

控轧控冷工艺参数对海上风电 用S460钢组织性能影响

吴冠辉¹, 毛凌波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: 针对海上风电S460钢在复杂海洋环境中对高强韧性的需求, 通过超纯净冶炼结合控轧控冷工艺, 研究了未再结晶区轧制温度、道次压下率及待温厚度对组织性能的影响。结果表明: 降低未再结晶区轧制温度至812℃可促进晶粒细化与位错强化, 屈服强度提升至610.47MPa, 同时增加准多边形铁素体比例并改善塑韧性; 当道次压下率增至26.0%时, 贝氏体含量提升并强化纳米级粒子析出, -80℃冲击吸收能量下降至142J; 当待温厚度为40mm时, 其强度与低温韧性综合性能最佳。研究表明: 通过控轧控冷工艺调控晶粒细化、位错及析出相分布是控制S460钢强韧性匹配的核心要素, 可为海上风电结构钢的高效制备提供工艺设计依据。

关键词: 控轧控冷工艺; 海上风电S460钢; 低温韧性; 组织性能

Effect of thermo-mechanical control process parameters on microstructure and mechanical properties of S460 steel for offshore wind power

WU Guanhui¹, MAO Lingbo¹, 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: To address the demand for high strength and toughness of S460 steel in complex marine environments, the effects of non-recrystallization zone rolling temperature, pass reduction rate, and holding thickness on microstructure and mechanical properties were investigated through ultra-purified smelting combined with thermo-mechanical controlled processing. The results indicated that reducing the rolling temperature in the non-recrystallization zone to 812℃ was found to promote grain refinement and dislocation strengthening, with the yield strength being elevated to 610.47MPa. At the same time, more quasi-polygonal ferrite was formed, improving both plasticity and toughness. When the pass reduction rate was raised to 26.0%, the amount of bainite and nano-sized particle precipitation increased, but the impact energy at -80℃ dropped to 142J. The optimal balance between strength and low-temperature toughness was achieved at a holding thickness of 40mm. This study demonstrates that the strength-toughness synergy in S460 steel can be controlled by tailoring grain refinement, dislocation density, and precipitate

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)。

通信作者: 毛凌波, 副教授, 主要从事低碳冶金、高性能金属材料相关研究工作, E-mail: lbmao@gdut.edu.cn。

distribution via TMCP, providing a robust process design basis for efficient manufacturing of offshore wind power structural steels.

Keywords: thermo-mechanical control process; S460 steel for offshore wind power; low-temperature toughness; microstructure and mechanical properties

1 序言

随着全球能源结构向清洁化、低碳化转型，海上风电作为可再生能源的重要组成部分，近年来发展迅猛。截至2024年12月，我国海上风电并网容量达4127万kW，规模化应用对风电装备用钢的性能提出了更高要求^[1]。海上风电支撑结构（如塔筒、导管架等）长期面临复杂的海洋环境（高湿度、盐雾腐蚀、交变载荷等），要求钢材兼具高强度、优异的低温韧度、抗疲劳性能，以及良好的焊接性^[2, 3]。S460级高强钢因其综合性能优势，成为该领域的关键材料，其组织性能的优化对降低风电场全生命周期成本、提升结构可靠性具有重要意义。

材料的力学性能与微观组织密切相关，而控轧控冷（Thermo-Mechanical Control Process, TMCP）工艺是调控钢材组织性能的核心技术。通过合理设计轧制温度、道次压下率、待温厚度及终冷温度等参数，可实现晶粒细化、析出强化及相变强化的协同作用。HE等^[4]通过TMCP消除高锰耐磨钢中C、Si和P的偏析，减轻Mn的带状偏析，并调控奥氏体晶粒尺寸及碳化物析出，从而优化其性能。KUMAR等^[5]通过优化终轧温度和高累积压下率（>65%）促进晶粒细化与变形诱导铁素体转变，显著提升钢

板屈服强度和夏比冲击韧度。孙震等^[6]研究发现，降低终轧温度可增加变形带密度，促进铁素体形核，细化晶粒；LI等^[7]通过（Direct Quenching þ Tempering, DQ þ T）控制轧制形变与分级冷却细化初始奥氏体晶粒并抑制粗大析出，为后续热处理优化强韧性提供基础。现有研究TMCP工艺对低合金高强结构钢的强韧性调控机制已开展较深入的理论探讨，但针对海洋风电用钢，其强化增韧机理的系统研究仍存在明显不足，其微观组织演变与力学性能的关联机制尚不完善，相关基础研究仍显薄弱。

针对上述问题，本文以S460钢为研究对象，基于实验室轧制试验，系统探究不同未再结晶区轧制参数对显微组织及力学性能的影响规律。结合电子背散射衍射（EBSD）和透射电镜（TEM）分析，揭示工艺-组织-性能的关联机制，为海上风电用S460钢的TMCP工艺优化提供理论支撑，推动生产高强韧、耐疲劳风电用钢。

2 试验材料与方法

S460钢坯采用超纯净钢工艺生产，其化学成分见表1。根据所采用试验轧机的开口度，将连铸坯锻为150mm厚度，用于热轧试验研究。

试验在实验室φ450mm轧机上进行，采用常规

表1 S460钢坯化学成分（质量分数） (%)

