

海上风电用S460钢的疲劳行为研究

毛凌波¹, 余乐瑶¹, 黄传清², 胡战²

1. 广东工业大学 广东广州 510006
2. 宝钢湛江钢铁有限公司 广东湛江 524072

摘要: 为了分析不同控冷控轧 (TMCP) 工艺条件下的组织对S460海上风电用钢疲劳性能的影响, 根据前期试验研究结果, 选用综合力学性能最优的S460-14号样板和对比样板S460-11进行了疲劳性能测试, 通过对S460钢的力学性能、断口形貌、EBSD观察和织构分析, 揭示了海上风电用S460钢的疲劳行为机制。

关键词: 海上风电; S460钢; TMCP; 疲劳

Research on fatigue behavior of S460 steel for offshore wind power

MAO Lingbo¹, YU Leyao¹, HUANG Chuanqing², HU Zhan²

1. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China
2. Baosteel Zhanjiang Iron & Steel Co., Ltd., Zhanjiang 524072, Guangdong, China

Abstract: In order to analyze the effect of microstructure under different thermo-mechanical control processes (TMCP) on the fatigue performance of S460 offshore wind power steel, this work selected the S460-14 sample with the best comprehensive mechanical properties and the comparison sample S460-11 based on the previous experimental research results for fatigue performance testing. Through the mechanical properties, fracture morphology, EBSD observation, and texture analysis of S460 steel, the fatigue behavior mechanism of S460 steel for offshore wind power was revealed.

Keywords: offshore wind power; S460 steel; TMCP; fatigue

1 序言

作为利用再生清洁能源——风能转化为电能的风力发电技术的重要部分, 海上风电技术的研究备受关注^[1-3]。目前, 我国海上风力发电已经形成规模, 截至2024年3月底, 全国海上风电并网容量达3803万kW^[4]。海上风电的发展对风电装备用钢提出了更高的要求, 除了关注钢材在海洋环境中的腐蚀情况^[5-7], 在复杂的海洋气候中对钢材的力学性

能也需要更加深入的研究^[8-10]。其中通过控冷控轧 (Thermo Mechanical Control Process, TMCP) 工艺来控制组织结构, 是获得高强度微合金钢目标性能的有效手段^[11, 12]。目前, 已有不少学者及企业采用控冷控轧对海工用钢的性能进行研究。潘中德等^[13]对成分以及TMCP工艺进行设计, 研发的S420ML钢满足BS EN10025-4: 2004《热轧结构钢产品 第4部分: 热机械轧制可焊接细晶粒结构钢交货技术条

基金项目: 广东省促进经济高质量发展专项资金海洋经济发展资助项目 (GDOE[2019]A08号)。

件》要求，低温断裂韧性好、强度高、焊接性能优异，能够满足海上风电设备需求。孙震等^[14]对不同终冷温度的S460钢从组织性能上进行分析，发现降低终冷温度带来的更大的过冷度，可明显地细化晶粒，终冷温度为570℃的情况下平均晶粒尺寸仅为1.89μm。王华等^[15, 16]在多阶段控冷控轧技术下，结合合金成分设计以及仿真模拟获得了多项用于船舶特殊钢的创新成果。但是，目前海上风电用钢需要考虑的抗疲劳性能的研究较少，因此对疲劳行为机制还需要进一步研究。

为了分析不同控冷控轧工艺条件下的组织对S460海上风电用钢疲劳性能的影响，本文根据前期试验研究结果，选用综合力学性能最优的S460-14号样板和对比样板S460-11进行了疲劳性能测试，通过对S460钢的力学性能、断口形貌、EBSD观察和织构分析，揭示了海上风电用S460钢的疲劳行为机制。

2 试验材料及方法

2.1 试验材料

试验钢坯取自宝钢湛江钢铁有限公司中厚板厂，其化学成分见表1。由于试验轧机的开口度有限，因此用于热轧试验研究的连铸坯厚度为150mm。

表1 S460试验钢化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Alt	Nb	Ti	Cu	Ni	Cr	Mo	N
0.08	0.08	1.52	115	9	0.039	0.02	0.013	0.27	0.35	0.02	0.12	37

注：P、S、N的含量单位为ppm。

轧制试验在东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室φ450mm轧机上进行，控制轧制采用常规两阶段轧制，成品钢板厚度为12mm。为了研究冷却速率、终冷温度对组织与性能的影响，设定热轧试验压下规程见表2，具体TMCP工艺见表3。

试验研究选择了综合力学性能最优的S460-14样品和对比样品S460-11进行疲劳性能测试。疲劳试样尺寸按GB/T 3075—2008《金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法》制定，经车削加工而成。圆柱试样总长度110mm，夹持端长度总计79.6mm，直径12mm并开螺纹；平行段直径8mm。具体试样尺寸如图1所示。

