

基于 Q420GJ 钢丝极电渣焊接头工艺试验及数值仿真

马殿响 杜建国 樊超 马翔宇 李靖飞 孟璇

(山西航天清华装备有限责任公司 山西 长治 046012)

摘要: 某箱型柱结构中,翼缘板、腹板和内加劲板均采用 Q420GJ 建筑结构用钢板,其中内加劲板采用三边全熔透坡口焊焊缝与翼缘板和腹板进行连接,剩余一边采用电渣焊进行焊接,最后组成全封闭焊缝。本文以 Q420GJ 板材为研究对象,开展丝极电渣焊接工艺试验,焊缝接头经超声波探伤满足标准 I 级要求;分别对焊缝接头横截面进行宏观金相检测、焊缝接头冲击试验和焊缝金属拉伸试验,检测结果表明内加劲板与翼缘板之间的焊缝熔合良好,焊缝区和热影响区—20℃ 冲击功 KV₂ 平均值分别为 141J、173J,焊缝区抗拉强度大于 530MPa,均满足设计要求。最后使用 Sysweld 焊接仿真软件进行电渣焊接头的数值模拟,模拟得到的焊缝截面形状与试验结果基本吻合。

关键词: Q420GJ; 箱型柱; 丝极电渣焊; 宏观金相; 数值模拟

0 引言

目前,越来越多的箱型柱/梁等钢结构产品中,原材料强度等级向 345MPa、420MPa、460MPa 等级别发展和过渡,高强度级别的钢材在多层/超高层钢结构工程中越来越受青睐。在某高层钢结构塔体柱脚构件及箱型柱段的主体结构中,设计要求选用 Q420GJ 建筑结构用钢板。此种材料主要应用于高层建筑结构、大跨度结构、体育场馆及其他重要建筑结构,常以热轧、正火、正火+回火状态交货,具有抗震、抗低温冲击、厚度效应较低等性能。Q420GJ 与常用的碳素钢、低合金钢的主要差异是规定了下屈服强度和屈强比,规定了碳当量和焊接裂纹敏感性指数, P、S 元素的含量均控制在较低水平。

根据现行国家标准 GB/T 19879-2015^[1], 该种材料在规定厚度 50mm 情况下, 其碳当量 CEV=0.4%、

焊接热裂纹敏感系数 P_{cm}=0.26%。根据现行国家标准 GB 50661-2011《钢结构焊接规范》^[2] 中表 3.0.1 钢结构工程焊接难度等级, Q420GJ 焊接难度等级趋于 C 级(较难), 属于较难焊接的材料。Q420GJ 钢化学成分和力学性能见表 1 和表 2。

1 产品结构及工艺特点分析

某产品箱型柱结构主要由翼板、腹板、端板、底板及内加劲板组成, 横截面尺寸 1100mm×1100mm, 总高 5820mm, 主体材质为 Q420GJ C-Z15 高层建筑结构用钢板, 板厚均为 50mm, 其结构见图 1。为提高结构本身抗震等级、抗弯等性能, 要求箱型柱内加劲板与翼缘板和腹板均形成全熔透焊缝——其中三边采用全熔透单侧坡口焊缝, 剩余一边采用电渣焊进行焊接, 形成全封闭焊缝。焊缝质量等级均要求为 GB 50661-2011《钢结构焊接规范》中 I 级要求,

表 1 Q420GJ 钢化学成分(厚度 50mm)

牌号	化学成分(质量分数)/%												
	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	Als	Cr	Cu	Ni	Mo
Q420GJ C-Z15	≤ 0.2	≤ 0.55	≤ 1.7	≤ 0.025	≤ 0.015	≤ 0.2	≤ 0.07	≤ 0.03	≥ 0.015	≤ 0.8	≤ 0.3	≤ 1.0	≤ 0.50

表 2 Q420GJ 钢力学性能(厚度 50mm)

牌号	拉伸试验				纵向冲击试验	弯曲试验	厚度方向拉伸试验
	下屈服强度 R _{eL} /MPa	抗拉强度 R _m /MPa	屈强比 R _{eL} /R _m	断后伸长率 A/%	冲击吸收能量 KV ₂ /J	180° 弯曲压头直径 D/mm	断面收缩率 Z/%
Q420GJ C-Z15	420 ~ 550	530 ~ 680	≤ 0.83	≥ 20	≥ 47	D=3a	15

