

屈服强度890MPa级实心焊丝力学性能研究

张亚平, 刘玉双, 熊刚, 田海成, 王哲, 韩海峰

武汉铁锚焊接材料股份有限公司 湖北武汉 430080

摘要: 采用研制的屈服强度890MPa级的实心焊丝进行焊接试验, 通过单因素法研究保护气体、焊接速度、道间温度3个因素对焊缝金属力学性能的影响。结果表明: 该焊丝采用Ar + (5%~20%) CO₂均可满足力学性能指标要求; 焊接速度为15~43cm/min时, 随着焊接速度的增加, 屈服比增加, 冲击吸收能量先增加后降低, 焊接速度为21~23cm/min时, 焊缝具有良好的综合力学性能; 道间温度为70~200℃时, 随着温度的升高, 焊缝强度降低, 伸长率升高, 当道间温度在100~150℃时, 焊缝具有良好的强韧匹配, 当道间温度达到180~200℃时, 强度不满足要求。选用熔敷金属性能较优的工艺参数开展对接焊接试验, 接头具有良好的力学性能。

关键词: 屈服强度; 实心焊丝; 保护气体; 焊接速度; 道间温度; 力学性能

Study on mechanical properties of the solid wire with yield strength of 890MPa

ZHANG Yaping, LIU Yushuang, XIONG Gang, TIAN Haicheng, WANG Zhe, HAN Haifeng

Wuhan TEMO Welding Consumables Co., Ltd., Wuhan 430080, Hubei, China

Abstract: The solid wire with yield strength of 890MPa was used for welding test, and the effects of shielding gas, welding speed and interpass temperature on the mechanical properties of weld metal was studied by single factor method. The results show that Ar + (5%~20%)CO₂ can meet the requirements of mechanical properties. When the welding speed is in the range of 15~43cm/min, the yield ratio increases and the impact toughness first increases and then decreases with the increase of welding speed. When the welding speed is 21~23cm/min, the weld has good comprehensive mechanical properties. When the interpass temperature is 70~200℃, the weld strength decreases and the elongation increases with the increase of temperature. When the interpass temperature is 100~150℃, the weld has a good strength-toughness match, and when the interpass temperature is 180~200℃, the strength does not meet the requirements. The butt welding test was carried out by selecting the process parameters with better deposited metal properties, and the joint had good mechanical properties.

Keywords: yield strength; the solid wire; the shielding gas; welding speed; the interpass temperature; mechanical properties

1 序言

高强钢的应用可减少结构自重, 节约焊接材料消耗、焊接工时, 减少焊接应力, 实现结构综合成本降低的目标。高强钢焊接结构涉及到国民经济建设和国防建设的各个领域, 包括容器储罐、起重

和采矿设备、海洋工程等工作条件苛刻的领域。尤其工程机械对产品的机动性、灵活性、快速反应等性能要求不断提高, 基于结构使用性能要求, 高强钢焊接结构在工程机械领域的应用越来越广泛。目前, 行业竞争激烈, 为降低成本、提高生产效率,

智能化、自动化焊接材料发展迅速，特别是实心焊丝，其熔敷效率高、扩散氢含量低，可降低高强钢冷裂纹敏感性，应用比例逐步扩大^[1]。现采用我公司研制的屈服强度890MPa级的实心焊丝进行焊接试验，通过单因素法研究保护气体、焊接速度、道间温度3个因素对焊缝金属力学性能的影响。

2 试验材料及方法

研制的屈服强度890MPa级实心焊丝规格为 $\phi 1.2\text{mm}$ ，化学成分见表1，熔敷金属力学性能见表2。

表1 实心焊丝的化学成分（质量分数）（%）						
C	Si	Mn	S	P	Ni + Cr + Mo	Ti
0.075	0.44	1.78	0.0013	0.0015	5.5	0.44

表2 熔敷金属力学性能			
屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	-50℃冲击吸收能量 /J
≥890	940~1100	≥14	≥27

焊接母材为涟源钢铁集团有限公司生产的屈服强度为890MPa的高强钢，熔敷试板单面坡口为 10° ，对接试板单面坡口为 30° 。焊机型号为Panasonic YD-500GR W，气体流量控制在20L/min。

