

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.12.13

一种新型风电塔筒用 Q420D 钢热加工性能及焊接性研究

杨延丽^{1,2}, 李利霞^{1,2}, 张国栋³, 田浩楠^{1,2}, 刘中柱³, 何江里⁴

1. 中信重工机械股份有限公司, 河南 洛阳 471003
2. 智能矿山重型装备全国重点实验室, 河南 洛阳 471039
3. 中信金属股份有限公司, 北京 100027
4. 燕山大学 亚稳材料全国重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要: 为满足风力发电机大型化发展对风电塔筒用钢高强度、高疲劳性能的需求, 某钢厂开发了一种 25 mm 厚新型 Q420D 高强钢, 其疲劳强度较传统材质提升 10% 以上。为了解此材质的热加工性能及焊接性, 通过火焰切割试验、火焰热矫试验、小铁研试验、焊接热影响区最高硬度试验及焊接工艺评定试验, 结合力学性能测试与微观组织分析, 开展全面性能研究。结果表明, 火焰切割对母材硬度的影响深度约为 5 mm, 实际加工需预留不少于 5 mm 的表面加工余量; 在 600~800 °C 热矫温度范围内, 母材力学性能均满足 GB/T 1591—2018 标准要求, 热矫后 -20 °C 冲击吸收能量均值超 300 J, 力学性能稳定; 小铁研试验中, 常温至 100 °C 预热条件下焊缝表面及根部裂纹率均为 0, 焊接热影响区最高硬度仅 251.7 HV₁₀, 远低于 ISO 15614-1:2017 标准限定值 380 HV₁₀, 表明该材质冷裂纹敏感性低、淬硬倾向小, 可焊性优异; 采用气保焊打底+埋弧焊填充/盖面的复合焊接工艺制备单 V 形坡口接头, 其抗拉强度、冲击韧性、弯曲性能及硬度均符合 ISO 15614-1:2017 等级 2 标准, 焊缝区与热影响区微观组织为铁素体+粒状贝氏体(热影响区呈粗晶特征), 母材为多边形铁素体+少量粒状贝氏体, 焊缝冲击断口为准解理断裂, 热影响区为韧性断裂, 接头强韧匹配性良好。

关键词: 风电塔筒; Q420D 钢; 热加工性能; 焊接性; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG457.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2025)12-0091-09

Research on the Hot Processing Performance and Weldability of Q420D Steel for a New Type of Wind Power Tower Tube

YANG Yanli^{1,2}, LI Lixia^{1,2}, ZHANG Guodong³, TIAN Haonan^{1,2}, LIU Zhongzhu³, HE Jiangli⁴

1. CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471039, China
2. State Key Laboratory of Intelligent Mining Heavy Equipment, Luoyang 471039, China
3. CITIC Metal Group Ltd., Beijing 100027, China
4. State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

Abstract: To meet the demand for high strength and high fatigue performance of steel materials used in wind turbine towers driven by the trend toward larger-scale wind turbine generators, a certain steel plant has developed a novel 25 mm-thick Q420D high-strength steel with over 10% improvement in fatigue strength compared to conventional materials. To investigate its thermomechanical processing properties and weldability, comprehensive performance studies were conducted through flame cutting tests, thermal straightening tests, small iron research tests (e.g., Tekken test), maximum hardness tests in heat-affected zones (HAZ), and welding procedure qualification tests, combined with mechanical property evaluations and microstructural analyses. Results indicate that flame cutting induces hardness variation in the base metal at a depth of approximately 5 mm, necessitating a minimum surface machining allowance of 5 mm during practical processing. Within the

收稿日期: 2025-06-08 修回日期: 2025-07-23

基金项目: 中信集团重大科技创新项目(2022ZXKYA06100)

作者简介: 杨延丽(1992—), 硕士, 主要从事焊接工艺及热加工技术研究。E-mail: YYL155653616652021@163.com。

thermal straightening temperature range of 600-800 °C, all mechanical properties of the base metal comply with GB/T 1591—2018 standards, achieving an average impact absorption energy exceeding 300 J at -20 °C after thermal straightening, demonstrating stable mechanical performance. In the small iron research tests under ambient temperature to 100 °C preheating conditions, both surface and root crack rates in welds are zero, while the maximum HAZ hardness reaches only 251.7 HV10, significantly below the ISO 15614-1:2017 limit of 380 HV10. This indicates low cold crack sensitivity, minimal hardening tendency, and excellent weldability. Using a composite welding process combining gas metal arc welding (GMAW) for root pass and submerged arc welding (SAW) for filling/capping passes, single-V groove joints were fabricated. These joints exhibit tensile strength, impact toughness, bending properties, and hardness fully compliant with ISO 15614-1:2017 Level 2 requirements. Microstructural analysis reveals ferrite + granular bainite (with coarse-grained characteristics in HAZ) in weld and HAZ regions, while the base metal consists of polygonal ferrite + minor granular bainite. Fracture surfaces show quasi-cleavage morphology in welds and ductile fracture in HAZ, indicating optimal strength-toughness matching in joints.

Keywords: wind turbine tower shell; Q420D steel; hot workability; weldability; microstructure; mechanical properties

引用格式:杨延丽,李利霞,张国栋,等.一种新型风电塔筒用Q420D钢热加工性能及焊接性研究[J].电焊机,2025,55(12):91-99.

Citation: YANG Yanli, TIAN Haonan, DU Zhenkun, et al. Research on the Hot Processing Performance and Weldability of Q420D Steel for a New Type of Wind Power Tower Tube[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(12): 91-99.

