

7A52 铝合金 TIG - 拉弧螺柱焊工艺

南京理工大学 材料科学与工程学院(210094) 张德库 杨伟林 王克鸿 周 琦

摘要 以高强铝合金 7A52 为主要研究对象,研究 TIG - 拉弧复合热源焊接高强铝合金螺柱的工艺特点,利用正交试验分析焊接规范对焊缝成形的影响。试验结果表明:TIG 热源的加入大大增加了高强铝合金螺柱焊接时电弧的稳定性。在最佳的工艺条件下高强铝合金螺柱接头焊缝成形良好,无烧损、裂纹等缺陷,焊接接头抗剪强度可达母材强度 70% 以上,表明 TIG - 拉弧复合热源螺柱焊是一种理想的高强铝合金焊接工艺。

关键词: 高强铝合金 TIG - 拉弧 螺柱焊

中图分类号: TG457.14

0 前 言

7A52 铝合金属 Al-Zn-Mg 系合金,因其优良的力学性能和加工性能、较高的比强度和比刚度、良好的低温性能和耐腐蚀性,在航空航天、地面车辆和装备的焊接结构中有越来越广泛的应用^[1-2]。轻型装甲车辆内壁焊接结构中分布有大量的螺柱型附座,但目前国内重型车辆上的螺柱焊接方法仍然落后,大多采用焊条电弧焊、半自动气体保护焊工艺方法^[3-6],采用这些焊接方法获得的焊接接头缺陷较多,性能很难达标,而且生产效率也很低,对特种车辆与重型车辆制造业的发展有很大的制约。

特种车辆内部的螺柱多为中大直径螺柱,对于 7A52 铝合金这类导热系数高的材料^[7-8],单纯通过提高焊接电流来完成中大直径螺柱焊会带来严重的螺柱烧损现象,引入第二热源可有效减少螺柱焊接过程的热输入量,从而减少螺柱烧损现象。同时 TIG 热源的预热使焊件温度梯度更加平衡,增大了熔池流动性,焊缝成形更为美观。适当的预热温度还可以提高焊接过

程的稳定性,获得优质焊缝。

所谓 TIG - 拉弧螺柱焊接方法,即在原有螺柱焊接设备与方法的基础之上,引入第二热源,采用 TIG 热源辅助预热的方式^[9-10],使焊件温度梯度更加平衡,这样能够有效地克服焊接高强铝合金附座时产生的未熔合、烧损、成形不良和焊接热裂纹等缺陷。

1 试验材料与方法

1.1 试验设备

试验采用 TIG 焊机与拉弧式螺柱焊机作为焊接热源,其中 TIG 焊机预热采用交流接法、钨极直径 3.2 mm;螺柱焊机最大电流 2 000 A。复合热源焊接系统采用由南京理工大学智能化焊接中心设计的 TIG - 拉弧螺柱焊接系统。

1.2 试验材料

试验采用直径 18 mm、高 23 mm 的 7A52 螺柱与 80 mm × 80 mm × 16 mm 厚 7A52 铝板。母材的化学成分如表 1 所示。试样焊前采用钢丝刷和砂布打磨清理,然后用丙酮拭去油污。

表 1 母材的化学成分(质量分数,%)

Zn	Mg	Mn	Cr	Ti	Zr	Cu	Fe	Si	Al
4.6	2.58	0.35	0.20	0.14	0.12	0.086	<0.15	<0.10	余量

1.3 试验方法

试验采用高纯氩气作为保护气体,不填充焊接保护剂。焊接过程采用自制保护气体装置对熔池进行全面保护,装置结构如图 1 所示。

由于焊接参数复杂繁多,为便于寻找最优焊接工艺参数,试验考虑对工艺过程和焊接接头性能影响较大的工艺参数作为正交试验的关键参数,包括:预热温度、焊接电流和焊接时间。参考 3 个因素进行正交试验设计和工艺参数优化。其它固定工艺参数为:提升高度为 4 mm,浸入深度为 4 mm,保护气体流量为 25 L/min。

收稿日期: 2015 - 01 - 02

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20131261)