熔敷金属试验需制备2块试板和1块垫板。试板尺寸为 $20\text{mm} \times 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 。垫板尺寸为 $10\text{mm} \times 30\text{mm} \times 300\text{mm}$ 。熔敷金属试板按照图1组装。按规定的焊接参数，以每层两道焊的方法在平焊位置焊接。每一层焊道的焊接方向在试件端部改变，每一焊道的厚度为 $2\sim 4\text{mm}$ ，每焊完一道后，若有残渣则应去除，将试板置于静止的空气中待焊缝冷却到相应的温度后再开始焊接下一焊道。从熔敷金属试板上截取1个纵向拉伸试样和1组3个V型缺口冲击试样（见图1），进行拉伸和冲击试验。纵向

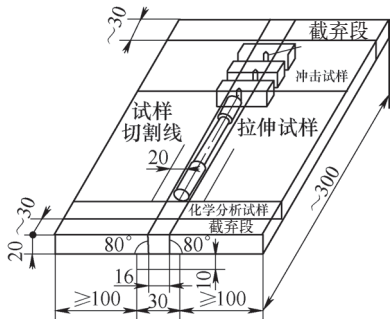


图1 熔敷金属试板及取样示意

拉伸试样的轴线应尽可能位于试件焊缝的中心线，并在试件厚度的中间处。V型缺口冲击试样的轴线应位于试件厚度的中间，且与焊缝中心线垂直，V型缺口应位于焊缝中心线上，并与试板表面相垂直。

对接试板按照图2装配，按照规定的焊接参数完成正面焊接后反面清根，再进行反面焊接。为使焊后试件平直，试件可在焊前预置反变形。从对接试板上截取1个横向拉伸试样，2个弯曲试样和1组3个冲击试样（见图2），进行拉伸、正反弯曲和冲击试验（试样轴线位于板厚中心）。

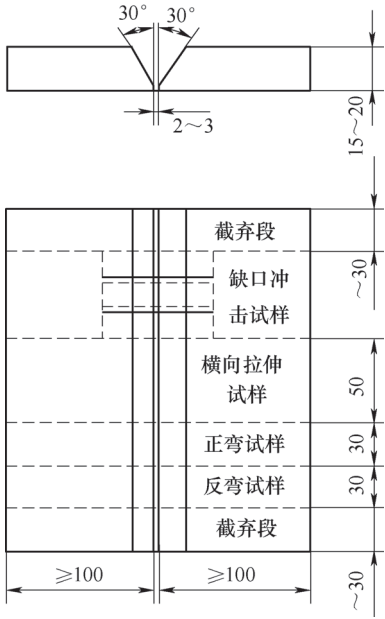


图2 对接试板及取样示意

依据GB/T 2650—2008《金属材料焊缝破坏性试验 冲击试验》开展冲击性能试验；依据GB/T 2651—2023《金属材料焊缝破坏性试验 横向拉伸试验》开展接头拉伸试验；依据GB/T 2652—2022《金属材料焊缝破坏性试验 熔化焊接头焊缝金属纵向拉伸试验》开展熔敷金属拉伸试验，依据GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》开展接头弯曲试验。

3 焊接工艺对力学性能的影响

保护气体通过保护金属熔滴、熔池及焊缝，来提高焊接质量和可靠性。当用纯 CO_2 作保护气体时，电弧稳定性差，熔滴呈非轴向过渡，飞溅较大，焊缝成形较差。当用纯Ar焊接低合金钢时，阴极斑点飘移较大，也易造成电弧不稳。向Ar中加入一定量 CO_2 可显著提高电弧稳定性，并且由于氧

是表面活性物质,可降低液态金属的表面张力,使熔滴细化,所以有利于改善焊缝成形和提高抗气孔能力。焊接高强钢时,从减少氧化夹杂和焊缝氧含量出发,希望采用纯Ar作保护气体;从稳定电弧和焊缝成形出发,希望向Ar中加入氧化性气体,并且加入的氧化性气体CO₂比例不同,对焊接电弧稳定性、熔滴过渡频率、飞溅、焊缝成形及焊道波纹等方面均有影响^[2],因此有必要从保护气体种类出发探讨其对焊缝力学性能的影响。

道间温度对焊缝成形、强度及韧性、焊接裂纹、变形、气体和杂质逸出等有重要影响。道间温度过高时,熔化金属流动性显著增强,可能导致焊缝表面凹凸不平;道间温度过低时,焊缝窄小,焊缝成形不良。随着道间温度提高,焊缝强度可能会降低,而韧性提高。因此,有必要从道间温度出发探讨其对焊缝力学性能的影响。