表2 S460钢热轧试验压下规程

道次	0	1	2	3	4	5 (待温)	6	7	8	9
开口度/mm	150	130	100	75	55	40	30	22	16	12
压下率/%	—	13	23	25	26	27	25	26	27	25
等效应变	—	0.16	0.30	0.33	0.36	0.37	0.33	0.36	0.37	0.33
应变速率/(1/s)	—	4.11	6.15	7.39	8.92	10.58	11.72	14.13	16.76	18.55

表3 S460钢TMCP工艺

编号	一阶段 开轧温 度/℃	一阶段 终轧温 度/℃	二阶段 开轧温 度/℃	二阶段 终轧温 度/℃	出水 温度 /℃	冷却 时间 /s	冷却 速度 /(℃/s)
S460-10	1033	1014	814	832	671	12	11.75
S460-11	1032	1013	812	838	666	6	25.33
S460-12	1023	1017	811	823	674	4.5	28.67
S460-13	1029	1014	812	840	612	9	23.11
S460-14	1029	1011	813	830	570	12	20
S460-15	1032	992	870	868	630	12	18.17

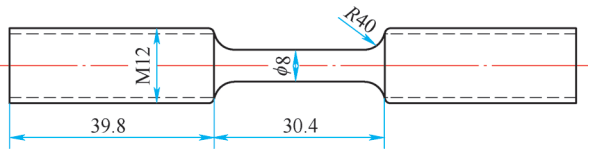


图1 疲劳试样结构示意图

2.2 试验方法

疲劳试验为拉-拉室温疲劳试验，采用应力控制，其应力比 $R=0$ ，循环载荷频率为正弦波80Hz，试验参照GB/T 3075—2008《金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法》进行。应力幅从略低于抗拉强度开始依次递减，直至疲劳寿命达到 10^7 周次。取至少6级应力水平，各级应力水平上试样的数量分配随着应力水平的降低而逐渐增加，每级应力水平上的试样数量不少于3个。应力减量10~20MPa，用升降法求得条件疲劳极限的S-N曲线。具体疲劳测试工艺如图2所示。

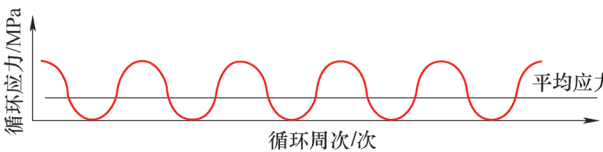


图2 疲劳测试工艺示意

3 S460钢的疲劳行为

3.1 S460钢的疲劳性能

前期已对S460的工艺优化和组织性能做了全面的试验测试,对不同的未再结晶区轧制温度、冷却速度、终冷温度工艺下的显微组织及力学性能进行了研究,得到了综合力学性能较好的S460-14号钢。对比样板S460-11与S460-14的力学性能测试结果见表4。从表4可看出,S460-11号和S460-14号钢的疲劳极限分别为450MPa和500MPa。值得注意的是,在应力比 $R=0$ 的条件下,S460-11号钢的疲劳极限略低于屈服强度,这可能是由于S460-11号钢在奥氏体区进行超快速冷却,但是冷却时间仅有6s,冷却后钢板心部温度较高,返温后钢板整体温度较高,因此冷却返温后组织不均匀,且存在较高残余应力。从而导致在循环加载过程中裂纹萌生提前,其屈服强度 $<460\text{MPa}$,不满足对强度的要求。而S460-14号钢在奥氏体区进行冷却速度相对较低的超快速冷却,一方面可抑制动态再结晶/亚动态再结晶晶粒的长大或抑制奥氏体的静态再结晶软化,进而在相变前获得细小的奥氏体晶粒,提高相变形核位置,同时可以有效地降低相变点,增加相变驱动力,提高形核率,获得细小的铁素体晶粒;另一方面又有效防止了冷却返温后的组织不均匀性。众所周知,晶粒细化有助于延迟裂纹萌生,这可能是S460-14号钢疲劳极限较高的原因。

表4 S460-11与S460-14疲劳性能对比 (MPa)

编号	屈服强度	抗拉强度	疲劳极限 (峰值应力)
S460-11	453	582	450
S460-14	481	623	500

S460-11与S460-14的显微组织如图3所示。从图3可看出,经过不同的TMCP工艺后,室温下得到的显微组织为多边形铁素体和珠光体。其中,多边形铁素体所占比例较多,珠光体所占比例较少,S460-11的晶粒尺寸较S460-14晶粒尺寸粗大,这也与其晶粒尺寸分布统计相一致(见图4)。

