



7xxx 系铝合金焊接研究现状与展望

宋友宝^{1,2}, 李 龙¹, 吕金明², 严 安², 周德敬¹

(1. 银邦金属复合材料股份有限公司, 江苏省金属层状复合材料重点实验室, 无锡 214145;

2. 无锡银邦防务科技有限公司, 无锡 214145)

摘 要: 结合 7xxx 系铝合金的焊接特点, 介绍 7xxx 系铝合金焊接焊丝的选择与优化, 阐述双丝-MIG 焊、激光-MIG 复合焊、搅拌摩擦焊 3 种焊接新方法, 与传统焊接方法相比, 它们在 7xxx 系铝合金焊接上颇具优势和发展前景。通过合金化进行 7xxx 系铝合金母材和焊丝的优化设计、开发新的焊接方法是未来铝合金焊接领域的重要研究方向。

关键词: 7xxx 系铝合金; 焊接; 焊丝选择; 焊接方法

文章编号: 1004-0609(2018)-03-0492-10

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

7xxx 系铝合金是以 Zn 为主要强化元素的铝合金, 属于可热处理强化铝合金, 在适当的热处理条件下, 其强度可高达 400~800 MPa, 又称为高强或超高强铝合金, 具有比强度高、加工性能好、断裂韧度高等优点, 被广泛应用于航空航天、军工国防、轨道交通、造船等领域^[1-4]。7xxx 系铝合金包括 Al-Zn-Mg 系和 Al-Zn-Mg-Cu 系两类合金。其中 Al-Zn-Mg 系合金具有中等强度, 有一定应力腐蚀倾向, 焊接性良好, 称为中高强可焊铝合金, 如 7005、7039、7A52 等。Al-Zn-Mg-Cu 系合金由于 Cu 的加入, 强度和抗应力腐蚀性能均得到提高, 但焊接性能下降, 一般称为超高强难焊铝合金, 如 7050、7075、7475 等。

现代工业的发展对 7xxx 系铝合金的强度、韧性、抗应力腐蚀性能及焊接性能提出了更高的要求。人们在开发 7xxx 系铝合金时, 遇到了提高合金的强度势必会降低合金的焊接性能的瓶颈^[5-6]。各种铝合金结构件主要是通过焊接成形, 因而焊接性能是 7xxx 系铝合金重要的工艺性能指标, 在合金设计时, 必须综合考虑合金的各项性能指标, 兼顾合金的焊接性能。另外, 随着焊接技术的不断发展, 涌现出的各种新型焊接技术(双丝 MIG 焊、搅拌摩擦焊等), 解决了 7xxx 系铝合金焊接的一些难题, 促进了 7xxx 系铝合金焊接结构件的应用。

1 7xxx 系铝合金焊接的特点

1.1 7xxx 系铝合金焊接难点

一般来说, 铝合金焊接普遍有以下几个难点^[7-8]:

1) 铝合金导热率大, 焊接时需要更高的线能量, 同样焊接速度下, 热输入量要比钢材的大 2~4 倍; 2) 铝和氧亲和力大, 铝合金表面易形成熔点高达 2060 °C 的难熔氧化膜; 3) 铝合金熔体很容易吸氢产生气孔; 4) 铝合金属于典型的共晶合金, 且线膨胀系数大, 焊缝凝固时易产生热裂纹; 5) 铝合金线膨胀系数大, 易产生焊接变形。7xxx 铝合金由于其自身特点, 除具有以上焊接问题外, 还具有其他焊接难点: 1) 7xxx 系合金含有较多的低沸点 Zn、Mg 合金元素, 在焊接过程中烧损严重, 焊缝中强化相(如 $MgZn_2$)减少, 导致焊缝强度降低; 2) 7xxx 系铝合金是经固溶、时效等热处理达到较高的强度后使用, 在焊接时, 焊接区域经历较高温度的焊接热循环, 热影响区发生过时效和晶粒粗化而严重软化。图 1 所示为 7xxx 系铝合金焊接接头组织^[9], 其中 HAZ 表示热影响区(Heat-affected zones), DAS 表示枝晶间距(Eutectic arm spacing)。在焊缝区存在羽毛状结构(Feathery)、颗粒(Granular)、溶质带

基金项目: 无锡市科技发展资金项目(CZE02H1504); 重点国家及机构产业技术合作项目(BZ2016004); 江苏省金属层状复合材料重点实验室项目(BM2014006)