焊接热输入对焊缝强度、韧性、硬度均有重要影响,焊接热输入过大会导致接头强度降低,冲击性能下降;焊接热输入过小时,则可能影响与母材熔合,并且导致焊缝金属产生脆化相,从而降低韧性,因此合理控制焊接热输入的大小对于获得理想焊缝至关重要。热输入与焊接电流、电弧电压成正比,与焊接速度成反比,其中焊接速度的改变更大程度上影响热输入,因此本研究从焊接速度角度出发研究热输入对焊缝力学性能的影响。

3.1 保护气体对焊缝力学性能的影响

保护气体的组成对焊缝成形、电弧稳定性、焊缝金属化学成分等有重要影响,因此在实际生产过程中应考虑多种因素来选择焊接保护气体。在固定焊接电流、电弧电压、焊接速度及道间温度的条件下,开展Ar与CO₂不同比例的焊接试验,具体焊接参数见表3。

表3 不同保护气体的焊接参数

试验编号	保护气体	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 / (cm/min)	道间温度 /℃
Q1	80%Ar + 20%CO ₂	220 ~ 240	26 ~ 28	21 ~ 23	100 ~ 120
Q2	85%Ar + 15%CO ₂				
Q3	90%Ar + 10%CO ₂				
Q4	95%Ar + 5%CO ₂				

经过试验可得出以下结论。

1) 随着保护气体中CO₂含量的增加,焊缝表面

渣量、飞溅增加,但焊缝成形逐渐平滑。

2) 采用95%Ar + 5%CO₂作为保护气体焊接时,熔池平静,电弧声音柔和,焊道表面有极少量的焊渣分布,无需打磨,但是电弧呈笔刷形状,焊缝略凸(见图3)。原因是Ar电离电压较低,电弧稳定性好;CO₂含量少,熔池冶金反应较弱,但是采用95%Ar + 5%CO₂保护气体焊接时,氧含量低,熔池中液态金属的铺展性不良,导致焊缝略凸,此时需要焊枪适当摆动,以确保与母材的熔合。随着保护气体中CO₂含量提升,电弧的挺度增强,焊缝逐渐平滑,焊接飞溅增多。



图3 95%Ar + 5%CO₂保护气体焊接成形

3) 采用80%Ar + 20%CO₂保护气体焊接时,电弧爆破声严重,有较多细小颗粒飞溅至母材两侧,焊缝成形相对平滑,无需焊枪较大摆动即可与母材较好熔合,焊缝表面被一层较薄的氧化物覆盖(见图4)。这是因为熔滴和熔池的表面张力随着氧含量的提高而降低^[3],熔池液态金属流动性增强,提高焊缝表面的铺展润湿性,使焊缝熔深、熔宽适中,焊道成形平滑。



图4 80%Ar + 20%CO₂保护气体焊接成形

不同保护气体焊接试验焊缝力学性能检测结果见表4。保护气体与焊缝强度及冲击性能的关系分别如图5、图6所示。

表4 不同保护气体焊接试验焊缝力学性能

试验编号	保护气体	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	-50℃冲击吸收能量 /J
Q1	80%Ar + 20%CO ₂	916	957	16.5	67、60、74 (平均值67)
Q2	85%Ar + 15%CO ₂	930	977	16.5	74、66、85 (平均值75)
Q3	90%Ar + 10%CO ₂	938	980	16.0	80、74、66 (平均值78)
Q4	95%Ar + 5%CO ₂	955	1018	17.0	73、78、91 (平均值81)