C	Si	Mn	P	S	Alt	Nb	Ti	Cu	Ni	Cr	Mo	N
0.08	0.08	1.52	0.0115	0.0009	0.039	0.02	0.013	0.27	0.35	0.02	0.12	0.0037

两阶段轧制工艺，目标钢板厚度12mm。通过未再结晶温度（ T_{nr} ）经验公式计算，S460钢的未再结晶温度为951℃。因此，将再结晶控制轧制的终轧温度设定在1000~1020℃，而开轧温度则保持在1050℃。终轧温度分别选定为850℃和780℃，采用近似恒温轧制以研究终轧温度对材料组织与性能的影响。此外，根据 Ae_3 经验公式，S460钢平衡冷却过程中奥氏体和铁素体两相共存下限温度估算为786℃。

根据热轧压下规程（见表2）对钢坯进行轧制，

最终厚度为12mm。为系统研究不同工艺参数对材料组织与性能的影响规律，设计了以下3组试验。

1) S460-1试样和S460-2试样探究开轧温度、终轧温度对组织与性能的影响，具体试验工艺参数见表3。两者相比，S460-1试样二阶段开轧温度和终轧温度较低，轧后层流冷却速度均为11℃/s左右，其他参数接近。

2) S460-3试样的待温厚度为70mm，S460-4试样的待温厚度为22mm，S460-5试样的待温厚度为

表2 S460钢热轧压下规程

编号	工艺参数	道次												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
S460-1	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	—	—	—
S460-2	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	—	—	—
S460-3 (70mm待温)	开口度/mm	150	130	105	85	70	55	40	30	22	16	12		
	压下率 (%)	—	13	19	19	33	21	27	25	27	27	25	—	—
S460-4 (22mm待温)	开口度/mm	150	130	105	85	70	55	40	30	22	16	12	—	—
	压下率 (%)	—	13	19	19	33	21	27	25	27	27	25	—	—
S460-5 (40mm待温)	开口度/mm	150	130	105	85	70	55	40	30	22	16	12	—	—
	压下率 (%)	—	13	19	19	33	21	27	25	27	27	25	—	—
S460-6 (40mm待温)	开口度/mm	150	130	105	85	70	55	40	32	26	21	17	14	12
	压下率 (%)	—	13	19	19	33	21	27	20	19	19	19	18	14
S460-7 (40mm待温)	开口度/mm	150	130	105	85	70	55	40	27	18	12	—	—	—
	压下率 (%)	—	13	19	19	33	21	27	33	33	33	—	—	—

表3 S460控轧控冷工艺

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)
S460-1	1027	1017	812	829	614	18	10.83
S460-2	1025	975	875	874	648	18	11.44

40mm，3个试样对比用于研究待温厚度对组织与性能的影响。

3) S460-6试样的精轧单道次压下率较小，S460-7试样的精轧单道次压下率较大，S460-5试样的精轧单道次压下率适中，3个试样对比用于研究道次压下率对组织与性能的影响。

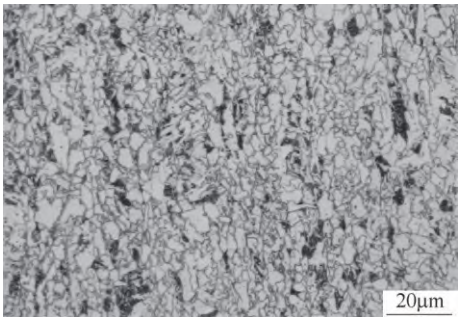
切取热轧板纵断面，经抛光腐蚀（4%硝酸酒精）后作为金相观察试样，采用金相显微镜（SOPTOP IE500M）对其显微组织进行观察。在含12.5%的高氯酸和87.5%的无水乙醇的电解液中对金相试样电解抛光，去除应力后用于EBSD分析。

按GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》规定对试验钢的屈服强度、抗拉强度和伸长率等力学性能进行测试，拉伸试验机为LE5105，拉伸速度为5mm/min。根据GB/T 229—1994《金属夏比缺口冲击试验方法》要求，制备了10mm×10mm×55mm的标准夏比V型缺口试样，采用LZ22.302-C冲击试验机开展系列冲击试验研究，试验温度分别为20℃、-40℃、-80℃和-110℃。试样在测试前，在不同温度的溶液中进行20min的恒温预处理。

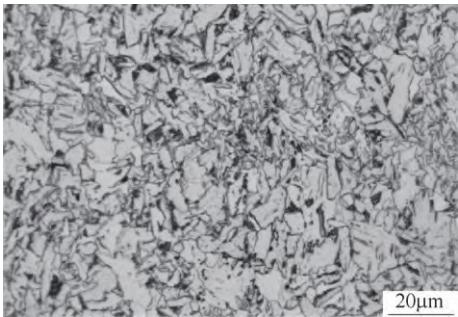
3 试验结果与分析

3.1 开轧温度、终轧温度对组织与性能的影响

在相同终冷温度、冷却速度的条件下，不同未再结晶区轧制温度下的显微组织如图1所示。经过比



a) S460-1



b) S460-2

图1 不同未再结晶区开轧温度、终轧温度下的显微组织

较可以看出,经过不同的TMCP工艺后,室温下得到的显微组织均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,S460-1试样的晶粒尺寸较S460-2试样的晶粒尺寸细小,这是由于降低二阶段开轧温度和终轧温度有利于在二阶段轧制过程中累积变形带等缺陷,在随后的冷却过程中,铁素体在这些变形带上形核,提高了铁素体相变的形核率,促进了组织细化。