进一步对最优性能的样品S460-14和对比样品S460-11进行了不同应力幅度的疲劳性能测试。因S460-11和S460-14样品钢的屈服强度和抗拉强度有差异,因此应力等级略有差异。其中,S460-11

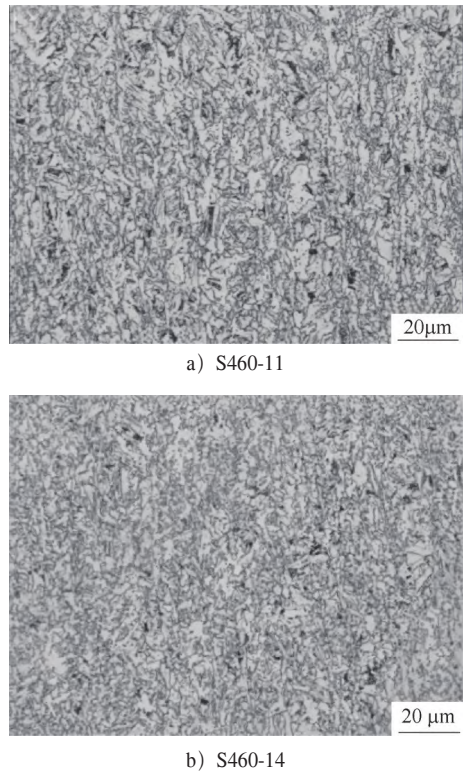


图3 S460-11与S460-14的金相组织对比

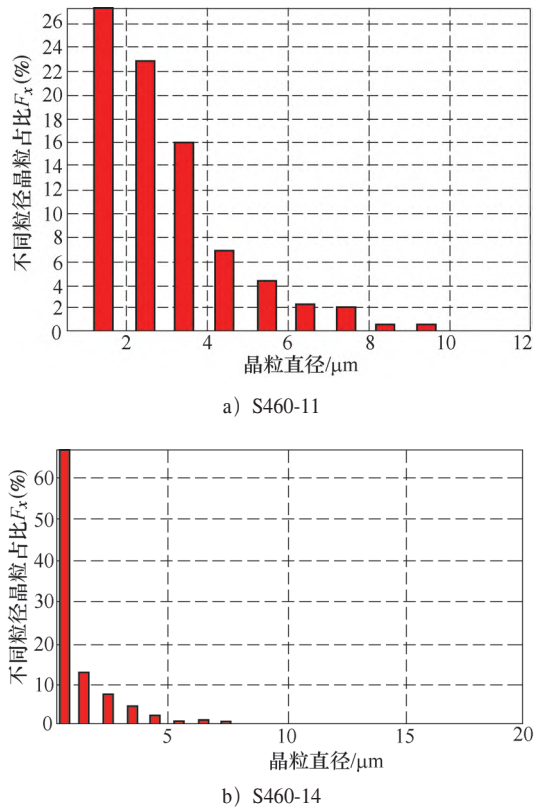


图4 S460-11与S460-14的晶粒尺寸分布

的应力等级从高到低依次为560MPa、540MPa、520MPa、500MPa、480MPa、460MPa、450MPa;

S460-14的应力等级从高到低依次为570MPa、560MPa、550MPa、540MPa、520MPa、510MPa、500MPa。得到了S460-11和S460-14样品钢的S-N曲线,如图5所示。