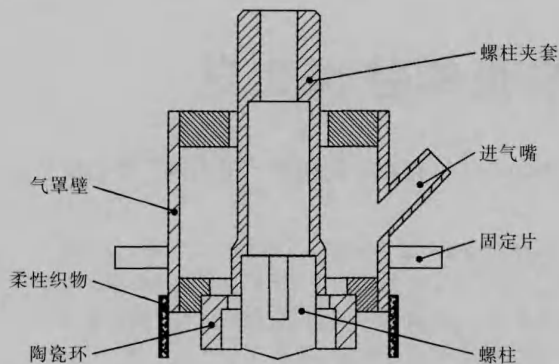


图1 气体保护装置结构图

调整 TIG 焊机的焊接电流及焊接时间可直接测定预热温度,试验时根据温度变量反选对应的 TIG 热源工艺参数进行复合热源螺柱焊接试验。所测预热温度与 TIG 热源工艺参数对应关系如表 2 所示。焊后选择优化的工艺参数制样,利用 CSS-44100 型电子万能试验机分析了螺柱接头的力学性能。

表2 预热温度与 TIG 热源工艺参数对应关系^①

焊接电流 I/A	焊接时间 t/s	预热温度 $T/^\circ\text{C}$
135	20	129
135	30	156
135	40	182
150	20	147
150	30	185
150	40	192

注:①数据取 TIG 热源关闭 15~20 s 后的温度值。

根据单因素试验结果选取参数范围,设计正交试验因素水平如表 3 所示^[11]。预热温度(因素 A)、焊接主电流(因素 B)、焊接时间(因素 C)均为 4 水平,采用 $L_{16}(4^3)$ 型正交表,共需 16 组试验(每组 2 个试样)。

表3 正交试验因素水平表

水平	预热温度 $T/^\circ\text{C}$	焊接主电流 I/A	焊接时间 t/ms
1	0	800	900
2	120	850	950
3	150	900	1 000
4	180	950	1 050

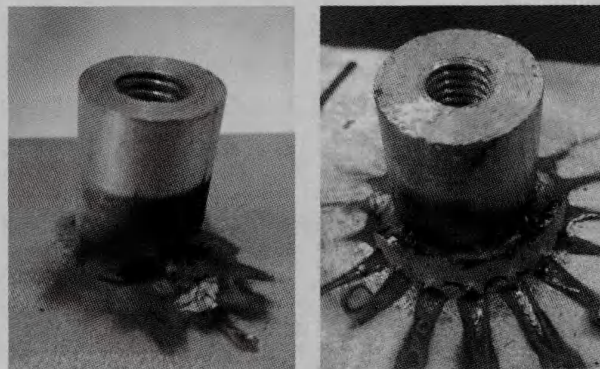
采用表 3 正交试验方案进行 7A52 高强铝合金的 TIG-拉弧螺柱焊接试验,以螺柱焊接接头的力学性能试验结果为评定标准,利用极差分析试验结果。

2 试验结果与分析

2.1 焊缝成形特点

7A52 铝合金焊接时热裂纹倾向大、容易出现气孔、夹渣等缺陷,造成焊后焊缝强度低。铝合金自身导热系数高,使得焊接过程中大量的热被迅速导入基体金属内部,比热容大,需要消耗较大的热量。铝合金螺柱与厚板进行焊接时必须采用能量集中、功率大的热源,有时还需辅以预热等工艺措施。

TIG 预热条件和预热温度较低时(120°C 以下),螺柱烧损情况严重,而预热温度在 $150\sim 180^\circ\text{C}$ 时,没有出现螺柱烧损。出现这种现象主要原因在于预热温度过低时,在螺柱焊接不到 1s 的时间内热输入会出现不均匀分布,单纯靠提高螺柱引弧电流很容易导致螺柱在极短时间内因热输入量过高而出现烧损,如图 2a 所示。而预热温度达到 150°C 以上时,铝板表面的温度场分布相对均匀,螺柱引弧时电弧稳定性得到明显提高,电弧更为稳定均匀,有效避免了偏弧、烧损现象。同时由于合适的预热温度使螺柱焊接热输入适中,阴极雾化作用有效清理了板材表面的氧化层,有效提高了焊接熔池的流动性,螺柱下压过程中挤压更均匀,使焊缝成形连续、美观,如图 2b 所示。



(a) 烧损(无预热)

(b) 成形连续(预热)

