 3 种焊接构造细节  $P$ - $\alpha$ - $S$ - $N$  曲线将对确定焊接钢结构疲劳设计与安全评估可靠性及其他疲劳试验的规划和开展提供有益参考。

**关键词:** 高周疲劳;  $P$ - $\alpha$ - $S$ - $N$  曲线; 焊接构造细节; 单侧容限系数; 疲劳试验

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2024)12-1221-11

## Analysis of Statistical Characteristics of Fatigue Test Data for Welding Details

Liu Heng<sup>1</sup>, Zong Liang<sup>1,2</sup>, Ding Yang<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** Fatigue tests are the basis of fatigue design for steel structures, and due to the high discreteness of fatigue test data, a failure probability-reliability index-stress amplitude-fatigue life ( $P$ - $\alpha$ - $S$ - $N$ ) curve with the assurance of reliability should be established by combining with statistical analysis. In this paper, the existing mainstream statistical analysis methods for fatigue test data at home and abroad are summarized. Then, the calculation methods and probability assumptions for tolerance factor  $k$  are compared, and the distributions of  $k$  with reliability index  $\alpha$  and failure probability  $P$  and the influence of the number of effective data  $n$  on  $k$  are analyzed. Furthermore, the fatigue test data of three typical types of welding details (i.e., a butt weld, a load-transferring cruciform joint and a non-load-transferring cruciform joint) in the literature are analyzed, and the  $P$ - $\alpha$ - $S$ - $N$  fatigue design curves for these welding details with different values of reliability index  $\alpha$  (i.e., 0.95, 0.75 and 0.50) are established. Analyses show that the design curves for the three types of welding details specified in the existing codes are on the safe side and close to the statistical results obtained in this paper. Compared with those in the case of a sufficient number of test samples,

收稿日期: 2024-03-13; 修回日期: 2024-06-04.

作者简介: 刘衡 (1998—), 女, 博士研究生, liuheng0711@tju.edu.cn.

通信作者: 宗亮, zongliang@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52278200).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52278200).

the influences of reliability index  $\alpha$  and failure probability  $P$  on tolerance factor  $k$  are more significant when the number of test samples is small. The standard deviation (SD) of fatigue test data of welding details is concentrated in the range of 0.12—0.19. With a decrease in the number of test samples, the SD of the overall data tends to increase, and both the one-sided tolerance factor  $k_{(P,\alpha,v)}$  and the offset  $k_{(P,\alpha,v)}$  SD of fatigue design curves and median  $S-N$  curves are on an upward trend. When the number of test samples is sufficient, the value of reliability index  $\alpha$  will have less influence on the fatigue design curves for welding details. In comparison, when the number of test samples is small (e.g., less than 272), the corresponding influence will be more obvious. The established  $P-\alpha-S-N$  curves for the three types of welding details provide a helpful reference for the welded steel structure fatigue design and safety assessment reliability, as well as for the planning and carrying out of other fatigue tests.

**Keywords:** high-cycle fatigue;  $P-\alpha-S-N$  curve; welding detail; one-sided tolerance factor; fatigue test

随着中国基础设施建设的深入推进,钢结构以其轻质、高强、装配化率高等特点,在大跨度结构、桥梁、海洋平台等各类结构中得到了广泛的应用。然而,钢结构在服役过程中将承受往复荷载的作用,进而引发疲劳问题,严重危害结构的服役安全。因此,在钢结构设计过程中,对于承受动力荷载的结构需进行疲劳设计<sup>[1]</sup>。

目前钢结构的常用疲劳设计主要有名义应力法、热点应力法和有效缺口应力法等。名义应力法以其形式简洁、方便使用等特点,在钢结构疲劳设计过程中得到了广泛的应用,同时也在国内外各主流规范中得到广泛采纳<sup>[1-6]</sup>。基于名义应力进行疲劳设计的方法,依赖于已有数据所建立的应力幅-疲劳寿命( $S-N$ )疲劳设计曲线及疲劳构造分类,然而疲劳试验具有较高的离散性,因此建立具有可靠度保证的疲劳设计曲线至关重要。结合数理统计分析方法对疲劳试验数据进行有效处理与合理分析是建立疲劳设计曲线的关键,也是实现钢结构疲劳性能合理评估的基础。

与此同时,可靠度指标的选取将对疲劳设计曲线的建立产生一定影响,可靠度指标考虑过高将导致所建立的疲劳设计曲线过于保守,反之则无法保证足够的安全裕量。对于这一问题,目前国内外规范中已有相关规定<sup>[3-8]</sup>,然而不同规范中对于可靠度参数取值及相关统计概率假设存在一定差异性,这将导致在疲劳试验数据处理过程中存在参数选取困难、统计概念不明确等问题。疲劳试验具有耗时长、成本高等特点,往往难以获得足够的样本数量,因此为有效利用、充分挖掘疲劳试验数据,应结合数理统计分析方法在小样本基础上建立考虑可靠度指标及失效概率的失效概率-可靠度指标-应力幅-疲劳寿命( $P-\alpha-S-N$ )曲线,以期对钢结构疲劳设计提供有效参考。

本文针对这一问题,对现有国内外规范中疲劳试验数据统计分析方法进行汇总,明确所采用数理统计基本概念及假设,并对国内外规范中容限系数  $k$  的算

方法与概率假设进行对比,分析容限系数  $k$  随可靠度指标  $\alpha$  及失效概率  $P$  的分布以及有效数据个数  $n$  对其影响。对现有文献中对接焊缝、传力十字接头及非传力十字接头 3 类典型焊接构造疲劳试验数据进行汇总并开展统计分析,建立了焊接构造  $P-\alpha-S-N$  疲劳设计曲线。在此基础上,讨论了样本数量、疲劳试验应力比及可靠度指标选取对焊接构造  $P-\alpha-S-N$  疲劳设计曲线影响情况。本文工作为疲劳试验数据统计分析及考虑可靠度指标的  $P-\alpha-S-N$  疲劳设计曲线的建立提供了重要参考。

## 1 疲劳试验统计分析方法

名义应力法在钢结构疲劳设计过程中得到了广泛的应用,同时也在国内外各主流规范中得到广泛采纳。不同规范对名义应力  $S-N$  曲线的形式、构造细节分类、疲劳强度取值、所涵盖细节构造种类数量等方面有所区别,现有主流规范<sup>[1-3, 5-6]</sup>中基于名义应力法的疲劳设计方法汇总如表 1 所示。

名义应力法的应用依赖于已有数据所建立的疲劳设计曲线。为建立具有可靠度保证的疲劳设计曲线,需对疲劳试验数据进行数据统计分析。

### 1.1 疲劳试验统计概念介绍

失效概率  $P$  及可靠度指标  $\alpha$  为疲劳试验中常用统计概念。失效概率  $P$  表示在概率  $P$  下总样本寿命取小于或等于  $N_p$  的概率,这一统计概念是针对样本个体而言的。当对数疲劳寿命服从均值为  $\mu$ 、标准差为  $\sigma$  的正态分布时,失效概率为  $P$  的对数安全寿命为  $N_p = \mu - \mu_p \sigma$ ,其中  $\mu_p$  为与失效概率  $P$  对应的上分位值。区别于失效概率  $P$ ,可靠度指标  $\alpha$  为子样本层面的统计概念<sup>[9]</sup>,用来评价子样本对于母体分布的反映情况。由于疲劳寿命的高离散性,母体分布的均值  $\mu$  及标准差  $\sigma$  通常难以获得,则需要通过子样本的均值  $\bar{x}$  及标准差  $SD$  作为母体分布统计指标的估计

