

高强风电钢 Q420NE 焊接疲劳性能研究

韩 钧, 黄 利, 袁晓鸣

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: 为了评价高强风电钢 Q420NE 钢板的焊接疲劳性能, 采用埋弧焊工艺对厚度为 20 mm 的钢板进行焊接, 接头通过疲劳试验获得疲劳趋势图(S-N 曲线), 并以此为依据计算出设定状态下的疲劳极限。当反复加载数设定为 10^7 次时, 实测的焊接接头最大疲劳应力约为 300 MPa, 对应的应力幅为 150 MPa, 其对应的存活率为 50%; 当存活率为 97.7% 时, 其最大疲劳应力约为 284 MPa, 对应的应力幅为 142 MPa。

关键词: 风电钢; 焊接; 疲劳极限; 应力

中图分类号: TG457.11

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2026)02-0031-04

Research on Welding Fatigue Performance of High Strength Wind Power Steel Q420NE

Han Jun, Huang Li, Yuan Xiaoming

(Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: In order to evaluate the welding fatigue performance of plate with high strength wind power steel Q420NE, the plate with the thickness of 20 mm is welded with submerged arc welding process, fatigue trend diagram(S-N curve) of welded joint is obtained through fatigue test and fatigue limit under set condition is calculated based on this. When repetitive loading is set to be 10^7 times, the maximum measured fatigue stress of welded joint is approximately 300 MPa, corresponding stress amplitude is 150 MPa and survival rate is 50%; when survival rate is 97.7%, its maximum fatigue stress is approximately 284 MPa and corresponding stress amplitude is 142 MPa.

Key words: wind power steel; welding; fatigue limit; stress

当前风电行业正加速向“大型化、高功率、海上化”转型, 陆上风机单机容量从 2.5 MW 升级至 5~10 MW, 海上风机达 15~20 MW, 相应的风机装备尺寸(塔架高度超 150 m、叶片长度超 100 m)与结构重量剧增, 使得风机用钢焊接接头面临更严苛的疲劳挑战^[1-5]。Q420NE 高强钢板用于制作风机塔架, 具有较高的强度、良好的韧性和优良的焊接性能。本文以 Q420NE 高强钢板为研究对象, 通过焊

接接头疲劳试验得到疲劳极限趋势图(S-N 曲线), 推算出特定存活率状态下的疲劳极限。

1 焊接试板

Q420NE 焊接试板成分如表 1 所示, 厚度 20 mm, 焊接接头及焊接顺序如图 1 所示。焊接材料选用 KGS-70GX 焊丝和 KGF-102G 焊剂。采用埋弧焊接工艺, 焊接工艺及参数见表 2 与表 3。

表 1 化学成分(质量分数)

													%	
C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Cu	Mo	N	CEV	
≤0.20	≤0.60	≤1.70	≤0.025	≤0.005	≤0.050	≤0.120	≤0.050	≤0.30	≤0.80	≤0.40	≤0.10	≤0.025	≤0.45	

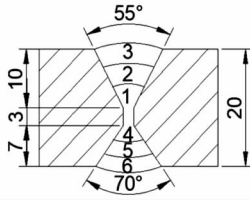


图 1 焊接接头及焊接顺序

表 2 焊接工艺

预热温度 /°C	层间温度 /°C	背面清根 方法	电源电极
100	130 ~ 150	机械打磨	DCEP

注:打底焊后,背面进行清根和打磨处理。

表 3 焊接参数

焊道	焊接方法	焊丝直径 /mm	焊接电流 I /A	焊接电压 U /V	焊接速度 v /(mm·min ⁻¹)	层间温度 /°C	热输入 /(kJ·mm ⁻¹)
1	GMAW	1.2	250	27.0	378	100	0.86
2	SAW	4.0	550	30.6	420	100	2.40
3	SAW	4.0	650	31.5	420	144	2.93
4	SAW	4.0	650	32.3	420	146	3.00

2 疲劳试验

从焊接试板上截取如图 2 所示的焊接接头疲劳试样,疲劳试样留存了初始的焊缝,以真实评价接头的疲劳极限。

结合风机塔筒的实际受力模式,接头疲劳试验采用轴向拉-拉的加载方式,应力比 R 设定为 0.5 (即最小加载应力与最大加载应力的比值为 0.5),应力循环采用正弦波。疲劳极限采用升降法测定,而反复加载基数设定为 10^7 次。疲劳试验的应力加载模式如图 3 所示,疲劳试验情况如图 4 所示。加载次数达到设定要求,试验会自动终止,此时的试样状态完好。如果试验在加载次数设定要求前中止,这种情况下试样会在焊趾处产生裂纹。焊接接头在不同应力条件下的疲劳极限如图 5 所示,其中图 5(a)采用最大应力作为应力表征方式,而图 5(b)则采用应力幅作为应力表征方式。