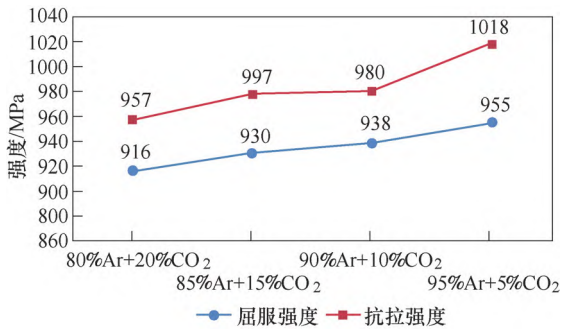


图5 气体类型与焊缝强度关系

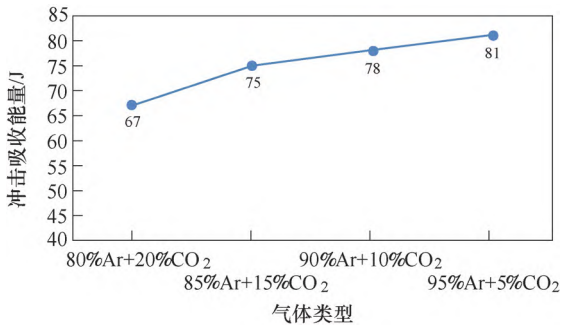


图6 气体类型与冲击性能关系

由表4及图5、图6可知，在相同的焊接参数下，随着保护气体中CO₂含量占比由5%升高至20%时，焊缝金属力学性能均可满足要求，但焊缝强度与低温冲击吸收能量均呈下降趋势。保护气体为95%Ar+5%CO₂时焊缝力学性能最优，因此后续焊接速度、道间温度试验均采用95%Ar+5%CO₂作为保护气体。

3.2 焊接速度对焊缝力学性能的影响

焊接速度是表征焊接生产效率的重要参数，是控制焊接热输入的关键因素，因此合理选择焊接速度对保证焊接质量尤为重要。为了验证焊接速度对焊缝力学性能影响，在固定其他焊接参数情况下改变焊接速度，具体焊接参数见表5，所得焊缝力学性能见表6。焊接速度与焊缝强度、屈强比关系如图7所示，焊接速度与冲击性能的关系如图8所示。

表5 不同焊接速度的焊接参数

试验编号	焊接速度 / (cm/min)	焊接电流 /A	电弧电压 /V	道间温度 /℃	保护气体
Q5	15~18	220~240	26~28	100~120	95%Ar+5%CO ₂
Q4	21~23				
Q6	30~33				
Q7	40~43				

表6 不同焊接速度焊缝力学性能

试验编号	焊接速度 / (cm/min)	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	屈强比	伸长率 (%)	-50℃冲击吸收能量 /J
Q5	15~18	915	1001	0.91	17.0	73、70、69 (平均值70)
Q4	21~23	955	1018	0.94	17.0	73、78、91 (平均值81)
Q6	30~33	965	1015	0.95	16.0	58、72、73 (平均值67)
Q7	40~43	989	1024	0.97	14.0	23、54、33 (平均值36)

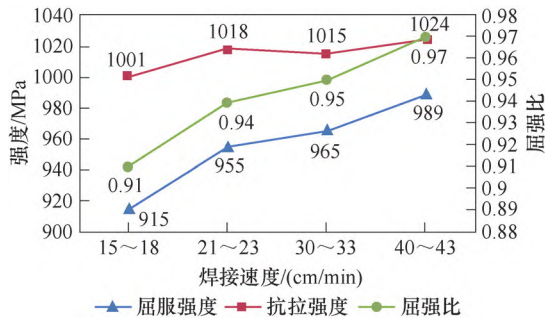


图7 焊接速度与焊缝强度、屈强比关系

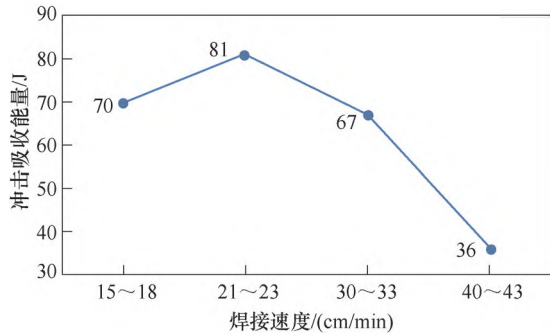


图8 焊接速度与冲击性能关系

由图7可得出，随着焊接速度提高，热输入降低，焊缝金属的屈服强度及抗拉强度均升高，但是屈服强度比抗拉强度提升的更快，屈强比从0.91增加到0.97。由图8可得出，焊接速度为15~43cm/min时，低温冲击吸收能量先升高再急剧降低，焊接速度为21~23cm/min时，-50℃低温冲击吸收能量可达80J以上；焊接速度为40~43cm/min时，虽然-50℃低温冲击吸收能量均值≥27J，但是开始出现单值不满足要求的现象。

3.3 道间温度对焊缝力学性能的影响

道间温度影响焊缝金属冷却速度，对焊缝组织转变过程有影响，包括焊缝组织的晶粒大小、金相组织等，导致焊缝金属力学性能的变化^[4]。为了研究道间温度对力学性能的影响，在固定其他焊接参

