

焊接参数对钢筋骨架主筋力学性能影响

陈士忠¹,白云飞¹,刘子金²,汶浩²

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中国建筑科学研究院有限公司
建筑机械化研究分院,河北 廊坊 065000)

摘要 目的 研究 CO_2 气体保护焊中不同焊接参数对钢筋骨架主筋力学性能的影响,以提高钢筋骨架自动成型生产线的生产质量和生产效率。方法 通过四因素三水平正交实验,结合钢筋骨架自动成型生产线焊接钢筋骨架,研究焊接时间、电弧电压、焊接电流、箍筋间距4个因素对钢筋骨架主筋抗拉强度、屈服强度以及延展性的影响,通过优良率的对比明确各因素对焊接结果的影响程度和最佳的焊接参数组合。结果 分析结果表明焊接电流为 300 A、电弧电压 25 V、焊接时间 1.3 s、箍筋间距 100 mm时焊接效果最佳。结论 4个焊接因素对钢筋骨架焊接结果影响顺序从大到小依次为焊接电流、电弧电压、焊接时间、箍筋间距,并且电流对钢筋骨架主筋的焊接结果影响最明显。

关键词 焊接参数;钢筋骨架;主筋;延伸率;优良率

中图分类号 TU 755.3⁺3;TG404

文献标志码 A

The Influence of Welding Parameters on Mechanical Properties of Main Reinforcement of Steel Skeleton

CHEN Shizhong¹, BAI Yunfei¹, LIU Zijin², WEN Hao²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China Academy of Building Sciences Limited Construction Mechanization Research Branch, Langfang, China, 065000)

Abstract: The influence of different welding parameters on the mechanical properties of the main reinforcement in CO_2 gas shielded welding is studied, in order to improve the production quality and efficiency of the automatic forming production line. Through four factors and three levels orthogonal experiment, combined with the automatic forming production line of steel skeleton, the influence of welding time, arc voltage, welding current and stirrup spacing on the tensile strength, yield strength and ductility of the main reinforcement of steel skeleton is studied. Through the comparison of the excellent rate, the influence degree of each factor on the welding result and the best combination of welding parameters are determined. The results show that the welding effect is

收稿日期:2019-03-21

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC704002)

作者简介:陈士忠(1979—),男,副教授,博士,主要从事质子交换膜燃料电池技术和建筑机械设计方面研究。

the best when the welding current is 300 A,the arc voltage is 25 V,the welding time is 1.3 s and the stirrup spacing is 100 mm. The influence order of the four welding factors on the welding results of the steel skeleton is welding current,arc voltage,welding time,stirrup spacing,and the current has the most obvious influence on the welding results of the main reinforcement of steel skeleton.

Key words: welding parameters; steel skeleton; main reinforcement; percentage elongation; good proportion ratio

随着国家工业的不断进步,人们对工业生产的节能降耗和环保要求不断提高。在促进建筑工程的不断升级,进入新常态时期的同时,国家在“十三五”期间明确提出了“建筑工业化和绿色建筑的持续发展”^[1-2]的理念。钢筋骨架作为重要的建筑材料,其质量直接影响工程的进程与效率。过去,钢筋骨架成型主要采用绑扎或手动点焊,这两种骨架成型方式不仅具有尺寸偏差较大的缺陷,而且很难保证焊点质量的统一性和稳定性^[3]。然而焊接技术作为一种最常用的连接方式,被广泛应用于工业生产^[4-7]。钢筋骨架自动成型焊接技术是一种新型的骨架成型技术,通过采用钢筋骨架自动成型生产线进行钢筋骨架的焊接,具有优化焊接质量、提升生产效率、改善工人工作条件等优势^[7-8],从而有效避免了绑扎和手动点焊等方式的缺陷。

CO₂ 气体保护焊是应用 CO₂ 作为保护气,为了防止熔化金属被氧化,对空气和熔融金属机械进行隔离的一种焊接方法,具有焊接质量好、外形优良、韧性高等优点^[9]。此外,CO₂ 气体保护焊操作简便,易于实现设备的自动化运作,不但节约了成本,还满足了现代建筑外观协调美的需求。房元斌等^[10]通过正交试验对 T 形接头的焊接参数进行调整,不仅优化了焊缝的宏观形貌本,还降低了焊接残余应力的峰值。阎红^[11]通过对药芯焊丝中 Al 含量的控制,得出了当焊丝中 Al 质量分数为 0.48% 时,焊缝的力学性能良好的结论。笔者通过正交实验对 CO₂ 气体保护焊焊接电流、电弧电压、焊接时间、箍筋间距等焊接参数进行控制与调节,以寻求最