值. 与此同时, 当样本数量较少时, 为保证子样本对母体分布的真实反映, 需基于单侧容限法引入单侧容限系数, 得到具有可靠度指标  $\alpha$  的疲劳寿命  $N_{P,\alpha}$ , 即

$$N_{P,\alpha} = \bar{x} - k_{(P,\alpha,\nu)} SD \quad (1)$$

式中:  $k_{(P,\alpha,\nu)}$  为单侧容限系数;  $\nu$  为自由度. 随后将

对该系数计算方法及取值进行讨论. 需要指出的是, 通常情况下假定疲劳试验数据服从正态分布, 失效概率及可靠度指标均按数理统计中正态分布相关假定予以考虑, 因此必要时应对疲劳试验数据进行正态检验.

表 1 基于名义应力法的疲劳设计方法汇总

Tab.1 Summary of fatigue design methods based on nominal stress method

规范	分类数量	形式	疲劳极限	设计方法
GB 50017—2017 <sup>[1]</sup>	14	$N_f \leq 5 \times 10^6$ 时, $m = 3, 4, 5$ ; $5 \times 10^6 < N_f \leq 1 \times 10^8$ 时, $m$ 增加 2; $1 \times 10^8 < N_f$ 时, $m = 3, 4, 5$	$5 \times 10^6$ 次, 给出 $2 \times 10^6$ 次寿命容许应力	容许应力法
TB 10091—2017 <sup>[2]</sup>	12	直线式, $m = 3, 4$	—	容许应力法
Eurocode 3 <sup>[3]</sup>	16	$N_f \leq 5 \times 10^6$ 时, $m = 3$ ; $5 \times 10^6 < N_f \leq 1 \times 10^8$ 时, $m$ 增加 2; $1 \times 10^8 < N_f$ 时, $m = 3, 4, 5$	$5 \times 10^6$ 次	极限状态法
IIW-1823-07 <sup>[5]</sup>	13	$N_f \leq 1 \times 10^7$ 时, $m = 3$ ; $1 \times 10^7 < N_f$ 时, $m$ 取无穷	$1 \times 10^7$ 次	容许应力法
BS 7608:2014 <sup>[6]</sup>	10	$N_f \leq 1 \times 10^7$ 时, $m = 3$ ; $1 \times 10^7 < N_f$ 时, $m$ 取无穷	$1 \times 10^7$ 次	容许应力法

注:  $N_f$  为疲劳寿命;  $m$  为材料性质相关参数.

为建立具有可靠度保证的  $S-N$  设计曲线, 在疲劳试验过程中, 首先应当确定合适的样本数量. 根据 ISO 12107: 2012<sup>[8]</sup> 中相关规定, 对于解释性工作, 需保证样本数量大于 10, 而对于建立具有保证率的设计曲线, 需保证样本数量大于 30. 解释性工作可理解为不考虑可靠度指标 ( $\alpha = 50\%$ ) 时所建立的  $P-S-N$  曲线, 而具有保证率的设计曲线则为考虑单侧容限系数  $k_{(P,\alpha,\nu)}$  所建立的  $P-\alpha-S-N$  曲线.

对于应力幅的选取, 不要求在同一应力幅下的重复数据, 以便确定  $S-N$  曲线是否为对数线性关系, 并降低应力幅选取导致的偏差. 由于在低应力幅、长寿命范围内, 数据倾向于更为分散, 因此建议对试样按对数应力幅等间隔分配, 从而增加长寿命区间试验数量. 与此同时, 在对  $S-N$  曲线的回归分析时, 拟合相关系数  $\gamma$  应保证满足相关系数起码值的规定. 当相关系数  $\gamma$  无法满足起码值要求<sup>[10]</sup> 时, 表明  $\lg S$  与  $\lg N$  间无线性相关性, 需补充有效试验数据直至满足要求. 相关系数  $\gamma$  可表示为

$$\gamma = \frac{S_{XY}}{\sqrt{S_{XX}S_{YY}}} \quad (2)$$

式中  $S_{XX}$ 、 $S_{YY}$  和  $S_{XY}$  分别为寿命方差、应力幅方差以及寿命与应力幅间的协方差.

### 1.2 中值 $S-N$ 曲线与 $P-\alpha-S-N$ 曲线

中值  $S-N$  曲线即失效概率  $P = 50\%$ 、可靠度指标  $\alpha = 50\%$  时基于试验数据拟合得到的  $S-N$  曲线.  $S-N$  曲线通常采用幂函数形式, 可表示为

$$S^m N = C \quad (3)$$

式中  $C$  和  $m$  为材料性质相关参数, 可通过疲劳试验进行标定. 在双对数坐标系下  $S-N$  曲线呈线性关系, 如式 (4) 所示, 则  $C$  和  $m$  可通过最小二乘法拟合得到.

$$\lg N + m \lg S = \lg C \quad (4)$$

中值  $S-N$  曲线以其便于标定、易于获取等特点, 在材料及构件疲劳性能的评估过程中得到了广泛的应用. 然而由于中值  $S-N$  曲线在建立过程中未考虑可靠度指标 ( $\alpha = 50\%$ ) 及失效概率的影响, 因此在工程应用中对于重要性较高的构件难以在其基础上直接开展疲劳寿命评估及剩余寿命分析, 而是一般将其用于解释性试验.

为增强所建立  $S-N$  曲线的可靠度指标, 引入单侧容限系数  $k_{(P,\alpha,\nu)}$  对中值  $S-N$  曲线进行折减以体现设计曲线对可靠度指标  $\alpha$  的要求.  $P-\alpha-S-N$  曲线的建立流程如图 1 所示.