针对不同未再结晶区轧制温度试验钢显微组织的差异,进行了EBSD试验,结果如图2所示。两种工艺的晶粒尺寸分布如图3所示。经过计算,得到S460-1的平均晶粒尺寸为 $2.78\mu\text{m}$ 、S460-2的平均晶粒尺寸为 $3.03\mu\text{m}$,这充分说明降低未再结晶区轧制温度可以细化组织。

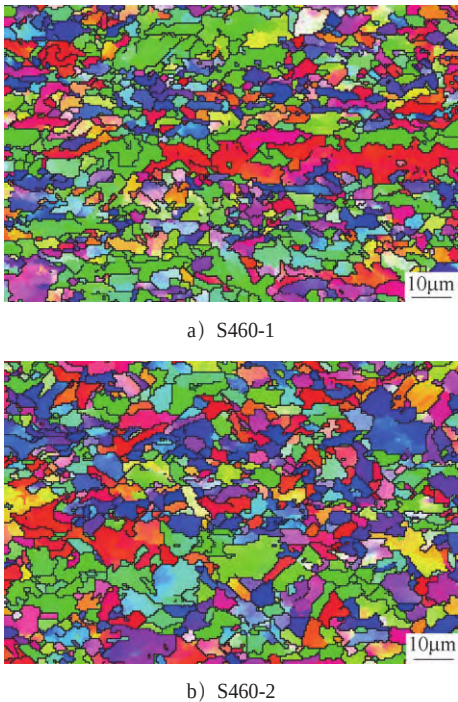


图2 S460 EBSD扫描图像

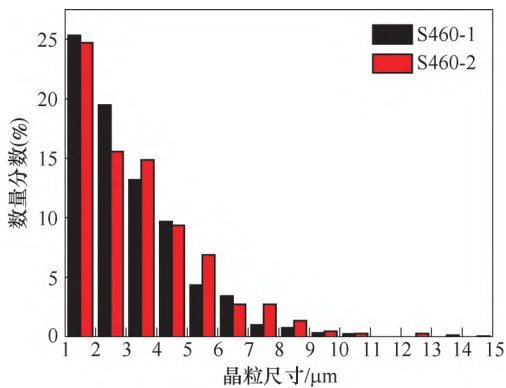


图3 晶粒尺寸分布

不同未再结晶区轧制温度下试验钢的力学性能见表4。从表4可看出,当未再结晶区轧制温度为 812°C 时,强度较高,屈服强度为 610MPa ,抗拉强度为 676MPa ,满足S460级别钢板强度的要求。当未再结晶区轧制温度为 812°C 时,伸长率较高,为 28.33% 。不同未再结晶区轧制温度下试验钢的冲击吸收能量如图4所示。未再结晶区轧制温度为 812°C 的冲击吸收能量较高。综合比较,未再结晶区轧制温度为 812°C 获得的力学性能较好。未再结晶区轧制温度的降低,有利于细晶和位错强化效果的增强,使得试验钢板的屈服强度升高,准多边形铁素体比例增大,塑性和韧性提高。

表4 不同未再结晶区轧制温度试验钢的力学性能

编号	未再结晶区轧制温度/ $^{\circ}\text{C}$	平均屈服强度/ MPa	平均抗拉强度/ MPa	平均伸长率(%)
S460-1	812	610.47	676.25	28.33
S460-2	875	500.06	594.70	18.33

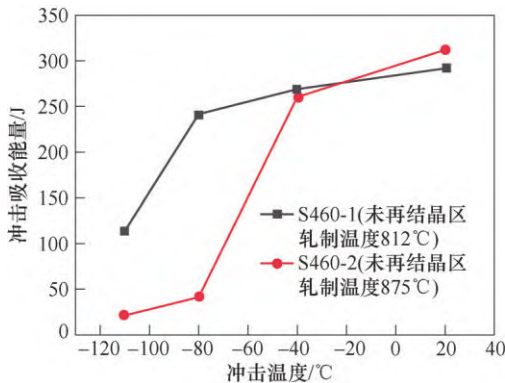
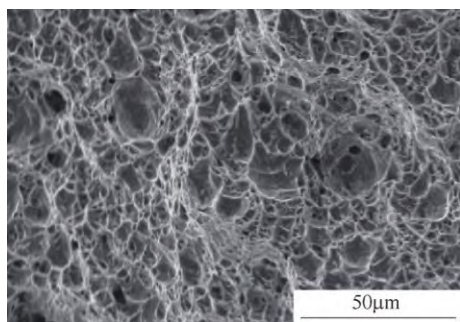