佳的焊接效果。在钢筋骨架自动成型生产线的可调范围内,主筋采用直径为 16 mm、箍筋采用直径为 8 mm 的 HRB400 级钢筋进行正交实验,研究不同焊接参数对钢筋骨架主筋力学性能的影响情况,进而优化焊接参数,提高钢筋骨架自动成型过程中的优良率。

1 正交实验基本原理

正交实验设计是在拉丁方理论和群论的基础上研究复杂因素水平的一种高效、迅捷、经济的实验设计方法^[12-13],并且可以通过部分代表性较强的实验,衡量各个实验因素对参数指标的影响情况,从而获得最佳的参数组合^[14-16]。根据正交实验正交性的特点,从全面试验中挑选部分有代表性的实验参数点进行实验,实现较少的实验次数,取得比较准确可靠的实验参数优化性能组合^[17-18]。由此,使正交实验设计方法作为力学性能评价标准逐步运用于焊接工艺的优化^[19-22]。正式实验开始前,笔者进行了数百组的钢筋骨架自动焊接技术的参数赋值与调试实验,得到焊接试验参数调整有效范围见表 1。由于焊接为自动进行,为使焊点得到保护气的充分保护,避免被氧化,所以设置焊接时间时存在 0.2 s 的延迟。即实际焊接时间 = 焊接时间 - 0.2。

表 1 实验参数有效范围

Table 1 Effective range of experimental parameters

焊接时间	电弧电压	焊接电流	箍筋间距
A/s	B/V	C/A	D/mm
1.0 ~ 1.6	20 ~ 30	220 ~ 380	100 ~ 200

由于钢筋骨架生产线进行生产时需要输

入参数的自动焊接来实现钢筋骨架的自动生产,因此为了进一步精确和优化焊接质量以及生产效率,通过式(1)确定正交实验次数:

$$n=\sum_{i=1}^m(S_i-1)+1=m(S-1)+1. \quad (1)$$

式中: n 为实验次数; m 为因素数量; S 为水平数量。

由式(1)计算可得实验次数为9次,所以应用代表复杂因素水平的正交表 $L_9(3^4)$ 进行实验。

本次实验的主要目的:①探索影响钢筋骨架自动成型焊接因素的效应曲线规律;②确定焊接质量最优因素组合以及各因素的影响程度。

2 焊接实验

2.1 设计参数和试件选材

采用钢筋数控弯箍机和闪光对焊机制作矩形封闭箍筋,封闭箍筋直径为8 mm,封闭箍筋长宽为360 mm×200 mm,主筋直径为16 mm,待焊接封闭箍筋冷却后方可使用。根据生产流程并按照《钢筋焊接及验收规程》(JGJ18—2012)的要求,确定本次焊接实验的因素为焊接时间(A)、电弧电压(B)、焊接电流(C)、箍筋间距(D),实验母材采用HRB400级钢筋,材料性能见表2。实验共9组,每组10根,共计90根,对每根主筋进行拉伸实验。焊接实验主筋与箍筋的固定见图1。

表2 HRB400级钢筋参数

Table 2 HRB400 reinforcement parameters			
母材材料	$R_{P0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$\sigma/\%$
HRB400	435	612	15.6

注: $R_{P0.2}$ 为屈服强度; R_m 为抗拉强度; σ 为延伸率。

2.2 试件焊接及检验设备

实验采用廊坊凯博建设凯博科技有限公司所研发的自动钢筋骨架成型生产线进行钢筋骨架的自动焊接(见图2)。实验采用型号为ER50-6、直径为1.2 mm的焊丝。



(a)主筋定位 (b)箍筋定位
图1 试件焊接夹持图

Fig. 1 Welding clamping diagram of specimen



图2 钢筋骨架自动成型生产线

Fig. 2 Automatic forming production line of steel frame

调整实验参数分组进行焊接,待成型骨架(见图3)冷却结束后,在其上截取主筋长度为800 mm,箍筋预留长度距焊点100 mm(见图4),以防止切割时对焊点造成损伤。应用液压拉伸实验仪器,依据《金属材料拉伸试验方法》(GB/T228.1—2010)对试件进行拉伸,由计算机软件得出实验数据。