收稿日期: 2016-07-21; **修订日期:** 2017-04-26

通信作者: 宋友宝, 工程师, 硕士; 电话: 0510-88997000; E-mail: ybstju@163.com

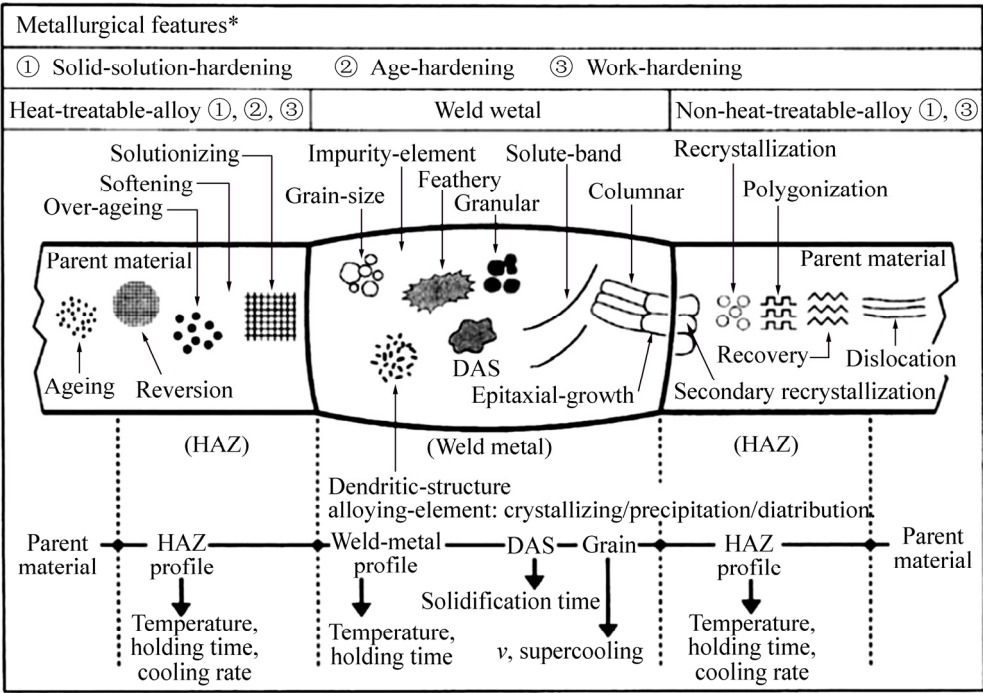


图 1 可热处理强化铝合金焊接接头组织^[9]

Fig. 1 Microstructure of heat-treatable aluminum alloy weld^[9]

(Solute band)、树枝晶(Dendritic structure)等各种复杂的晶粒和结构;在热影响区存在回复(Reversion)、过时效(Over-ageing)、软化(Softening)等变化,这些因素会导致焊缝区和热影响区中出现薄弱区域,在接头承载时易发生断裂。因此,在 7xxx 系铝合金焊接时,既要考虑选择合适的焊丝,提高焊缝金属的强度,又要考虑采用合适的焊接方法与工艺,以控制热输入,尽可能减轻热影响区软化程度。

1.2 合金元素对 7xxx 系铝合金焊接性的影响

7xxx 系铝合金除了含 Zn、Mg(Cu)主要合金元素外,还会加入少量 Mn、Cr、Ti、Zr 等其他元素,以形成综合性能优良的合金。这些元素对合金的焊接性能影响作用各有不同,研究合金元素对焊接性能的影响,有利于合金的设计和焊接材料的选用。1) Zn、Mg: 7xxx 系铝合金的强度随 Zn、Mg 含量的增加而增加,Zn 含量增加会增加焊接热裂纹倾向,而 Mg 的增加可降低合金焊接热裂倾向。2) Cu: 在 Al-Mg-Zn 系合金基础上添加 Cu,可提高合金的强度,但会增加焊接热裂倾向,严重损害焊接性能。有关研究表明,当 Cu 含量大于 0.3%(质量分数,下同)时,容易产生焊接热裂纹^[10]。3) Mn、Cr: 添加少量(一般不超过 1%)的 Mn 和 Cr 可提高合金的抗应力腐蚀性能,焊接热裂倾向随 Cr、Mn 含量的增加而降低。4) Ti、Zr: 加入

微量的 Ti 和 Zr 可细化合金组织,打乱凝固时柱状晶的方向性,破坏液态薄膜的连续性,因而可降低热裂倾向。5) Fe、Si: Fe 和 Si 为 7xxx 系铝合金中的杂质元素,易形成低熔点共晶,引起热裂纹,需要严格控制 Fe 和 Si 的含量。各种合金元素对 7xxx 系铝合金焊接性的影响如表 1 所列^[11-12]。

表 1 7xxx 系铝合金中各元素对焊接性的影响^[11-12]

Table 1 Influence of elements on weldability of 7xxx series aluminum alloys^[11-12]

Element	Strength	Crack resistance	Corrosion resistance
Zn	↑	↓	↓
Mg	↑	↑	↓
Cu	↑	↓	↑
Mn	↑	↑	↑
Cr	↑	↑	↑
Ti	↑	↑	↑
Zr	↑	↑	↑
Fe	↓	↓	↓
Si	↓	↓	↓

Note: ↑ means effect of increase; ↓ means effect of decrease; Corrosion resistance refers to stress corrosion resistance of welded joint.

2 7xxx 系铝合金焊接焊丝的选择与优化

2.1 焊丝的选择

在母材确定的条件下,焊接接头的性能主要取决于两个方面:一是焊丝成分的设计与优化,二是焊接工艺的选择与优化^[13]。焊缝实际上是焊丝和母材在焊接热循环作用下熔化后形成的铸态金属,且焊缝在焊后一般没有条件再经形变加工,多数情况下也不可进行热处理,只能通过合金化和控制焊接工艺条件来控制焊缝的组织 and 性能。在焊接工艺条件一定时,正确选择焊丝尤为重要。

选择焊丝需考虑以下几个方面:1) 焊接时产生焊接裂纹和气孔倾向低;2) 焊接接头的强度、塑性、抗腐蚀性等性能优良;3) 焊缝金属表面颜色与母材颜色匹配^[14]。但是,不是每种焊丝均能同时满足以上各项要求,有时焊丝自身某些方面的性能会相互矛盾。例如,强度与塑性难以兼得,抗裂性与颜色匹配难以兼顾。需将焊丝的性能表现及其适用性和预定用途联系起来,以便针对不同材料和主要或特殊性能要求来选择焊丝。