0 引言

风力发电具有清洁环保、可再生、运行成本低廉、装机规模灵活、增强国家或地区的能源自给能力和安全性等优点。风能作为一种重要的可再生能源,世界各国正在不断地大力发展风电^[1-2],综合国家能源局、中国电力企业联合会、水电水利规划设计总院、中国可再生能源学会风能专业委员会(CWEA)的信息,2017~2023年我国风电发电量占比从4.7%升至9.1%,平均每年提高0.73个百分点。2024年第一季度我国风电发电量达到2665亿千瓦时,在全国总发电量中的占比升至10.81%,超过水电(发电量为2102亿千瓦时,占比9.39%),成为我国第二大电力来源。张家口市坝上地区风力发电产业发展迅速,前景广阔^[3-8]。

基于《2030年前碳达峰行动方案》,风电已成为“十四五”清洁能源的主要发展方向,风力发电机不断趋于大型化,相应事故也在逐年增加^[9-11]。其中风电塔筒疲劳断裂造成的破坏近几年时有发生。开发高强度、高疲劳性能的风电塔筒用钢,是突破这一困境的核心路径,而钢材的焊接性能作为结构制造质量与服役可靠性的关键保障,同样备受关注。

目前国内风电塔筒主流用钢为Q355系列,该材质在长期交变应力作用下,局部高应力区容易形成微小裂纹,造成安全事故和经济损失^[12]。为提高

塔筒本身的强度和疲劳性能,近年来风电塔筒研究趋势逐渐向Q420D材质过渡。2024年某钢厂研究出一种新型高强高疲劳风电塔筒用Q420D材质,母材疲劳强度能提高10%以上,但此材质的工艺性和焊接性还未见相关研究。

基于此,本文通过母材热切割硬度试验、热矫试验、小铁研试验、焊接热影响区最高硬度试验及焊接工艺评定试验,系统探究新型Q420D钢的热加工性能和焊接性,明确其工艺适配参数与焊接质量控制要点,为该材质在风电塔筒制造中的规模化应用提供理论依据与技术支持。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

选用25 mm厚新型风电塔筒用Q420D钢板作为母材,根据等强匹配原则,焊材均选用大西洋品牌,气保焊焊丝型号为CHW-55C1,直径 $\varnothing 1.2$ mm,埋弧焊焊丝型号为CHW-S9,直径 $\varnothing 4$ mm,焊剂为CHF101。母材及焊材的化学成分见表1,机械性能见表2。母材金相组织如图1所示,为贝氏体和铁素体的多相组织,强韧性良好。

1.2 试验方法

1.2.1 母材热切割硬度试验

采用现场常用的数控火焰切割机进行切割试

表 1 母材及焊材化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of base metal and welding wire(wt. %)													
材料	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	V	Ti	B	Al
Q420D	0.08	0.27	1.40	0.014	0.002	0.26	0.04	0.01	0.036	0.027	0.014	<0.000 5	0.023
CHW-55C1	0.078	0.56	1.09	0.010	0.002 9	0.035	0.92	0.003 1	—	0.002 9	—	—	—
CHW-S9	0.062	0.19	1.46	0.009 2	0.003 2	0.036	0.046	0.32	—	—	—	—	—

表 2 母材及焊材机械性能

Table 2 Mechanical properties of base metal and welding wire					
材料	R_m /MPa	R_{ch} /MPa	A_5 /%	冲击吸收能量	
				温度/℃	KV2/J
Q420D	520~680	≥400	≥19	-20	≥40
CHW-55C1	550~740	≥460	≥17	-45	≥27
CHW-S9	550~740	≥460	≥20	-20	≥27

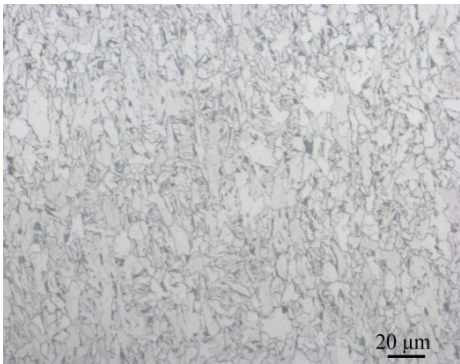


图 1 母材金相组织

Fig. 1 Metallographic structure of the base metal

验,燃气气体为天然气+氧气。制备规格为 100 mm×200 mm 的试块,沿试块 200 mm 长度方向采用线切割成两部分,在线切割后的横截面上进行维氏硬度测试。测试采用 10 kg 载荷,测点间距为 1 mm,试板切割及硬度测点分布如图 2 所示。此试验的目的是验证火焰切割对钢板切割表面的影响深度。

1.2.2 热矫试验

热矫试验是为了检验火焰矫正温度对母材力学性能的影响。切割制备尺寸为 300 mm×500 mm 的试板,采用氧乙炔气烤枪对试板表面进行单面火焰烘烤,选取生产常用的 600 ℃、700 ℃、800 ℃作为热矫温度,温度偏差控制在±20 ℃,加热带尺寸为 100 mm×500 mm,加热过程采用远红外测温仪实时监测温度。试板加热空冷至室温,在加热区域按图 3 所示位置截取 2 个拉伸试样、3 个冲击试样及 2 个侧弯试样,进行力学性能测试。

1.2.3 斜 Y 坡口拘束试验(小铁研试验)