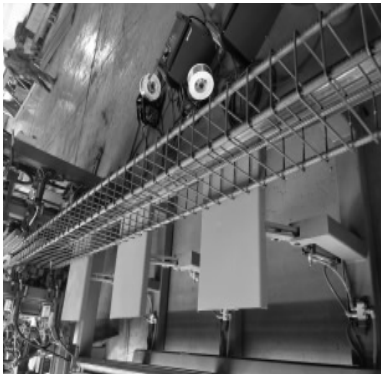


图3 钢筋骨架

Fig. 3 Framework of steel reinforcement

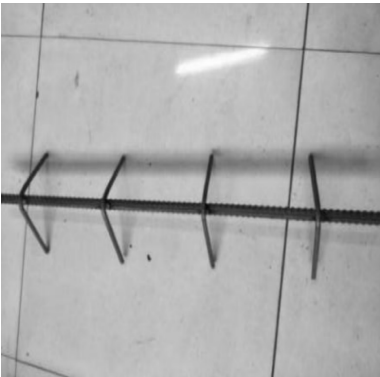


图4 拉伸实验试件图

Fig.4 Tensile test specimen diagram

2.3 实验结果评价指标

依据《钢筋焊接机验收规程》(JGJ18—2012)^[23]的准则,将主筋拉伸断裂时的抗拉强度、屈服强度、延伸率与母材的各项性能的对比结果作为评判准则。通过对实验数据的极差进行分析,确定焊接时间、电弧电压、焊接电流、箍筋间距的各个因素水平对钢筋骨架抗拉强度、屈服强度、延伸率的影响规律,找出主筋性能最接近母材、外观最优的结果。

3 焊接钢筋骨架正交实验过程

3.1 设计正交实验

为了使钢筋骨架自动焊接的参数范围更加精确,根据之前研究得到的有效范围和钢筋焊接验收规范要求,确定实验因素水平见表3。

表3 正交实验水平因素表

Table 3 Orthogonal test level factor table

水平	焊接时间/ s	电弧电压/ V	焊接电流/ A	箍筋间距/ mm
1	1.0	20	220	100
2	1.3	25	300	150
3	1.6	30	380	200

根据正交实验标准正交表的设置,为了使实验数据更加明确,对每一列进行编号,设第1列为A,第2列为B,第3列为C,第4列为D。选用描述复杂因素水平的标准正交表

$L_9(3^4)$ 进行分析。将实验方案所需的相关因素和水平列于表4。按照实验方案进行试验,记录主筋各项性能结果见表5,并通过焊接优良率来确定每组实验结果的优劣程度,进而确定最佳的参数组合。其中,焊接优良率是焊接钢筋骨架的外形优良(焊点处熔融金属基本均匀;压入深度:热轧钢筋的0.3~0.45d;每一件制品的焊点脱落或漏焊的试件数量不能超过总数的4%;焊点无裂痕、多孔性缺陷及明显烧伤现象。)、抗拉强度、屈服强度和延伸率浮动(即增加或减少)不超过母材各项性能的5%的占比。试件编号和实验分析结果件见表6。

表4 $L_9(3^4)$ 正交表

Table 4 $L_9(3^4)$ Orthogonal table

序号	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

表5 正交实验结果

Table 5 Orthogonal test results

序号	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后延伸 率/%
1	628.5	445.0	13.1
2	624.0	453.0	12.4
3	598.8	443.0	9.9
4	602.5	454.7	10.6
5	605.8	448.1	11.3
6	605.8	445.9	10.6
7	605.7	434.6	15.3
8	604.0	440.0	14.2
9	612.3	448.0	12.8