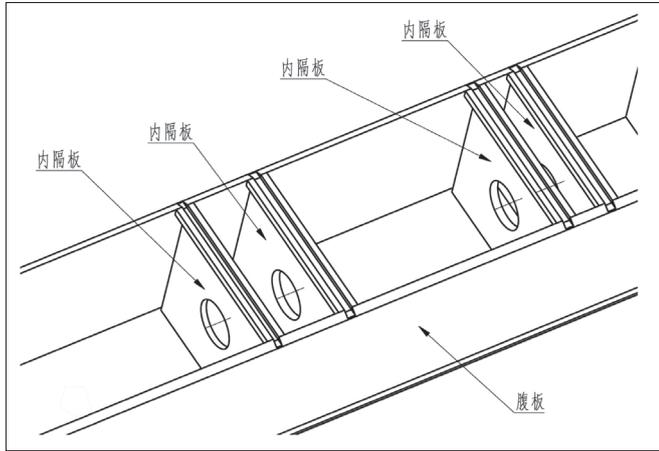


图1 箱型柱结构组成

焊后需进行100%内部无损探伤^[3]。

根据工厂以往箱型结构产品的生产经验，设计技术要求中一般只规定焊接内加劲板的三边焊缝，剩余一边则不进行焊接。对于重要承力结构件，可在面板上对应内加劲板的位置加工塞焊孔以进行焊接。而对于超大型箱型结构件，可在内加劲板上设计人孔，焊接人员通过人孔进入箱型梁内部，实现内加劲板四边焊缝的焊接。但是对于空间小、无法通过人孔进行内部的箱型梁构件，要实现内加劲板四边焊缝的焊接，则需通过其他焊接工艺技术，实现内加劲板剩余一边焊缝的焊接。

基于对电渣焊工艺技术的研究和适用性分析，本产品内加劲板的焊接采用非熔嘴式丝极电渣焊。为确保内加劲板电渣焊的焊缝质量等级满足标准中相应要求，在产品投产前，需按照相应要求进行焊接工艺评定，确保焊接工艺参数和检测结果符合标准

规定。

根据标准 GB 50661-2011 第 4.0.5 条^[2]，标称屈服强度 > 295MPa 且 ≤ 370MPa 为 II 类钢材；标称屈服强度 > 370MPa 且 ≤ 420MPa 为 III 类钢材。本产品中使用的 Q355B、Q345GJ 属于 II 类钢材，Q420GJ 为 III 类钢材。

根据标准 GB 50661-2011 第 6.2.2 条^[2]，I、II 类同类别钢材中当强度和等级发生变化时，在相同供货状态下，高级别钢材的焊接工艺评定结果可替代低级别钢材；III、IV 类同类别钢材中的焊接工艺评定结果不得相互替代。

根据标准 GB 50661-2011 第 6.2.4 条^[2]，对于电渣焊方法，其适用厚度范围为 0.75t ~ 1.1t (t 为板厚)。因此，对于本钢结构工程中使用的钢材 Q420GJ 及其厚度规格，焊接工艺试验方案见表 3。

表3 丝极电渣焊工艺试验方案

序号	钢材及质量等级	试件厚度/mm	厚度适用范围/mm	备注
1	Q420GJ C-Z15	50	37.5 ~ 55	—

2 电渣焊焊接工艺试验

2.1 焊接试验件方案设计

根据产品结构特点，采用 1:1 试件模拟本产品的电渣焊接头，分别设计两种高度的组件进行试件焊接，试件接头形式见图 2。翼缘板和加劲板均采用厚度为 50mm 的钢板，两侧衬板采用厚度为 40mm 的钢板，共同组成 25mm × 50mm 的电渣焊焊孔，衬板与翼缘板、加劲板之间采用角焊缝进行连接固定。