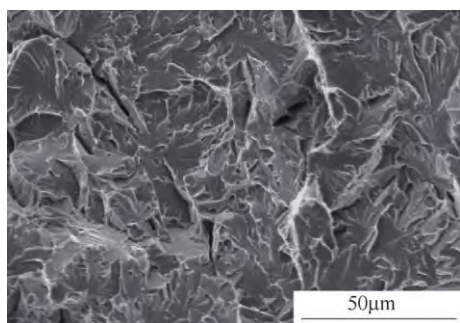
图4 不同未再结晶区轧制温度下的系列温度冲击吸收能量

不同未再结晶区轧制温度下的 -80°C 冲击断口形貌如图5所示。从图5可看出,在S460-1试样的断口形貌中存在大量韧窝,说明断裂机制为韧性断裂;而S460-2试样的断口形貌为河流状解理断裂,说明断裂机制为脆性断裂。这也对应于S460-2试样的 -80°C 冲击吸收能量较低。

一阶段轧制为再结晶区轧制,轧制温度区间一般为 $1000\sim 1050^{\circ}\text{C}$ 。中间坯待温至 $800\sim 870^{\circ}\text{C}$,再进行第二阶段轧制,第二阶段为未再结晶区轧制,终轧温度为 $780\sim 880^{\circ}\text{C}$ 。未再结晶区轧制温度主要对奥氏体形变能、位错、相变形核位置、铁素体比例等产生影响,进而影响S460钢板的组织与性能。当未再结晶区轧制温度为 812°C 时(S460-1),得到的晶粒尺寸比轧制温度为 875°C (S460-2)的晶粒尺



a) S460-1



b) S460-2

图5 不同未再结晶区轧制温度下的-80℃冲击断口形貌

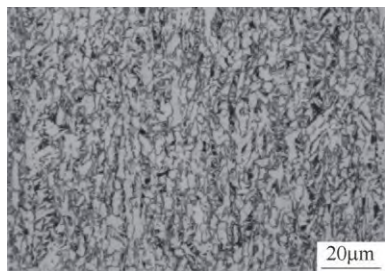
寸细,并且屈服强度、抗拉强度、塑性和冲击吸收能量均较高。这是由于未再结晶区轧制会使奥氏体因形变而拉长、压扁,在其他工艺相同的情况下,随着未再结晶区轧制温度的降低,形变奥氏体中的储存能增大,体系自由能升高,相变阻力减小,使奥氏体向铁素体转变的温度 Ar_3 升高;同时,轧制温

度降低,位错等缺陷因回复受到抑制而增多,增加了铁素体的有效形核位置,所以,未再结晶区轧制温度的降低不仅可以促进奥氏体相变的发生,而且能够提高形核率和位错密度,达到细晶和强化的效果。一旦轧制温度低于相变温度 Ar_3 ,铁素体将会在晶界、位错等缺陷处优先形核,且由于该过程中形成的铁素体更多是因受形变诱导影响而产生的,所以一般晶粒细小,更有利于性能的提升。因此,未再结晶区轧制温度的降低,有利于细晶和位错强化效果的增强,使得试验钢板的屈服强度升高,准多边形铁素体比例增大,塑性和韧性提高。

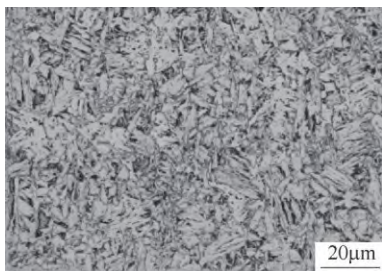
3.2 道次压下率对组织与性能的影响

在相同轧制温度、终冷温度、冷却速度的条件下,不同道次压下率时的显微组织如图6所示。平均道次压下率分别为18.2%、26.0%和33.1%。经比较可看出,采用不同的TMCP工艺后,室温下得到的显微组织均为多边形铁素体+珠光体+少量贝氏体。当平均道次压下率为26.0%时,贝氏体含量最高。这是由于在未再结晶区进行轧制时,较大的道次压下率会使奥氏体晶粒产生强烈的变形,形成大量的位错、晶界等缺陷。这些缺陷会增加奥氏体的不稳定性,促进贝氏体相变的发生^[8]。

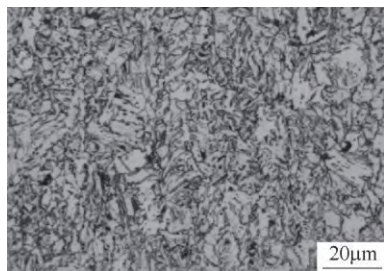
针对不同道次压下率试验钢显微组织的差异,进行了EBSD试验,结果如图7所示。3种工艺的晶



a) S460-6 (18.2%)

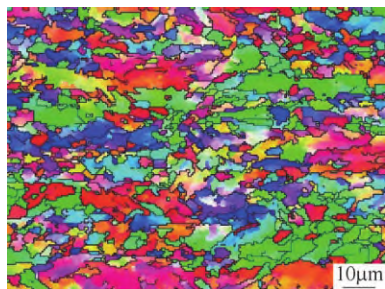


b) S460-5 (26.0%)

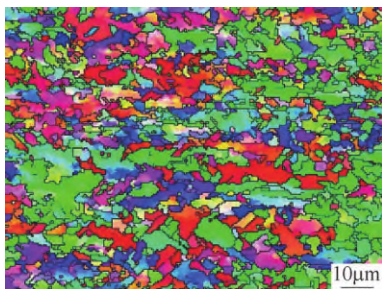


c) S460-7 (33.1%)