本试验目的是评价母材焊接热影响区的冷裂

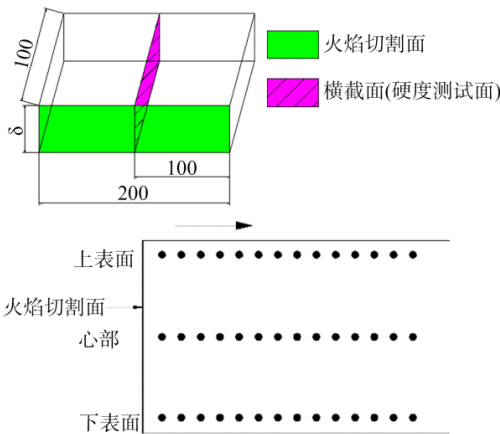


图 2 试样切割及切割后横截面上硬度点位分布示意

Fig. 2 Schematic diagram of sample cutting and hardness point distribution on the cross-section after cutting

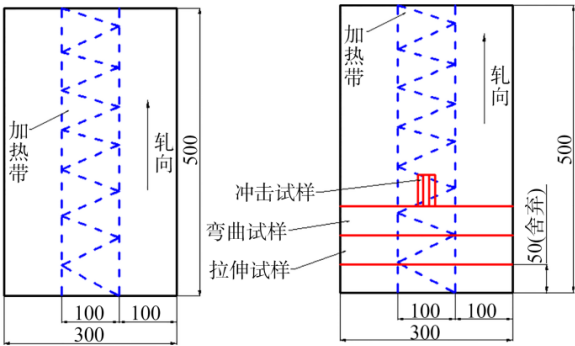


图 3 试板热矫加热区域及取样位置示意

Fig. 3 Schematic diagram of the heat straightening heating area and sampling positions of the test plate

纹敏感性。参考标准为 GB/T 32260.2—2015《金属材料焊缝的破坏性试验 焊件的冷裂纹试验 弧焊方法 第 2 部分:自拘束试验》。试板形状及坡口尺寸如图 4 所示,焊接方法为气体保护焊,焊丝为 CHW-55C1,∅1.2 mm,保护气为 100%CO₂,焊接工艺参数如表 3 所示。设置常温(20 ℃)、60 ℃、80 ℃、100 ℃四种预热温度,试件焊后空冷并静置 48 h,按 NB/T 47013.5—2015 进行焊缝表面渗透检测,观察焊缝表面是否存在裂纹并计算裂纹率;采用线切割将焊缝四等分,观察每个试块 5 个横截面的焊缝根部裂纹情况,并按标准 GB/T 32260.2—2015 计算裂纹率。

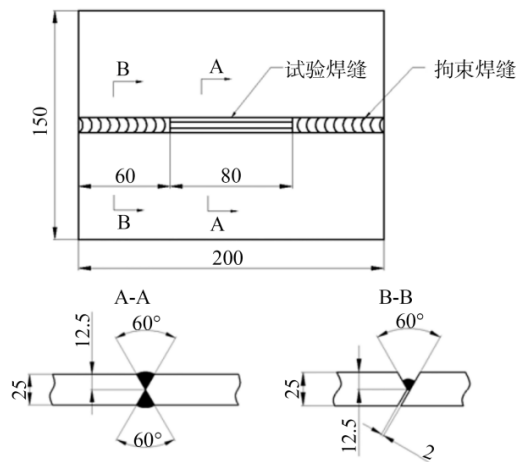


图4 斜Y形坡口焊接裂纹试验用试件的形状及尺寸
Fig. 4 Shape and dimensions of the specimen for the oblique Y-groove welding crack test

1.2.4 焊接热影响区最高硬度试验

焊接热影响区最高硬度试验是根据焊接接头焊接热影响区的最高硬度相对地评价被焊钢材的淬硬倾向和冷裂纹敏感性。本试验按照标准 GB/T 4675.1—2016 加工为 20 mm×75 mm×200 mm 的标准试件,厚度方向保留一个原始轧制面,然后在试件表面中心线上焊接一道 125±10 mm 长的焊缝,焊丝为 CHW-55C1,其他焊接工艺参数见表 3,焊后空冷并静置 12 h。沿垂直于焊缝中心线方向切开试件,在横截面划一条切于熔合线底部切点 O 且平行于试板轧制表面的测试线(见图 5、图 6),采用 10 kg 载荷进行维氏硬度(HV₁₀)测试,通过最高硬度值评价母材的淬硬倾向及冷裂纹敏感性。

表3 斜Y坡口拘束试验焊接工艺参数
Table 3 Welding process parameters of the oblique Y-groove welding crack test

焊丝	直径 /mm	保护 气	流量 /(L·min ⁻¹)	电流 /A	电压 /V	焊接速度 /(mm·min ⁻¹)
CHW-55C1	1.2	CO ₂	15~25	230~270	28~33	350~450

