

高速铁路简支箱梁大型焊网钢筋疲劳性能试验研究

张少朋^{1,2}, 张志国³, 牛远志¹, 李艳¹, 张学泽³

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142; 2. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006;

3. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:为评估高速铁路简支箱梁电阻焊成型网片钢筋的拉伸疲劳性能,以雄忻高铁预制箱梁钢筋生产线网片为对象,开展 HRB400E 焊网钢筋反复拉伸疲劳试验研究。制作搭接电阻焊钢筋试件,受力钢筋直径为 12、16、18、20、22 mm,加载应力比取 0.2 和 0.4,完成 143 组常幅应力循环高频拉伸疲劳加载试验,拟合得到焊网钢筋 $S-N$ 曲线和 $P-S-N$ 曲线,分析焊网受力钢筋直径、加载应力比、试件制作方式和焊接参数对循环加载 200 万次疲劳应力幅的影响。结果表明:焊网钢筋试件的疲劳断口基本平直,呈现反复挤压的光滑区和突然断裂的粗糙区,具有明显的疲劳破坏特征;循环加载 200 万次时焊网钢筋疲劳容许应力幅介于钢筋母材和闪光对接焊钢筋结果之间;随焊网受力钢筋直径和加载应力比的增加,焊网钢筋疲劳应力幅均呈降低趋势;焊接工艺参数相同时,工厂制作试件的疲劳应力幅较生产线截取试件略低,采用工厂制作试件进行疲劳性能评定偏于安全;加载应力幅一定时,随着焊接电流增加,焊网钢筋疲劳寿命呈线性降低趋势;焊网钢筋采用电阻焊具有很好的疲劳性能,能够满足设计及规范要求。

关键词: 高速铁路桥; 预制箱梁; 焊网钢筋; 钢筋直径; $S-N$ 曲线; $P-S-N$ 曲线; 疲劳应力幅; 疲劳试验

中图分类号: U448.13; U448.213; U441.4

文献标志码: A

Experimental Study on Fatigue Performance of Large Welded Mesh Reinforcement in Simply-Supported Box Girder High-Speed Railway Bridge

ZHANG Shaopeng^{1,2}, ZHANG Zhiguo³, NIU Yuanzhi¹, LI Yan¹, ZHANG Xueze³

(1. China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China; 2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: This study focuses on the tensile fatigue performance of the resistance-welded mesh reinforcement in the simply-supported girder bridge accommodating high-speed railway. The mesh reinforcement in the precast box girders of the Xiong'an-Xinzhou High-speed Railway is taken as the study object. Repeated tensile fatigue tests were carried out for the HRB400E welded mesh reinforcement. Lap resistance-welded mesh reinforcement specimens were prepared, with load-bearing rebar diameters of 12, 16, 18, 20, and 22 mm, creating stress ratios of 0.2 and 0.4. 143 groups of high-frequency tensile fatigue tests were conducted under constant amplitude cyclic loading. The $S-N$ and $P-S-N$ curves were fitted. The influences of multiple factors on the fatigue stress ranges of the welded mesh reinforcement under 2 million load cycles were analyzed, including the diameter of the load-bearing steel bars, stress ratio, manufacturing way of specimens and welding parameters. It is concluded that the fatigue fracture of the specimens is roughly straight, revealing the repeatedly-pressed smooth zones and the abruptly-

收稿日期:2024-08-19

基金项目:中国国家铁路集团有限公司科技开发重大课题(K2023G004);中国铁路设计集团有限公司科技开发课题(2024A0203601)

Major Scientific and Technological Development Project of China State Railway Group Co., Ltd. (K2023G004); Project of Science and Technology Development of China Railway Design Corporation (2024A0203601)

作者简介:张少朋,高级工程师, E-mail: zhangshaopeng@crdc.com。研究方向:桥梁勘察设计 & 智能建造。

通信作者:张志国,教授, E-mail: zhangzhg@stdu.edu.cn。研究方向:结构稳定与疲劳,智能建造技术。

fractured rough zones, possessing distinct fatigue failure characteristics. Under 2 million load cycles, the allowable fatigue stress range of the welded mesh reinforcement is between the stress ranges of the base metal and the flash-butt-welded rebar. As the diameter of the load-bearing steel bars and the stress ratio increase, the fatigue stress ranges show sign of decreasing. Under the same welding parameters, the fatigue stress ranges of the factory-manufactured specimens are lower than those of the specimens cut from the production line. Therefore, using the factory-manufactured specimens for fatigue performance evaluation is safer. With constant stress amplitude, as the welding current increases, the fatigue life of the mesh reinforcement declines linearly. Resistance welding allows the mesh reinforcement to have sound fatigue performance and meet the design and code requirements.

