铝合金对接接头MIG焊组对间隙及钝边尺寸研究

石换军
通号轨道车辆有限公司　湖南长沙　410217

摘要：通过对10mm厚6082（T6）铝合金板在不同对接间隙（超出ISO 9692-3：2016建议范围）和不同坡口钝边尺寸下进行MIG焊，对比各试件的熔合状态、抗拉强度、背弯等因素，验证焊缝质量，从而选取焊接质量更优的接头形式。经对比试验发现，10mm厚6082（T6）对接焊缝MIG焊时，钝边1~2mm、间隙b=2mm时为组对最佳效果。

关键词：铝合金熔焊；MIG焊；钝边；间隙

1　序言

铝合金具有密度低、耐蚀性高、韧性好、可再生利用等优点，在汽车、轨道交通、航空航天等领域应用广泛。在众多的焊接工艺方法中，铝合金MIG焊接工艺在其中的应用优势显著，具有焊接质量高、设备轻便、工艺简单、成本低廉等特点。铝合金因其热导率和膨胀系数大的物理特性，所以在MIG焊焊接时会产生较大的焊接变形。焊接变形的大小主要与产品结构、焊接热输入、焊接填充量等因素相关[1]，其中填充量主要与接头间隙、钝边及坡口角度等密切相关，现有的参照标准为ISO 9692-3：2016，其对于板厚6~25mm的铝合金建议钝边c≤3mm、间隙4mm≤b≤10mm。

本文将针对10mm厚6082（T6）铝合金板的MIG焊对接接头小于标准建议的间隙、标准建议范围内的钝边对接头熔合情况及力学性能进行研究，为铝合金产品接头优化设计提供改进方向。

2　试验方案

选用10mm厚6082（T6）铝合金板作为研究对象，焊接方法为MIG焊，坡口角度70°，在保证其他参数相对稳定的前提下，采用交叉变量法调整焊接间隙、钝边尺寸。接头形式：带可移除衬垫的V形对接接头（见图1）。

利用福尼斯TPS5000焊机焊接试板，利用不锈钢试板焊接工装进行辅助固定，选用进口SAFRA ER5087、ϕ1.2mm实芯焊丝作为填充材料[2]，选用70%Ar+30%He作为保护气体，通过调整焊接间隙、钝边尺寸，制备并使用MIG焊接16个试件。试验中的焊接电流、电弧电压均按波动范围中间值进行记录，试验方案及对应的焊接参数见表1~表4。

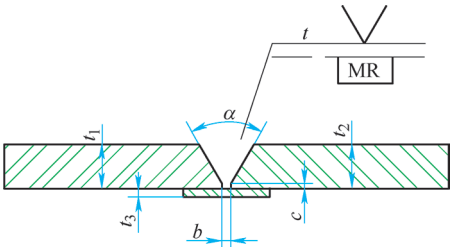


图1　接头形式

注：t_1、t_2为板厚，t_3为衬垫厚度，α为坡口角度，b为焊接间隙，c为钝边尺寸，t为焊接熔深。

表1　无钝边，组对间隙不同时的焊接参数

编号	组对间隙/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接时间/s	焊接速度/cm·min^{-1}	热输入/kJ·mm^{-1}
1	0	167	20.5	34	61.76	266.05
		215	23.5	36	58.33	415.75
		195	23.3	38	55.26	394.64
		196	23.2	35	60.00	363.78
2	1	140	19.3	33	63.64	203.81
		218	23.4	36	58.33	419.76
		197	24	37	56.76	399.85
		196	23.7	40	52.50	424.70
3	2	155	20.2	33	63.64	236.17
		220	23.8	40	52.50	478.72
		198	24.2	42	50.00	459.99
		195	24.3	44	47.73	476.56
4	3	160	20	36	58.33	263.31
		215	23.6	51	41.18	591.48
		194	23.4	43	48.84	446.18
		188	24.0	49	42.86	505.34