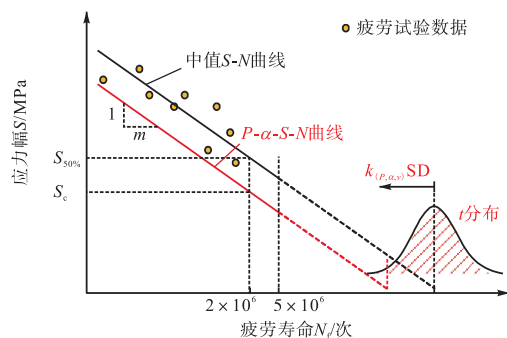


图 1  $P-\alpha-S-N$  曲线建立流程示意

Fig.1 Schematic of construction process of  $P-\alpha-S-N$  curve

则总样本在失效概率  $P$ 、可靠度指标  $\alpha$  和自由度

数  $v = n - 1$  下的  $S-N$  曲线下极限估计, 即  $P-\alpha-S-N$  曲线可表示为<sup>[7]</sup>

$$\hat{x}_{(P,\alpha,v)} = \hat{b} - \hat{m}y - k\hat{\sigma}_x \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(y - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中:  $x = \lg N$ ;  $y = \lg S$ ;  $\hat{m}$  和  $\hat{b}$  为  $S-N$  曲线最小二乘法拟合参数;  $k$  为单侧容限系数时, 可通过式(6)计算得到;  $\hat{\sigma}_x$  为对数疲劳寿命的标准偏差, 可根据式(7)进行估计. 式(5)中的平方根值为根据总样本对标准差估计值的修正, 与试样数及试验范围相关. 当试样数充足时, 该修正值接近 1, 可以忽略<sup>[7]</sup>.

$$k_{(P,\alpha,n)} = \frac{\mu_p + \mu_\alpha \sqrt{\frac{1}{n} \left[ 1 - \frac{\mu_\alpha^2}{2(n-1)} \right] + \frac{\mu_p^2}{2(n-1)}}}{1 - \frac{\mu_\alpha^2}{2(n-1)}} \quad (6)$$

$$\hat{\sigma}_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [x_i - (\hat{b} - \hat{m}y_i)]^2}{n-2}} \quad (7)$$

由式(6)可知, 当不考虑可靠度指标 ( $\alpha = 50\%$ ,  $\mu_\alpha = 0$ ) 时,  $k_{(P,\alpha,v)} = \mu_p$ , 此时式(7)将退化为  $P-S-N$  曲线的形式, 如式(8)所示. 该式与《铁路钢桥连接疲劳试验方法》<sup>[4]</sup>等规范中  $P-S-N$  设计曲线形式一致.

$$\hat{x}_{(P,\alpha,v)} = \hat{b} - \hat{m}y - \mu_p \hat{\sigma}_x \quad (8)$$

## 2 容限系数 $k$ 的取值及计算

容限系数  $k$  的取值与失效概率  $P$ 、可靠度指标  $\alpha$  及有效数据个数  $n$  有关. 对此, 各规范中已给出不同概率下单侧容限系数  $k_{(P,\alpha,v)}$  的取值表<sup>[7-8]</sup>. 然而, 由于不同规范中对于概率指标分布形式、单侧或双侧分位点等统计概念的考虑存在差异,  $k$  的取值在各规范中并不统一, 这为容限系数  $k$  的选取及  $P-\alpha-S-N$  曲线的建立造成了困难. 针对这一问题, 本文对各规范中单侧容限系数  $k_{(P,\alpha,v)}$  的概率假设及计算方法予以汇总, 并对不同概率指标下  $k_{(P,\alpha,v)}$  值分布情况进行分析, 以期为单侧容限系数的合理取值提供便利.

在《金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法》<sup>[7]</sup>及国际标准 ISO 12107: 2012<sup>[8]</sup>中, 对于容限系数  $k$  按单侧概率分布进行考虑, 其计算方法如式(6)所示. 上述规范给出了可靠度指标分别为 90% 和 95% 且失效概率分别为 90%、95%、99% 及 99.9% 时的单侧容限系数的取值.

国际焊接协会规范 IIW-1823-07<sup>[5]</sup>中给出的容限系数  $k_1$  的计算方法如式(9)所示, 其也给出了在可靠

度指标  $\alpha = 95\%$  和双侧失效概率  $P = 0.75$  (对应单侧失效概率  $P = 0.875$ ) 时  $k$  的取值表. 该规范<sup>[5]</sup>同时给出了当偏差确定时的  $k$  值, 然而这一条件在试验中较难满足.

$$k_1 = \frac{t_{(P,n-1)}}{\sqrt{n}} + \varphi_\alpha^{-1} \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2_{\left(\frac{1+\beta}{2}, n-1\right)}}} \quad (9)$$

为进一步分析失效概率  $P$ 、可靠度指标  $\alpha$  及有效数据个数  $n$  对容限系数  $k$  的影响, 基于 ISO 12107: 2012<sup>[8]</sup>中计算方法(式(6))及概率假定, 计算不同概率取值下  $k$  值分布, 如图 2 所示. 图 2 给出了  $P$  取值范围 50% ~ 99%、 $\alpha$  取值范围 50% ~ 95% 及  $n$  取值范围 5 ~ 30 时单侧容限系数分布. 如图 2 所示, 单侧容限系数随失效概率  $P$  及可靠度指标  $\alpha$  的提高而增加, 随  $n$  的增加而降低. 相较于有效数据个数充足的情况 ( $n = 30$ ), 当有效数据个数较小时 ( $n = 5$ ), 可靠度指标及失效概率对容限系数影响更为显著, 这表明在小样本情况下, 若要获得具有一定可靠度保证率的  $S-N$  设计曲线, 需对中值  $S-N$  曲线进行更多折减, 以降低样本数量不足产生的偏差.

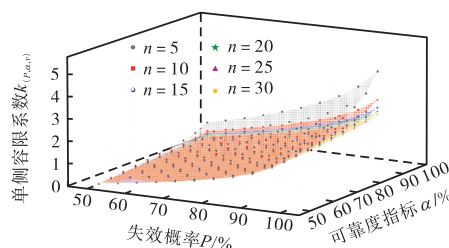


图 2 单侧容限系数  $k_{(P,\alpha,v)}$  分布  
Fig.2 Distribution of one-sided tolerance factor  $k_{(P,\alpha,v)}$

## 3 焊接构造疲劳数据统计

为进一步分析疲劳试验数据统计特征, 讨论应力比  $r$ 、有效数据个数  $n$  以及失效概率  $P$ 、可靠度指标  $\alpha$  取值对所建立  $S-N$  曲线影响情况, 针对 3 种典型焊接构造细节开展疲劳试验数据统计工作, 包括对接焊缝、传力十字接头、非传力十字接头 3 种典型构造, 焊接构造细节分别如图 3(a) ~ (c) 所示. 针对 3 种构造, 分别统计了已有文献中 48 组<sup>[11-31]</sup> (602 个数据点)、32 组<sup>[32-54]</sup> (494 个数据点) 和 38 组<sup>[11, 51-64]</sup> (357 个数据点) 疲劳数据, 共计 1453 个疲劳数据, 并与规范<sup>[1]</sup>中疲劳 FAT 设计曲线进行对比, 分别如图 4(a) ~ (c) 所示. 从图中可以看出, 对于相同疲劳焊接构造类别, 由于试验材料、焊接工艺等存在差异, 不同文献中疲劳试验数据组间差异显著.