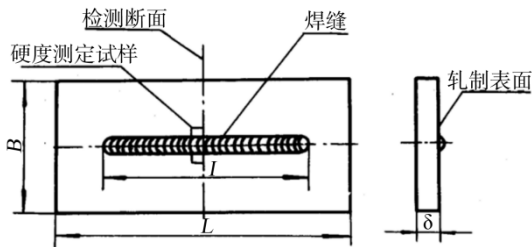


图5 试件形状及焊接示意图
Fig. 5 Test piece shape and welding schematic diagram

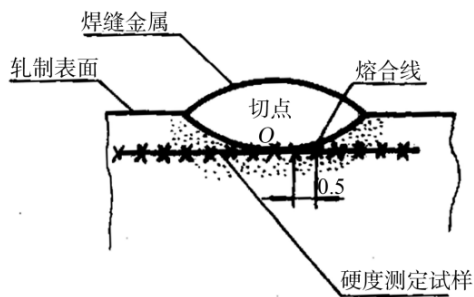


图6 硬度点位分布示意
Fig. 6 Schematic diagram of hardness point distribution

1.2.5 焊接工艺评定试验

依据 ISO 15614-1:2017 等级 2 标准开展焊接工艺评定。焊前试板规格为 25 mm×200 mm×500 mm,焊后规格为 25 mm×400 mm×500 mm,采用工程常用的 V 形坡口对接形式,如图 7 所示。焊接采用“气保焊打底+埋弧焊填充/盖面”工艺:打底焊丝为 CHW-55C1,填充及盖面采用埋弧焊丝 CHW-S9+焊剂 CHF101;正面焊接完成后,反面采用碳弧气刨清根,焊后直接空冷,焊接工艺参数如表 5 所示。按 ISO 15614-1:2017 标准要求取样,沿焊缝长度方向切除两端各 25 mm,在剩余区域截取 4 个拉伸试样、焊缝及热影响区各 3 个冲击试样、4 个侧弯试样及 1 个横截面硬度试样。其中,热影响区冲击试样缺口中心点距熔合线 1~2 mm,焊缝冲击试样缺口中心点位于焊缝中心线上;硬度试样在距焊接接头上下表面各 2 mm 及焊缝根部各布置一排测点,共 3 排。试验结果按 ISO 15614-1:2017 及 GB/T 1591

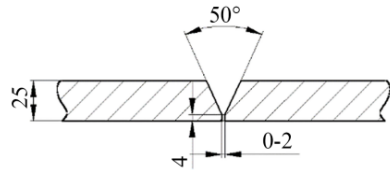


图7 焊接试板对接坡口形式
Fig. 7 Butt groove form of the welding test plate

表5 焊接工艺评定试验参数
Table 5 Welding procedure qualification test parameters

母材	焊材	道间温度 /°C	电流 /A	电压 /V	焊速/ (mm·min ⁻¹)
打底	CHW-55C1	80~180	230~270	28~33	350~450
填充/盖面	CHW-S9+ CHF101	80~180	450~600	27~32	320~460

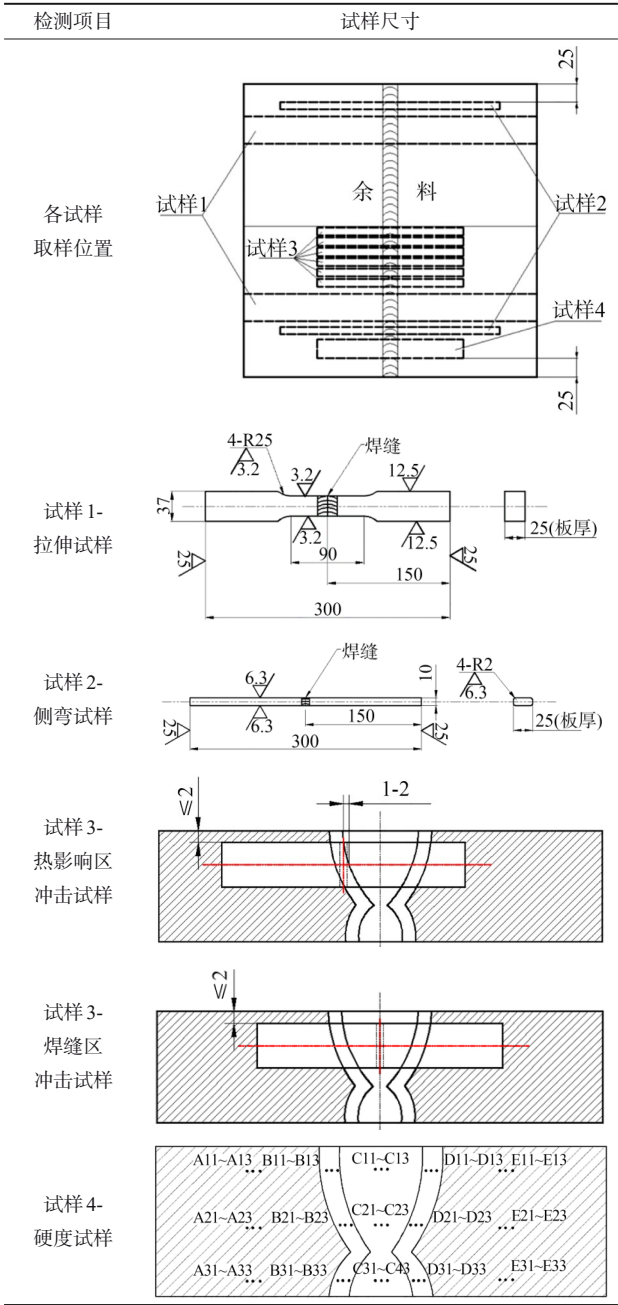
注:保护气体为 CO₂,气体流量 15 L/min。

—2018 标准进行合格判定,具体性能要求如表 6 所示,试样取样位置及尺寸如表 7 所示。

表 6 焊接接头机械性能标准要求
Table 6 Mechanical Properties of welded joints

R_m /MPa	Akv/J (-20℃)	硬度 /HV10	侧弯	宏观金相
≥520	≥40	≤380	$D=40$, $\alpha=180^\circ$	焊缝的宏观金相上不能 出现裂纹、气孔、夹渣、 未熔合等缺陷

表 7 试样取样位置及尺寸
Table 7 Sample sampling location and size



2 试验结果与分析

2.1 母材热切割硬度试验

硬度值随火焰切割距离的变化趋势如图 8 所示。由图可知,硬度的整体变化趋势为随火焰切割面越远,硬度值逐渐降低并趋于稳定,在距离切割面约 5 mm 处达到稳定值。这一结果表明,火焰切割对 Q420D 母材的影响深度约为 5 mm,如果对切割后的表面质量要求较高,建议预留不小于 5 mm 的表面加工余量。