Key words: high-speed railway bridge; precast box girder; welded mesh reinforcement; rebar diameter; $S-N$ curve; $P-S-N$ curve; fatigue stress range; fatigue test

0 引 言

高速铁路简支箱梁钢筋骨架的成型有绑扎和焊接两种方式^[1],其中,焊接成型方式采用自动化设备成型,具有生产工业化程度高、钢筋连接更加牢固、整体刚度大、钢筋间距控制准确均匀等优点^[2],在以往直径较小的规则钢筋网片中获得了广泛应用,比如桥面铺装、挡墙结构等。近年来,随着高铁简支箱梁智能建造标准的提高,钢筋加工正尝试从传统的人工绑扎方式转变为新型的自动焊接方式,但大型焊接钢筋网片的抗疲劳性能尚未明晰,阻碍了这一加工方式的转型和智能建造的进程。

关于焊网钢筋疲劳性能国内外进行了相关研究,并逐渐形成相应的产品标准。1972年版的德国标准 DIN488 中规定,冷轧带肋钢筋网在循环加载 200 万次时的疲劳容许应力幅应不超过 120 MPa,之后在该标准 2001 年版中将冷轧和热轧焊接钢筋网的循环加载 200 万次疲劳容许应力幅下调为 100 MPa。2008 年版的欧洲规范 BS EN 1992-1-2 中同样将焊网钢筋循环加载 200 万次疲劳容许应力幅定为 100 MPa。我国《钢筋焊接网混凝土结构技术规程》(JGJ 114—2014)制定时,根据国内外相关试验数据统计,得出在 95% 保证率下焊网钢筋疲劳应力幅要高于 100 MPa,可见各国规范取值偏于保守。另外,预制梁焊网钢筋焊接工艺参数也与规范制定条件存在差异,所以直接套用规范取值并不合适。

近年来,研究人员结合工程需要,对钢筋和钢筋接头疲劳性能进行了针对性研究以为焊网钢筋疲劳性能研究提供参考。赵泳茗^[3]对直径 16 mm 和 32 mm 的轨道梁 HRB400 钢筋进行疲劳试验,结果表明直径增大会使钢筋疲劳性能下降。盛兴旺等^[4]、王亚飞等^[5]进行了 HRB400F、HRB400、HRB500、HRB500F 共 4 种规格闪光对焊高强度钢筋连接的疲劳试验,加载应力比为 0.2 和 0.4,得出钢

筋牌号、钢筋直径以及加载应力比对钢筋疲劳性能的影响。对于焊网钢筋疲劳性能试验,顾万黎等^[6-7]通过对 HRB400(直径 14 mm+12 mm)及 CRB600H(直径 10 mm+12 mm)在加载应力比为 0.2 时的焊网钢筋进行疲劳性能试验,得到 95% 保证率下的 P (保证率)~ S (应力幅)~ N (荷载循环次数)曲线,并与国内外相应规范进行比较。李铖等^[8]分别对 CRB500 焊接钢筋网母材试件以及带焊接节点的试件进行不同应力水平下的疲劳试验,得到了钢筋母材及焊网钢筋的 $S-N$ 曲线及 $P-S-N$ 曲线,得出焊接对钢筋疲劳性能有降低作用。杜闯等^[9]通过对 HRB400 焊网钢筋进行疲劳拉伸试验,得出各工况下的 $S-N$ 曲线,最终拟合得出焊网钢筋的疲劳应力幅约为 128 MPa,比母材钢筋下降约 45%。

综上所述,目前国内外开展的高强钢筋疲劳试验主要集中在母材、接头连接方式方面,关于电阻点焊工艺下钢筋网片的疲劳试验研究较少,尤其对于大型焊网钢筋疲劳性能尚未形成统一标准。因此,为实现高铁预制梁部品化加工、自动化拼装和信息化管理,评估焊接钢筋网片疲劳性能,确保铁路预制梁质量及营运行车安全,以雄忻高铁预制箱梁钢筋生产线网片为对象开展相关的疲劳试验研究。设计制作搭接电阻焊钢筋试件并进行疲劳拉伸试验,拟合得到焊网钢筋的 $S-N$ 曲线和 $P-S-N$ 曲线,并分析不同焊网受力钢筋直径、加载应力比、试件制作方式和焊接参数对焊网钢筋疲劳性能的影响,为推广钢筋部品化生产提供依据,同时为今后规范制定积累更多的数据样本。

1 焊网钢筋疲劳试验

1.1 试件设计

结合雄忻高铁 32 m 单、双线简支预制箱梁钢筋构造,将梁体钢筋优化为网片形式,钢筋网片主要

包含 280 根 U 形钢筋、65 片定位网、15 片钢筋网、5 片钢带网, 网格尺寸分为 10 cm×10 cm、10 cm×15 cm、10 cm×20 cm、12.5 cm×10 cm、12.5 cm×12.5 cm、12.5 cm×15 cm、12.5 cm×20 cm 七种。按照施工图, 根据十字交叉处钢筋直径对网片进行归纳, 共分为 5 种类型: 分布钢筋直径均为 12 mm, 受力钢筋直径为 12、16、18、20、22 mm。雄忻高铁 24 m 单、双线简支预制箱梁钢筋网片划分方式与 32 m 同梁型简支箱梁基本一致, 也有 5 种十字交叉钢筋。其中钢带网数量较少, 不做介绍。

根据高铁简支箱梁钢筋使用及受力特征, 设计了搭接电阻焊钢筋的拉伸疲劳试验试件, 该试件由十字形钢筋组成, 其中受力钢筋直径为 12、16、18、22 mm, 长 300 mm, 分布钢筋直径均为 12 mm、长 40 mm, 钢筋材料采用 HRB400E 钢筋。选取的钢筋直径和材料与雄忻高铁定襄、五台梁场应用的焊接成型超大型钢筋网片一致。焊网钢筋典型试件见图 1。