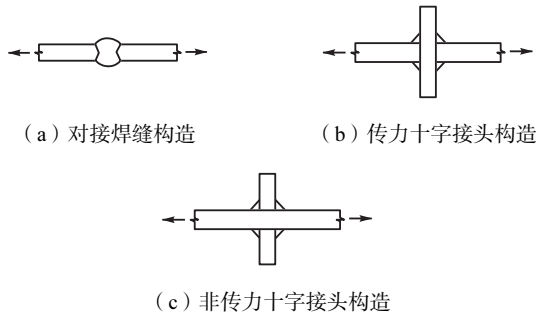


图 3 典型焊接构造细节  
Fig.3 Typical welding details

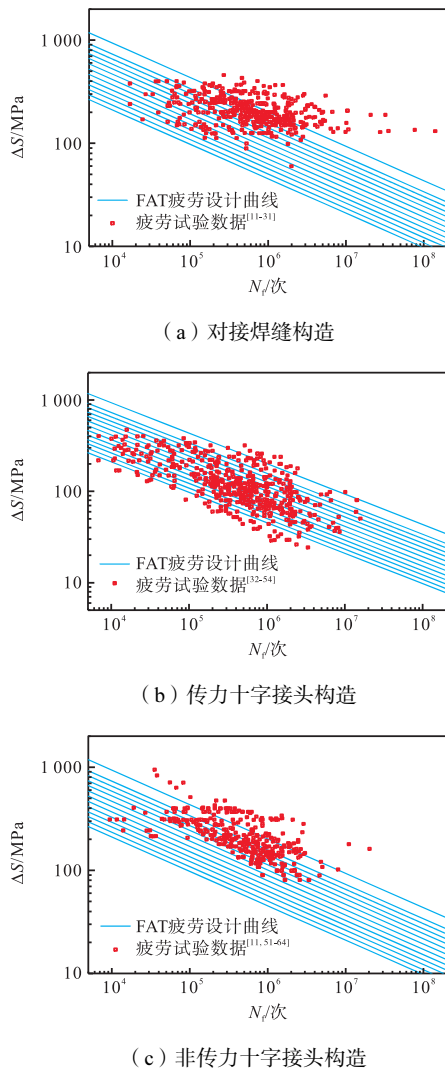


图 4 焊接构造细节疲劳试验数据统计  
Fig.4 Statistics of fatigue test data for welding details

### 3.1 焊接构造疲劳试验数据分布特征

为讨论焊接构造疲劳试验数据分布情况,对 3 种典型构造疲劳试验数据进行数据统计分析.基于最小二乘法拟合得到焊接构造疲劳均值  $S-N$  曲线 ( $\lg N + m \lg S = C$ ) 及标准差  $SD$ ,如图 5 所示,拟合结果见表 2.如图 5 所示,3 种典型焊接细节中,对接焊缝构造疲劳性能最好,传力十字接头疲劳性能最差,

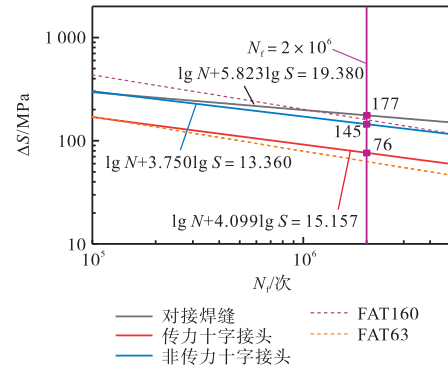


图 5 焊接构造中值  $S-N$  曲线  
Fig.5 Median  $S-N$  curves for welding details

$2 \times 10^6$  次寿命对应疲劳应力幅分别为 177 MPa、145 MPa 和 76 MPa. 3 种焊接构造中值  $S-N$  曲线  $m$  取值分别为 5.823、3.750 及 4.099,传力十字接头及非传力十字接头斜率取值较为接近且与规范<sup>[1]</sup>中疲劳设计曲线 ( $m = 3$ ) 较为一致,而对接焊缝构造  $m$  取值大于规范<sup>[1]</sup>中疲劳设计曲线,即  $S-N$  曲线斜率较低,表明相较于十字接头构造,对接焊缝构造疲劳寿命对应应力幅相对不敏感.在疲劳寿命区间  $1 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$ ,3 种焊接构造细节疲劳中值  $S-N$  曲线总体位于 FAT160 至 FAT63 范围内.

基于已有文献中 3 种典型焊接构造细节疲劳试验数据及中值  $S-N$  曲线,讨论焊接构造疲劳试验数据统计特征.如表 2 所示,3 种焊接构造标准差  $SD$  位于 0.13 ~ 0.19,均与 BS 7608:2014<sup>[6]</sup>中的标准差推荐取值  $SD = 0.2$  较为接近,且均小于  $SD = 0.2$  这一概率假设.因此,对于焊接构造疲劳试验,基于总体样本  $SD = 0.2$  这一概率假设开展数据统计分析是合理且偏于安全的.

表 2 焊接构造细节中值  $S-N$  曲线拟合结果

Tab.2 Fitting results of median  $S-N$  curves for welding details

构造类别	拟合曲线关系式	$m$	$C$	$SD$
对接焊缝	$\lg N + 5.823 \lg S = 19.380$	5.823	19.380	0.133
传力十字接头	$\lg N + 3.750 \lg S = 13.360$	3.750	13.360	0.186
非传力十字接头	$\lg N + 4.099 \lg S = 15.157$	4.099	15.157	0.146

对于需要考虑焊接残余应力影响的构造细节疲劳试验,规范<sup>[1]</sup>中推荐采用提高应力比  $r$  的方法.为讨论试验应力比 ( $r = S_{\min}/S_{\max}$ ) 选取对疲劳性能影响,针对传力十字接头与非传力十字接头两种典型构造,对已有疲劳试验数据根据应力比  $r$  (分别为 0.25、0.50、0.10、0) 进行分组,并拟合得到不同应力比下焊接疲劳构造中值  $S-N$  曲线,如图 6(a) 和 (b) 所示.从图中可以看出,对于应力比选取为 0 或 0.10 开展的疲劳试验,两种应力比下疲劳试验  $S-N$  曲线基本重

合,焊接构造疲劳寿命相差不大. 当应力比选取为 0.25 及 0.50 时,相较于应力比选取为 0 或 0.10 的情况,焊接构造疲劳寿命将显著降低.

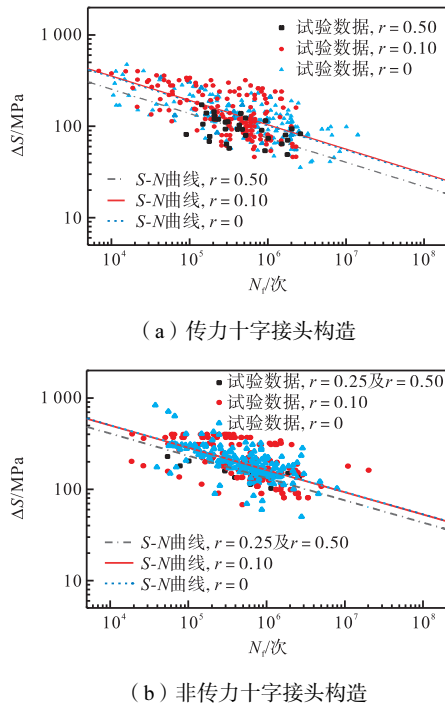


图 6 焊接构造细节不同应力比  $r$  疲劳试验  $S-N$  曲线

Fig.6 Fatigue test  $S-N$  curves for welding details with various values of stress ratio  $r$

### 3.2 焊接构造疲劳 $P-\alpha-S-N$ 设计曲线

为讨论有效数据个数对焊接构造  $P-\alpha-S-N$  设计曲线影响情况,对 3 种典型焊接构造细节分别选取其中不同数量数据点进行统计分析. 为保证数据点选取的随机性和避免数据组间差异,在各组疲劳试验数据中分别随机选取其中 1/2、1/4 及 1/8 的数据点进行统计分析. 焊接构造疲劳试验部分数据选取及不同样本数量中值  $S-N$  曲线拟合结果如图 7 所示. 从图 7 中可以看出,随机选取部分数据点后,所选取各数据量下拟合得到的中值  $S-N$  曲线基本重合,表明所选数据样本可反映各焊接构造总体样本情况.