表6 正交实验分析结果

Table 6 Orthogonal experimental results

序号	试验因素				优良率/%
	焊接时间/s	电弧电压/V	焊接电流/A	箍筋间距/mm	
1	1	20	220	100	75
2	1	25	300	150	85
3	1	30	380	200	70
4	1.3	20	300	200	77
5	1.3	25	380	100	79
6	1.3	30	220	150	83
7	1.6	20	380	150	60
8	1.6	25	220	200	78
9	1.6	30	380	100	81

3.2 实验数据处理

采用极差分析法进行分析。其中, K_i 表示*i*行上水平号所对应实验因素的结果总和。 k_i 为 K_i/v ,其中*v*为任意列上各水平出现的次数,所以 k_i 表示该列上因素在水平*i*下得到的实验结果的算数平均值,用以判断该列因素的最佳水平,据此确定最优的实验参数组合。 R 为极差, $R = \max \{k_1, k_2, k_3\} - \min \{k_1, k_2, k_3\}$ 。由极差 R 可以看出当该列因素水平发生变化时,实验结果的变化情况,随着 R 的增大,表明该因素对实验结果的影响越明显。由此对纵筋焊接结果优良率的极差进行分析,结果见表7。

表7 极差分析表

Table 7 Range analysis table					%
因素	焊接时间 优良率	电弧电压 优良率	焊接电流 优良率	箍筋间距 优良率	
K_1	230	212	236	235	
K_2	239	242	243	228	
K_3	219	234	209	225	
k_1	76.67	70.67	78.67	78.33	
k_2	79.67	80.67	81	76	
k_3	73	78	69.67	75	
R	6.67	10	11.33	3.33	

4 结果分析

4.1 实验数据结果初步分析

依据对钢筋骨架优良率的极差分析和因素水平效应曲线分析,得出每个因素对焊接效果影响的强弱顺序,确定主筋性能最接近母材的因素水平组合。对正交实验结果表6行分析可以看出在2号实验($A_1B_2C_2D_2$)的条件下,焊接的钢筋骨架外形优良、主筋的抗拉强度、屈服强度、延伸率的综合性能接近母材的性能。根据 K 值对因素水平效应曲线和极差 R 进行分析,明确钢筋骨架焊接的最优实验参数和焊接因素对焊接结果影响的强弱顺序。

4.2 实验因素水平交叉分析

钢筋骨架自动焊接的因素与水平对试验结果的影响关系见图5。通过以每个因素的水平作为横坐标,对应的水平条件下实验结果的优良率的均值作为纵坐标,得出各因素水平的效应曲线。根据正交实验综合可比的特性,分析各因素相应水平下 k 的峰值,并依据效应曲线得出如下结论:要使钢筋骨架焊接的主筋外形优良、抗拉强度、屈服强度、延伸率最接近母材,焊接时间应为1.3 s、电弧电压应为25 V、焊接电流应为300 A、箍筋间距应为100 mm。最后根据正交实验的实际

全面性得出在所有组合($3^4=81$)中最佳因素水平组合应为($A_2B_2C_2D_1$)。

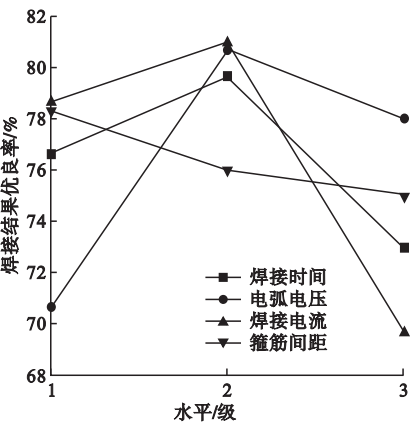


图5 因素水平效应曲线图

Fig. 5 Factor horizontal effect curves

4.3 实验结果主次因素分析

根据实验极差分析表中 R 值确定各因素对实验结果影响主次,即 R 越大的因素对焊接结果的影响程度越大。由表6 计算结果得出,焊接电流对焊接钢筋骨架优良率的影响最为明显,其次为电弧电压、焊接时间、箍筋间距。

4.4 实验结果检验分析

通过以上分析可知钢筋骨架焊接的最佳因素组合,明确了钢筋骨架自动焊接的参数最优组合,通过对钢筋骨架自动成型生产线设置实验所得的最佳焊接参数组合进行钢筋骨架的制作。随机抽取 100 件冷却后的钢筋骨架进行检验,只有 10 支试件存在焊接缺陷,其余皆为合格产品。随机取 10 支试件重复上述拉伸实验并对结果与之前拉伸结果进行对比验证,结果见表 8。可以看出,调整后主筋的性能更加优良。