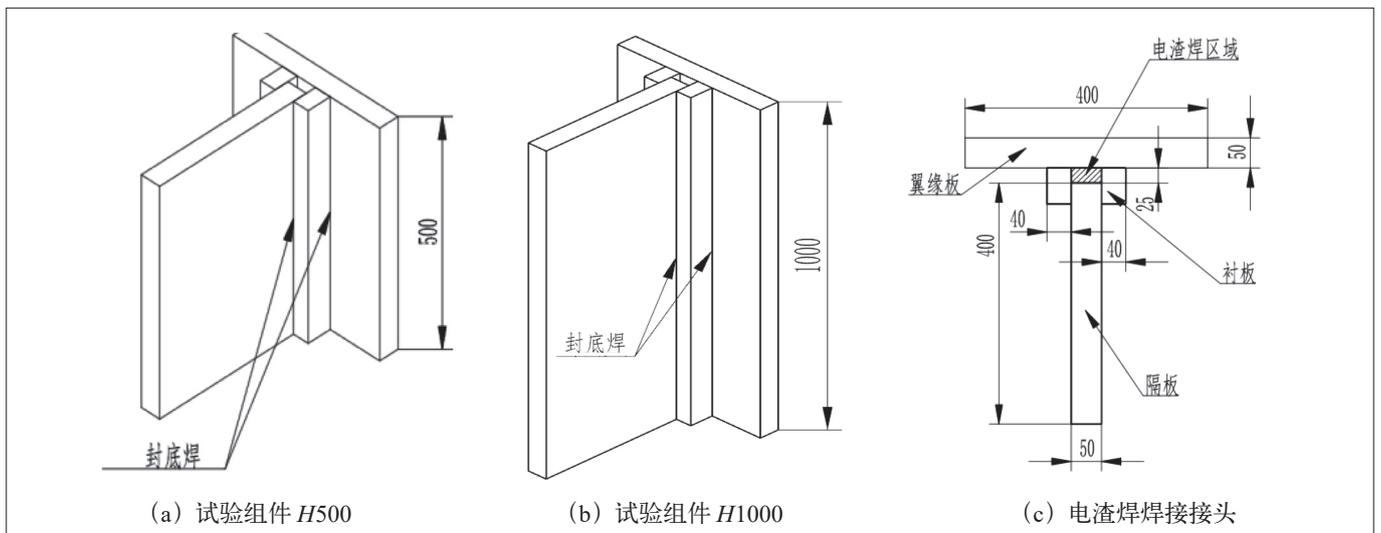


图2 电渣焊焊接接头及工艺试验组件

根据试验组件的结构组成,两种组件的电渣焊焊接接头工艺试验件明细见表4。

2.2 焊接设备及焊接材料

根据试验方案,本产品焊接设备采用ZHS-1000丝极电渣焊专用焊机,焊接材料选择H10Mn2、直径 ϕ 1.6mm桶装焊丝,焊剂采用熔炼型高硅高锰低氟JF-600电渣焊专用焊剂,粒度为40~60目,P含量 \leq 0.05%、S含量 \leq 0.06%。H10Mn2焊丝的相关力学性能见表5。

2.3 焊接工艺设计

通过查询焊接手册以及建筑钢结构行业内电渣焊相关文献^[4-7],并结合焊接设备厂家推荐值,本产品丝极电渣焊接头焊接工艺参数见表6。

2.3.1 电渣焊接头组装控制要求

根据标准GB 50661-2011第7.17条^[2]要求,电渣焊在引弧和熄弧时可使用钢制或铜制引熄弧块,且使用的铜制引熄弧块长度不应小于100mm、引弧槽深度不应小于50mm,引弧槽的截面积应与正式电渣焊接头的截面积一致。根据标准JGJ 99-2015第9.6.15条^[4],电渣焊衬板的下料、加工及装配应严格控制质量和精度,使其与横隔板、翼缘板紧密贴合;当装配缝隙大于1mm时,应采取措施进行修整和补救。由于电渣焊的渣池深度较大,一般为20~40mm,渣池垂直上升的速度较慢,若出现较大的缝隙,熔融的铁水将会顺着缝隙从衬板侧流出,在箱型柱内部

产生大量多余物,且渣池深度无法保持,从而影响焊缝质量。

2.3.2 引弧造渣

丝极电渣焊通过电弧熔化焊剂,从而逐渐形成稳定的渣池,因此引弧时,为了得到一定深度和稳定的渣池,提前在引弧槽内放入一些铁屑、细焊丝,然后盖上一层约15~20mm厚的焊剂。为了引弧和加速造渣过程,起始阶段采用较高的电压(高于正常电压4~5V)和电流以及较低的送丝速度。引弧形成初始渣池后,需逐步加入焊剂、压住电弧,以防飞溅。当焊剂熔化并达到一定熔深时,将焊接电压、送丝速度调整至正常值,进入正常焊接。