图 1 焊网钢筋典型试件

Fig. 1 Typical Welded Mesh Reinforcement Specimen

试件主要采用生产线截取的制作方式, 每种直径试件基数按 10 组制作。为比较不同制作方式的影响, 单独由工厂制作直径 12、16、22 mm 的 3 种试件作为对照试件, 采用与生产线相同的焊接工艺参数, 数量基数同生产线截取试件。考虑疲劳试验夹具处断裂的可能性, 每种直径试件还制作了一定数量的备用试件, 当试验失效后采用备用试件, 直到全部备用试件用完或获得有效数据样本后, 不再进行同类型试验。

焊网钢筋通过专用设备, 采用电阻点焊自动加工成型, 焊网钢筋性能与焊接工艺和焊接参数有关, 主要受焊接电流、时间和电极压力影响, 在实际工程中可通过三者匹配参数调整, 形成合理的焊接工艺。根据工程实践经验, 对生产线电阻焊不同直径钢筋选取的焊接工艺参数见表 1。其中工厂制作试件也采用相同的焊接工艺参数。

1.2 疲劳试验加载设备及试件处理

试验加载采用 GPS300 高频疲劳试验机, 最大静负荷为 ±300 kN, 最大动负荷为 150 kN, 加载频

表 1 钢筋网片焊接工艺参数

Tab. 1 Welding Parameters of Mesh Reinforcement

受力钢筋直径/mm	压力/N	电流/A	焊接时间/s	维持时间/s
12	8 500	18 500	0.30	1
16	8 500	19 500	0.36	1
18	8 500	20 000	0.40	1
20	9 000	21 000	0.42	1
22	9 000	22 000	0.44	1

率 80~250 Hz。疲劳试验的成败在于夹具的设计, 为此, 在正式试验前, 进行了夹持的改进和模拟测试, 根据文献[10]经验, 在钢筋试件夹持端套用铝箔锡箔纸和铣扁等方式, 有利于应力的扩散, 减少由于夹持应力集中而造成的端部断裂, 经过反复测试, 最终确定在三片式单孔标准锚具夹具基础上, 对直径 12 mm 钢筋在夹持端采用套锡箔纸、其余直径钢筋采用铣扁的处理方法, 以保证试验较高的成功率。

1.3 疲劳试验应力及加载方法

焊网钢筋疲劳试验采用常幅加载, 在常温状态下进行。加载应力为最小拉应力-最大拉应力反复拉伸循环, 波形为正弦波。本次疲劳试验加载应力参考设计及铁路相关规范, 并考虑疲劳加载断裂可能性, 加载应力比取 0.2、0.4, 试验最大应力为 200~400 MPa, 以 50 MPa 为 1 级, 最小应力由对应的加载应力比进行控制。

根据国内关于钢筋高低频疲劳应力加载试验研究^[5,11], 加载频率对疲劳试验结果几乎没有影响, 而采用高频加载可以节省试验时间, 减少试验成本, 提高试验效率, 为此, 本次疲劳试验加载频率采用 80~120 Hz 高频方式。考虑试验时间及成本, 疲劳试验加载循环次数以 500 万次进行控制, 即当加载循环次数达到 500 万次试件仍未断裂, 将停止加载, 并记录相关试验数据。

2 疲劳试验结果及分析

2.1 疲劳断裂情况

最终共完成 143 组试件疲劳加载试验, 其中试验加载到 500 万次仍未断裂的试件有 10 组, 在钢筋焊接位置断裂的有 70 组(图 2), 在夹持处断裂的有 61 组, 在焊接处以外中间段断裂的有 2 组, 总体有效数据 82 组, 有效样本数量较多, 能够满足统计分析要求。



图 2 钢筋焊接位置断裂

Fig. 2 Fracture of Rebar Welding Location

结合试验过程进一步分析可知, 试件从加载到破坏, 主要经历 3 个阶段: ①裂纹起源阶段。当循环加载达到一定次数后, 在钢筋焊接处首先出现微裂纹。②裂纹扩展阶段。随着加载和卸载的反复交替, 微裂纹逐渐扩展成疲劳裂纹扩展区, 在不断地张开、闭合与摩擦作用下裂纹扩展区变得相对光滑。③裂纹瞬断阶段。随着重复加载次数的递增, 裂纹持续扩展, 当疲劳裂纹达到临界尺寸, 剩余有效钢筋面积无法再承受作用荷载时, 钢筋会突然发生疲劳断裂, 宏观上表现为断口平整但略显粗糙(图 3)。这种平整但粗糙的断口具有典型的疲劳断口特征, 表明在最终断裂瞬间, 断裂面迅速传播并形成了新的、未经磨损的粗糙表面, 反映了断裂的急剧性和脆性特征。

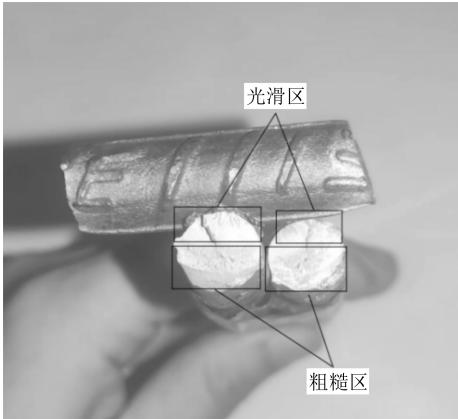


图 3 疲劳断裂断口截面

Fig. 3 Cross-Section of Fatigue Fracture

2.2 焊网钢筋 S~N 曲线

随着工程中焊接使用的增加, 残余应力的影响越来越突出, 在疲劳性能分析时, 目前常用的办法是采取应力幅进行计算^[12-17], 而对残余应力很小的构件或连接则采用折算应力幅以保证公式的统一, 为此本次焊网钢筋试验也采用应力幅进行分析。