在此基础上,进一步讨论试件数量对疲劳设计曲线影响情况. 为建立具有可靠度保证的焊接构造  $P-\alpha-S-N$  设计曲线,根据式(9)计算当失效概率  $P=0.9$  和可靠度指标  $\alpha=0.95$  时单侧容限系数  $k_{(P,\alpha,v)}$  的对应取值,并根据式(10)建立焊接构造  $P-\alpha-S-N$  设计曲线. 3 种典型焊接构造各样本量下标准差  $SD$ 、单侧容限系数  $k_{(P,\alpha,v)}$ 、偏移量  $k_{(P,\alpha,v)}$   $SD$  及焊接构造  $P-\alpha-S-N$  疲劳设计曲线  $2 \times 10^6$  次寿命对应应力幅  $S_f$  汇总见表 3. 从表 3 中可以看出,对于不同批次疲劳试验综合分析的情况,随着疲劳试验数据的减少,数据整体标

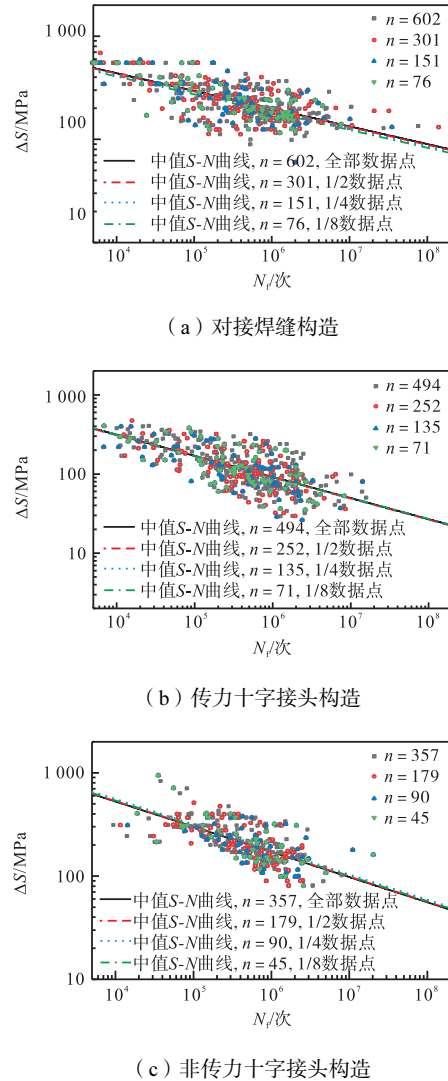


图 7 焊接构造疲劳试验部分数据

Fig.7 Partial data of fatigue test for welding details

准差  $SD$  倾向于增加,单侧容限系数  $k_{(P,\alpha,v)}$  及疲劳设计曲线与中值  $S-N$  曲线偏移量  $k_{(P,\alpha,v)}$   $SD$  均呈上升趋势. 焊接构造  $P-\alpha-S-N$  疲劳设计曲线  $2 \times 10^6$  次寿命对应应力幅  $S_f$  均随试件数量减少而降低,即当样本数量较少时,为获得相同可靠度保证的疲劳设计曲线应进行更高折减. 随试验数据的增多,整体拟合得到的  $S-N$  曲线将趋近于对于该焊接构造类别的真实描述.

$$\hat{x}_{(P,\alpha,v)} = \hat{b} - \hat{m}y - k_{(P,\alpha,v)} SD \tag{10}$$

如表 3 所示,当失效概率  $P=0.9$  和可靠度指标  $\alpha=0.95$  时,3 种焊接构造  $P-\alpha-S-N$  疲劳设计曲线  $2 \times 10^6$  次寿命对应应力幅分别为 115.74 MPa、42.12 MPa 及 90.18 MPa,《钢结构设计标准》<sup>[1]</sup>中对对接焊缝、传力十字接头和非传力十字接头对应  $2 \times 10^6$  次寿命的容许应力幅分别为 112 MPa、36 MPa 及 80 MPa,相较于本文疲劳试验数据统计分析结果均偏于安全且较为接近.

表 3 各有效数据个数下典型焊接构造细节疲劳试验数据统计参数取值 ( $P = 0.9, \alpha = 0.95$ )

Tab.3 Statistical parameters for fatigue test data of typical welding details with various numbers of effective data ( $P = 0.9, \alpha = 0.95$ )

焊接构造类别	$n$	SD	$k_{(P,\alpha,\nu)}$	$k_{(P,\alpha,\nu)}$ SD	$S_t$ /MPa
对接焊缝	602	0.132 73	1.375 5	0.182 6	115.74
	301	0.133 39	1.416 7	0.189 0	115.07
	151	0.133 07	1.477 1	0.196 6	110.14
	76	0.123 76	1.567 5	0.194 0	106.39
传力十字接头	494	0.186 15	1.385 7	0.257 9	42.12
	252	0.190 53	1.430 0	0.272 5	39.71
	135	0.193 27	1.489 4	0.287 9	38.18
	71	0.192 77	1.578 8	0.304 3	36.65
非传力十字接头	357	0.146 42	1.405 0	0.205 7	90.18
	179	0.146 32	1.459 9	0.213 6	90.20
	90	0.152 32	1.541 6	0.234 8	89.41
	45	0.162 76	1.668 9	0.271 6	79.21

### 3.3 可靠度指标选取

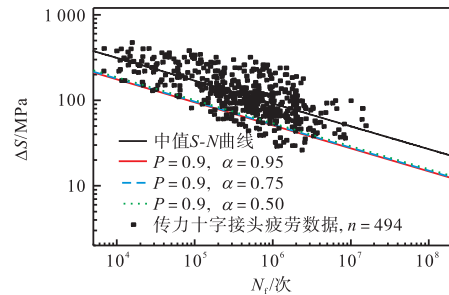
为讨论可靠度指标选取对焊接构造疲劳  $P-\alpha-S-N$  设计曲线影响,分别建立传力十字接头与非传力十字接头两种焊接构造在失效概率  $P = 0.9$  和可靠度指标  $\alpha$  分别为 0.95、0.75 和 0.50 时的  $P-\alpha-S-N$  设计曲线,如图 8 所示.各可靠度指标下单侧容限系数  $k_{(P,\alpha,\nu)}$  取值、偏移量  $k_{(P,\alpha,\nu)}$  SD 及  $P-\alpha-S-N$  疲劳设计曲线  $2 \times 10^6$  次寿命对应应力幅  $S_t$  汇总见表 4.如图 8 所示,大部分疲劳试验数据可包含在  $P-\alpha-S-N$  设计曲线上部区域内,但仍有部分数据落在  $P-\alpha-S-N$  设计曲线下侧.当疲劳试验样本数量充足时(图 8(a)和(c)),可靠度指标  $\alpha$  分别为 0.95、0.75 和 0.50 时的  $P-\alpha-S-N$  设计曲线基本重合,可靠度指标取值对疲劳设计曲线影响较小;当疲劳试验样本数量较小时(图 8(b)和(d)),可靠度指标取值的影响增大.