表2　1mm钝边，组对间隙不同时的焊接参数

编号	组对间隙/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接时间/s	焊接速度/cm·min^{-1}	热输入/kJ·mm^{-1}
5	0	167	20.6	40	52.50	314.53
		214	23.2	36	58.33	408.53
		196	23.5	34	61.76	357.95
		195	23.6	35	60.00	368.16
6	1	150	20.1	39	53.85	268.77
		218	23.8	39	53.85	462.51
		195	23.5	33	63.64	345.65
		203	23.3	33	63.64	356.77
7	2	175	20.9	34	61.76	284.24
		220	24	49	42.86	591.36
		194	23.5	37	56.76	385.56
		198	23.6	38	55.26	405.87
8	3	172	20.8	41	51.22	335.27
		210	23.7	49	42.86	557.42
		193	23.9	40	52.50	421.73
		192	23.7	42	50.00	436.84

表3　2mm钝边，组对间隙不同时的焊接参数

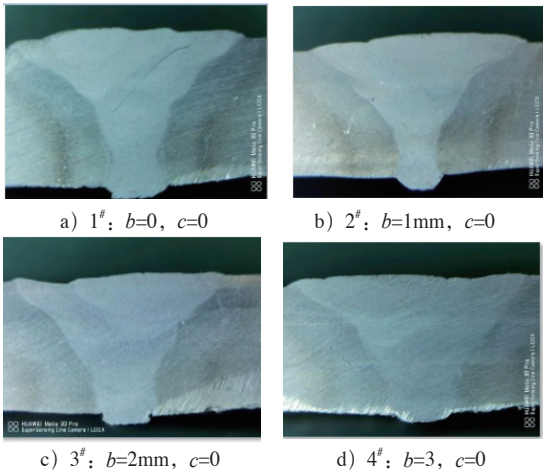
编号	组对间隙/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接时间/s	焊接速度/cm·min^{-1}	热输入/kJ·mm^{-1}
9	0	167	20.6	40	52.50	287.46
		214	23.2	36	58.33	421.33
		196	23.5	34	61.76	371.62
		195	23.6	35	60.00	371.95
10	1	150	20.1	39	53.85	256.45
		218	23.8	39	53.85	390.98
		195	23.5	33	63.64	315.57
		203	23.3	33	63.64	347.42
11	2	175	20.9	34	61.76	318.5
		220	24	49	42.86	440.52
		194	23.5	37	56.76	344.73
		198	23.6	38	55.26	353.96
12	3	172	20.8	41	51.22	349.47
		210	23.7	49	42.86	480.73
		193	23.9	40	52.50	383.12
		192	23.7	42	50.00	383.21

表4　3mm钝边，组对间隙不同时的焊接参数

编号	组对间隙/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接时间/s	焊接速度/cm·min^{-1}	热输入/kJ·mm^{-1}
13	0	168	20.7	33	63.64	262.31
		220	22.7	45	46.67	513.67
14	1	192	21.4	33	63.64	309.92
		198	24.3	45	46.67	494.89
15	2	208	21.6	33	63.64	338.89
		215	23.6	34	61.76	394.32
		200	22.7	30	70.00	311.31
		195	23.1	31	67.74	319.18
16	3	215	21.7	36	58.33	383.90
		214	23.4	38	55.26	434.95
		196	23.7	36	58.33	382.23
		191	24.2	37	56.76	390.91