疲劳极限可以通过函数方程的经验公式进行拟合,即

$$S = S_0 \times N^b \text{ 或 } \Delta\sigma = \Delta\sigma_0 \times N^b \quad (1)$$

式中: S 为加载应力; $\Delta\sigma$ 为单次循环加载应力的应力幅,即 $\Delta\sigma = S_{\max} - S_{\min}$; N 为循环次数; S_0 、 $\Delta\sigma_0$ 、 b 为相应疲劳试验条件下的常数,与材料成分、试样尺

寸和加载形式有关。

将幂函数方程式(1)各自取对数后,可以得到线性表达式(2)。

$$\text{Lg}S = \text{Lg}S_0 + b \times \text{Lg}N \text{ 或 } \text{Lg}\Delta\sigma = \text{Lg}\Delta\sigma_0 + b \times \text{Lg}N \quad (2)$$

采用最小二乘法拟合试验获得的疲劳极限数据,计算得出 $S_0 = 964.3 \text{ MPa}$, $\Delta\sigma_0 = 482.1 \text{ MPa}$, $b = -0.0751$,根据试验数据拟合得到 $S-N$ 曲线: $S = 964.3 \times N^{-0.0751}$ 或 $\Delta\sigma = 482.1 \times N^{-0.0751}$,该 $S-N$ 曲线对应的存活率为 50%。每组应力与对应的疲劳极限数据都满足正态分布,可得到在不同存活率 P 下的最大疲劳极限曲线。例如,当存活率 P 为 97.7% 时,计算得到 $S-N$ 曲线为 $S = 730.5 \times N^{-0.0587}$ 或 $\Delta\sigma = 365.2 \times N^{-0.0587}$ 。



图 2 焊接接头疲劳试样

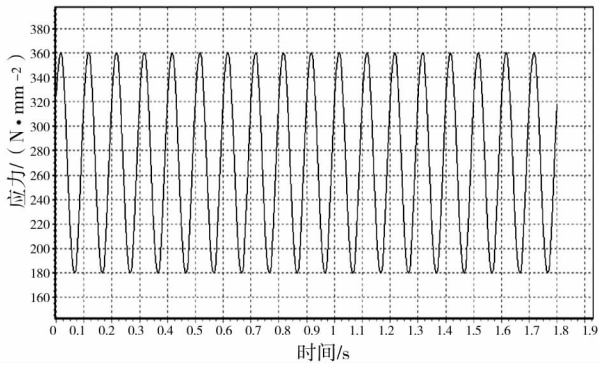
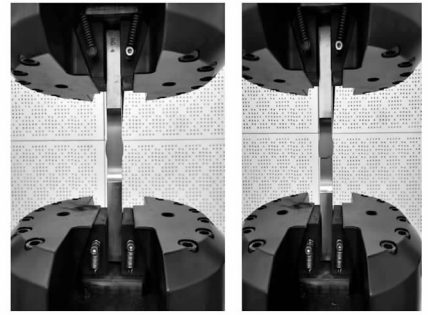
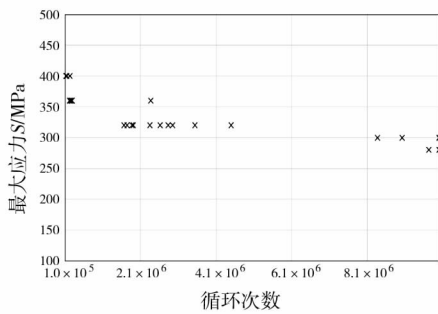