为确定疲劳应力幅, 以进行疲劳性能分析, 根据试验结果进行 S~N 曲线拟合。目前疲劳曲线拟合主要有单对数线性模型、双对数线性模型、双对数双折线模型及三参数对数模型等方法。我国《铁路工程混凝土结构高强钢筋设计规定》(铁总建设[2015] 343 号文) 中采用双对数双折线模型对钢筋母材及焊接接头钢筋进行疲劳计算, 本文也采用该模型进行试验数据处理, 其中循环加载 200 万次以内拟合曲线斜率为 $-m_1$, 循环加载 200 万次以上拟合曲线斜率为 $-m_2 = -m_1 - 2$ 。将本次疲劳试验所得 72 个在焊接处和试件中间断裂的数据进行拟合, 得到焊网钢筋 S~N 曲线, 见图 4。拟合得到焊网钢筋

S~N 曲线方程为:

$$\begin{cases} \lg N = 14.02 - 3.62 \lg S & (N < 200 \text{ 万次}) \\ \lg N = 18.30 - 5.62 \lg S & (N \geq 200 \text{ 万次}) \end{cases} \quad (1)$$

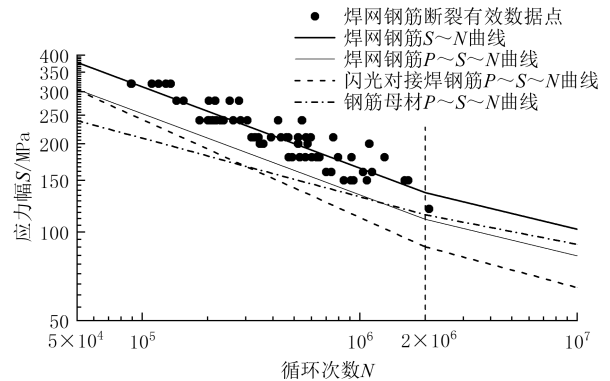


图 4 焊网钢筋 S~N 曲线及 P~S~N 曲线与规范曲线比较

Fig. 4 Comparison of S-N and P-S-N Curves of Welded Mesh Reinforcement with Code-Suggested Curves

拟合 S~N 曲线中, 拟合相关系数 $R = -0.92$, 说明拟合曲线相关性较好, 可用于焊网钢筋的疲劳性能分析。根据拟合的 S~N 曲线, 可以得到在循环加载 200 万次时 HRB400E 焊网钢筋对应的疲劳应力幅为 136.47 MPa。《铁路桥涵混凝土结构设计规范》(TB 10092—2017) 中给出同型号钢筋母材疲劳应力幅为 145 MPa, 闪光对接焊钢筋的疲劳应力幅为 130 MPa, 由此可见, 采用焊网钢筋疲劳性能介于这二者之间, 表明采用电阻焊的焊网钢筋成型工艺仍具有较好的抗疲劳性能。本试验所得结果与文献[18]根据焊接损伤程度分析结论总体一致。

2.3 焊网钢筋 P~S~N 曲线

在确定容许应力幅时, 不能直接采用焊网钢筋疲劳试验 S~N 曲线, 还要按规定考虑一定保证率和置信度进行焊网钢筋 P~S~N 曲线拟合。参考《铁路工程混凝土结构高强钢筋设计规定》, 取保证率 $P = 97.7\%$, 置信度 $\gamma = 75\%$ 。P~S~N 曲线拟合结果见图 4, 其曲线方程为:

$$\begin{cases} \lg N = 13.70 - 3.62 \lg S & (N < 200 \text{ 万次}) \\ \lg N = 17.79 - 5.62 \lg S & (N \geq 200 \text{ 万次}) \end{cases} \quad (2)$$

将《铁路工程混凝土结构高强钢筋设计规定》给出的钢筋母材、闪光对接焊钢筋 P~S~N 曲线与焊网钢筋的 S~N 曲线及 P~S~N 曲线参数进行比较, 见表 2。由图 4 和表 2 可知: ①焊网钢筋 P~S~N 曲线在循环加载 200 万次附近位于钢筋母材和闪光对接焊钢筋 P~S~N 曲线之间, 与钢筋母材相比略有降低; 由于斜率差别, 导致 P~S~N 曲线出现交叉变化, 但是总体上可以看出焊网钢筋具有良好的抗疲劳性能。②在循环加载 200 万次时,

表2 钢筋疲劳曲线参数对比
Tab. 2 Comparison of Fatigue Curve Parameters of Rebar

钢筋类型	疲劳曲线	m_1	m_2	$\lg A_1$	$\lg A_2$	N_0 /万次	$\Delta\sigma$ /MPa
钢筋母材	$P\sim S\sim N$ 曲线	5	7	16.60	20.71	200	114.76
闪光对接焊钢筋	$P\sim S\sim N$ 曲线	3	5	12.15	16.06	200	89.00
焊网钢筋	$S\sim N$ 曲线	3.62	5.62	14.02	18.30	200	136.47
	$P\sim S\sim N$ 曲线	3.62	5.62	13.70	17.79	200	110.64