7xxx 系铝合金主要合金元素为 Zn,通常采用逆转型选材方式来选择焊丝^[15],选用高 Mg 的合金(5xxx 系 Al-Mg 合金)焊丝来焊接高 Zn 合金,以提高焊缝的抗裂性。实践表明,当焊缝中 Mg 含量为 1%~2%时,焊缝抗裂能力最差。采用高 Mg 焊丝焊接时,可通过焊丝往焊缝金属中添加 Mg 元素,一方面可使焊缝成分避开抗裂性能最差的 Mg 含量区间,提高焊缝抗裂性,另一方面也可弥补 Mg 在焊接高温下的烧损,增加 MgZn₂ 强化相数量,提高焊缝强度。因此,常选用 5xxx 系合金焊丝(如 ER5183、ER5356、ER5556)来焊接 7xxx 系铝合金。另外,文献[7]中指出,焊接 7xxx 系铝合金,除了选用 5xxx 系高 Mg 焊丝外,还可采用与母材牌号相同的 Al-Zn-Mg 焊丝或高 Mg 低 Zn 的 X5180 焊丝。表 2 以 7039 铝合金为例,列举了选用不同焊丝焊接后接头的性能,可见对于同一种母材合金,选用不同牌号的焊丝,焊缝抗裂性、接头强度、延展性、抗腐蚀性等性能指标会有一定差异。

2.2 焊丝的微合金化

焊丝中除了起主要强化作用的合金元素外,还含有少量 Mn、Cr、Zr、Ti、B 等微合金化元素,这些元素可改善焊缝抗裂性,提高接头性能。近年来,有学者尝试在标准牌号焊丝的基础上添加 Zr、Sc、Er 等微

表 2 7039 铝合金采用不同焊丝焊接的接头性能^[7]

Table 2 Joint properties of 7039 aluminum alloy welded by different wires^[7]

Brand	Crack resistance	Joint strength	Ductility	Corrosion resistance	Color math
ER5183	A	A	B	A	A
ER5356	A	B	A	A	A
ER5556	A	A	B	A	A
ER5654	B	C	A	A	A

Note: A, B, C represent the level of welding performance, A is best, B is medium, C is last.

合金化元素,来改善焊缝性能。赵志浩等^[16]使用 ER5356 焊丝及添加 Sc、Zr、Er 的 ER5356 焊丝分别对 7A52 铝合金进行了 TIG 焊,研究了 Sc、Zr、Er 对焊接接头性能的影响,其结果表明,在 ER5356 焊丝中添加 Sc、Zr、Er 可有效细化焊缝组织,提高接头强度,单独添加 Sc 的焊丝效果最好,接头强度可达 322.6 MPa,为母材强度的 70%。王生等^[17]采用 ER5356 焊丝和自行开发的 Zr+Sc 复合微合金化的 Al-Mg 焊丝对 7A52 铝合金进行 TIG 焊,结果表明,Zr+Sc 复合微合金化的 Al-Mg 焊丝焊接接头比 ER5356 焊丝焊接接头的屈服强度和伸长率分别提高了 24%和 37%,接头强度可达 378 MPa,为母材强度的 76%,并认为强化和韧化机制是焊缝中生成的细小 Al₃Zr、Al₃Sc 粒子的细晶强化和弥散强化作用。Zr/Sc/Er 微合金化元素对 7A52 铝合金焊接接头性能的影响归纳如表 3 所列^[16-18]。

由表 3 可知,在焊丝中添加 Zr、Sc、Er 微合金化元素可提高焊接接头的强度和伸长率,与不添加微合金化元素的标准焊丝相比,接头强度最大可提高 6%。需要指出的是,Sc 作为一种战略资源,价格非常昂贵,这极大地限制了 Sc 的推广应用。从表 3 也可看出,焊丝中添加 Er 或 Zr 具有和 Sc 类似的强化作用,而 Er 和 Zr 成本较 Sc 低很多,因此可考虑用 Er、Zr 替代 Sc 进行焊丝微合金化。

3 7xxx 系铝合金的焊接方法

铝合金传统的焊接方法有钨极氩弧焊(TIG)、熔化极惰性气体保护焊(MIG)、激光焊(LBW)等^[19-21]。而 7xxx 系铝合金存在热裂敏感、合金元素烧损、接头软化严重等焊接难点,采用传统焊接方法焊接 7xxx 系铝合金难以取得较好的焊接效果,存在焊接效率低、焊缝成形不良等局限性。随着现代制造业的迅猛发展,

表 3 Zr/Sc/Er 微合金化元素对 7A52 铝合金焊接接头性能的影响^[16-18]

Table 3 Effect of Zr/Sc/Er microalloying elements on joint properties of 7A52 aluminum alloy^[16-18]