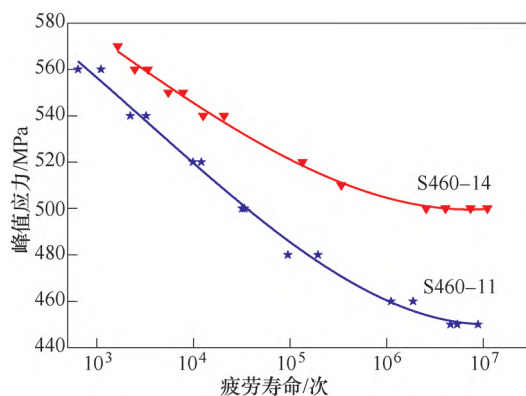


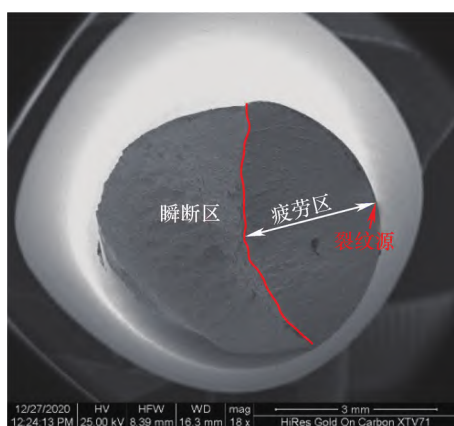
图5 S460-14和S460-11号钢的S-N曲线

3.2 S460钢疲劳断口分析

图6、图7所示分别为S460-11和S460-14风电钢的疲劳断口宏观形貌。从图6、图7可看出,在各级

应力等级下,裂纹源几乎都表现为收敛类源区,并且都分布在表面或近表面。这是因为车削样品的表面存在着较多应力集中和缺陷,且多数样品的疲劳断口宏观形貌图都观察到不止一处裂纹源。此外,从宏观形貌图的疲劳区可以观察到明显的疲劳贝纹线,呈海滩条带状。在疲劳贝纹线扩展的尽头是瞬断区,且瞬断区的范围随着应力等级的降低而逐渐减小。值得注意的是,在S460-14钢的疲劳断口中发现了多个裂纹源,不同位置的裂纹源引发的疲劳贝纹线交织在一起,形成了一道宽而高的“脊岭”,并在该位置有效阻碍了疲劳贝纹线的扩展,如图7d蓝色虚线框内标记所示。

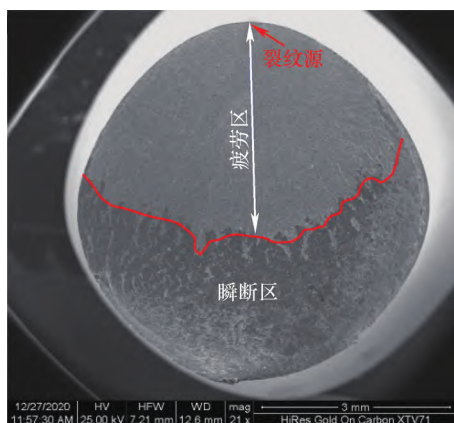
图8、图9所示分别为S460-11和S460-14样品钢断口疲劳区微观形貌。由图8、图9可知,S460风电钢疲劳断口疲劳区的疲劳辉纹的宽度和深度均较大,疲劳辉纹的间距接近50 μ m(见图9d)。S460-11号和S460-14号风电钢经过循环加载以后,断面上也出现了大量