数情况下,改变焊接道间温度,具体焊接参数见表7,所得焊缝力学性能见表8。道间温度与强度、屈强比关系如图9所示,道间温度与伸长率、冲击性能的关系如图10所示。

表7 不同道间温度的焊接参数

试验编号	道间温度 /℃	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 / (cm/min)	保护气体
Q8	70~90	220~240	26~28	21~23	95%Ar+5%CO ₂
Q4	100~120				
Q9	130~150				
Q10	180~200				

表8 不同道间温度焊缝力学性能

试验编号	焊接温度 /℃	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	屈强比	伸长率 (%)	-50℃冲击吸收能量/J
Q8	70~90	975	1020	0.96	14.5	48、55、41 (平均值48)
Q4	100~120	955	1018	0.94	17	73、78、91 (平均值81)
Q9	130~150	936	1002	0.93	17.5	77、79、67 (平均值74)
Q10	180~200	889	970	0.92	19	58、51、66 (平均值58)

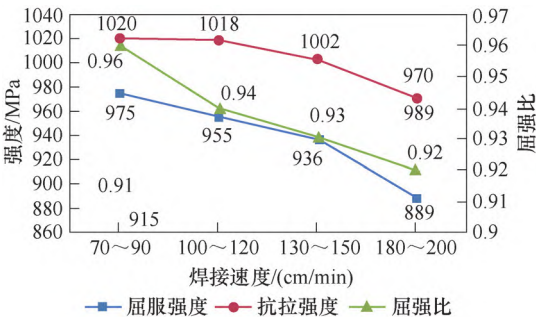


图9 道间温度与强度、屈强比的关系

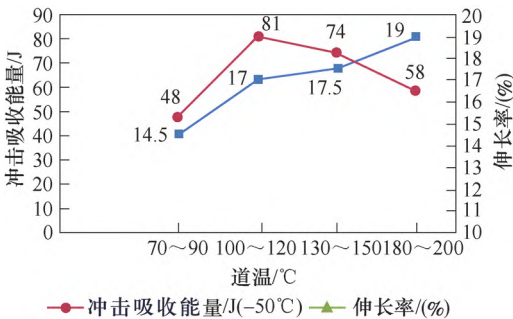


图10 道间温度与伸长率、冲击性能的关系

由表8及图9、图10可得出,随着道间温度从70℃升高到200℃,焊缝金属强度降低,当道间温度达到180~200℃时,屈服强度已不满足要求;随

着道间温度的升高,屈强比从0.96降低至0.92,而伸长率从14.5%升高至19%。道间温度控制在100~150℃时,焊缝金属强度、伸长率及低温冲击性能达到良好的匹配。

3.4 对接接头试验

由上述系列试验得出,编号为Q4的熔敷金属试验焊缝力学性能最优,因此采用该试验参数开展对接接头试验,焊接参数及力学性能分别见表9、表10。对冲击断口进行金相组织分析,焊缝组织为针状铁素体,金相组织如图11所示。

表9 对接接头焊接参数

试验编号	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 / (cm/min)	道间温度 /℃	保护气体
Q11	220~240	26~28	21~23	100~120	95%Ar+5%CO ₂

表10 对接接头力学性能

抗拉强度 /MPa	正反弯 (D=6r, 120° 不裂, 180° 不断)	-50℃冲击吸收能量 /J
997 (断母材)	合格	58、55、61 (平均值58)

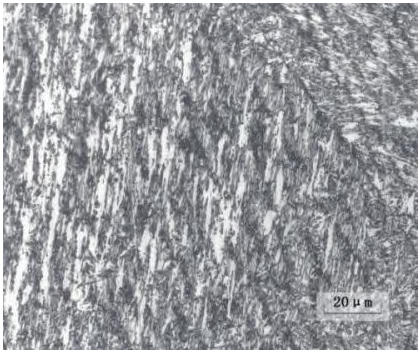


图11 冲击断口金相组织

4 结束语

1) 在焊接电流220~240A、电弧电压26~28V、焊接速度21~23cm/min、道间温度100~120℃的情况下,焊丝采用Ar+(5%~20%)CO₂均可满足焊缝金属力学性能要求,可综合考量焊接工艺性能和焊缝力学性能来选择保护气体。

2) 在焊接电流220~240A、电弧电压26~28V、道间温度100~120℃的情况下,焊接速度控制在21~23cm/min时,-50℃低温冲击吸收能量可达80J以上。

3) 在焊接电流220~240A、电弧电压26~28V、焊接速度21~23cm/min的情况下,道间温度 (下转第80页)