Base metal thickness/mm	Strength/MPa	Base welding wires	Adding element	Joint strength/MPa	Ductility/%	Increase percentage of joint strength/%	Increase percentage of ductility/%
3	458	ER5356	—	316.5	7.4	—	—
		ER5356	0.3%Sc	322.5	8.2	1.9	10.8
		ER5356	0.3%Zr	321.5	9.1	1.6	23.0
		ER5356	0.3%Er	319.3	8.4	0.9	13.5
		ER5183	—	316.2	8.1	—	—
		ER5183	0.3%Sc	332.4	9.6	5.1	18.5
		ER5183	0.3%Er	328.6	8.3	3.9	2.5
		ER5183	0.1%Sc+0.2%Er	323.6	9.2	2.3	13.6
12	500	ER5356	—	356	8.0	—	—
		ZNHS	0.5%–0.6%(Sc+Zr)	378	11	6.2	37.5

表 4 7xxx 系铝合金焊接方法特点

Table 4 Characteristics of welding method of 7xxx series aluminum alloys

Welding method	Invention time	Advantage	Disadvantage
TIG	1892	Basic method of welding Al alloys can weld at low current, especially adapt to weld sheet and flexible welding position	Low welding speed, limited tungsten current carrying capacity and welding metal thickness, harmful tungsten
MIG	1935	Stable metal transfer, less splash, can weld thick plate, weld forms well, the most extensive method of Al alloy welding	Strict cleaning of surface of base metal and wire, high heat input and large deformation after welding
LBW	1965	Strong energy concentration and especially suitable for precision welding, low heat input and narrow HAZ	Strict assembly of weld and low energy conversion efficiency, high cost and limited welding metal thickness
Double wire MIG	1996	High welding speed and deposition efficiency, beautiful welding gap, high welding quality	Expensive equipment and complex process
Laser-MIG hybrid welding	1982	Reduce reflection of Al alloy to laser and increase weldable plate thickness	Problem of welding crack and porosity
Friction stir welding	1991	Solid-state joining, free of fusion welding defects, high joint strength, without wire filling, have advantage of welding Al alloys	Rigid fixation, poor process flexibility, difficult to weld complex weld

7xxx 系铝合金焊接件生产量逐渐增加，也对焊接提出了高效率、高质量的技术要求，为此，焊接研究者们开发出几种较新的焊接方法，如双丝 MIG 焊、激光-MIG 复合焊、搅拌摩擦焊(FSW)。表 4 所列为 7xxx 系铝合金几种焊接方法特点介绍，接下来着重介绍后 3 种较新的焊接方法。

3.1 双丝 MIG 焊

单丝 MIG 焊为铝合金普遍采用的焊接方法，但随着制造业的发展，传统的单丝 MIG 焊已在熔敷效率、焊接速度、焊缝成形质量等方面显现出一定的局限性，单纯依靠改变焊接电源、填充焊丝及保护气体等工艺措施很难再进一步提高焊接质量。为提高焊接生产效

率,改善焊缝成形,近年来国外公司对双丝 MIG 焊进行了大量研究工作。双丝 MIG 焊从原理上可分为两类,分别是美国 Miller 公司开发的 Twin arc 双丝焊接系统和德国 Cloos 公司开发的 Tandem^[22-25],原理如图 2 所示。

Twin arc 双丝焊采用两个完全相同的焊接电源(也可以用同一个电源),两套送丝机构,两根焊丝共用一个导电嘴和一个气体喷嘴,两个电弧同电位,供一个熔池。优点是系统相对简单,无需协同控制,但缺点也比较明显,因为电弧的稳定性完全依靠自身的调节

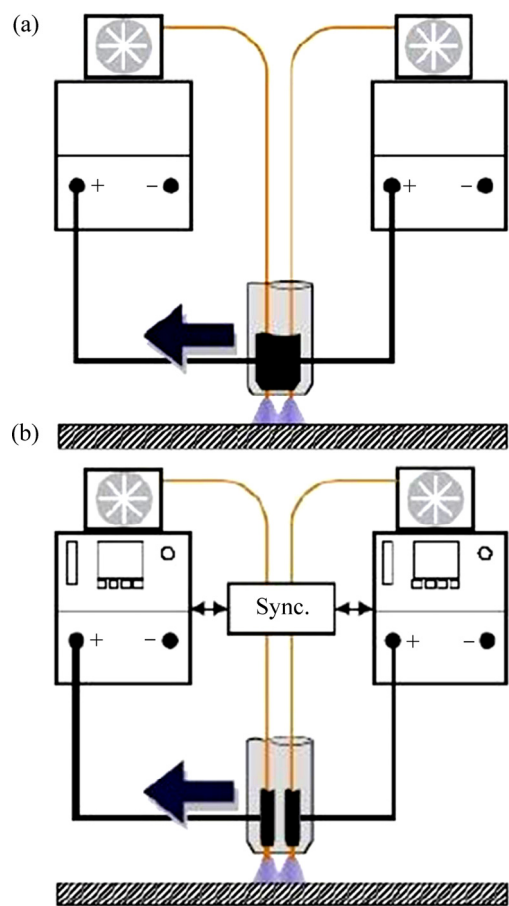


图 2 双丝 MIG 焊组成系统示意图^[25]
Fig. 2 Schematic diagram of double wire MIG welding system^[25]: (a) Twin arc; (b) Tandem

作用,所以电弧稳定性差,电弧间的干扰大,很难对电弧及熔滴过渡进行精确控制。如图 2(b)所示,Tandem 双丝焊是将两根焊丝按一定的角度放在一个特别设计的焊枪里,两根焊丝分别由各自电源独立供电,相互绝缘,除送丝速度可不同外,其他所有的参数皆可独立设定,并通过数字化协同控制器,灵活调节脉冲电流,以最佳控制电弧,将两个电弧的相互干扰降到最低。