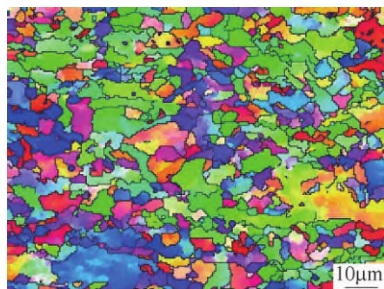
图6 不同道次压下率时的显微组织



a) S460-6



b) S460-5



c) S460-7

图7 S460 EBSD扫描图像

粒尺寸分布如图8所示。经过计算,得到S460-6的平均晶粒尺寸为 $2.82\mu\text{m}$, S460-5的平均晶粒尺寸为 $2.55\mu\text{m}$, S460-7的平均晶粒尺寸为 $3.38\mu\text{m}$,说明贝氏体组织较多时晶粒较为细小。晶粒取向统计结果显示, S460-6、S460-5和S460-7的大角度晶界比例分别为29.20%、30.25%和26.80%。较高的大角度晶界比例意味着更细小的组织,这与平均晶粒尺寸统计结果相一致。

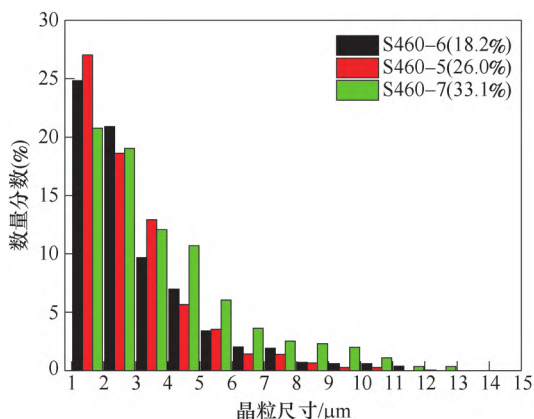


图8 晶粒尺寸分布

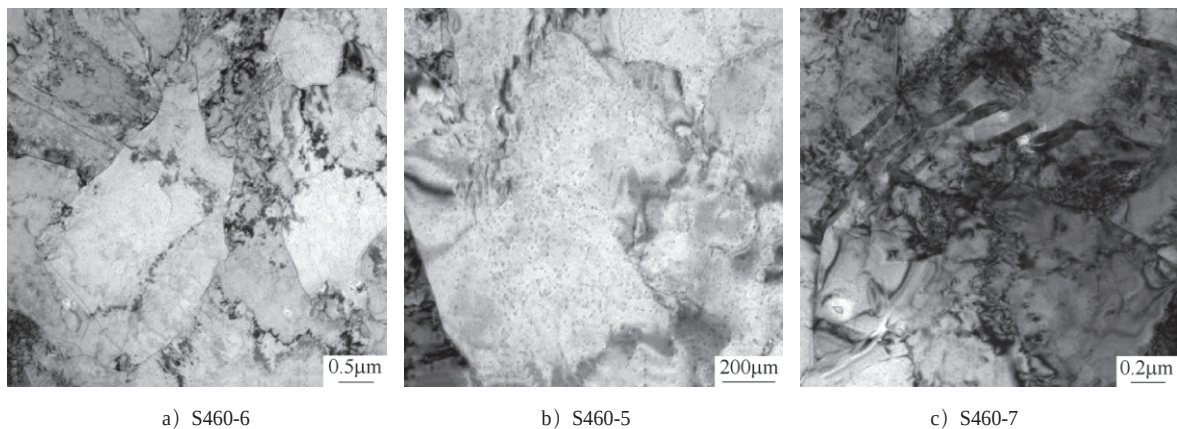


图9 析出粒子TEM观察

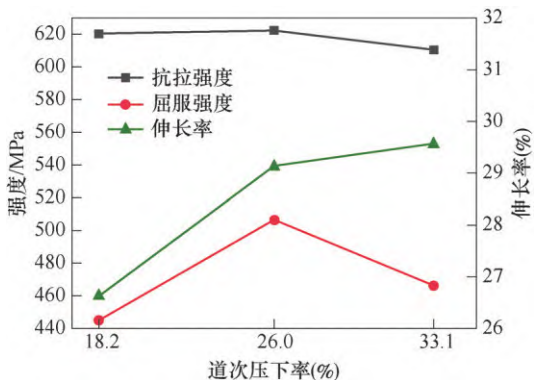


图10 不同道次压下率时的拉伸性能

利用TEM对不同道次压下率时的组织形貌和析出粒子进行TEM观察,如图9所示。从图9a中可观察到大块状的多边形铁素体,而在铁素体内部弥散分布着较多的纳米级析出粒子(见图9b),尺寸在5nm左右。从图9c中可观察到多边形铁素体+珠光体组织,而纳米级析出粒子数量较少,说明平均道次压下率为26.0%时有利于纳米级粒子的析出。

图10所示为不同二阶段轧制道次压下率时的拉伸性能对比。从图10可知,当平均道次压下率为26.0%时,屈服强度最大值为507MPa,抗拉强度为622MPa,这是由于显微组织中存在较多的贝氏体,导致相变强化作用较强,以及纳米级析出粒子导致的析出强化作用较强。