注: $\lg A_1$ 、 $\lg A_2$ 分别为两斜线段的截距; N_0 为预期疲劳寿命,即规定的疲劳失效荷载循环次数,我国规范习惯以200万次为依据; $\Delta\sigma$ 为与 N_0 对应的疲劳应力幅。

钢筋母材容许应力幅为114.76 MPa,闪光对接焊钢筋为89.00 MPa,而焊网钢筋为110.64 MPa,仅比钢筋母材低3.6%,高于《钢筋焊接网混凝土结构技术规程》(JGJ 114—2014)中循环加载200万次疲劳容许应力幅100 MPa的要求,表明采用电阻焊制作的焊网钢筋的疲劳性能良好,同时也证明本文试验数据可靠,可作为计算焊网钢筋疲劳容许应力幅的依据。

2.4 疲劳性能影响因素分析

2.4.1 钢筋直径和加载应力比

根据疲劳试验结果,可得到不同焊网受力钢筋直径、加载应力比及试件制作方式的焊网钢筋疲劳性能 $S\sim N$ 曲线,见表3。分别计算不同条件参数钢筋循环加载200万次下的疲劳应力幅,对影响疲劳寿命的不同条件参数进行分析评价。

表3 不同条件参数焊网钢筋拟合 $S\sim N$ 曲线方程

Tab. 3 $S\sim N$ Curves of Welded Mesh Reinforcement Fitted with Different Condition Parameters

焊网钢筋试件制作方式	受力钢筋直径/mm	加载应力比	拟合 $S\sim N$ 曲线方程
生产线截取试件	12	0.2	$\lg N = 16.60 - 4.60 \lg S$
		0.4	$\lg N = 13.44 - 3.38 \lg S$
	16	0.2	$\lg N = 14.58 - 3.81 \lg S$
		0.4	$\lg N = 15.97 - 4.49 \lg S$
	18	0.2	$\lg N = 12.69 - 3.06 \lg S$
		0.4	$\lg N = 13.60 - 3.51 \lg S$
	22	0.2	$\lg N = 23.37 - 4.98 \lg S$
		0.4	$\lg N = 10.74 - 2.20 \lg S$
工厂制作试件	12	0.2	$\lg N = 11.36 - 2.54 \lg S$
		0.4	$\lg N = 25.23 - 8.48 \lg S$
	16	0.4	$\lg N = 13.63 - 3.50 \lg S$
		0.2	$\lg N = 11.93 - 2.72 \lg S$

根据表3拟合 $S\sim N$ 曲线方程,选取生产线截取直径12、16、18、22 mm焊网钢筋试件的 $S\sim N$ 曲线,计算其在循环加载200万次时的疲劳应力幅,对加载应力比为0.2、0.4时不同直径焊网钢筋疲劳性能进行比较,见图5。

由图5可知:

(1) 焊网受力钢筋直径对其疲劳性能有明显影响,随着钢筋直径增加,循环加载200万次时的疲劳

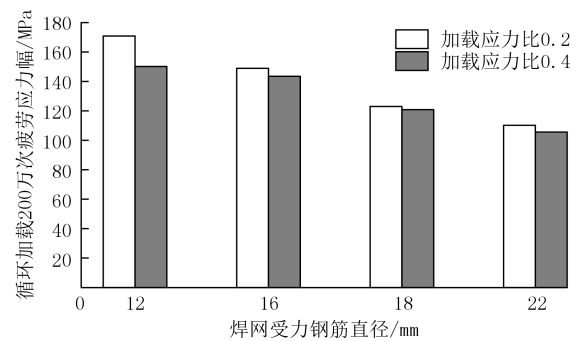


图5 不同加载应力比时焊网钢筋试件疲劳性能比较
Fig. 5 Comparison of Fatigue Performance of Welded Mesh Reinforcement Specimens under Different Stress Ratios

应力幅呈降低趋势;加载应力比为0.2时,钢筋直径从12 mm增加到16、18、22 mm时,疲劳应力幅降低比率分别为12.7%、17.3%、10.4%;加载应力比为0.4时,相应的疲劳应力幅降低比率依次为4.4%、16%、10.4%,其中直径22 mm焊网钢筋的疲劳应力幅降低比率偏小,是因为本次试验该直径焊网受力钢筋试验结果有效数据较少所致,但是并不影响疲劳应力幅降低趋势的分析。

(2) 在焊网受力钢筋直径相同情况下,加载应力比越大,在循环加载200万次时的疲劳应力幅越低;焊网受力钢筋直径12、16、18、22 mm时,加载应力比0.4的疲劳应力幅较加载应力比0.2分别降低12%、3.8%、2.1%、4.5%,不同直径变化降低的比率有差异,没有表现出明显的规律特性,在一定范围内可以认为对焊网钢筋疲劳应力幅直径变化不敏感。

2.4.2 试件制作方式

根据表3拟合 $S\sim N$ 曲线方程,可得焊网钢筋生产线截取全部试件在循环加载200万次时, $S\sim N$ 曲线方程为 $\lg N = 14.60 - 3.85 \lg S$,疲劳应力幅为143.06 MPa;工厂制作全部试件在循环加载200万次时, $S\sim N$ 曲线方程为 $\lg N = 14.91 - 4.02 \lg S$,疲劳应力幅为138.20 MPa。生产线截取试件在循环加载200万次时的疲劳应力幅比工厂制作试件高3.5%,说明在生产线上制作焊网钢筋试件的焊接工艺更加稳定,对焊接参数的把控更为准确,所以生产