张传臣等^[26]对 7A52 铝合金进行了单、双丝 MIG 焊焊接工艺对比,结果表明,与单丝 MIG 焊相比,双丝 MIG 焊接头变形更小(见图 3)组织更为细小致密,热影响区窄,焊缝区硬度高于单丝焊缝,接头强度比单丝焊提高了 7.7%。余进等^[27]研究了 40 mm 厚 7A52 铝合金双丝 MIG 焊接头的组织和性能,结果表明,7A52 铝合金采用双丝 MIG 焊可得到优良的焊接接头,接头强度最高可达 305 MPa,为母材强度的 74%。有关 7A52 铝合金单双丝 MIG 焊的研究结果如表 5 所列^[26-28]。双丝 MIG 焊在厚板 7A52 铝合金焊接上优势明显,接头强度比单丝 MIG 焊的提高 6%~11%,其焊接速度可高达 600~800 mm/min。

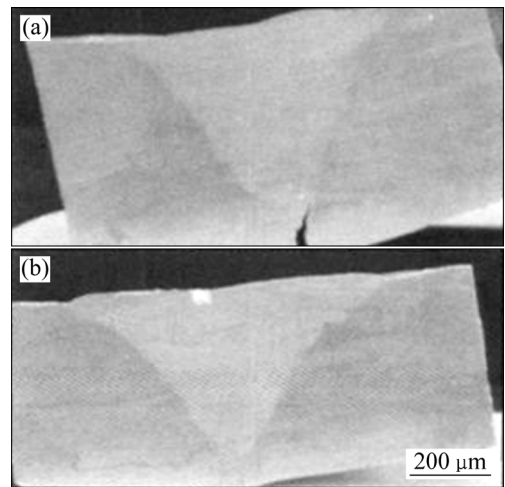


图 3 单双丝 MIG 焊接接头变形对比^[26]
Fig. 3 Comparison of weld distortion between single and double wire MIG welding^[26]: (a) Joint of single wire MIG; (b) Joint of double wire MIG

表 5 7A52 铝合金单双丝 MIG 焊接工艺对比^[26-28]

Table 5 Process comparison of 7A52 aluminum alloy welded by single and double wires MIG welding ^[26-28]					
Thickness/mm	Filler wire	Welding machine	Strength/MPa	Coefficient/%	Speed/(mm·min ⁻¹)
40	Single5356	SAF TRS-480	250	61	300
40	Double5356	Fronius TPS500	269	66	600
40	Single5A56	Single wire semi-automatic MIG	252	61	350
40	Double5A56	Fronius TIME-TWIN double wire MIG	280	68	680
40	Double5A56	SAF TANDEM high speed welding system	305	74	800

3.2 激光-MIG 复合焊

激光焊是铝合金焊接方法之一, 具有飞溅小、热影响区窄、焊缝成形美观等优点^[29]。但由于铝合金自身的高导热性和对激光发射率高, 激光焊接功率利用率低, 导致铝合金激光焊所需激光器功率大、成本高、焊接熔深浅等问题, 并且铝合金激光焊对焊前预处理要求高, 这些因素都限制了激光焊在铝合金焊接中的应用。20 世纪 70 年代末, 英国伦敦帝国大学学者 STEEN^[30]首次提出了激光-电弧复合焊接的方法。这种工艺被认为是综合了激光与电弧的优点, 即将激光的高能量密度和电弧的较大加热区组合起来, 同时, 通过激光与电弧的相互作用, 来改善激光能量的耦合特性和电弧的稳定性。而铝合金焊接又常采用 MIG 焊, 因此激光-MIG 复合焊应运而生, 图 4 所示为激光-MIG 复合焊原理示意图^[31]。

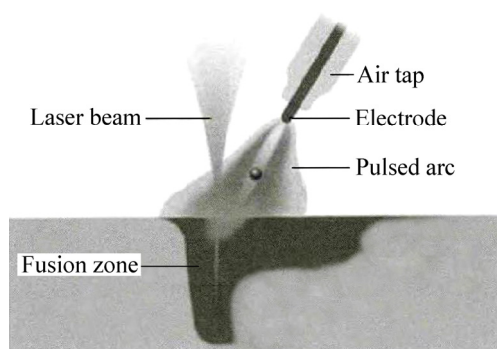


图 4 激光-MIG 复合焊原理示意图^[31]

Fig. 4 Schematic diagram of laser-MIG hybrid welding^[31]

激光-MIG 复合焊既能综合激光焊和 MIG 焊的各自优点, 又可弥补各自不足, 具有焊接速度快、焊缝熔深大、工艺适应性好、焊缝成形美观等优点。国内外学者对铝合金激光-MIG 焊进行了广泛研究。PETRING 等^[32]对高强铝合金激光-MIG 复合焊研究得出, MIG 焊焊接速度超过 2 mm/min 时, 焊缝质量开始变差, 而激光-MIG 复合焊接时可在保证焊缝成形良好的前提下将焊速提高至 4 mm/min^[32]。钱红丽^[33]采用激光-MIG 复合焊对 4 mm 厚 7A52 铝合金进行焊接试验研究, 结果表明复合焊焊缝均匀平整且表面具有金属光泽, 可获得良好的焊缝成形, 接头强度可达到母材的 70%。陶传琦等^[34]研究了 15 mm 7N01 铝合金 MIG 与激光-MIG 复合焊对比, 结果表明复合焊接头力学性能略高于 MIG 焊的, 但复合焊焊接效率明显高于 MIG 焊的, 且其焊接热输入明显低于 MIG 焊的。图 5 所示为 MIG 焊和激光-MIG 复合焊接头硬度分布, 可见复合焊焊缝区硬度高于 MIG 焊的。