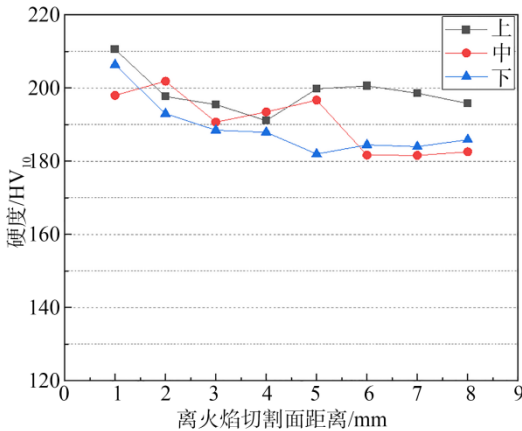


图 8 维氏硬度值随火焰切割距离的变化趋势
Fig. 8 Variation trend of vickers hardness value with flame cutting distance

2.2 热矫试验

表 8 为不同温度热矫后母材的力学性能,编号 J25-600、J25-700、J25-800 分别为 600℃、700℃、800℃温度下热矫后试样。由表可知,三种热矫温度下,母材的抗拉强度最低值为 558 MPa,屈服强度最低值为 467 MPa,延伸率不低于 24%,均满足标准中抗拉强度 520~680 MPa、屈服强度 ≥400 MPa、延伸率 ≥19% 的要求; -20℃冲击吸收能量均值均超过 320 J,远高于标准最低要求值 (≥40 J),且侧弯试验 ($D=30$ mm, $\alpha=180^\circ$) 均无缺陷,表明热矫处理未对母材力学性能造成不利影响。综上,实际生产应用中 600~800℃范围内可以采用火焰烘烤的方法对钢板表面进行矫正。

2.3 斜 Y 坡口拘束试验(小铁研试验)

对小铁研试块焊缝表面进行渗透试验,结果显示焊缝表面无裂纹。

表 9 为不同预热温度后的小铁研试样经线切割

表 8 不同温度热矫后母材力学性能

Table 8 Mechanical properties of base metal after thermal straightening at different temperatures

编号	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_{el} /MPa	延伸率 A/%	冲击 KV2/J(-20 °C)	弯曲 $D=30, \alpha=180^\circ$
J25-600	558/559	467/472	29/28	316.6/323.9/337.4 均值 325.97	合格
J25-700	580/579	497/488	24.5/27	324.4/325.4/317.6 均值 322.47	合格
J25-800	571/575	485/492	26/24	343.7/342.1/346.8 均值 344.2	合格
原始态要求值(GB/T 1591)	520~680	≥ 400	19	≥ 40 (纵向)	—

表 9 不同预热温度下试样的裂纹率结果

Table 9 Crack rate results of samples under different preheating temperatures

预热温度/°C	试样号									
	X-1 左	X-1 右	X-2 右	X-3 右	X-4 右	X-5 右	X-6 右	X-7 右	X-8 右	X-9 右
常温(20 °C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

后焊缝根部的裂纹率结果。结果显示,四种预热温度下,焊缝根部均无裂纹,说明该新型 Q420D 钢焊接热影响区对冷裂纹敏感性较低,焊接性能良好。

2.4 焊接热影响区最高硬度试验

图 9 为硬度值距熔合线切点 O 的变化趋势图。由图 9 可知,熔合线最低切点 O 处的硬度值最高,为 251.7 HV₁₀,随距 O 点距离增加,硬度值逐渐降低并趋于稳定。最高硬度值远低于 ISO 15614-1:2011 标准规定的最高允许值 380 HV₁₀,进一步证实新型 Q420D 钢的淬硬倾向小,冷裂纹敏感性低,焊接性良好。

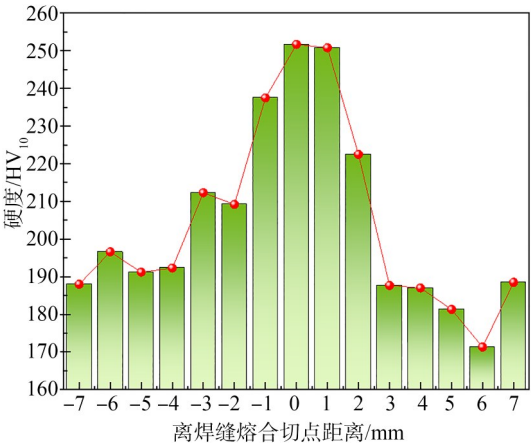


图 9 焊接热影响区硬度趋势

Fig. 9 Hardness trend diagram of the welding heat-affected zone

2.5 焊接工艺评定试验

2.5.1 机械性能试验结果及分析

表 10 为焊接接头抗拉强度、冲击吸收能量、弯曲试样结果,表 11 和图 10 为焊接接头上表面、焊缝根部、下表面不同区域硬度值。由表 10 可知,拉伸试样断裂位置均在母材,可见焊缝抗拉强度值大于母材,可满足使用要求;焊缝处冲击吸收能量平均值在 200 J 以上,热影响区冲击吸收能量平均值在 300 J 以上,远高于母材最低冲击要求值 40 J,焊缝及热影响区韧性良好;侧弯试样在直径为 40 mm 的压头下弯曲角度 180°时,试样拉伸表面上的焊缝区