表8 实验前后焊接结果力学性能对比

Table 8 Comparison of mechanical properties of welding results before and after experiment

实验前后	抗拉强度 R_m /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后延伸率/%	优良率 F /%
调整前	609.7	445	12.4	75
调整后	619	438	15.4	90

5 结 论

(1)根据正交实验结果匹配分析得出最佳焊接参数组合为焊接时间 1.3 s、电弧电压 25 V、焊接电流 300 A、箍筋间距 100 mm ($A_2B_2C_2D_1$)。

(2)通过正交实验对焊接结果主次因素分析得出,焊接电流对焊接结果的影响最为明显,其次是电弧电压、焊接时间、箍筋间距。

(3)采用优化后的参数进行钢筋骨架的自动成型焊接,使焊接优良率提高了 15%。

(4)由于箍筋间距对焊接结果的影响比较小,在实际生产中可以通过其他参数的调节来弥补钢筋骨架箍筋间距对焊接质量造成的损失。在实际生产中可以在允许的范围内自行调节箍筋间距。

参考文献

[1] 廖袖锋,魏奇科,董孟能,等. 新型焊接箍筋试验研究及其应用[J]. 重庆交通大学学报, 2013, 4: 573 – 576.
(LIAO Xiufeng, WEI Qike, DONG Mengneng, et al. Experimental research and application of the new welding [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2013, 4: 573 – 576.)

[2] 谈夏维. 装配式钢筋纤维混凝土耗能节点抗剪性能研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2018.
(TAN Xiawei. Research on shear performance of fabricated steel fiber concrete energy-dissipation joint [D]. Fuzhou: Fujian University of Technology, 2018.)

[3] 张鹏贤,韦志成,刘志辉. 管道焊口间隙量与错边量的激光视觉检测[J]. 焊接学报, 2018, 39(11): 103 – 107.
(ZHANG Pengxian, WEI Zhicheng, LIU Zhihui. Laser visual measurement for gap values and misalignment values of pipeline welding groove [J]. Transactions of the China welding institution, 2018, 39(11): 103 – 107.)

[4] 武会宾,刘立甫,王立东,等. Q125 级套管钢高频电阻焊接头耐 CO_2/H_2S 腐蚀行为[J]. 焊接学报, 2013, 34(10): 17 – 21.
(WU Huibin, LIU Lifu, WANG Lidong, et al. Corrosion behavior of high frequency resistance welding joint of Q125 grade tube steel under CO_2/H_2S environment [J]. Transactions of the China welding institutions, 2013, 34(10): 17 – 21.)

[5] 徐连勇,董鑫刚,荆洪阳,等. 3Cr 低合金钢焊接接头腐蚀膜对基体的保护作用[J]. 焊接学报, 2015, 36(7): 83 – 87.