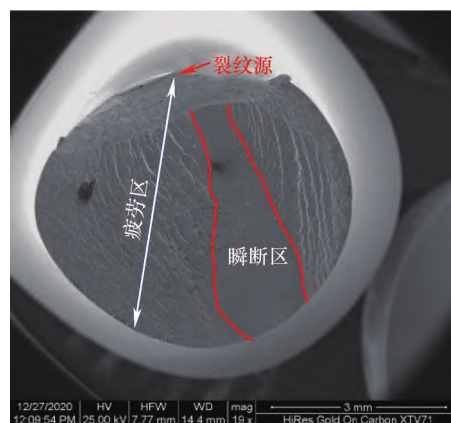
a) $\sigma_{\max} = 540\text{MPa}$



b) $\sigma_{\max} = 520\text{MPa}$



c) $\sigma_{\max} = 500\text{MPa}$



d) $\sigma_{\max} = 480\text{MPa}$

图6 S460-11号风电钢疲劳断口宏观形貌

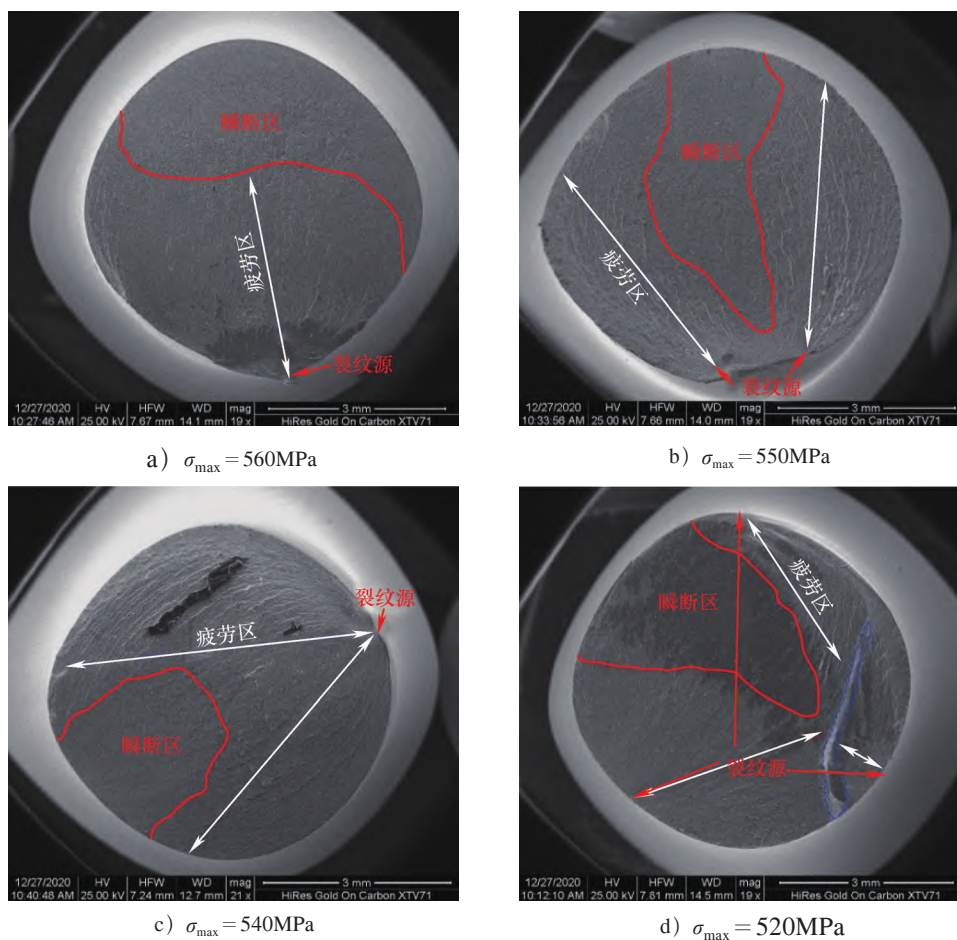


图7 S460-14号风电钢疲劳断口宏观形貌

的侵入/挤出和二次裂纹。二次裂纹沿垂直于疲劳辉纹的方向扩展（见图8a、b中黄色虚线，红色实线标记为疲劳辉纹）。此外，二次裂纹长度较长，且在二次裂纹方向出现了类似于疲劳辉纹的台阶状形貌（见图8a中橙色圈标记）。大量的二次裂纹吸收了大量的塑性变形功，延迟了长裂纹的生成，从而提高了材料的疲劳性能。随着循环应力等级的降低，二次裂纹数量逐渐减少，并出现了明显的侵入/挤出形貌。此外，在较低应力等级下，虽然有侵入/挤出，但也观察到大量的二次裂纹，这表明不同应力等级下材料吸收循环变形功的机制有差别，在较低应力等级时，材料依靠侵入/挤出+二次裂纹吸收应力集中延迟开裂，而在较高应力等级时材料依靠二次裂纹机制延迟开裂。

此外，在S460-14风电钢疲劳断口的疲劳区侵入/挤出之外观察到大量的韧窝，并且分布在一条疲劳辉纹两侧（见图9c）。表明S460-14风电钢循环加载过程中，每循环一定周次，在突破一级疲劳辉纹

形成下一级疲劳辉纹的过程中都会产生大量的塑性变形。这可能与S460-14风电钢组织特征为多边形铁素体+珠光体有关，其中多边形铁素体所占比例较多，珠光体较少。这种组织特征在提高加工硬化能力、降低屈强比的同时，也提高了材料在循环加载条件下疲劳裂纹扩展抗性。

对S460-11和S460-14试验钢距离断口界面（1mm）的位置进行了TEM观察，结果如图10所示。从图10中观察到大量的位错滑移，证明试验钢在疲劳断裂前产生了大量的塑性变形，位错滑移较为充分。此外，在图10a、b中均能看到位错滑移至于晶界处，并且大量的弥散析出相对位错运动造成了阻碍。晶界处原子排列不规则，因此在常温下晶界的存在会对位错运动起阻碍作用，致使塑性变形抗力提高，从而延迟了疲劳裂纹的产生，析出相也会产生类似的作用。