表 10 拉伸、冲击、侧弯试验结果

Table 10 Results of tensile, impact and side bend tests

试样	拉伸试验		冲击试验		侧弯试验	
	R_m /MPa	断裂 位置	冲击试 验温度	KV ₂ /J	位置	$D=40, \alpha=180^\circ$
1-1	594	母材	-20 °C	177/221.3/232.2 210.16	焊缝	合格
1-2	604	母材	-20 °C	329.9/310.6/340.3 326.9	热影 响区	
合格 指标	≥ 520	—	-20 °C	≥ 40	—	—

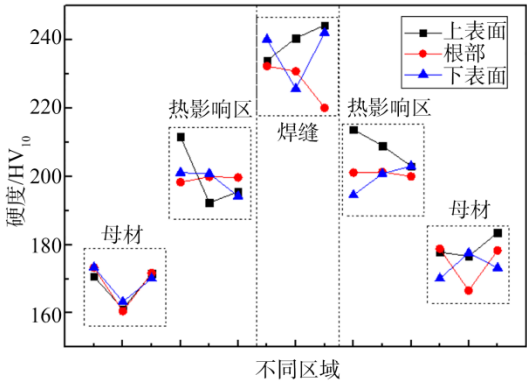


图 10 焊接接头不同区域维氏硬度值

Fig. 10 Vickers hardness values of different areas of welded joint

和热影响区无任何缺陷,说明焊接接头塑性良好。

由表 11 可知,焊缝上表面、焊缝根部、焊缝下表面所有维氏硬度值均低于标准 ISO15614-1:2017 中最高硬度要求 380 HV₁₀,结果满足该标准要求。从图 10 中也可看出,3 排位置硬度变化趋势一致:焊缝区硬度>热影响区硬度>母材区硬度。

表 11 硬度试验结果(HV₁₀)
Table 11 Hardness test results (HV₁₀)

位置	母材	热影响区	焊缝	热影响区	母材
上表面	170.7/173.3/173.4	211.6/198.3/201.1	233.9/232.3/240.1	213.7/201.1/194.5	177.8/178.8/170.1
	均值 172.5	均值 203.7	均值 235.3	均值 203.1	均值 175.6
根部	161.2/160.5/163.3	192.3/199.9/200.8	240.5/230.8/225.7	209/201.3/200.8	176.6/166.6/177.6
	均值 161.7	均值 197.7	均值 232.5	均值 203.7	均值 173.6
下表面	171.5/171.7/170.1	195.5/199.7/194.2	244.3/220.1/242.1	203/200/203	183.5/178.3/173.2
	均值 171.1	均值 196.5	均值 235.5	均值 202	均值 178.3

2.5.2 焊接接头微观组织与断口形貌分析

(1)冲击试样断口分析。

图 11a、11b 分别为焊缝区和热影响区冲击断口韧窝区域在放大 500 倍、1 000 倍和 2 000 倍下的 SEM 形貌。

由图 11a 可知,焊缝断口韧窝区域微观形貌存在撕裂棱、少量小韧窝、河流花样,断口形貌较为平整,为准解理断裂;由图 11b 可知,热影响区断口韧窝区域的大韧窝和小韧窝非均匀分布,为韧窝断裂。依据标准 ISO 15614-1:2017 的 7.7.4 节规定,热影响区冲击试样缺口的中心点距熔合线 1~2 mm,缺口位置对热影响区冲击测试的结果影响重大,缺

口位置决定了其中包括的粗晶区、细晶区、临界晶区及母材组织的比例。实际工程应用中,结合经验,对高强度钢和低强度钢热影响区冲击试样缺口的中心点距熔合线距离分别按 2 mm、1 mm 控制。

准解理断裂属于脆性断裂,韧窝断裂属于韧性断裂,可知焊缝处韧性低于热影响区,则焊缝冲击吸收能量小于热影响区,与表 7 中检测数据一致。

(2)金相组织。

图 12 为焊接接头不同区域的金相组织形貌。由图 12a 可知,焊缝组织为粒状贝氏体和少量铁素体;由图 12b 可知,热影响区粗晶区晶粒粗大,金相组织为粒状贝氏体和铁素体;图 12c 中,母材组织为