3　试验结果及分析

对每个项目取4个截面做宏观金相分析，选取典型金相如图2~图5所示。



a）1#：b=0，c=0　b）2#：b=1mm，c=0

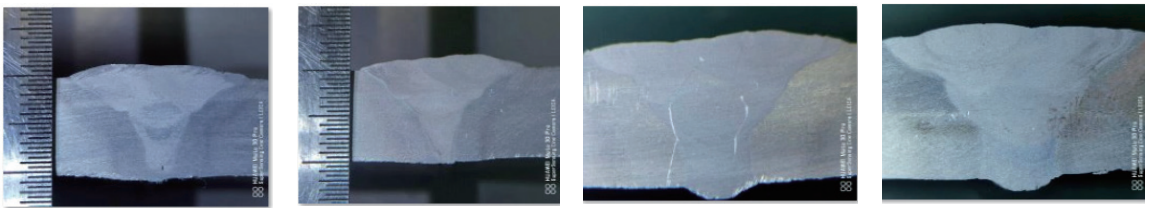
c）3#：b=2mm，c=0　d）4#：b=3，c=0

图2　1#~4#试件宏观金相形貌

注：钝边为0，在各种间隙状态下均可焊透，且熔合状态良好。

在钝边为0、各种焊接间隙时宏观金相显示熔合状况良好；在间隙为2mm、3mm，且c=0~3mm时宏观金相显示熔合状况良好，见表5。

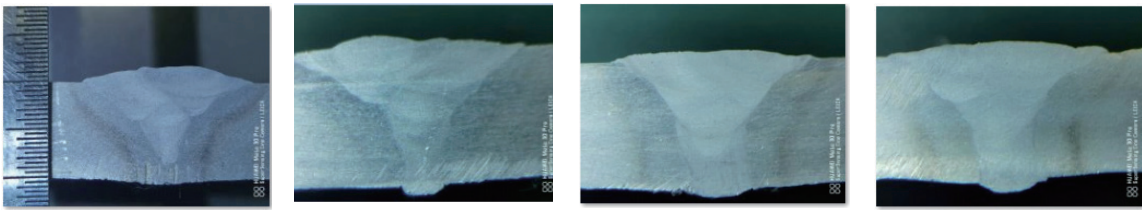
对于合格率≥50%的试件，通过调整参数和加



a）5#：*b*=0，*c*=1mm（1/4焊透） b）6#：*b*=1mm，*c*=1mm（3/4焊透） c）7#：*b*=2mm，*c*=1mm d）8#：*b*=3mm，*c*=1mm

图3 5#~8#试件宏观金相形貌

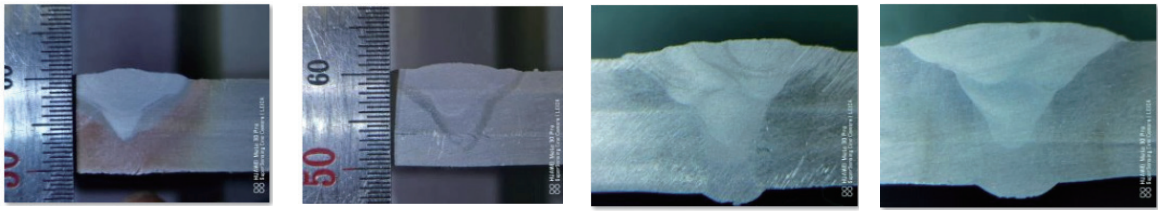
注：5#试件（1mm钝边、间隙为0），4个断面合格1个，3个根部未熔合；6#试件（1mm钝边、间隙为1mm），3个断面熔合良好，1个断面根部出现未熔合现象；7#、8#试件均合格。



a）9#：*b*=0，*c*=2mm（未焊透） b）10#：*b*=1mm，*c*=2mm（2/4焊透） c）11#：*b*=2mm，*c*=2mm d）12#：*b*=3mm，*c*=2mm

图4 9#~12#试件宏观金相形貌

注：9#试件根部1.5mm未熔合2mm；10#试件2件根部未完全熔合，2件合格；11#、12#试件合格。



a）13#：*b*=0，*c*=3mm（未焊透） b）14#：*b*=1mm，*c*=3mm（未焊透） c）15#：*b*=2mm，*c*=3mm d）16#：*b*=3mm，*c*=3mm

图5 13#~15#试件宏观金相形貌

注：13#试件，根部2.5~3mm未熔合；14#试件，根部2mm左右未熔合；15#、16#试件合格。

表5 宏观金相结果统计

	b=0	*b*=1mm	*b*=2mm	*b*=3mm
c=0	全焊透	全焊透	全焊透	全焊透
c=1mm	部分焊透	部分焊透	全焊透	全焊透
c=2mm	全未焊透	部分焊透	全焊透	全焊透
c=3mm	全未焊透	全未焊透	全焊透	全焊透

表6 抗拉强度结果 （MPa）

	b=0	*b*=1mm	*b*=2mm	*b*=3mm
c=0	227	227	222	222
c=1mm	—	226	223	220
c=2mm	—	191	223	214
c=3mm	—	—	230	223