采用Thermo-Calc热力学软件计算了S460试验钢的热力学平衡相图，如图11所示。从图11可看出，

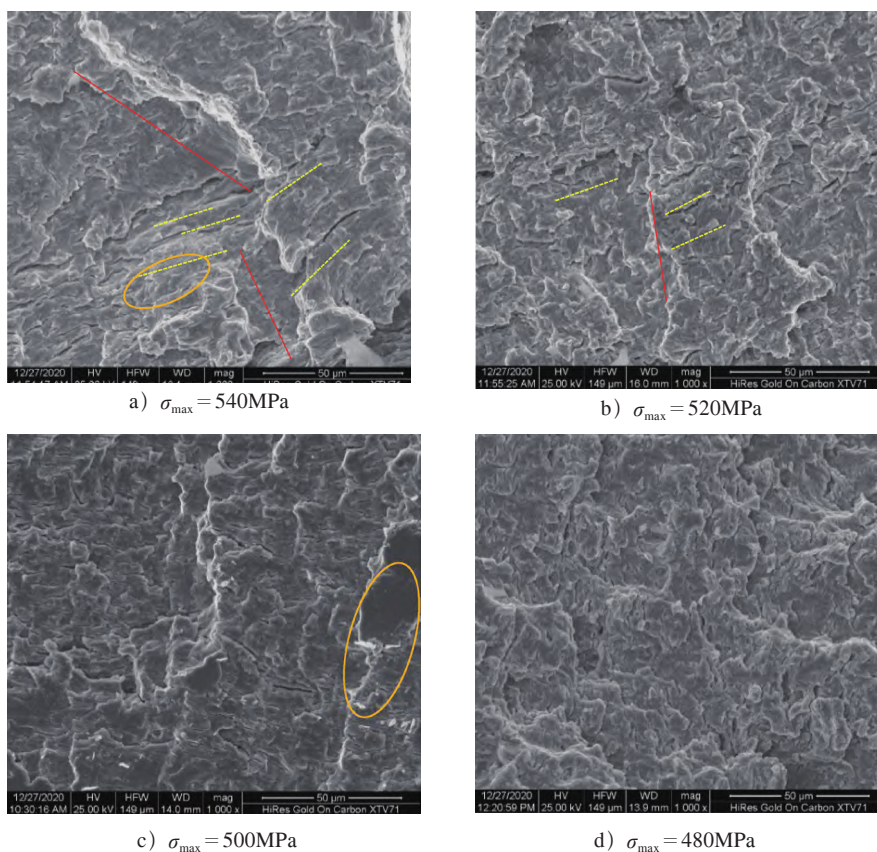


图8 S460-11风电钢疲劳断口微观形貌

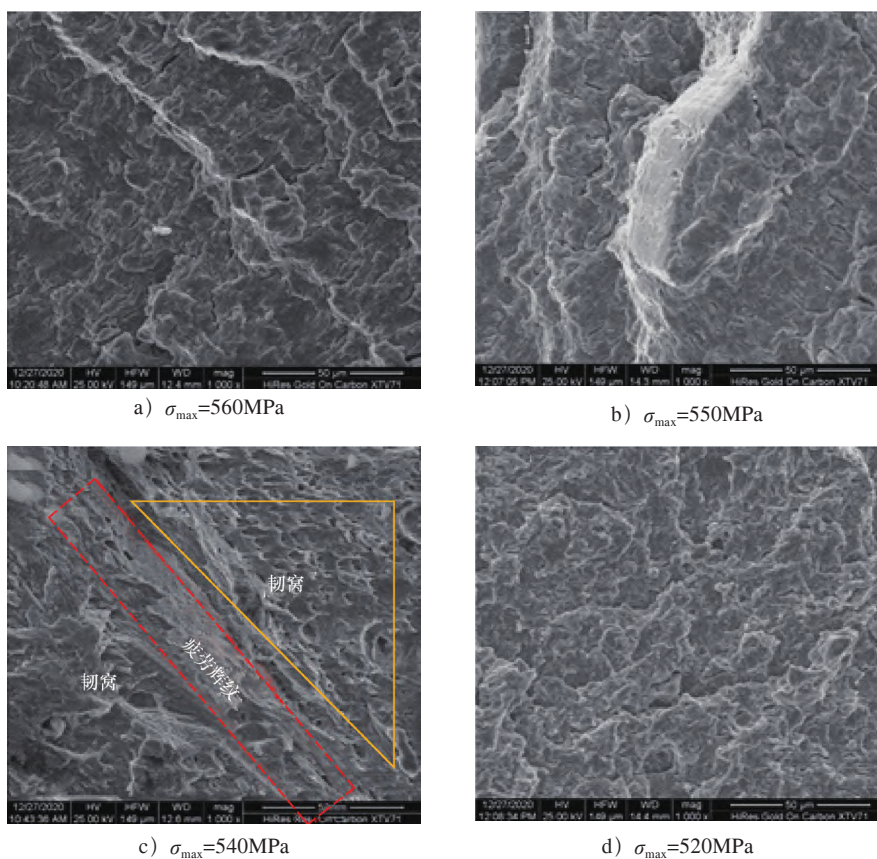


图9 S460-14风电钢疲劳断口微观形貌

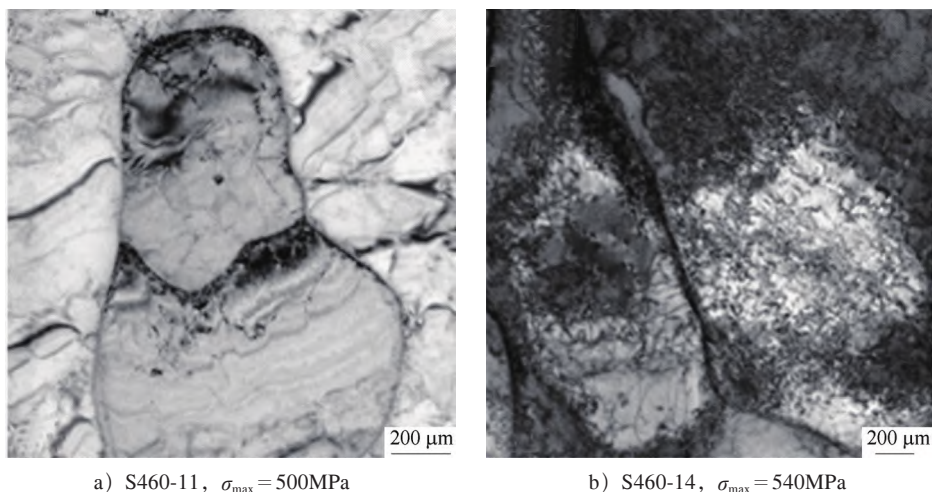


图10 S460风电钢疲劳断口TEM图

高温区域存在以TiN、NbC为主的析出相。一方面，TiN的固溶度较小，全固溶温度较高；另一方面，少量高温析出相可有效钉扎晶界，抑制奥氏体的粗化。

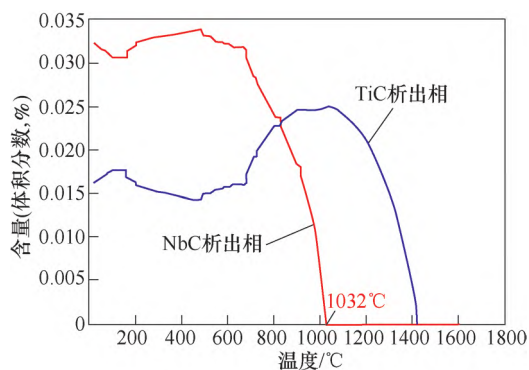


图11 S460试验钢的热力学平衡相图

3.3 S460钢断后EBSD观察和织构分析