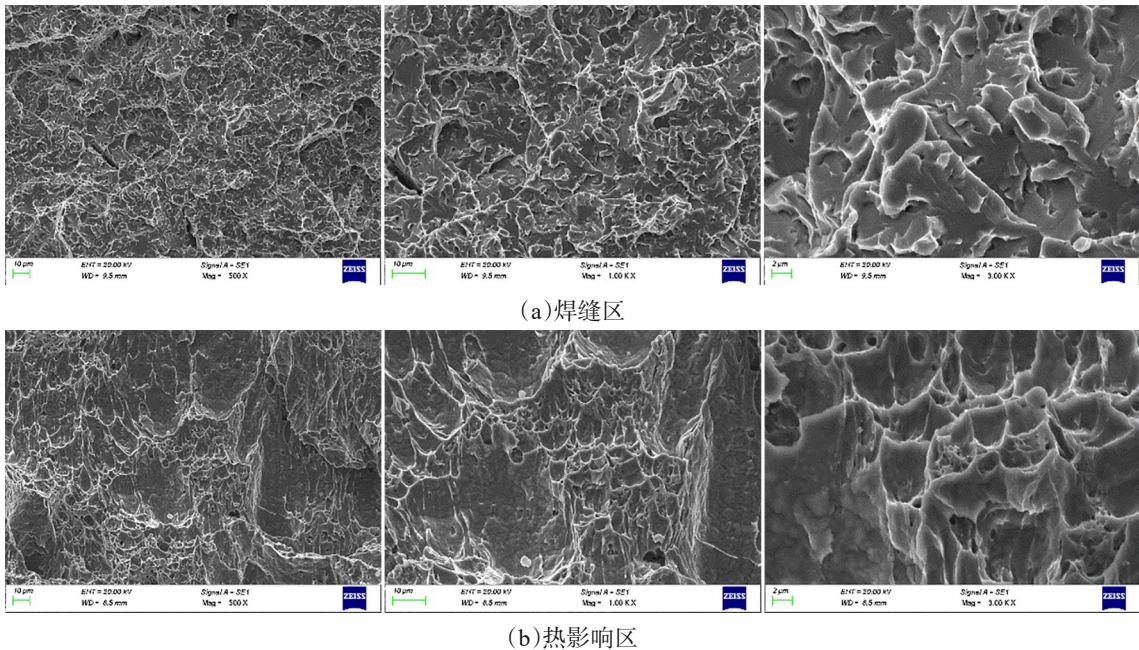


图 11 焊缝和热影响区冲击断口韧窝区域微观形貌

Fig. 11 Dimple zone microscopic morphology of impact fracture of weld seam and heat affected zone

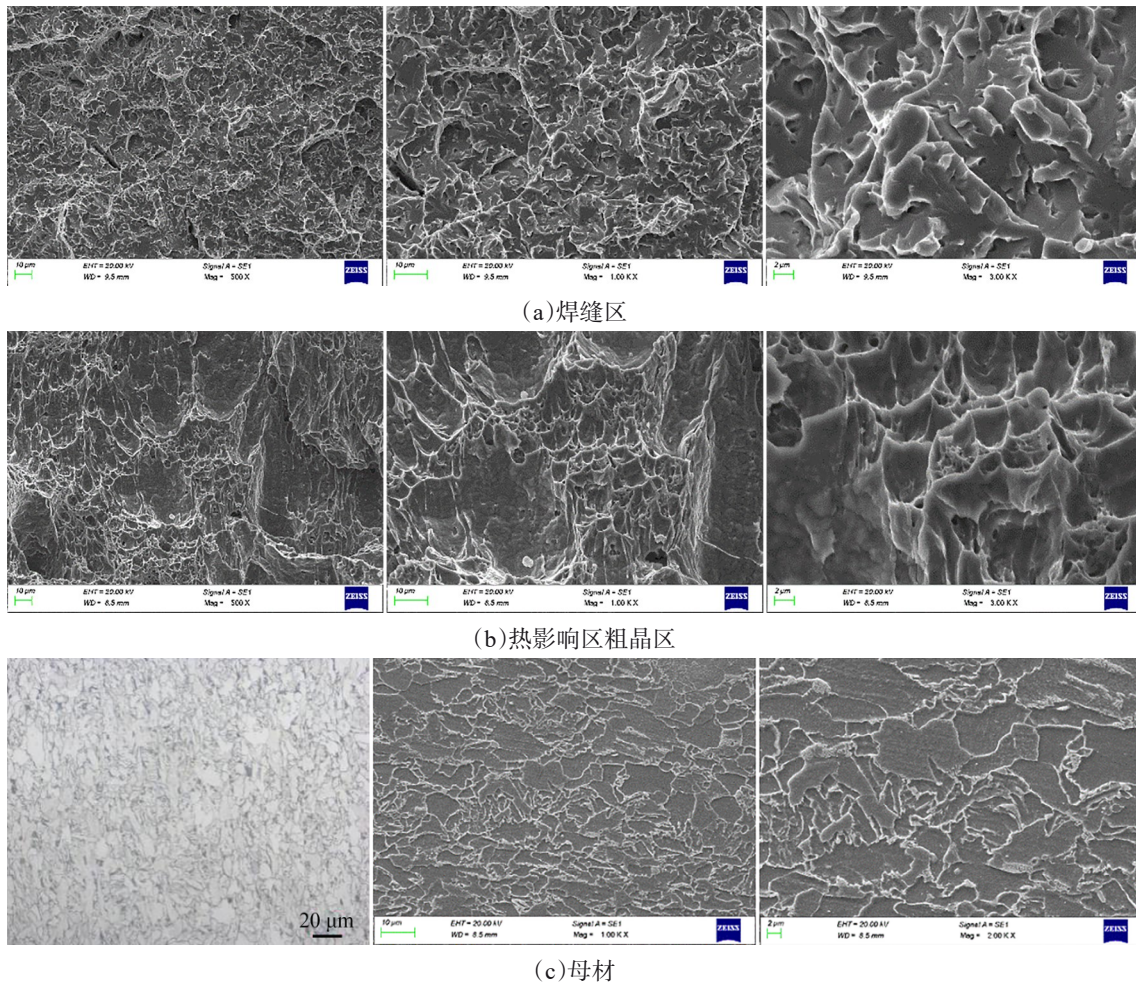


图 12 金相组织及 SEM 微观形貌

Fig. 12 Metallographic structure and SEM microstructure

准多边形铁素体+少量粒状贝氏体。对比图 12a、12b 可知,焊缝区晶粒尺寸远小于热影响区粗晶区,焊缝和热影响区粗晶区处组织均含有更高比例的贝氏体组织,因此硬度高于以准多边形铁素体组织为主的母材,与表 11 中硬度结果相一致。

3 结论

通过火焰切割硬度试验、热矫试验、斜 Y 坡口拘束试验、焊接热影响区最高硬度试验及焊接工艺评定试验,结合力学性能测试与微观组织分析,系统探究了新型 25 mm 厚风电塔筒用 Q420D 钢的热加工性能与焊接性,明确了其工艺适配规律与接头性能特征,主要结论如下:

(1) 对该材质进行火焰切割下料时,距离火焰

切割面越远,硬度值逐渐降低并趋于稳定。实际生产中采用火焰切割下料时,建议预留不小于 5 mm 的表面加工余量,以确保工件表面性能均匀性与加工质量。

(2) 采用 600 °C、700 °C、800 °C 温度对该材质进行火焰矫正,力学性能均能达到母材最低力学性能要求值,抗拉强度最低为 558 MPa,屈服强度最低 467 MPa, -20 °C 下冲击吸收能量均高于 310 J。

(3) 分别在常温、60 °C、80 °C、100 °C 预热温度下对该材质进行斜 Y 型坡口拘束试验,试验焊缝的表面和横截面上裂纹率均为 0,说明该钢种对冷裂纹敏感性低。

(4) 焊接热影响区硬度最高值为 251.7 HV₁₀, 远低于标准 ISO15614-1:2017 标准中的最高硬度允许值 380 HV₁₀, 说明该材质相对淬硬倾向小,冷裂纹敏

感性低。

(5)该材质焊接试验结果显示,焊接接头的抗拉强度、冲击吸收能量、侧弯、硬度值均满足标准ISO 15614-1:2017要求,接头性能良好。焊缝与热影响区粗晶区金相组织为粒状贝氏体和铁素体,母材金相组织为铁素体+珠光体。焊缝冲击断口形貌为准解理断裂,热影响区冲击断口形貌为韧窝断裂。

参考文献:

- [1] 郑黎明,贾科,毕天姝,等. 海上风电接入柔直系统交流侧故障特征及对保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(20):20-32.
ZHENG L M, JIA K, BI T S, et al. Analysis of AC side fault characteristics and their impact on protection of offshore wind power connected to flexible straight systems [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20):20-32.
- [2] 孟昭亮,程远,邵文权,等. 同步直驱风电机组并网系统仿真[J]. 西安工程大学学报,2015,29(4):436-441.
MENG Z L, CHENG Y, SHAO W Q, et al. Simulation of synchronous direct drive wind turbine grid connected system [J]. Journal of Xi'an Engineering University, 2015, 29(4):436-441.
- [3] 于太安,武志勤,耿俊峰. 风电塔筒法兰焊接方法研究[J]. 河北建筑工程学院学报,2008,26(1):79-80+83.
YU T A, WU Z Q, GENG J F. Research on Welding Method of Wind Turbine Tower Flanges [J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Technology, 2008, 26(1):79-80+83.
- [4] 申全民. 关于加快张家口坝上风电开发的对策建议[J]. 经济论坛,2007(4):41-43+69.
SHEN Q M. Suggestions on Accelerating the Development of Wind Power in Zhangjiakou Dam [J]. Economic Forum, 2007(4):41-43+69.
- [5] 梁建明,王占英,刘春东,等. 风电塔筒法兰焊接工艺[J]. 焊接技术,2009,38(2):30-31.
LIANG J M, WANG Z Y, LIU C D, et al. Welding process of wind turbine tower flange[J]. Welding Technology, 2009, 38(2):30-31.
- [6] 李树旺. 基于声发射的风电塔筒材料Q355E钢疲劳监测研究[D]. 甘肃:兰州理工大学,2022.
- LI S W. Research on Fatigue Monitoring of Q355E Steel for Wind Turbine Tower Materials based on Acoustic Emission [D]. Gansu: Lanzhou University of Technology, 2022.
- [7] 杨昊. 风电塔筒的可靠性分析与检测技术研究[D]. 辽宁:沈阳工业大学,2023.
YANG H. Research on Reliability Analysis and Testing Technology of Wind Turbine Towers [D]. Liaoning: Shenyang University of Technology, 2023.
- [8] 成小乐,李玉,孙戡,等. 含典型缺陷的风电塔筒环焊缝强度分析[J]. 西安工程大学学报,2023,37(1):84-92.
CHENG X L, LI Y, SUN J, et al. Strength analysis of circumferential welds in wind turbine towers with typical defects [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2023, 37(1):84-92.
- [9] 徐孝峰,刘劲尧,夏曙光,等. 海上风电机组故障监测一体化系统设计[J]. 电子设计工程,2022,30(14):77-81.
XU X F, LIU J Y, XIA S G, et al. Design of Integrated Fault Monitoring System for Offshore Wind Turbine [J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(14):77-81.
- [10] 封焯文,朱世平,赵志华,等. 基于智能算法的高海拔风电机组多参数优化设计[J]. 陕西电力,2022(04):35-42.
FENG Z W, ZHU S P, ZHAO Z H, et al. Multi parameter optimization design of high-altitude wind turbines based on intelligent algorithms [J]. Shaanxi Electric Power, 2022(04):35-42.
- [11] 刘建爽,李钢强,刘祥银,等. 基于扇区载荷的风电机组塔筒焊缝疲劳强度分析[J]. 风能,2020(8):66-70.
LIU J S, LI G Q, LIU X Y, et al. Fatigue strength analysis of wind turbine tower welds based on sector loads [J]. Wind Energy, 2020(8):66-70.
- [12] 李庆堂,杨保维,付有泰. 新能源风电塔筒制作中几个难点问题探讨[J]. 水电站机电技术,2023,46(7):42-45.
LI Q T, YANG B X, FU Y T. Discussion on several key and difficult issues in the production of new energy wind power tower tubes [J]. Hydroelectric Power Station Electromechanical Technology, 2023, 46(7):42-45.