图2 不同焊接工艺的典型焊缝成形状态

2.2 试验分析

焊后对 16 组试样进行评定,试验结果(焊接接头的力学性能)按抗剪强度测试值计算,如表 4 所示。极差分析是利用数理统计方法计算正交表中每列的极差 R_j 来判断各个因素的影响大小,以获得所需的水平组

合,计算公式^[12]为

$$R_j = L_{ij}(\max) - L_{ij}(\min) \quad (1)$$

式中: i 为水平数; j 为因素数,即正交表中的列数; L_{ij} 是正交表中第 j 列第 i 水平试验结果之和的算术平均值; R_j 是第 j 列的极差值。

由上述极差计算公式计算出因素 A(预热温度)、B(焊接主电流)、C(焊接时间)及空白列 D、E 在各个水平下的结果,极差 R 的大小可反映该列因素的水平变动对指标影响的大小。

表4 正交试验结果

序号	A	B	C	空白 列 D	空白 列 E	抗剪强度 τ/MPa
1	0	800	900	1	1	59
2	0	850	950	2	2	70
3	0	900	1 000	3	3	69
4	0	950	1 050	4	4	87
5	120	800	950	3	4	56
6	120	850	900	4	3	101
7	120	900	1 050	1	2	119
8	120	950	1 000	2	1	76
9	150	800	1 000	4	2	147
10	150	850	1 050	3	1	164
11	150	900	900	2	4	134
12	150	950	950	1	3	165
13	180	800	1 050	2	3	168
14	180	850	1 000	1	4	170
15	180	900	950	4	1	145
16	180	950	900	3	2	159

表5为正交试验的极差分析结果,从表5中的结果可知,空白列 D、E 的极差值小于因素 A、B、C 的极差值,试验误差较小。因素 A 所取不同水平对接头强度影响最大,其次是焊接时间和焊接电流。这主要是由于铝的导热系数高,比热容大,焊接时必须采用能量集中、功率大的热源,但在焊接时间 1 000 ms 内,热输入量不足会导致熔合率低甚至未熔合;而瞬间大的热输入量却会造成螺柱的烧损,合适的预热措施则可平衡螺柱焊接过程的热输入量,有效避免螺柱烧损现象的出现,200 ℃ 以内的预热温度可有效改善了焊缝形态与强度。同时 TIG 热源预热使焊接区域的温度梯度分布更为均匀,防止了熔合不均匀和热裂纹的出现。

表5 极差分析结果

序号	A	B	C	空白列 D	空白列 E
L_{1j}	71.025	107.225	112.875	127.95	110.675
L_{2j}	87.600	125.950	108.975	111.80	123.500
L_{3j}	152.325	116.500	115.200	111.60	125.425
L_{4j}	160.100	121.375	134.000	119.70	111.450
R_j	89.075	18.725	25.025	16.35	14.750

焊接时间一般控制在 1 000 ms 以内,由于焊接时间的极短,在合适的参数范围内,这一因素对焊缝强度的影响就相对较小。

通过极差分析结果可以判定 $R_A > R_C > R_B > R_D > R_E$,表5中各列最大数值对应的水平即该因素的最优水平。因此试验中因素的最优水平为 A_4, B_2, C_4 ,即预热温度为 180 ℃,焊接电流为 850 A,焊接时间为 1 050 ms。

极差分析只评估了各个因素对试验指标的影响的主次关系,却没有估计试验误差的大小以及各个因素对试验指标影响的显著性,因此还需进行方差分析。方差分析是通过 F 检验来判定因素的显著性的。主要公式^[12]为

$$S_T = \sum_{k=1}^n X_k^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n X_k \right)^2 \quad (2)$$

$$S_A = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^q X_{ij}^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n X_k \right)^2 \quad (3)$$

$$S_E = S_T - S_A \quad (4)$$

式中: S_T 为指标值的总离差平方和; S_A 为因素的离差平方和; S_E 为误差平方和; X_k 为各组试验结果; n 为试验总次数; q 为每个因素的水平数; s 为每个水平做的试验次数; X_{ij} 为正交表中第 j 列第 i 水平试验结果。对表4中的数据进行分析,所得结果如表6所示。

表6 方差分析结果

方差来源	离差平方和 S	自由度 f	F 值	显著水平	显著性
A	24 324.802 5	3	33.525 60	6.60	高
B	770.872 5	3	1.062 50		
C	1 485.322 5	3	2.047 14		
误差	1 451.120 0	6			