2.3.3 正常焊接

正常焊接过程中,为了得到高质量的焊缝组织,需保持焊接参数恒定,并经常测量渣池深度,确保渣池有足够熔融金属填充焊口间隙,使之有效熔合衬板、隔板侧壁。焊接过程中如果发生少量侧漏,需及时调整焊接电压及送丝速度,保证渣池的有效深度。

2.3.4 收弧操作

电渣焊焊缝收尾处最容易产生缩孔、裂纹和夹渣等缺陷,因此收尾处需设置收弧板,使其收尾焊缝位于收弧板内。收弧时,逐渐减小电流和电压直至断电,断电后不能立即放掉渣池,待其缓慢冷却后,再采用气割等方式去除收弧段焊缝。

表4 电渣焊接头工艺试验件明细

试件图号	名称	材质	规格/mm	尺寸/mm	数量/件	备注
0-11	隔板	Q420GJ C-Z15	50	400×500	1	0-10/H500
0-12	翼缘板	Q420GJ C-Z15	50	400×500	1	0-10/H500
0-13	衬板	Q420GJ C-Z15	40	60×500	2	0-10/H500
0-21	隔板	Q420GJ C-Z15	50	400×1000	1	0-20/H1000
0-22	翼缘板	Q420GJ C-Z15	50	400×1000	1	0-20/H1000
0-23	衬板	Q420GJ C-Z15	40	60×1000	2	0-20/H1000

表5 H10Mn2 焊丝化学成分及力学性能

焊丝牌号	焊丝化学成分/%								熔敷金属力学性能				
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	R_{eL}/MPa	R_m/MPa	R_{eL}/R_m	A/%	KV ₂ /J
H10Mn2 ϕ 1.6mm	0.06	0.05	1.73	0.008	0.006	0.018	0.006	0.08	428	516	0.83	32	131

表6 电渣焊试板焊接工艺参数

试板编号	焊接电流/A	电弧电压/V	渣池深度/mm	送丝速度/(mm/s)	预热温度/°C	环境温度/°C	环境湿度/%
0-10	390~400	45~50	20~30	14	\geq 80	\geq 10	\leq 75
0-20	390~400	45~50	20~30	14	\geq 80	\geq 10	\leq 75

2.4 焊缝超声波检测要求及结果

根据标准 GB 50661-2011 第 8.1.5 条^[2], 电渣焊接头的焊缝外观成形应光滑, 不得有未熔合、裂纹等缺陷, 当板厚小于 30mm 时, 压痕、咬边深度不应大于 0.5mm; 板厚不小于 30mm 时, 压痕、咬边深度不应大于 1mm。

电渣焊焊缝质量等级要求为 I 级, 其合格等级不应低于标准 GB 50661-2011 第 8.2.4 条中 B 级检验的 II 级, 满足上述要求后, 还应进行焊缝熔透宽度、焊缝偏移检测。

超声检测 B 级检验应符合下列规定: B 级检验采用一种角度探头在焊缝的单面双侧进行检验, 受几何条件限制时, 应在焊缝单面、单侧采用两种角度探头(两角度之差大于 15°)进行检验。母材厚度大于 100mm 时, 应采用双面双侧检验, 受几何条件限制时, 应在双面单侧, 采用两种角度探头(两角度之差大于 15°)进行检验, 检验应覆盖整个焊缝截面。条件允许时应作横向缺欠检验。焊缝超声波检测位置见图 3。

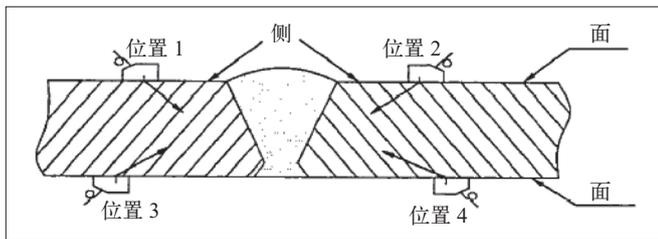


图 3 焊缝超声波检测位置示意图

根据上述要求, 采用超声波检测方法, 对试验组件焊缝接头进行 UT 无损检查, 检查结果满足 GB 50661-2011 中 I 级质量要求。

2.5 焊缝截面宏观金相检测

依据试验工艺规程, 在试验组件上截取焊缝横截面的金相试样, 经过铣削、磨削、腐蚀等工序得到电渣焊横截面的宏观金相组织, 如图 4 所示, 结果显示隔板与翼缘板之间熔合良好。