激光-MIG 复合焊在铝合金焊接上具有较大优势, 为焊接性较差的 7xxx 系铝合金焊接提供了新的方法和思路。而目前针对 7xxx 系铝合金激光-MIG 复合焊方面的研究仍不多, 尤其是针对厚度 20 mm 以上的 7xxx 系铝合金激光-MIG 焊, 还未见有公开的文献报道, 并且激光-MIG 焊在焊接 7xxx 系铝合金厚板时, 仍存在气孔、裂纹等问题。本文作者认为, 激光-MIG 复合焊颇具发展前景, 未来可针对 7xxx 系厚板铝合金激光-MIG 焊开展工艺优化方面的工作, 以促进激光-MIG 复合焊在 7xxx 系铝合金厚板焊接上的应用。

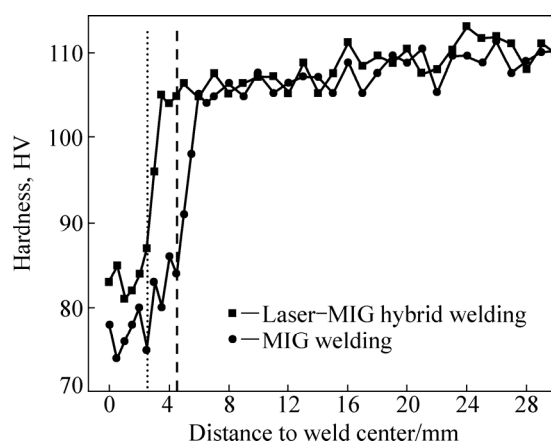


图 5 MIG 与激光-MIG 复合焊接头硬度分布^[34]

Fig. 5 Joints hardness distribution of MIG and laser-MIG hybrid welding^[34]

3.3 搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊 (FSW) 是由英国焊接研究所 (The Welding Institute, TWI) 于 1991 年提出的新型固相连接技术^[35-37], 搅拌摩擦焊利用高速旋转的搅拌头与待焊材料间的搅拌摩擦生热, 将材料加热至塑性状态, 并在轴向顶锻压力的热-机综合作用下, 形成致密的固相连接焊缝。由于 FSW 焊接过程中不存在金属的熔化, 可避免熔焊方法的常见焊接缺陷 (如气孔、裂纹、合金元素烧损渣等), 因此, FSW 在焊接铝合金尤其是焊接性欠佳的 7xxx 系高强铝合金上独具优势。目前, 搅拌摩擦焊技术已成功应用于航空航天、轨道车辆、船舶舰艇、汽车等多个工业领域^[38-40], 并且正在大面积取代熔焊方法用于铝合金连接件制造。例如美国已将搅拌摩擦焊成功应用于两栖战车铝合金装甲的焊接, 取得了强度高、耐腐蚀性好的高质量焊缝。波音公司已在 Delta II 火箭燃料贮箱制造上使用搅拌摩擦焊焊接了 1200 m 无缺陷焊缝。

国内外研究者对 7xxx 系铝合金搅拌摩擦焊进行了广泛研究。SHARMA 等^[41]采用搅拌摩擦焊焊接了 5

mm 厚 7039-T6 铝合金,得到的接头强度最高可达 354 MPa,为母材强度的 85%,研究发现转速和焊接速度对接头力学性能的影响可通过回归模型来预测。马志华等^[42]研究了 30 mm 厚 7A52 铝合金搅拌摩擦焊的接头组织和性能,结果表明焊缝区横截面硬度呈“W”形,TMAZ/HAZ 过渡区为接头软化区,接头强度最高可达到母材强度的 85.8%。图 6 所示为 7A52 铝合金 FSW 和双丝 MIG 接头的组织,从图 6 中可看出,双丝 MIG 焊缝中心晶粒粗大,而 FSW 接头焊缝区为细小的等轴晶^[43]。

图 7 所示为 7xxx 系铝合金不同焊接方法可焊板厚及焊接系数范围(图中 1892、1935 等数字表示各种焊接方法的发明年份, LB-MIG、DW-MIG 分别代表激光-MIG 复合焊和双丝 MIG 焊),从图 7 中可看出,随着焊接技术的发展,可焊板厚和焊接系数不断增加。其中搅拌摩擦焊是目前 7xxx 系铝合金可焊板厚范围最广(0.4~180 mm)、焊接系数最高(75%~97%)的焊接方法。激光-MIG 复合焊改善了铝合金对激光反射率高的问题,从而可焊板厚范围增大、焊接系数也有所提高。双丝 MIG 焊的高效焊接优势明显,其焊接速度