将表6中的 F 值与显著水平值(6.60)相比较发现,因素A的 F 值大于显著水平值,而因素B,C的 F 值均小于显著水平值,表明因素A对焊接接头的力学性能影响最为显著。方差分析结果与极差分析结果一致。

3 焊接工艺验证

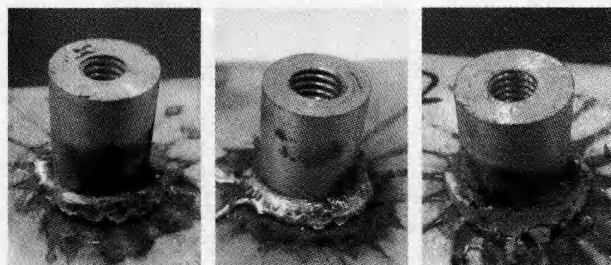
通过正交试验分析,确定了试验的较佳工艺参数:预热温度180℃,焊接电流850A,焊接时间1050ms。通过对结果的分析对比,发现预热温度控制在180℃对焊缝强度提升作用显著,而焊接时间在所选参数范围内影响较小,所以固定这两个最优工艺参数,取3组不同的焊接电流进行重复试验,以验证最佳工艺参数的准确性与可重复性。确定工艺参数最优的3组焊接规范进行下一步的研究,如表7所示。

表7 最优工艺验证参数设置

规范	预热温度 $T/^\circ\text{C}$	焊接电流 I/A	焊接时间 t/s
1 [#]	180	800	1050
2 [#]	180	850	1050
3 [#]	180	900	1050

3.1 外观分析

所选3组规范焊缝成形如图3所示。3种规范所得的焊缝均匀连续、成形美观、飞溅小,没有烧损、表面气孔等缺陷。



(a) 规范1[#] (b) 规范2[#] (c) 规范3[#]

图3 优选焊接工艺规范下的焊缝成形图片

3.2 力学性能试验

对3组焊接规范的试样进行剪切试验,每组焊接规范两个剪切试样,剪切结果见图4。从图可以看

出,规范2[#]抗剪强度为176MPa,达到母材强度的70%;规范1[#]的抗剪强度为171MPa,达到母材的65%以上;规范3[#]的抗剪强度为174MPa,在母材的60%左右。

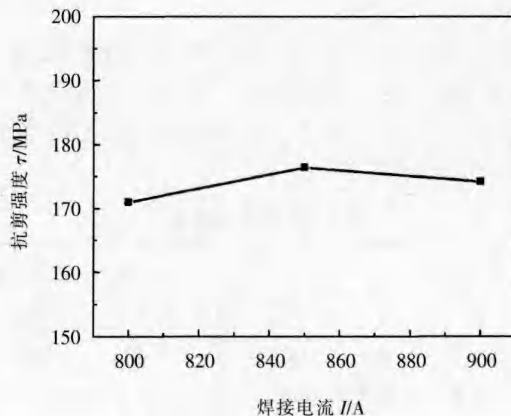
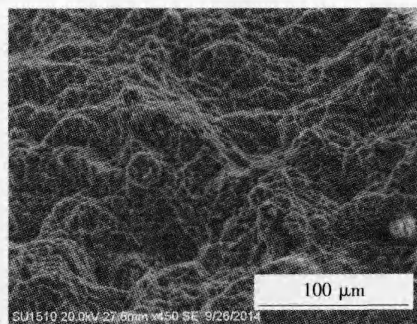


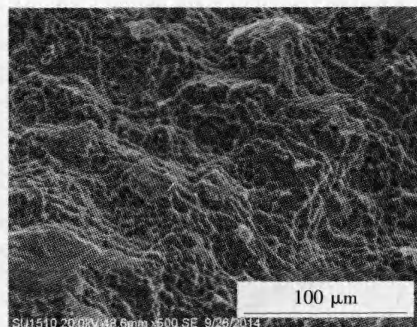
图4 力学性能试验结果

3.3 微观形貌分析

为了进一步分析影响螺栓抗剪强度的原因,利用扫描电镜观察了断口的微观形貌。从图5中可以看出,1[#],3[#]两种规范下的断口的均存在一定数量的韧窝^[13],可判断其为韧性断裂,规范3[#]有少量孔洞和微裂纹存在。