2.6 焊缝接头冲击及拉伸试验

依据试验工艺规程, 分别在试验组件上截取相关焊接接头冲击试样、焊缝金属拉伸试样, 并根据国家标准分别进行试样的冲击试验、拉伸试验, 试验数据见表 7、表 8。结果显示, 其冲击功、焊缝金属屈服强度和抗拉强度均符合设计要求。

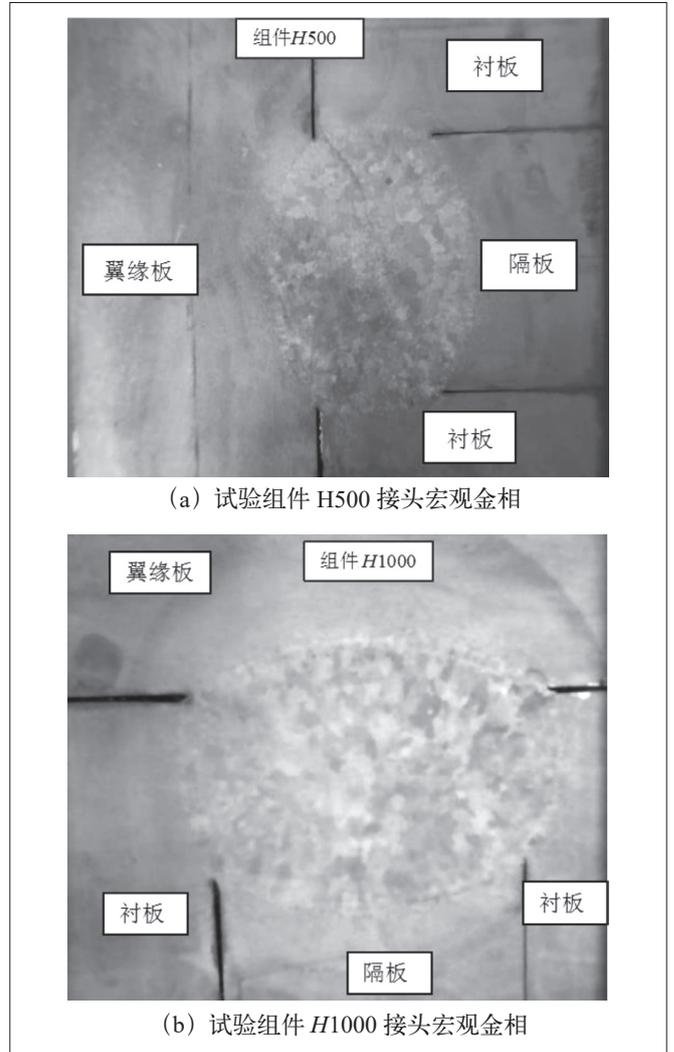


图 4 电渣焊接头宏观金相图

表 7 电渣焊接头冲击试验数据表

规格/mm	试样编号	KV2/J	平均值/J
δ 10	焊缝区	1-0CJ-11	150
		1-0CJ-11	141
		1-0CJ-11	132
δ 10	热影响区	1-0CJ-22	156
		1-0CJ-22	177
		1-0CJ-22	185

表 8 电渣焊接头焊缝区拉伸试验数据表

试件编号	直径/mm	屈服力/kN	最大拉力/kN	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 R_p /MPa
1-0LS-1-1	10	34.15	41.76	532	435
1-0LS-1-2	10	34.69	42.48	541	442
1-0LS-1-3	10	34.46	41.65	531	439

3 电渣焊接头的数值模拟仿真

根据电渣焊实际焊接过程，本文采用电弧加热和熔化金属的方式进行模拟仿真，采用这种方法不仅可以简化数值模型，而且不致于损失计算精度^[8]。根据电渣焊接头参数，采用 Sysweld 焊接仿真软件建立有限元模型，由于该模型在几何形状上为对称模型，采用 1/2 模型进行仿真计算。网格划分时，为平衡计算精度和计算时间，焊缝区及热影响区采用较密网格，远离热影响区采用较大的网格。有限元计算模型和网格划分结果如图 5 所示，有限元模型总节点数为 170784，单元总数为 159790，焊缝区及热影响区单元大小为 2mm。