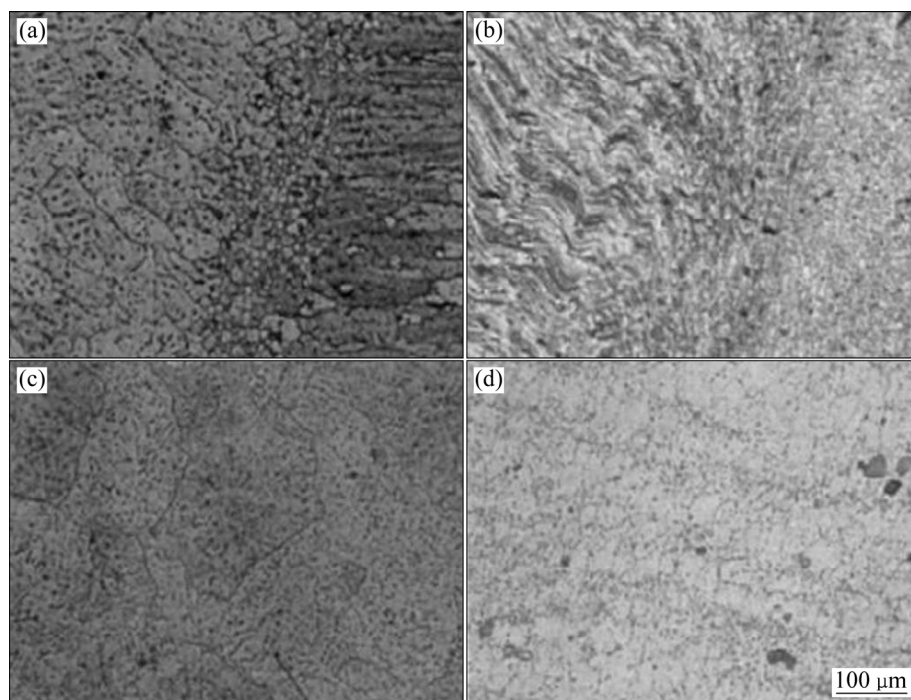


图 6 双丝 MIG 焊和 FSW 焊接接头组织^[43]

Fig. 6 Microstructures of double wire MIG and FSW joints^[43]: (a) Fusion zone of double MIG; (b) Thermo-mechanically affected zone of FSW; (c) Weld nugget zone of double MIG; (d) Weld nugget zone of FSW

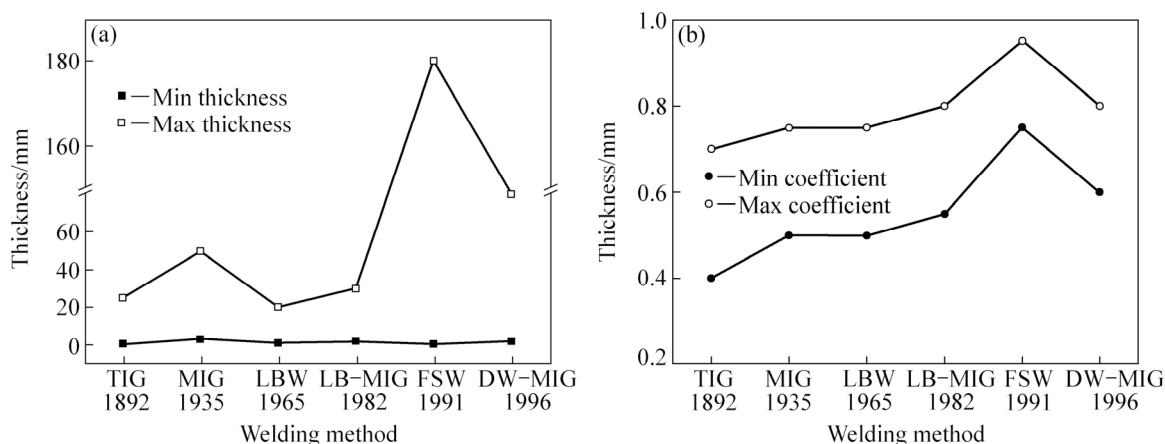


图 7 7xxx 系铝合金不同焊接方法可焊板厚及焊接系数范围

Fig. 7 Sheet thickness and welding coefficient of different welding methods for 7xxx series aluminum alloys: (a) Thickness gauge of plate; (b) Welding coefficient

和熔敷效率高于其他熔焊方法。随着焊接技术的更新改进, 相信 7xxx 系铝合金未来会有更好的新焊接方法出现。

4 结论与展望

1) 7xxx 系铝合金强度高, 焊接是制约 7xxx 系铝合金推广应用的重要因素。7xxx 系铝合金焊接存在热裂纹倾向大、焊缝中合金元素烧损多、热影响区软化严重等难点。调控 7xxx 系铝合金中主辅合金元素含量和比例及对焊丝进行微合金化优化设计, 是改善 7xxx 系铝合金焊接性、解决其焊接难点的重要途径。

2) 双丝 MIG 焊、激光-MIG 复合焊、搅拌摩擦焊这 3 种较新的焊接方法在 7xxx 系铝合金焊接上优势明显, 具有焊缝成形好、接头强度高、焊接速度快等优点。

3) 针对 7xxx 系铝合金的不同合金系、板厚和结构, 正确选用合适的焊接方法和工艺, 可有效提高 7xxx 系铝合金结构的焊接强度。随着焊接技术的不断发展, 相信未来会出现更新更好的焊接技术, 以促进 7xxx 系铝合金结构的推广应用。