为进一步探究S460钢疲劳性能的影响因素，对S460-11和S460-14号钢不同应力等级下的疲劳样品断后近断面（距离断裂界面1mm）进行了EBSD表征，如图12所示。由图12可知，S460-11和S460-14样品钢经过不同应力等级的循环加载后，IPF图中并没有观察到明显的变形组织，晶粒没有拉长和扭转现象发生，但是其晶体取向均产生不同程度的变化。经过计算，S460-11和S460-14样品钢的平均晶粒尺寸为 $2.72\mu\text{m}$ 和 $1.89\mu\text{m}$ （晶粒尺寸分布见图4）。为探究S460-11和S460-14样品钢疲劳加载过程中晶体取向的变化，进行了进一步的ODF分析。

通过Texture软件计算得出各个试样的ODF图。 $\varphi_2=0^\circ$ 的ODF截面取向分布如图13所示。由图13可

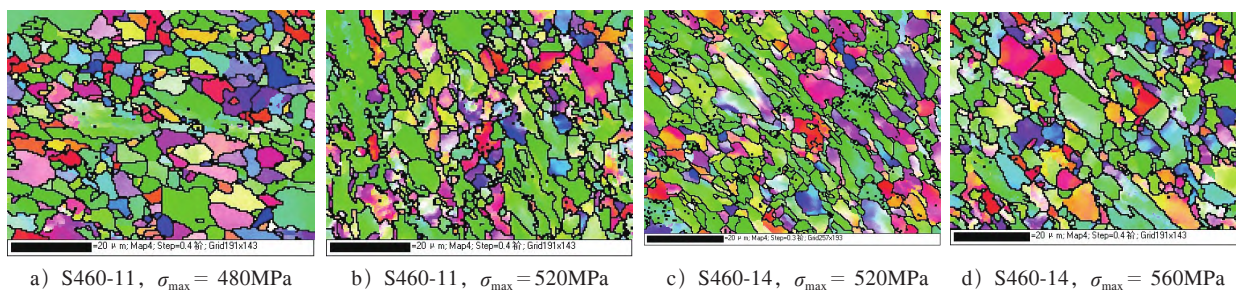


图12 S460风电钢疲劳断口截面EBSD

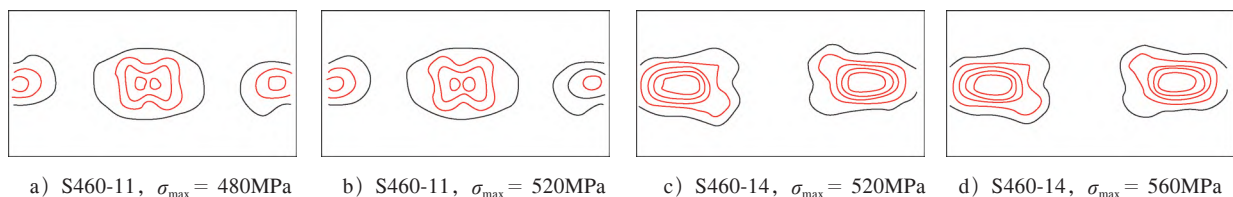


图13 S460风电钢疲劳断口截面取向分布 (ODF)