从表 4 中可以看出:随着可靠度指标增大,疲劳设计曲线较中值  $S-N$  曲线偏移量  $k_{(P,\alpha,\nu)}$  SD 增加;在样本数量充足情况下,考虑可靠度指标时( $P = 0.9, \alpha = 0.95$ )时疲劳设计曲线较未考虑( $P = 0.9, \alpha = 0.50$ )时  $2 \times 10^6$  次寿命对应应力幅  $S_t$  降低在 4 MPa 之内;当样本数量不足时,不同可靠度指标疲劳设计曲线  $S_t$  相差可达 13 MPa.

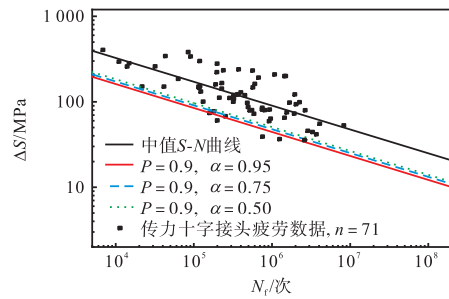
计算不同有效数据个数下可靠度指标  $\alpha = 0.95$  与  $\alpha = 0.50$  取值下单侧容限系数相对差值  $\Delta k$ ,如式(11)所示.  $\Delta k$  随有效数据个数变化情况如图 9 所示,当有效数据个数  $n = 60$  时  $\Delta k = 0.2$ ,此时可靠度指标对  $P-\alpha-S-N$  设计曲线影响仍不可忽略;当  $n$  大于 272

时,  $\Delta k$  小于 0.1,此时可认为可靠度指标对  $P-\alpha-S-N$  设计曲线影响较小.因此,当有效数据个数小于 272 时,建立疲劳设计曲线应考虑可靠度指标的影响.

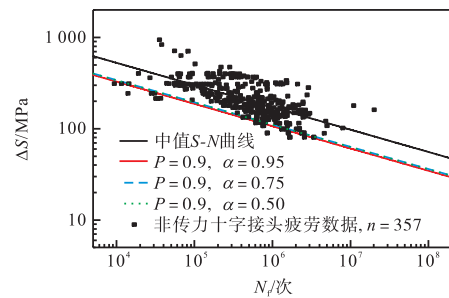
$$\Delta k = \frac{k_{(P=0.1,\alpha=0.95,n)} - k_{(P=0.1,\alpha=0.50,n)}}{k_{(P=0.1,\alpha=0.95,n)}} \quad (11)$$



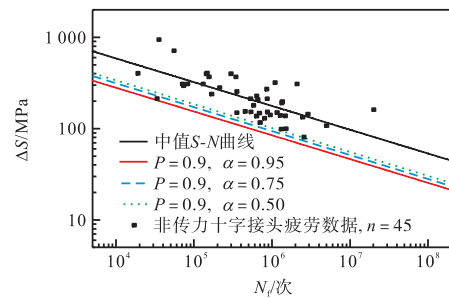
(a) 传力十字接头构造,  $n = 494$



(b) 传力十字接头构造,  $n = 71$



(c) 非传力十字接头构造,  $n = 357$



(d) 非传力十字接头构造,  $n = 45$

图 8 不同可靠度指标焊接构造细节  $P-\alpha-S-N$  疲劳设计曲线

Fig.8  $P-\alpha-S-N$  fatigue design curves for welding details with various values of reliability index

表 4 各可靠度指标下单侧容限系数  $k_{(P,\alpha,v)}$  及偏移量  $k_{(P,\alpha,v)}$  SD  
 Tab. 4  $k_{(P,\alpha,v)}$  and  $k_{(P,\alpha,v)}$  SD with various values of reliability index

焊接构造类别	$n$	$\alpha$	$k_{(P,\alpha,v)}$	$k_{(P,\alpha,v)}$ SD	$S_i$ /MPa
传力 十字接头	494	0.95	1.385 7	0.257 9	42.12
		0.75	1.323 9	0.246 4	43.25
		0.50	1.282 3	0.238 7	44.03
	71	0.95	1.578 8	0.304 3	36.65
		0.75	1.399 9	0.269 9	39.67
		0.50	1.286 8	0.248 1	41.72
非传力 十字接头	357	0.95	1.405 0	0.205 7	90.18
		0.75	1.331 6	0.195 0	92.43
		0.50	1.282 6	0.187 8	93.97
	45	0.95	1.668 9	0.321 7	70.58
		0.75	1.434 3	0.276 5	78.32
		0.50	1.290 0	0.248 7	83.50

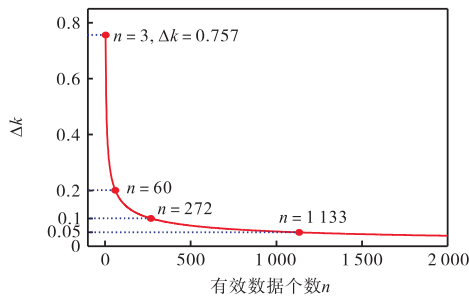


图 9 不同有效数据个数下单侧容限系数相对差值  $\Delta k$   
 Fig.9 Values of relative difference  $\Delta k$  with various numbers of effective data

### 4 结 论

本文对现有规范中有关疲劳试验数据统计分析及  $P-\alpha-S-N$  曲线的建立方法进行汇总和讨论, 主要工作及结论如下。

(1) 本文针对疲劳试验数据, 汇总了现有规范中疲劳试验中值  $S-N$  曲线及  $P-\alpha-S-N$  曲线的建立方法, 明确了容限系数  $k$  的统计概念, 并对不同规范中容限系数  $k$  的计算方法与概率假设进行对比。

(2) 分析了容限系数  $k$  随可靠度指标  $\alpha$  和失效概率  $P$  的分布以及有效数据个数  $n$  对其影响, 结果表明: 单侧容限系数  $k_{(P,\alpha,v)}$  随失效概率  $P$  及可靠度指标  $\alpha$  的提高而增加, 随有效数据个数的增加而降低。当有效数据个数较小时 ( $n=5$ ), 可靠度指标  $\alpha$  及失效概率  $P$  对容限系数  $k$  的影响更为显著。

(3) 针对现有文献中对接焊缝、传力十字接头及非传力十字接头疲劳试验数据开展统计分析, 结果表明: 现有规范中 3 种焊接构造设计曲线均偏于安全且与本文数据统计分析结果较为接近; 数据拟合标准差 SD 集中在 0.12 ~ 0.19, BS 7608: 2014<sup>[6]</sup>中按  $SD =$