图3 应力加载模式

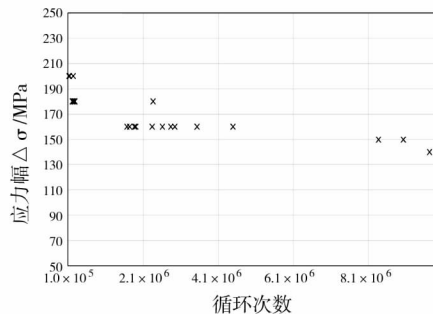


(a) 试样加载 (b) 断裂后

图4 疲劳试验



(a) 最大应力条件

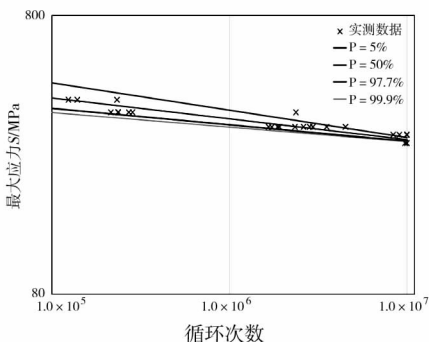


(b) 应力条件

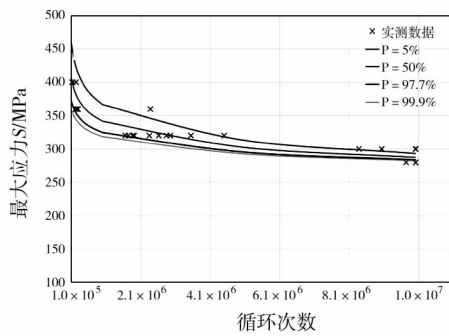
图5 焊接接头在不同应力条件下的疲劳极限

拟合后的接头疲劳极限曲线如图6所示。由图6可知,在设计应力循环模式下,Q420NE 钢板焊接接头的最大疲劳应力约为 300 MPa。由图6可见,当存活率设定为 97.7%时,最大疲劳应力约为 284 MPa,相较试验测得的极限应力略有降低。在设计应力循环模式下,有 97.7% 的试样的最大疲劳应力会高于 284 MPa。

图7为采用应力幅表征的焊缝在不同存活率下的疲劳极限曲线。可以看出,在设计循环模式下,Q420NE 钢板焊缝的最大疲劳应力幅约为 150 MPa,与此相对应,当将存活率设定为 97.7%时,最大疲劳应力幅约为 142 MPa,在设计循环模式下,有 97.7% 的试样的最大疲劳应力幅会高于 142 MPa。



(a) 基于公式(2)



(b) 基于公式(1)

图6 焊接接头在不同存活率下的疲劳极限曲线(应力表征)

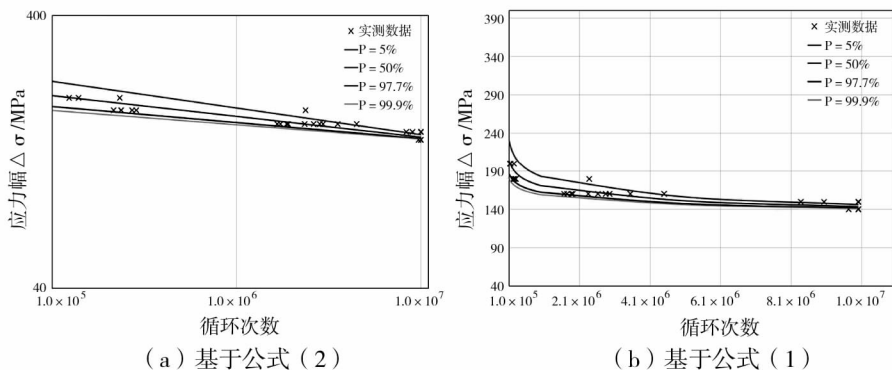


图 7 焊接接头在不同存活率下的疲劳极限曲线(应力幅表征)

3 结束语

通过一系列疲劳试验,拟合出 Q420NE 钢板焊接试板的焊接接头在最小加载应力与最大加载应力比值为 0.5 的疲劳极限曲线。当应力循环次数设定为 10^7 次时,焊接接头实测的最大疲劳应力约为 300 MPa,对应的应力幅为 150 MPa,其对应的存活率为 50%;当存活率为 97.7% 时,其最大疲劳应力约为 284 MPa,对应的应力幅为 142 MPa。

参 考 文 献

[1] 张鹏林,李军,徐生东,等. 风电塔筒用 Q355E 钢焊接接头在模拟酸雨环境下的腐蚀特性研

究[J]. 机械研究与应用,2024,37(5):6-12.

[2] 张晨,张保成,张开升,等. 海上漂浮式风电机组塔筒优化方法研究[J]. 太阳能学报,2024,45(6):652-660.

[3] 王宇航,周绪红,杨琳,等. 风电机组支撑结构技术发展现状及趋势[J]. 钢结构(中英文),2024,39(10):1-13.

[4] 祝武杰,莫福涛,郑龙. 海上风电风机机舱及轮毂组合体吊装施工技术研究[J]. 水电与新能源,2024,38(12):69-71.

[5] 王晓理,李建科,杨凤志,等. 在役风电项目经济寿命分析[J]. 能源工程,2025,45(1):27-31.

(上接第 25 页)

[4] 董嘉兵,王慧军,陈林,等. 新型 H380 级别高强度钢轨热处理工艺的数值模拟[J]. 特殊钢,2020,41(4):1-5.

[5] 费俊杰,周剑华,董茂松,等. 全长在线热处理钢轨生产工艺研究及产品开发[J]. 铁路技术创新,2019(2):69-75.

[6] 陈科澎,汪洋,张惠泽英,等. 百米 U75V 钢轨在线热处理工艺优化[J]. 热处理技术与装备,2024,45(2):7-11.

[7] 李海涛. 关于在线热处理技术优化钢材理化性能的分析与应用[J]. 中国金属通报,2022(23):177-179.