强实操练习有可能实现焊缝完全合格，此试验不再做研究。

根据ISO 4136：2012标准，对金相合格的试样进行拉伸试验：制备2个拉伸试样，抗拉强度均值见表6。

根据ISO 15614-2：2005要求，10mm厚6082（T6）铝合金抗拉强度最小为300MPa，MIG焊接头失效系数为0.6，故抗拉强度＞180MPa时合格，则送检试件抗拉强度均合格，且断裂发生在热影响区。

由于焊接热输入大，离焊缝较近的熔合区温度非常高，母材T6状态时效析出的Mg_2Si粒子会大部

分固溶到α（Al）基体中形成过饱和固溶体。而离焊缝较远的区域，焊接加热温度超过了原有的时效处理温度，但又未达到固溶温度，出现了过时效效应，从而产生过析出软化区[3]，故接头断裂位置一般出现在焊接热影响区。

根据ISO 5173：2009标准，对金相合格的试样进行弯曲试验：制备2个背弯试样。弯曲试样采用φ100mm圆形压头、支辊间距125mm、弯曲角度180°。5#、9#、13#、14#试件根部未熔合，不做背弯试验（见表7）。

表7 背弯试验结果

	b=0	*b*=1mm	*b*=2mm	*b*=3mm
c=0	合格	合格	合格	合格
c=1mm	—	合格	合格	不合格 （2~5mm裂纹）
c=2mm	—	合格	合格	合格
c=3mm	—	—	合格	不合格 （2~10mm裂纹）

8#（*c*=1mm，*b*=3mm）试件、16#试件（*c*=3mm，*b*=3mm）热影响区裂纹4~10mm不合格（按ISO 15614-2：2005要求裂纹≤3mm），其余试件弯曲试验合格。

根据相关文献资料，10mm厚6082（T6）焊接接头弯曲性能差，弯曲角度超90°时会出现裂纹[4]，本次试验不合格的试样中，8#试样180°背弯后出现2~5mm裂纹，16#试样180°背弯后出现2~10mm裂纹，其余合格，结果优于相关文献。

焊缝钝边相同时，焊接间隙越小，焊接时间越少；组对间隙相同时，钝边越大，焊接时间越少（见表8）。

ISO 9692-3：2016标准1.3中对于“母材厚度6~25mm时，焊接间隙为4mm≤*b*≤10mm”的建议，焊接间隙要求普遍较大且范围较广，尤其是对于6~10mm母材焊接而言，会造成焊接热输入较大、变形较大、效率降低。因此在实际生产工艺制定时，可适当缩小标准规定的范围，制定公司内部通用标准，对于不同厚度范围的母材焊接，细化焊缝细节规定，以达到工艺优化，减小焊接热输入，减小焊接变形，提升焊接效率的目的。

表8 焊接时间统计 （s）

	b=0	*b*=1mm	*b*=2mm	*b*=3mm
c=0	143	146	159	179
c=1mm	—	144	158	172
c=2mm	—	128	142	152
c=3mm	—	—	128	147

4 结束语

通过对不同焊接间隙、不同钝边条件下的10mm厚6082（T6）对接接头MIG焊焊缝分析，以及通过抗拉强度、背弯试验、焊接效率等信息的收集及对比分析，得出如下结论。

1）综合考虑，钝边*c*=1~2mm、间隙*b*=2mm时，焊接效率与焊接质量最优。

2）当焊接间隙小于ISO 9692-3：2016标准建议值时，也可得到质量稳定的合格焊缝，且可得到更高的焊接效率、更小的焊接变形。

参考文献：

[1] 李曙光，林正帅，张泽勇，等.铝合金高纯氩MIG焊接应用研究[J].金属加工（热加工），2020（5）：64-66.

[2] 靳佳霖，徐国富，李耀，等.焊丝成分对6082（T6）铝合金焊接接头组织和性能的影响[J].中国有色金属学报，2020，30（1）：1-8.

[3] 许鸿吉，唐海鹰，刘志平，等.6082铝合金MIG焊焊接接头组织与力学性能研究[J].热加工工艺，2010，39（1）：131-133.

[4] 石磊，聂甫恒，许晨玲，等.6082铝合金MIG焊接头力学性能与微观组织研究[J].焊接技术，2017，46（5）：54-57.

MW 20201128