(a) 规范1[#]



(b) 规范2[#]

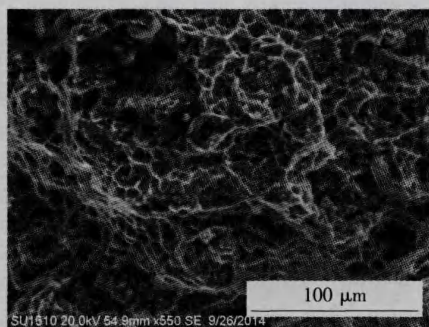
(c) 规范 3[#]

图5 不同工艺剪切断口形貌

规范 2[#]的断口形貌可以看出除了大量韧窝外,还存在大量的撕裂棱,所以其断裂形式为塑性断裂与韧性断裂共存的混合断裂。根据剪切试验结果及断口形貌分析,规范 2[#]是最优的螺柱焊接工艺规范。

4 结 论

(1) 采用 TIG-拉弧复合热源工艺焊接 7A52 高强铝合金焊接成形连续美观,在预热温度 180 ℃、焊接主电流 850 A、焊接时间 1 050 ms 下焊接接头的抗剪强度为 176 MPa,达到母材强度的 70%。表明 TIG-拉弧复合热源焊接是一种理想的高强铝合金焊接工艺。

(2) 焊前对铝板的 TIG 预热处理,不仅去除了待焊部位的氧化层,同时还增强了熔池的流动性,与未经 TIG 预热处理的焊件相比,有效改善了未熔合、螺柱烧损等焊接缺陷。

(3) 焊缝接头断口韧性较大,存在大量韧窝;最优工艺条件下还可见撕裂棱,属于塑性断裂与韧性断裂的混合断口形貌。

参 考 文 献

[1] 吴一雷,李永伟,强 俊,等. 超高强度铝合金的发展与

应用[J]. 航空材料学报,1994, 14(1):49-55.

- [2] 钱红丽,周 琦,陈 俐,等. 7A52 铝合金光纤激光焊接头组织性能分析[J]. 焊接,2014(9):49-52.
- [3] 王元良. 螺柱焊接技术的发展及应用[J]. 电焊机,2006,36(1):15-18.
- [4] 张瑞昌,黄贤聪. 螺柱焊机及其焊接工艺的研究[J]. 机械工人:热加工,2004,14:21-23.
- [5] Nishikawa W. The principle and application field of stud welding[J]. Welding International,2003, 17(9): 699-705.
- [4] 张瑞昌,黄贤聪. 螺柱焊机及其焊接工艺的研究[J]. 机械工人:热加工,2004(14):21-23.
- [6] 张天有. 储能螺柱焊工艺及其应用[J]. 焊接,1984(7):50-57.
- [7] 水野政夫. 铝及其合金的焊接[M]. 北京:冶金工业出版社,1985:261.
- [8] 谢水生,刘静安. 铝合金材料的应用与技术开发[M]. 北京:冶金工业出版社,2004:482.
- [9] 王克鸿,张德库,薛鹏飞,等. 复合热源螺柱焊方法[J]. 焊接学报,2008,29(11):45-48.
- [10] 池 强,张建勋,付继飞,等. 拉弧式电弧螺柱焊质量影响因素[J]. 电焊机,2005,35(4):6-9.
- [11] 栾 军. 试验设计的技术与方法[M]. 上海:上海交通大学出版社,1987:229.
- [12] 曹伟丽,叶慈南. 应用数理统计[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [13] 上海交通大学编写组. 金属断口分析[M]. 北京:国防工业出版社,1979:299.

作者简介: 张德库,1971 年出生,博士,副教授,硕士生导师。主要从事先进焊接工艺、先进材料的焊接及异种材料焊接技术等方面的研究工作和教学工作,已发表论文 40 余篇。

焊接技术问题征集

《焊接》杂志的“焊接技术问答”栏目,将邀请业内资深专家为读者解答一些焊接的基本知识、技术操作要点、安全操作常识及必要措施等问题。如果你在焊接生产中遇有暂时难以解决的技术方面问题,请发邮件至 hbjbjb@126.com 或寄至“150028 哈尔滨市松北区创新路 2077 号 焊接编辑部”收,请注明“焊接技术问答”字样。