图11所示为不同二阶段轧制道次压下率时的冲击性能对比。从图11可知,当平均道次压下率为18.2%和33.1%时, -110°C 仍未达到韧脆转变温度以下, -80°C 、 -40°C 和室温冲击吸收能量均在200J以上。当平均道次压下率为26.0%时, -40°C 和室温冲击吸收能量在250J以上,但 -80°C 冲击吸收

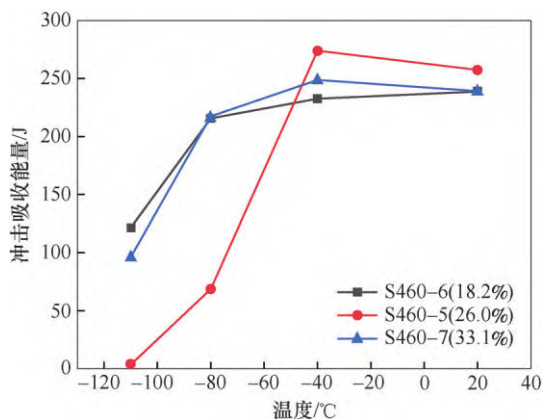


图11 不同道次压下率时的系列温度冲击吸收能量

能量显著下降, 韧脆转变温度接近 -60°C , 这是由于组织中贝氏体硬相尤其是上贝氏体含量较高而导致低温冲击性能恶化。纳米级析出粒子导致的析出强化作用较强也使低温冲击性能恶化。

不同道次压下率时的 -80°C 冲击断口形貌如图12所示。从图12可看出, S460-6和S460-7试样的断口形貌中存在大量韧窝, 说明断裂机制为韧性断裂; 而S460-5试样的断口形貌虽然也存在大量韧窝, 但韧窝尺寸明显减小, 说明断裂前发生了较小的塑性变形。这也对应于S460-5试样的贝氏体含量较高, -80°C 冲击吸收能量较低。

3.3 待温厚度对组织与性能的影响

在相同轧制温度、终冷温度、冷却速度的条件下, 不同待温厚度下的显微组织如图13所示。经过

比较可以看出, 经过不同的TMCP工艺后, 室温下得到的显微组织均为多边形铁素体+珠光体+少量贝氏体。待温厚度为40mm时, 贝氏体含量最高。

针对不同待温厚度试验钢显微组织的差异, 进行了EBSD试验, 结果如图14所示。3种工艺的晶粒尺寸分布如图15所示。经过计算, 得到S460-3的平均晶粒尺寸为 $3.15\mu\text{m}$, S460-5的平均晶粒尺寸为 $2.55\mu\text{m}$, S460-4的平均晶粒尺寸为 $3.35\mu\text{m}$, 说明贝氏体组织较多时晶粒较为细小。

图16所示为不同待温厚度下的拉伸性能对比。从图16可知, 待温厚度为40mm时, 屈服强度最大值为507MPa, 抗拉强度为622MPa, 这是由于显微组织中存在较多贝氏体导致相变强化作用较强。