- (XU Lianyang, DONG Xingang, JING Hongyang, et al. Protection performance of corrosion product to the substrate in 3Cr low alloy steel welded joint [J]. Transactions of the China welding institutions, 2015, 36(7): 83–87.)
- [6] 陈士忠, 苏伟, 刘子金, 等. HRB400 钢筋电阻对焊接头焊接参数对其性能的影响及优化[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(2): 362–369.
(CHEN Shizhong, SU Wei, LIU Zijin, et al. Influence and optimization of HRB400 steel upset butt welding parameters on the properties of welded joints [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(2): 362–369.)
- [7] 杜伟国, 张晓云, 陈关龙, 等. 伺服焊枪中频直流电阻点焊优势探讨[J]. 电焊机, 2009, 39(8): 53–55.
(DU Weiguo, ZHANG Xiaoyun, CHEN Guanlong, et al. Discussion on advantage of resistance spot welding using servo gun and MFDC [J]. Electric welding machine, 2009, 39(8): 53–55.)
- [8] 林尚扬, 陈善本, 李成桶, 等. 焊接机器人及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
(LIN Shangyang, CHEN Shanben, LI Chengtong, et al. Welding robot and its application [M]. Beijing: Mechanical Industry Agency, 2000.)
- [9] 辛海波. 焊接机器人在转向架构架焊接中的应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010, 4.
(XIN Haibao. Study on application of welding robot in the bogie frame [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.)
- [10] 潘燕武. 在焊接工艺中二氧化碳保护焊的应用[J]. 建材与装饰, 2017, 24: 211–212.
(PAN Yanwu. Application of carbon dioxide protection welding in welding process [J]. Construction materials & decoration, 2017, 24: 211–212.)
- [11] 房元斌, 蹇雪梅, 张华清, 等. 基于正交试验的 T 形接头焊接工艺优化[J]. 焊接学报, 2017, 38(8): 45–49.
(FANG Yuanbin, ZONG Xuemei, ZHANG Huaqing, et al. Optimization on weld procedure of T-joint based on orthogonal test [J]. Transactions of the China welding institution, 2017, 38(8): 45–49.)
- [12] 阎红. Al 对药芯焊丝 CO₂ 气体保护焊焊缝质量的影响[J]. 焊接, 2018(3): 48–51.
(YAN Hong. Influence of aluminum on weld quality of CO₂ gas shielded welding [J]. Welding & joining, 2018(3): 48–51.)
- [13] 张国栋, 薛吉林, 周昌玉. 基于正交试验设计的高温管道焊接工艺优化[J]. 焊接学报, 2008, 29(11): 53–56.
(ZHANG Guodong, XUE Jilin, ZHOU Changyu. Optimization on welding procedure of high temperature pipeline based on orthogonal test design [J]. Transactions of the China welding institution, 2008, 29(11): 53–56.)
- [14] 陶博浩, 李红, 宋永伦, 等. 电阻点焊冷轧 DP600 双相钢焊接接头性能的正交试验分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(6): 81–84.
(TAO Bohao, LI Hong, SONG Yonglun, et al. Analysis of orthogonal test of properties of dual-phase DP600 steel resistance spot welded joint [J]. Transactions of the China welding institution, 2013, 34(6): 81–84.)
- [15] ZHAN X H, WANG Y B, LIU Y, et al. Investigation on parameter optimization for laser welded butt joint of TA15 alloy [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2016, 84(9/10/11/12): 2697–2706.
- [16] ZHANG L J, ZHANG G F, BAI X Y, et al. Effect of the process parameters on the three dimensional shape of molten pool during full penetration laser welding process [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2016, 86(5/6/7/8): 1273–1286.
- [17] BAI Y, GAO H M, WU L, et al. Influence of plasma-MIG welding parameters on aluminum weld porosity by orthogonal test [J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2010, 20(8): 1392–1396.
- [18] 刘子金, 吴先涛, 侯爱山, 等. 关于 HRB400 级钢筋电阻对焊参数对接头抗拉强度影响的研究[J]. 建筑机械, 2018(3): 81–84.
(LIU Zijin, WU Xiantao, HOU Aishan, et al. Study on the effect of resistance butt welding parameters on the tensile strength of joints of grade reinforcement [J]. Construction machinery, 2018, 3: 81–84.)
- [19] 洪伟, 吴承祯. 试验设计与分析[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
(HONG Wei, WU Chengzhen. Test design and analysis [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2004.)
- [20] 许庆伟, 曹睿, 陈剑虹, 等. 汽车用镁/钢异种金属冷金属过渡点焊工艺特性[J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 43–46.
(XU Qingwei, CAO Rui, CHEN Jianhong, et al. Process characteristics of cold automotive dissimilar metals between magnesium and steel [J]. Transactions of the China welding institution, 2014, 35(5): 43–46.)
- [21] ZHANG L, LU J Z, LUO K Y, et al. Residual stress micro-hardness and tensile properties of ANSI 304 stainless steel thick sheet by fiber laser welding [J]. Materials science & engineering A, 2013, 561(8): 136–144.
- [22] LOU S M, WANG Y X, LU S, et al. Optimization of a porthole die for an aluminum profile extrusion based on orthogonal test method [J]. International journal of engineering, 2015, 14: 49–57.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋焊接及验收规程: JGJ18—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for welding and acceptance of reinforcing steel bars: JGJ18—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)