表2 HS367L焊丝化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
0.02	0.45	1.0	0.01	0.004	16.5	5.5	0.5

HS367L焊丝与HS13/5L焊丝相比,具有较高的Mn、Cr、Ni含量。经过试验验证,以HS367L焊丝为焊接材料的叶片焊缝硬度较高,平均硬度达到了300HB,高于以HS13/5L焊丝为焊接材料的叶片焊缝硬度(平均硬度为280HB),具有良好的耐磨性及耐蚀性,能够抵抗复杂水质对转轮流道表面带来的冲击,大大提高转轮的使用寿命,减少返修次数。

由于泵轮焊接工作量大,实际生产过程中选择使用气体保护焊,混合气体采用95%Ar+5%CO₂。前期工艺准备时对该焊接方法按ASME标准进行了焊接工艺评定,评定中的各项性能均达到标准规定的要求。与此同时,根据评定结果编制WPS(焊接工艺规范),作为焊工实际操作的指导文件。焊前采用天然气对转轮进行整体预热,预热应均匀,预热温度≥100℃,以增强抗裂性能^[1]。

为消除转轮焊接时应力带来的影响,常见处理方式退火,以消除焊接应力,焊接工艺评定规定的焊缝最长退火时间为16h,退火时间与焊缝厚度成正比;一旦退火时间超过焊接工艺评定规定的最长退火时间,则焊缝的力学性能会降低。退火前后均需进行无损检测确认焊缝质量,不同的退火时间可能带来不同的无损检测结果^[2]。由于短叶片装焊后叶片间操作空间受限,部分长叶片焊缝无法进行无损检测,所以长叶片的焊缝需以第一次退火后的无损检测结果为准。根据内部标准计算,长短叶片焊缝退火时间均不得<10h。采用上述装配方案,长叶

片需进行两次退火,两次退火的时间相加不能超过焊接工艺评定规定的退火时间。为保证第二次退火时短叶片焊缝的退火时间,第一次长叶片焊接后的退火时间需要缩短,且退火时间应尽可能长。实际生产过程中长叶片第一次退火时间为6h,原因是根据焊接工艺评定要求,在满足短叶片焊缝10h退火时间的要求下,长叶片的最大允许退火时间为6h。

在生产过程中持续对转轮的装配焊接过程进行跟踪,及时收集和发现生产中存在的技术难题,根据过程监控情况调整焊接工艺,确保生产出的转轮满足要求。

4 结束语

该工艺采用了分体装配方式,将长叶片和短叶片分开进行装配和焊接,解决了因操作空间不足而导致的焊接、打磨和无损检测问题,提高了生产效率和转轮的质量;通过选择合适的焊丝、焊接工艺评定及合理的退火时间,保证焊缝质量。经过实际检测,证明上述长短叶片形式转轮的装配及焊接工艺流程合理、可行。叶片焊缝焊后进行UT、PT检测,UT检测按ASME-VIII-APP-12:2023《锅炉及压力容器规范》、PT检测按ASME-VIII-APP-8:2023《锅炉及压力容器规范》执行。所有焊缝焊后无损检测均一次通过,焊后各尺寸均满足图样要求。

参考文献:

[1] 张伟华. 大型泵轮制造工艺[J]. 电机技术, 2015 (6): 47-49.
[2] 王志华. 白鹤滩水电站转轮无损检测技术应用[J]. 人民长江, 2020 (51): 372-375.

MW 20240419

(上接第77页)

控制在100~150℃时,焊缝金属强度、伸长率及低温冲击性能达到良好的匹配。

4) 在焊接电流220~240A、电弧电压26~28V、焊接速度21~23cm/min、道间温度100~120℃的情况下,焊丝采用95%Ar+5%CO₂气体保护,焊接接头可获得良好的综合力学性能,焊缝组织为针状铁素体。

参考文献:

[1] 杨玉民. 工程机械行业中的焊接技术应用[J]. 工程技

术, 2016 (7): 257.

[2] 唐伯钢, 尹士科, 王玉荣. 低碳钢与低合金高强度钢焊接材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
[3] 赵玉珍. 焊接熔池的流体动力学行为及凝固组织模拟[D]. 北京: 北京工业大学, 2004.
[4] 王宪, 杜义, 张京海, 等. 道间温度对10CrNi5MoV钢气体保护焊接头力学性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2014 (2): 37-41.

MW 20240429