图17所示为不同待温厚度下的冲击性能对比。

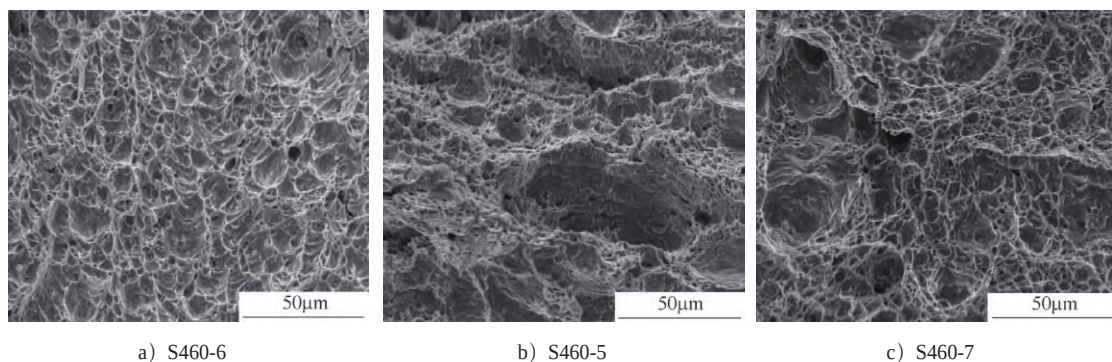


图12 不同道次压下率时的 -80°C 冲击断口形貌

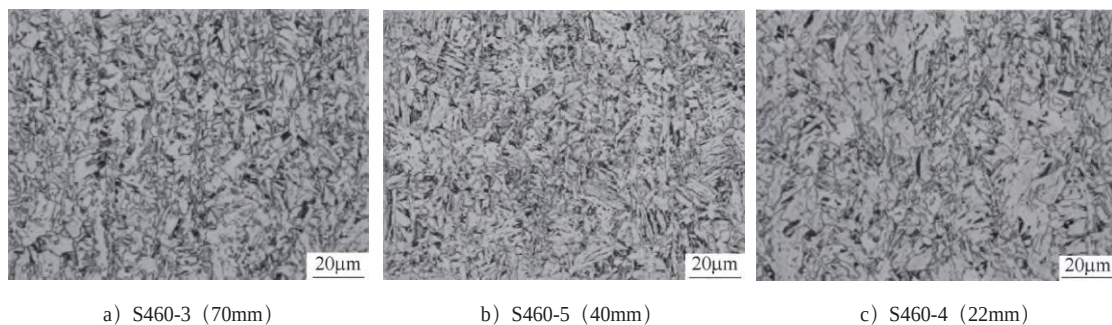


图13 不同待温厚度下的显微组织

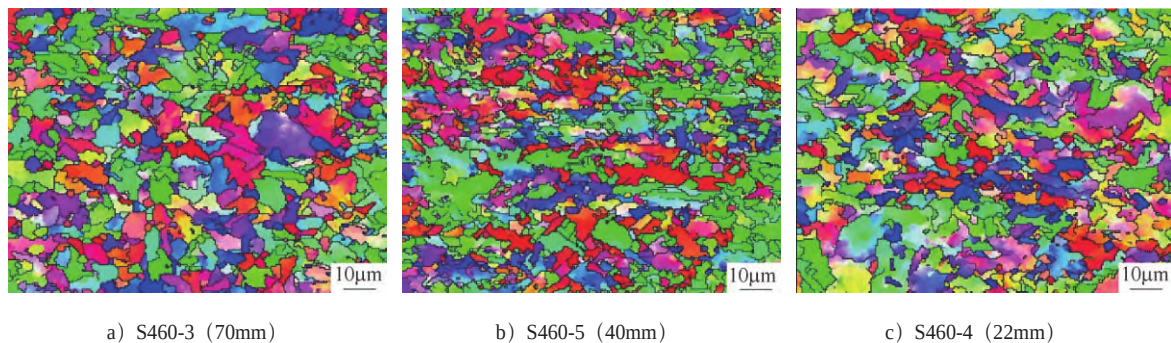


图14 S460 EBSD扫描图像

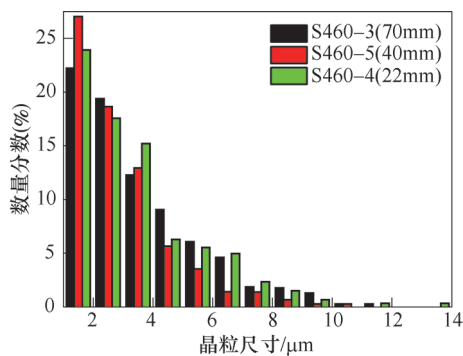


图15 晶粒尺寸分布

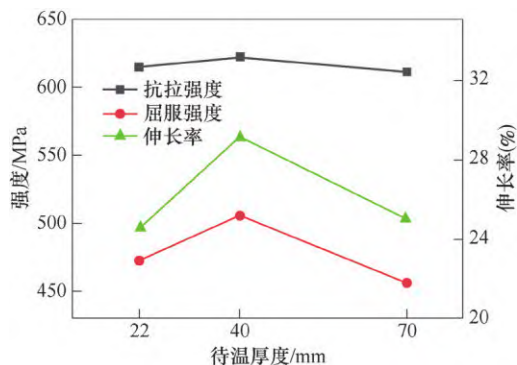


图16 不同待温厚度下的拉伸性能

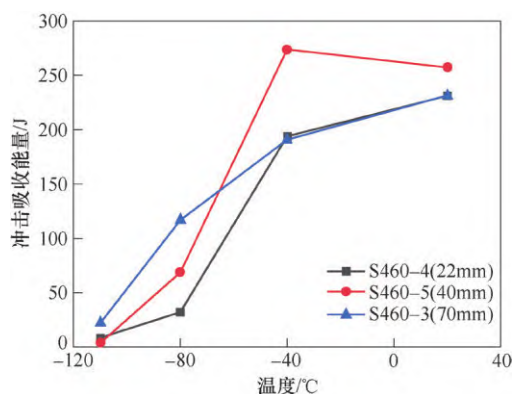
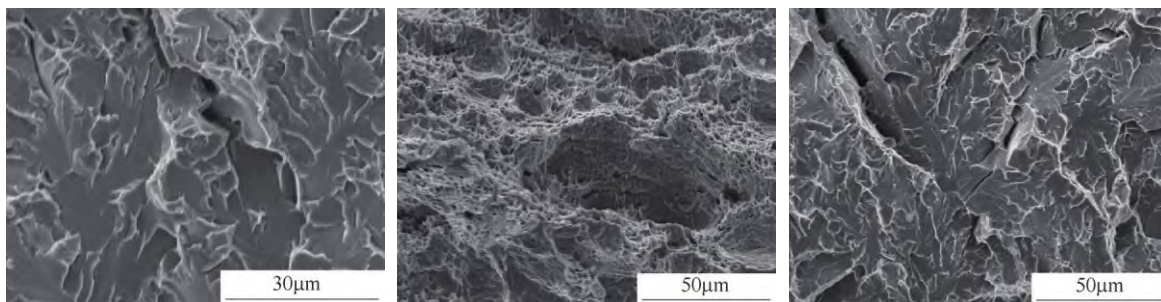