线上制作的焊网钢筋试件疲劳性能要优于工厂单独制作试件。此外, 二者的疲劳应力幅相差未超过 5%, 因此采用相同焊接工艺由工厂单独制作试件来代替生产线制作试件总体上偏于安全。可见, 在焊网钢筋疲劳性能评定时, 用工厂制作试件来代替生产线制作试件是可行的。

2.4.3 焊接参数

焊缝熔核区的质量是影响焊网钢筋性能的关键因素, 焊网钢筋所采用的电阻焊原理是在电极两端施压力, 并通以电流, 利用焊接区金属电阻产生的焦耳热使接触面达到熔融或高温塑性状态, 借助热力耦合作用实现冶金结合。其中焊接电流对于焊缝熔核区的影响最为重要: 焊接电流过小, 会造成焊接接头的实际温度过低, 无法达到焊接的塑性变形条件而产生缺陷; 焊接电流过大, 焊接实际温度过高, 焊接接头附近氧化严重, 会影响熔核的尺寸与质量^[19]。为研究焊接参数对于焊网钢筋疲劳寿命的影响, 取生产线截取试件, 加载应力比 0.2, 应力幅分别为 280、240、200 MPa, 得到不同焊接电流下焊网钢筋疲劳断裂次数, 见表 4。

表 4 不同焊接电流下焊网钢筋循环加载 200 万次疲劳断裂次数

Tab. 4 Fatigue Fracture Frequency of Welded Mesh Reinforcement under 2 Million Loading Cycles under Increasing Welding Currents

应力幅/MPa	焊接电流 I/A	疲劳断裂次数
280	18 500	279 213
	19 500	252 778
	20 000	216 881
	21 000	157 076
	22 000	143 737
240	18 500	305 018
	19 500	284 192
	20 000	262 558
	21 000	223 633
	22 000	208 035
200	18 500	660 232
	19 500	575 267
	20 000	521 487
	21 000	435 047
	22 000	348 191

根据表 4, 可得不同应力幅下焊接电流 I 对疲劳断裂次数 N' 的影响, 见图 6。由图 6 可知: ①随着焊接电流增加, 焊网钢筋疲劳断裂次数逐渐降低, 表明焊接电流增加会使焊网疲劳寿命出现降低趋势, 且基本呈线性降低; 3 种应力幅均表现出相同的下降趋势。②在焊网钢筋点焊牢固性得到保证时, 尽可能采用较低的电流参数, 以有利于焊网钢筋的抗疲劳性能。

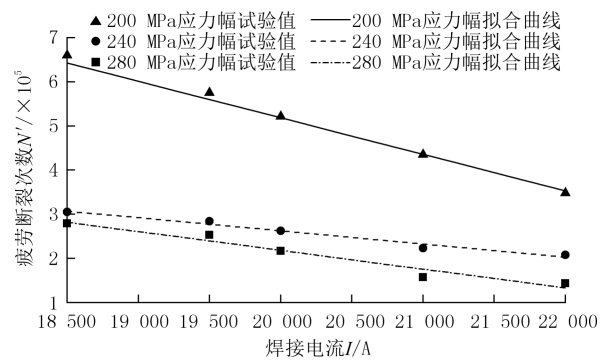


图 6 不同焊接电流下焊网钢筋疲劳断裂次数拟合曲线
Fig. 6 Fatigue Life Fitting Curve of Welded Mesh Reinforcement with Increasing Welding Current

不同应力幅下焊接电流与疲劳断裂次数拟合曲线方程见表 5。由表 5 可知: 拟合曲线决定系数 R^2 均大于 0.95, 说明线性拟合关系合适, 依据得到的拟合曲线方程可进行给定应力幅下焊接电流变化时焊网钢筋疲劳寿命预测。

表 5 不同应力幅下焊接电流与疲劳断裂次数拟合曲线方程

Tab. 5 Fitting Equations of Welding Current and Fatigue Fracture Cyclic Loading under Different Stress Amplitudes

应力幅/MPa	拟合 $N' \sim I$ 曲线方程	决定系数 R^2
280	$N' = 1.07 \times 10^6 - 42.55I$	0.953
240	$N' = 8.56 \times 10^5 - 29.67I$	0.978
200	$N' = 2.17 \times 10^6 - 82.72I$	0.992

3 结 论

为评估电阻焊成型网片钢筋的拉伸疲劳性能, 以雄忻高铁预制箱梁钢筋生产线网片为对象, 采用生产线截取和工厂制作方式制作焊网钢筋试件, 进行批量反复拉伸疲劳试验, 根据试验结果采用双对数双折线模型拟合焊网钢筋 $S \sim N$ 曲线和 $P \sim S \sim N$ 曲线, 分析了焊网受力钢筋直径、加载应力比、试件制作方式和焊接参数对其疲劳性能的影响。主要得出以下结论:

(1) 本次完成 143 组试验, 循环加载到 500 万次未断裂的有 10 组, 在钢筋焊接位置断裂的有 70 组, 在夹持处断裂的有 61 组, 在焊接处以外中间段断裂的有 2 组。在焊接位置或中间段断裂的疲劳断口基本平直, 呈现反复挤压的光滑区和突然断裂的粗糙区, 具有明显的疲劳破坏特征, 光滑区反映了疲劳裂纹从微观到宏观的发展过程。