0.20 考虑的概率假设与焊接构造疲劳数据统计结果吻合较好且偏于安全, 可以实现对焊接构造疲劳数据统计特征的描述。

(4) 对不同批次疲劳试验数据综合分析, 结果表明: 随着有效数据个数减少, 数据整体标准差 SD 倾向于增加, 单侧容限系数  $k_{(P,\alpha,v)}$  及疲劳设计曲线与中值  $S-N$  曲线偏移量  $k_{(P,\alpha,v)}$  SD 均呈上升趋势。焊接构造  $P-\alpha-S-N$  疲劳设计曲线  $2 \times 10^6$  次寿命对应应力幅  $S_i$  随有效数据个数减少而降低, 即当有效数据个数较小时, 为获得相同可靠度保证的疲劳设计曲线应进行更高折减。随着试验数据的增多, 整体拟合得到的  $S-N$  曲线将趋近于对于该焊接构造类别的真实描述。

(5) 建立了焊接构造不同可靠度指标 ( $\alpha$  分别为 0.95、0.75 和 0.50) 时的  $P-\alpha-S-N$  设计曲线。当疲劳试验有效数据个数充足时, 可靠度指标取值对疲劳设计曲线影响较小, 而当有效数据个数较小时, 可靠度指标取值对其影响增大。相较于  $\alpha=0.50$  的情况,  $\alpha=0.95$  时疲劳设计曲线  $2 \times 10^6$  次寿命对应应力幅降低在 13 MPa 内。当有效数据个数小于 272 时, 建立疲劳设计曲线应考虑可靠度指标的影响。

### 参考文献:

[1] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.  
 GB 250017—2017 Standard for Design of Steel Structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017(in Chinese).

[2] TB 10091—2017 铁路桥梁钢结构设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.  
 TB 10091—2017 Code for Design on Steel Structure of Railway Bridge[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017(in Chinese).

[3] EN 1993-1-9 Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-9: Fatigue[S]. Brussels, Belgium: CEN, 2005.

[4] TB/T 2349—2016 铁路钢桥连接疲劳试验方法[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.  
 TB/T 2349—2016 Fatigue Test Method for Connection of Railway Steel Bridge[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016(in Chinese).

[5] Hobbacher A F. IIW-1823-07 Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components[S]. Shaker Heights, USA: Welding Research Council, 2009.

[6] BS 7608: 2014 Guide to Fatigue Design and Assessment of Steel Structures[S]. London, UK: British Standards

- Institution, 2014.
- [7] GB/T 24176—2009 金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
GB/T 24176—2009 Metallic Materials—Fatigue Testing—Statistical Planning and Analysis of Data[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009 (in Chinese).
- [8] ISO 12107:2012 Metallic Materials—Fatigue Testing—Statistical Planning and Analysis of Data[S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2012.
- [9] 贾单锋, 廖小伟, 崔 佳. Q345qD 桥梁钢高周疲劳性能及  $\gamma$ - $P$ - $S$ - $N$  曲线试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(增1): 122-128.  
Jia Danfeng, Liao Xiaowei, Cui Jia. Experimental study on high cycle fatigue behavior and  $\gamma$ - $P$ - $S$ - $N$  curves of bridge steel Q345qD[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(Suppl 1): 122-128 (in Chinese).
- [10] 高镇同, 熊峻江. 疲劳可靠性[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000.  
Gao Zhentong, Xiong Junjiang. Fatigue Reliability [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2000 (in Chinese).
- [11] Huo L X, Wang D P, Wang W X, 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: 34-39.
- [12] Remes H. Strain-based approach to fatigue crack initiation and propagation in welded steel joints with arbitrary notch shape[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 52: 114-123.
- [13] Radziminski J B, Lawrence F V, Wells T W, et al. Low Cycle Fatigue of Butt Weldments of HY-100(T) and HY-130(T) Steel[R]. Urbana, USA: University of Illinois, 1970.
- [14] Harris L A, Nordmark G E. The Fatigue and Static Properties of Butt Welds in Structural Steels[R]. Urbana, USA: University of Illinois, 1954.
- [15] Remes H. Fatigue Test of CO<sub>2</sub>-Laser Hybrid and Submerged Arc Welded Butt Joint of RAEX S275 LASER and NVA[R]. Espoo, Finland: Helsinki University of Technology, 2003.
- [16] 贾单锋, 王元清, 崔 佳, 等. Q345qD 对接焊缝疲劳性能及断裂机理试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(11): 175-180.  
Jia Danfeng, Wang Yuanqing, Cui Jia, et al. Experimental research on fatigue performance and fracture mechanism of Q345qD butt welds[J]. Industrial Construction, 2017, 47(11): 175-180 (in Chinese).
- [17] 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: 长安大学工程机械学院, 2013.  
Zhang Xiaojun. Experimental Study on the Welded Joints Fatigue Strength and Fatigue Crack Growth Test of Q345qD Steel[D]. Xi'an: School of Construction Machinery, Chang'an University, 2013 (in Chinese).
- [18] Schaumann P, Collmann M. Influence of weld defects on the fatigue resistance of thick steel plates[J]. Procedia Engineering, 2013, 66: 62-72.
- [19] Černý I, Sís J, Zháňal P. Fatigue resistance of laser welded S355 steel sheet[J]. Key Engineering Materials, 2016, 665: 69-72.
- [20] Łagoda T, Głowacka K. Fatigue life prediction of welded joints from nominal system to fracture mechanics[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 137: 105647.
- [21] Zong L, Shi G, Wang Y Q, et al. Fatigue assessment on butt welded splices in plates of different thicknesses[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 129: 93-100.
- [22] Su H, Wang J, Du J S. Fatigue behavior of uncorroded butt welded joints made of bridge weathering steel[J]. Structures, 2020, 24: 377-385.
- [23] He C, Liu Y J, Wang Q Y. Very high cycle fatigue properties of welded joints under high frequency loading[J]. Advanced Materials Research, 2013, 647: 817-821.
- [24] Wang D Q Q, Yao D D, Wang Q, et al. Evaluating the fatigue property of S355J2W steel butt-welded joint: Multiple notch effects[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 167: 107362.
- [25] Gkatzogiannis S, Weinert J, Engelhardt I, et al. Corrosion fatigue behaviour of HFMI-treated butt welds[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 145: 106079.
- [26] Sonsino C M. Effect of residual stresses on the fatigue behaviour of welded joints depending on loading conditions and weld geometry[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31(1): 88-101.
- [27] Sorger G, Lehtimäki E, Hurme S, et al. Microstructure and fatigue properties of friction stir welded high-strength steel plates[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 23(5): 380-386.
- [28] Lago J, Guagliano M, Bokůvka O, et al. Improvement of fatigue endurance of welded S355 J2 structural steel by severe shot peening[J]. Surface Engineering, 2017, 33(9): 715-720.
- [29] Huo L X, Wang D P, Zhang Y F, et al. Investigation on improving fatigue properties of welded joints by ultra-