在焊接温度场的计算过程中，采用非线性传热方程来描述由焊接电弧产生的热在焊接工件内部传导的过程。由于电渣焊的焊接速度相对较慢，熔池内部温度相对比较均匀，所以本文采用半椭球等密度体积移动热源来模拟电渣焊的热输入。

将上述工艺试验过程中的相关参数输入软件进行仿真计算，计算所得的熔池形态如图 6 所示。通过对比仿真计算的熔池形状与焊接工艺试验得到的焊缝宏观金相，仿真计算的结果与实际焊缝形状基本吻合。

4 结语

本文基于 Q420GJ 板材开展丝极电渣焊焊接工艺

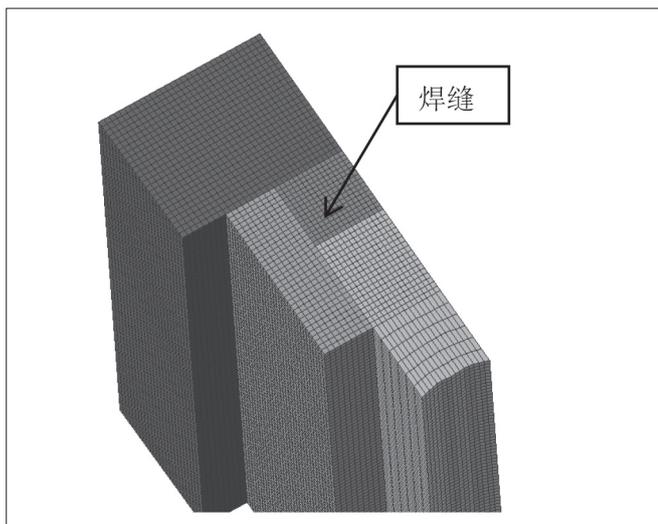


图 5 有限元模型

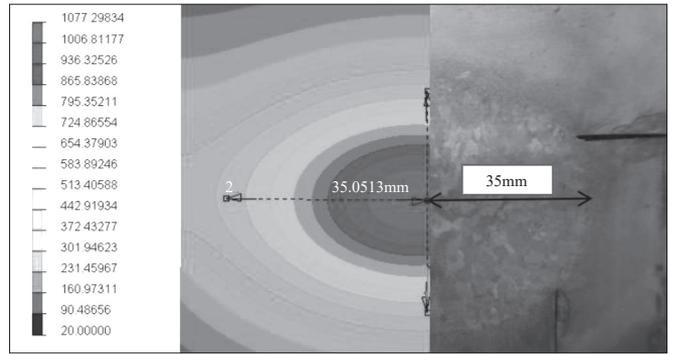


图 6 电渣焊接头数值模拟与实物对比图

试验研究，确定箱型构件内加劲板丝极电渣焊工艺方法，并开展焊接工艺试验，分别对焊缝接头横截面进行宏观金相检测、焊缝接头冲击试验和焊缝金属拉伸试验，各项检测结果均满足设计要求。最后使用 Sysweld 焊接仿真软件进行电渣焊接头的数值模拟，模拟得到的焊缝截面形状与试验结果基本吻合。

参考文献：

[1] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 建筑结构用钢板:GB/T 19879-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构焊接规范:GB 50661-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构工程施工质量验收标准:GB 50205-2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.

[4] 陈祝年. 焊接工程师手册 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[5] 包慧慧, 阎增兴, 赵庆科, 等. 箱形柱熔嘴丝极电渣焊 SES 焊接技术分析 [J]. 工程技术研究, 2021, 6(17):35-37.

[6] 陈浮, 黄志军, 廖凯, 等. Q420GJ 钢双丝埋弧焊接试验 [J]. 钢铁研究, 2014, 42(01):33-35.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层民用建筑钢结构技术规程:JGJ 99-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

[8] 孙加民, 蔡建鹏, 叶延洪, 等. 电渣焊接头温度场数值模拟 [J]. 焊接学报, 2015, 36(7):93-96.

作者简介: 马殿响 (1990.05-), 男, 回族, 云南昭通人, 本科, 工程师, 研究方向: 大型黑色金属结构件焊接工艺技术、机械加工工艺技术。