(2) 通过保证率 $P=97.7\%$ 、置信度 $\gamma=75\%$ 时的 $P \sim S \sim N$ 曲线分析, 可以得出电阻焊焊网钢筋在循环加载 200 万次时疲劳曲线介于钢筋母材和闪光对接焊连接之间, 焊网钢筋疲劳应力幅仅比钢筋

母材低 3.6%,表现出很好的疲劳特性。

(3) 在加载应力比相同时,随焊网受力钢筋直径的增加,疲劳应力幅呈降低趋势;在焊网受力钢筋直径相同时,随加载应力比增加,疲劳应力幅也呈降低趋势;焊网钢筋试件不同制作方式比较时,焊接工艺参数相同情况下工厂单独制作试件的疲劳应力幅较低,所以在对焊网钢筋进行疲劳性能评定时应统一试件的加工制作方式。加载应力幅一定时,随着焊接电流增加,焊网钢筋疲劳寿命呈线性降低趋势;依据试验结果得到的拟合曲线方程可以根据电阻焊电流推算焊网钢筋的疲劳寿命;在焊网钢筋点焊牢固性得到保证时尽可能采用较低的电流参数,以有利于焊网钢筋的抗疲劳性能。

(4) 通过本试验研究,证明电阻焊成型网片工艺可行,在合理焊接参数下能够保证焊网钢筋具有较高的抗疲劳性能,满足设计及规范要求。在智能建造标准不断提高的大背景下,应积极推广机械化、自动化和智能化的生产技术,达到少人化和提升效率的施工生产目标。

参考文献 (References):

- [1] 伍雁华,张宏,丛勳,等. 装配式成型钢筋骨架设计研究与应用[J]. 工程建设与设计,2023(18):1-4.
(WU Yanhua, ZHANG Hong, CONG Meng, *et al.*. Research and Application of the Design of Prefabricated Reinforcement Cage[J]. Construction & Design for Engineering, 2023(18): 1-4. in Chinese)
- [2] 程茂林,吴中正,杨秀礼,等. 基于网片弯折成型的超高索塔钢筋部品装配化施工工法[J]. 公路,2022,67(1):145-150.
(CHENG Maolin, WU Zhongzheng, YANG Xiuli, *et al.*. Assembly Construction Method of Super-High Bridge Tower Reinforcing Parts Formed by Integrated Mesh Bending [J]. Highway, 2022, 67(1): 145-150. in Chinese)
- [3] 赵泳茗. 轨道桥梁 HRB400 钢筋疲劳特性研究[J]. 工程建设,2023,55(5):17-21.
(ZHAO Yongming. Research on Fatigue Characteristics of HRB400 Rebar of Rail Bridges[J]. Engineering Construction, 2023, 55(5): 17-21. in Chinese)
- [4] 盛兴旺,郑纬奇,雷信洲. 铁路工程用闪光对焊连接高强钢筋疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报,2017,50(12):56-61.
(SHENG Xingwang, ZHENG Weiqi, LEI Jizhou. Experimental Study on Fatigue Behavior of High Strength Steel Bars Connected by Flash Butt Welding in Railway Engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(12): 56-61. in Chinese)
- [5] 王亚飞,王伟,刘迎倩. 高强钢筋电弧搭接焊连接疲劳性能试验研究[J]. 铁道工程学报,2021,38(3):113-117.
(WANG Yafei, WANG Wei, LIU Yingqian. Experimental Research on the Fatigue Performance of Lapped Welded Splices of High Strength Reinforcing Bars[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(3): 113-117. in Chinese)
- [6] 顾万黎,朱爱萍. 钢筋焊接网疲劳 S-N 曲线试验研究[J]. 施工技术,2017,46(4):71-74,103.
(GU Wanli, ZHU Aiping. Experimental Research on Fatigue S-N Curves of Welded Fabric[J]. Construction Technology, 2017, 46(4): 71-74, 103. in Chinese)
- [7] 顾万黎,林振伦. 钢筋焊接网疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构,2012,42(1):105-107,90.
(GU Wanli, LIM Chinloon. Experimental Research on Fatigue Properties of Welded Fabric[J]. Building Structure, 2012, 42(1): 105-107, 90. in Chinese)
- [8] 李铖,刘国寿,王时越. 焊接钢筋网疲劳性能试验研究[J]. 科技通报,2022,38(8):79-84.
(LI Cheng, LIU Guoshou, WANG Shiyue. Experimental Study on Fatigue Properties of Welded Steel Fabric[J]. Bulletin of Science and Technology, 2022, 38(8): 79-84. in Chinese)
- [9] 杜闯,高启辉,宋帅,等. 高速铁路简支箱梁钢筋网片十字焊接疲劳性能[J]. 铁道建筑,2024,64(6):71-77.
(DU Chuang, GAO Qihui, SONG Shuai, *et al.*. Fatigue Performance of Cross-Welded Steel Fabric for Simple Supported Box Girder of High Speed Railway [J]. Railway Engineering, 2024, 64(6): 71-77. in Chinese)
- [10] 赵泳茗. 铁路工程应用高强钢筋疲劳特性试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
(ZHAO Yongming. Experimental Study on Mechanical Properties of High-Strength Steel Bar Applied in Railway Engineering [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. in Chinese)
- [11] 林辉,徐升桥. 加载频率对高强钢筋疲劳试验的影响研究[J]. 铁道标准设计,2018,62(2):89-93.
(LIN Hui, XU Shengqiao. Effect of Loading Frequency on Fatigue Test of High-Strength Bars[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(2): 89-93. in Chinese)
- [12] 高策,解会兵,韩冰,等. 疲劳荷载作用下钢-混组合梁界面滑移对其性能影响研究[J]. 桥梁建设,2024,54(4):28-36.
(GAO Ce, XIE Huibing, HAN Bing, *et al.*. Influence of Interface Slip Effect on Fatigue Performance of Steel-Concrete Composite Girder under Fatigue Loads[J]. Bridge Construction, 2024, 54(4): 28-36. in Chinese)
- [13] 安然,王有志,王希岗,等. 正交异性钢桥面板双轴疲劳性能评估[J]. 桥梁建设,2024,54(2):91-98.
(AN Ran, WANG Youzhi, WANG Xigang, *et al.*. Biaxial Fatigue Behavior Evaluation of Orthotropic Steel Deck[J]. Bridge Construction, 2024, 54(2): 91-98. in Chinese)