- sonic peening method[J]. *Key Engineering Materials*, 2000, 183/184/185/186/187: 1315-1320.
- [30] Ohta A, Suzuki N, Maeda Y. Shift of S-N curves with stress ratio[J]. *Welding in the World*, 2003, 47: 19-24.
- [31] Wang T, Wang D P, Huo L X, et al. Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment(UPT) [J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31(4): 644-650.
- [32] 揭志羽. 预腐蚀及复杂应力场下钢桥焊接接头疲劳性能研究[D]. 成都: 西南交通大学土木工程学院, 2015.
- Jie Zhiyu. Study on the Fatigue Performance of Welded Joints in Steel Bridges Under Prior Corrosion and Complex Stress Fields[D]. Chengdu: School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 2015(in Chinese).
- [33] Wei S, Shi X J, Wei S P, et al. Fatigue performance assessment of thick TIG-dressing cruciform welded joints made by Q355D structural steel[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 5977-5993.
- [34] Man Z, Song W, Xu J, et al. Misalignment effect on the fatigue failure behavior of load-carrying cruciform welded joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 160: 106847.
- [35] Andrews R M. The effect of misalignment on the fatigue strength of welded cruciform joints[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1996, 19(6): 755-768.
- [36] Zong L, Shi G, Wang Y Q, et al. Investigation on fatigue behaviour of load-carrying fillet welded joints based on mix-mode crack propagation analysis[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2017, 17(3): 677-686.
- [37] Kainuma S, Mori T. A fatigue strength evaluation method for load-carrying fillet welded cruciform joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28(8): 864-872.
- [38] Kainuma S, Mori T. A study on fatigue crack initiation point of load-carrying fillet welded cruciform joints[J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(9): 1669-1677.
- [39] Anami K, Yokota H, Takao R. Evaluation of fatigue strength of load-carrying cruciform welded joint under combination of axial loading and out-of-plane bending[J]. *International Journal of Steel Structures*, 2008, 8(3): 183-188.
- [40] Hanji T, Tateishi K, Shimizu M, et al. Fatigue strength of cruciform joints and longitudinal joints with laser-arc hybrid welding[J]. *Welding in the World*, 2019, 63: 1379-1390.
- [41] Braun M, Scheffer R, Fricke W, et al. Fatigue strength of fillet-welded joints at subzero temperatures[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2020, 43(2): 403-416.
- [42] Mori T, Uchida D, Fukuoka T, et al. Assessment of fatigue strength of cruciform welded joints failing from weld roots under out-of-plane bending[J]. *Doboku Gakkaï Ronbunshuu A*, 2010, 66(3): 568-575(in Japanese).
- [43] Vishnuvardhan S, Raghava G, Saravanan M, et al. Fatigue life evaluation of fillet welded cruciform joints with load-carrying welds[J]. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2016, 69: 585-589.
- [44] Kainuma S, Kim I T. Fatigue strength evaluation of load-carrying cruciform fillet-welded joints made with mild steel plates of different thickness[J]. *International Journal of Fatigue*, 2005, 27(7): 810-816.
- [45] Sørensen J D, Tychsen J, Andersen J U, et al. Fatigue analysis of load-carrying fillet welds[J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2006, 128(1): 65-74.
- [46] Singh P J, Achar D R G, Guha B, et al. Fatigue life prediction of gas tungsten arc welded AISI 304L cruciform joints with different LOP sizes[J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25(1): 1-7.
- [47] Yamaguchi I, Terada Y, Nitta A. On the fatigue strength of structural steels for ships[J]. *Journal of Zosen Kiokai*, 1964, 1964(115): 89-99(in Japanese).
- [48] Ahola A, Björk T, Barsoum Z. Fatigue strength capacity of load-carrying fillet welds on ultra-high-strength steel plates subjected to out-of-plane bending[J]. *Engineering Structures*, 2019, 196: 109282.
- [49] Jakubczak H, Glinka G. Fatigue analysis of manufacturing defects in weldments[J]. *International Journal of Fatigue*, 1986, 8(2): 51-57.
- [50] Song W, Liu X S, Zhou G T, et al. Notch energy-based low and high cycle fatigue assessment of load-carrying cruciform welded joints considering the strength mismatch[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 151: 106410.
- [51] Goo B C. An experimental study on the fatigue of structural steels with various welding details[J]. *Key Engineering Materials*, 2008, 385/386/387: 593-596.
- [52] Miki C, Tateishi K, Fan H D. Fatigue strengths of fillet-welded joints containing root discontinuities[J]. *International Journal of Fatigue*, 1993, 15(2): 133-140.
- [53] 廖小伟, 王元清, 宗亮, 等. 基于有效缺口应力法

- 的钢桥焊接细节疲劳分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(1): 1-8.
- Liao Xiaowei, Wang Yuanqing, Zong Liang, et al. Fatigue analysis of typical welded joints of steel bridges using effective notch stress approach[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2017, 51(1): 1-8 (in Chinese).
- [54] Kim D J, Seok C S, Koo J M. Fatigue strength assessment of the fillet welded cruciform joints[J]. International Journal of Modern Physics B, 2006, 20(25/26/27): 4225-4230.
- [55] 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.
- [56] Nykänen T, Marquis G, Björk T. Fatigue analysis of non-load-carrying fillet welded cruciform joints[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007, 74(3): 399-415.
- [57] Zong L, Shi G, Wang Y Q, et al. Experimental and numerical investigation on fatigue performance of non-load-carrying fillet welded joints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 130: 193-201.
- [58] Su H, Wang J S, Du J. Fatigue behavior of uncorroded non-load-carrying bridge weathering steel Q345qDNH fillet welded joints[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 164: 105789.
- [59] Zhao E N, Yin H, Liu J H, et al. Experimental and comparative investigation on fatigue performance of three typical welded joints of Q370qNH bridge weathering steel[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19: e02630.
- [60] Barsoum Z, Jonsson B. Influence of weld quality on the fatigue strength in seam welds[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(3): 971-979.
- [61] Barsoum Z, Samuelsson J. Fatigue assessment of cruciform joints welded with different methods[J]. Steel Research International, 2006, 77(12): 882-888.
- [62] Okawa T, Shimanuki H, Funatsu Y, et al. Effect of preload and stress ratio on fatigue strength of welded joints improved by ultrasonic impact treatment[J]. Welding in the World, 2013, 57: 235-241.
- [63] Knysh V V, Mordyuk B N, Solovei S O, et al. Combining electric discharge surface alloying and high-frequency mechanic impact post-processing for increased corrosion fatigue life of as-welded transverse non-load-carrying attachments of the S355 steel[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 177: 107926.
- [64] 廖小伟, 王元清, 吴剑国, 等. 低温环境下十字形非传力角焊缝接头的疲劳性能[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(10): 2018-2026.
- Liao Xiaowei, Wang Yuanqing, Wu Jianguo, et al. Fatigue performance of non-load-carrying cruciform fillet-welded joints at low ambient temperature[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2020, 54(10): 2018-2026 (in Chinese).

(责任编辑:武立有)