知, S460-11和S460-14样品钢在经过循环加载之后均出现了较强的高斯织构, 并且随着应力等级的提高, 高斯织构的强度也逐渐提高。其中, S460-14与S460-11样品钢相比, 其高斯织构更强。

4 结束语

本文对S460钢典型工艺进行了不同应力幅的疲劳测试, 获得了相应 $S-N$ 曲线。主要结论如下。

1) 采用最优工艺制备的S460-14试验钢条件疲劳极限(应力比 $R=0$)达到了500MPa, 疲劳极限高出屈服强度19MPa, 而S460-11试验钢, 虽然疲劳极限也达到了450MPa, 但略低于屈服强度。S460-14试验钢良好的疲劳性能源于TMCP工艺过程中的超快速冷却与合适的冷却时间, 在该工艺条件下形核率高、晶粒细化、组织均匀, 延缓了疲劳裂纹的萌生。

2) S460钢在不同应力等级下表现出了不同的延迟开裂机制。在较低应力等级时, 材料依靠侵入/挤出+二次裂纹吸收应力集中延迟开裂, 而在较高应力等级时材料依靠二次裂纹机制延迟开裂。

3) 新一代TMCP工艺中的超快速冷却获得了S460钢的晶粒细化, 高温时存在的以TiN和NbC为主的析出相促成了弥散强化, 再加上形成于疲劳加载过程的织构强化, 三者共同的耦合作用是S460钢的疲劳性能提高的主要原因。

参考文献:

- [1] 时智勇, 王彩霞, 李琼慧. “十四五”中国海上风电发展关键问题[J]. 中国电力, 2020, 53 (7): 8-17.
- [2] 阳杰, 张建华, 马兆荣, 等. 海上风电与海洋牧场融合发展趋势与技术挑战[J]. 南方能源建设, 2024, 11 (2): 1-16.
- [3] SONG D, FAN T, LI Q, et al. Advances in offshore wind[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12 (2): 359.
- [4] 国家能源局. 国家能源局2024年二季度新闻发布会文字实录[Z]. 北京: 国家能源局, 2024.
- [5] 刘宇茜. 三种海工钢在海洋环境中的腐蚀行为对比研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2023.
- [6] MEHMANPARAST A, VIDAMENT A. An accelerated corrosion-fatigue testing methodology for offshore wind applications[J]. Engineering

Structures, 2021, 240: 112414.

- [7] 铁元芬. 海上风电钢结构防腐问题以及解决对策探究[J]. 中国设备工程, 2024 (6): 132-134.
- [8] ATTA-AGYEMANG S, KESSE M A, KAH P, et al. Improvement of strength and toughness: The effect on the weldability of high-strength steels used in offshore structures[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2017, 231 (3): 369-376.
- [9] ZHENG T, ZHAO C, HE J. Research on fatigue performance of offshore wind turbine blade with basalt fiber bionic plate[J]. Structures, 2023, 47: 466-481.
- [10] 刘鹏, 陈继雄. 一种海上风电用S355ML钢的研制方法及其力学性能[J]. 理化检验 (物理分册), 2022, 58 (12): 31-34, 42.
- [11] 王国栋. 中国中厚板轧制技术与装备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [12] 肖心萍. 增氮对控轧控冷低碳Mo-V-Ti钢微观组织和力学性能的影响[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [13] 潘中德, 李伟, 胡其龙, 等. 高性能风电用S420ML宽厚钢板的研制与开发: 第十二届中国钢铁年会论文集[C]. 北京: 中国金属学会, 2019.
- [14] 孙震, 高朋, 刘振宇. 终冷温度对风电用S460级钢组织性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33 (7): 635-641.
- [15] 王华. 420-690MPa厚规格海洋平台用钢的组织 and 性能研究: “2013海洋平台用钢国际研讨会”论文集[C]. 北京: 中国金属学会, 2013.
- [16] 中国钢铁工业协会, 中国金属学会. 冶金科学技术奖获奖项目简介: 极寒环境用高强韧易焊接海洋装备用钢关键技术创新及工程应用[J]. 中国冶金, 2022, 32 (6): 178.

MW 20240423