- [14] 赵而年, 孙洪斌, 张鑫, 等. 高性能桥梁耐候钢典型焊缝接头疲劳性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2022, 52(2): 75-81.
(ZHAO Ernian, SUN Hongbin, ZHANG Xin, *et al.* Experimental Study on Fatigue Properties of Typical Weld Joints of Specialist High-Performance Weathering Steel for Bridge[J]. Bridge Construction, 2022, 52(2): 75-81. in Chinese)
- [15] 汪金辉, 李雪健. U肋全熔透焊接正交异性板构造疲劳性能试验研究[J]. 世界桥梁, 2024, 52(3): 104-110.
(WANG Jinhui, LI Xuejian. Experimental Study on Fatigue Properties of Orthotropic Steel Deck with Full Penetration U Rib-to-Deck Welded Joints[J]. World Bridges, 2024, 52(3): 104-110. in Chinese)
- [16] 康玲, 牟廷敏, 闫忠. 钢管混凝土相贯焊接节点受力分析与疲劳寿命研究[J]. 世界桥梁, 2023, 51(6): 69-75.
(KANG Ling, MOU Tingmin, YAN Zhong. Research on Mechanical Property and Fatigue Life of Tubular Intersecting Welded Joints of Concrete-Filled Steel Tubes[J]. World Bridges, 2023, 51(6): 69-75. in Chinese)
- [17] 何雪, 康泽州, 严基, 等. 海洋环境下耐候钢十字非传力焊接接头腐蚀疲劳性能试验研究[J]. 世界桥梁, 2023, 51(3): 96-104.
(HE Xue, KANG Zezhou, YAN Ji, *et al.* Experimental Study of Corrosion Fatigue Performance of Non-Load-Carrying Cruciform Fillet Welds in Marine Environment[J]. World Bridges, 2023, 51(3): 96-104. in Chinese)
- [18] 张少朋, 张上, 牛远志, 等. 高铁预应力混凝土简支箱梁钢筋骨架部品装配化设计研究[J]. 铁道建筑, 2023, 63(12): 97-101.
(ZHANG Shaopeng, ZHANG Shang, NIU Yuanzhi, *et al.* Research on Assembly Design of Components for Rebar Skeleton in Prestressed Concrete Simple Supported Box Girder of High Speed Railway[J]. Railway Engineering, 2023, 63(12): 97-101. in Chinese)
- [19] 陈士忠, 白云飞, 刘子金, 等. 焊接参数对钢筋骨架主筋力学性能影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(5): 935-941.
(CHEN Shizhong, BAI Yunfei, LIU Zijin, *et al.* The Influence of Welding Parameters on Mechanical Properties of Main Reinforcement of Steel Skeleton[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2021, 37(5): 935-941. in Chinese)



ZHANG Shaopeng

张少朋

1987—, 男, 高级工程师
2011年毕业于石家庄铁道大学土木工程专业, 工学学士, 2014年毕业于石家庄铁道大学结构工程专业, 工学硕士。研究方向: 桥梁勘察设计 & 智能建造
E-mail: zhangshaopeng@crdc.com



ZHANG Zhiguo

张志国

1971—, 男, 教授
1993年毕业于石家庄铁道学院桥梁工程专业, 工学学士, 1998年毕业于西南交通大学桥梁与隧道工程专业, 工学硕士, 2005年毕业于哈尔滨工业大学固体力学专业, 工学博士。研究方向: 结构稳定与疲劳, 智能建造技术
E-mail: zhangzhg@stdu.edu.cn



NIU Yuanzhi

牛远志

1974—, 男, 正高级工程师
1997年毕业于西南交通大学桥梁工程专业, 工学学士。研究方向: 桥梁工程智能建造
E-mail: niuyuanzhi@crdc.com



LI Yan

李艳

1980—, 男, 正高级工程师
2002年毕业于哈尔滨工业大学材料科学与工程专业, 工学学士, 2005年毕业于哈尔滨工业大学结构工程专业, 工学硕士。研究方向: 铁路桥梁设计与计算分析
E-mail: liyan04@crdc.com



ZHANG Xueze

张学泽

1998—, 男, 硕士生
2020年毕业于西南石油大学土木工程与测绘专业, 工学学士。研究方向: 结构稳定与疲劳
E-mail: 646027605@qq.com

(编辑: 王金枝)