图17 不同待温厚度下的系列温度冲击吸收能量

从图17可看出, 3个待温厚度下在 -60°C 时均发生了韧脆转变, 因此 -80°C 冲击吸收能量明显降低。当待温厚度为40mm时, -40°C 和室温冲击吸收能量较高, 均在250J以上。这被归因于组织细化后可以阻碍裂纹扩展的有效晶粒尺寸减小, 导致冲击吸收能量提高。当待温厚度为40mm时, 钢板获得强度和低温韧性的最佳组合。

不同待温厚度下的 -80°C 冲击断口形貌如图18所示。从图18可看出, S460-6和S460-7试样的断



a) S460-3 (70mm)

b) S460-5 (40mm)

c) S460-4 (22mm)

图18 不同待温厚度下的 -80°C 冲击断口形貌

口形貌为河流状解理断裂, 说明断裂机制为脆性断裂。S460-6的解理面更为粗大, 这也对应于S460-6试样的 -80°C 冲击吸收能量最低。S460-2试样的断口形貌虽然存在大量韧窝, 但韧窝尺寸较小, 说明 -80°C 时也已发生了韧脆转变。

4 结束语

基于TMCP工艺, 通过系统调控未再结晶区轧制温度、道次压下率及待温厚度等关键参数, 结合显微组织表征与力学性能测试, 揭示了S460钢组织演变与强韧性协同调控机制, 主要结论如下。

1) 降低未再结晶区开轧温度和终轧温度有利于细化晶粒。S460-1试样在较低轧制温度下, 晶粒

尺寸比S460-2试样小。同时, 较低的未再结晶区轧制温度能增强细晶和位错强化效果, 使屈服强度升高, 准多边形铁素体比例增大, 塑性和韧性提高。

2) 道次压下率显著调控贝氏体与析出相含量。当平均道次压下率为26.0%时, 贝氏体比例与纳米析出相密度提升。贝氏体硬相增多, 导致韧脆转变温度接近 -60°C , -80°C 冲击吸收能量显著下降。相比之下, 当压下率为18.2%与33.1%时, 贝氏体含量较低, 组织以铁素体为主, 低温韧性优异。

3) 待温厚度影响显微组织中贝氏体含量及晶粒尺寸。当待温厚度为40mm时, 由于贝氏体相变强化和细晶强化作用, 屈服强度和抗拉强度达到最大值, -40°C 和室温冲击吸收能量较高, 因此钢板获

得强度和低温韧性的最佳组合。

综合本研究结果, S460-1工艺参数条件下获得的热轧板性能最优, 同时满足了高强度要求, 具有良好的低温韧性。这一优化工艺实现了显微组织的细化, 且具有合理的强韧性匹配, 为海上风电用S460钢的工业化生产应用提供了工艺设计依据。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 2024年可再生能源并网运行情况[R]. (2025-01-27) .
- [2] SONG D, FAN T, LI Q, et al. Advances in offshore wind[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12 (2) : 359.
- [3] 黄传清, 毛凌波, 胡战. 海上风电用S460钢焊接性能研究[J]. 金属加工 (热加工) 2024 (9) : 69-73.
- [4] HE Y, LIU J H, HUANG G Y, et al. Elemental segregation, microstructure, and mechanical properties of TMCP-treated high-manganese wear-resistant steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024: 1-16.
- (上接第10页)
- using machine learning and metaheuristics[J]. Materials, 2023, 16 (5) : 2081-2081.
- [51] UZUN F, KORSUNSKY A M. On the analysis of post weld heat treatment residual stress relaxation in Inconel alloy 740H by combining the principles of artificial intelligence with the eigenstrain theory[J]. Materials Science and Engineering, 2019, 752 (APR.3) : 180-191.
- [52] ZHANG Y, LI X, WANG H. Application of convolutional neural networks in defect detection for metal forging[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50: 1-10.
- [53] KIM N. A new approach to preform design in metal forging processes based on the convolution neural network[J]. Applied Sciences, 2021, 11.
- [54] MORAIS H. Electrical load demand forecasting using feed-forward neural networks[J]. Energies, 2021, 14.
- [55] EAYSIN A, KABIR S, GUNISTER E, et al. Process parameter optimization of laser beam machining for AISI -P20 mold steel using ANFIS method[J]. Results in Surfaces and Interfaces, 2025 (18) : 100357.
- [56] PODGORNIK B, BELIČ, IGOR, et al. Tool steel heat treatment optimization using neural network modeling[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2016, 47 (11) : 5650-5659.
- [57] LAOUISSI A, BLAOUI M M, ABDERAZEK H, et al. Heat treatment process study and ANN-GA based multi-response optimization of C45 steel mechanical properties[J]. Metals and Materials International, 2022, 28 (12) : 3087-3105.
- [58] KHALAJ O, HASSAS P, MAŠEK B, et al. Optimization of cooling rate of Q-P treated 42SiCr steel using AI digital twinning[J]. Heliyon, 2024, 10 (11) : 32101.
- [59] 耿治胜. 基于人工智能高炉节能减排算法研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023.
- [60] FANG L, SU F, KANG Z, et al. Artificial neural network model for temperature prediction and regulation during molten steel transportation process[J]. Processes, 2023, 11 (6) .

MW 20250308

MW 20250116