REFERENCES

- [1] 刘 兵, 彭超群, 王日初, 王小锋, 李婷婷. 大飞机用铝合金的研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(9): 1705-1715.
LIU Bing, PENG Chao-qun, WANG Ri-chu, WANG Xiao-feng, LI Ting-ting. Recent development and prospects for giant plane aluminum alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(9): 1705-1715.
- [2] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced aircraft aluminum alloys[J]. Materials & Design, 2014, 56: 862-871.
- [3] CHEN Kang-hua, HUANG Lan-ping. Strengthening-toughening of 7xxx series high strength aluminum alloys by heat treatment[J]. Transactions Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(3): 484-490.
- [4] 宋仁国. 高强度铝合金的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2000, 14(1): 20-22.
SONG Ren-guo. Current status and trends in high strength aluminum alloy research[J]. Materials Review, 2000, 14(1): 20-22.
- [5] 张新明, 邓运来, 张 勇. 高强铝合金的发展及其材料的制备加工技术[J]. 金属学报, 2015, 51(3): 257-271.
ZHANG Xin-ming, DENG Yun-lai, ZHANG Yong. Development of high strength aluminum alloys and processing technology for the materials[J]. Acta Metallurgical Sinica, 2015, 51(3): 257-271.
- [6] 张传臣, 陈芙蓉. 厚板高强铝合金焊接发展现状及展望[J]. 电焊机, 2007, 37(7): 6-11.
ZHANG Chuan-chen, CHEN Fu-rong. Present state and perspectives of thickness high-strength aluminum alloy welding[J]. Electric Welding Machine, 2007, 37(7): 6-11.
- [7] 吴圣川, 唐 涛, 李 正. 高强铝合金焊接的研究进展[J]. 现代焊接, 2011(2): 5-8.
WU Sheng-chuan, TANG Tao, LI Zheng. Progress of the study on the welding of high-intensity aluminum alloy[J]. Modern Welding Technology, 2011(2): 5-8.
- [8] 周万盛, 姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 18-23.
ZHOU Wan-sheng, YAO Jun-shan. The welding of aluminum and aluminum alloys[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 18-23.
- [9] FUKUDA T. Weldability of 7000 series aluminium alloy materials[J]. Welding International, 2012, 26(4): 256-269.
- [10] 邱小明. 超声冲击对 7A52 铝合金焊接接头组织及性能的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2014: 2-3.
QIU Xiao-ming. Effect of UIT on microstructure and properties of 7A52 aluminum alloy welded joint[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2014: 2-3.
- [11] MADUSUDHAN R G, MUKHOPADHYAY A K, SAMBASIVA R A. Influence of scandium on weldability of 7010 aluminum alloy[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2005, 10(4): 432-440.
- [12] NORMAN A F, HYDE K, COSTELLO F. Examination of the effect of Sc on 2000 and 7000 series aluminum alloy castings: For improvements in fusion welding[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 354(1): 188-198.
- [13] 贺永东, 张新明, 游江海. 复合添加微量铬、锰、钛、锆对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(12): 1917-1924.
HE Yong-dong, ZHANG Xin-ming, YOU Jiang-hai. Effect of minor Cr, Mn, Ti and Zr on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu based alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(12): 1917-1924.
- [14] 郭飞跃, 尹志明, 姜 锋, 王炎金, 吴雅舒. 大型铝型材焊丝、焊接工艺及焊接接头组织与性能[J]. 电力机车技术, 2001, 34(3): 35-38.
GUO Fei-yue, YIN Zhi-min, JIANG Feng, WANG Yan-jin, WU Ya-shu. Welding wire, welding processing, microstructure and properties of aluminum alloy welding joint for vehicle fabrication[J]. Technology of Electric Locomotives, 2001, 34(3): 35-38.
- [15] 卫晏华, 尹志民. 铁路列车车辆用大型铝合金型材焊丝的选用与生产[J]. 有色金属加工, 2005, 34(5): 21-24.

- WEI Yan-hua, YIN Zhi-min. Selection and production of welding wire for welding large aluminum alloy profiles for railroad cars[J]. *Nonferrous Metals Processing*, 2005, 34(5): 21–24.
- [16] 赵志浩, 徐 振, 王高松. ER5356 焊丝中 Sc、Zr、Er 对 7A52 铝合金焊接性能的影响[J]. *材料研究学报*, 2013, 27(3): 287–291.
- ZHAO Zhi-hao, XU Zhen, WANG Gao-song. Effect of Sc, Zr, Er in ER5356 welding wire on mechanical properties of welded joint of 7A52 aluminum alloy[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2013, 27(3): 287–291.
- [17] 王 生, 李 周, 尹志民, 周古昕, 戚建国. 钕钇微合金化焊丝焊接头的组织与性能[J]. *兵器材料科学与工程*, 2005, 28(3): 26–29.
- WANG Sheng, YIN Zhi-min, ZHOU Gu-xin, CHENG Jian-gou. Microstructures and properties of welded joint of 7A52 alloy welded by the solder wire containing Sc and Zr[J]. *Ordinance Material Science and Engineering*, 2005, 28(3): 26–29.
- [18] 徐 振, 赵志浩, 李 莹, 董 宇. 钕钇微合金化对 7A52 合金焊缝组织与性能的影响[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(6): 854–858.
- XU Zhen, ZHAO Zhi-hao, LI Ying, DONG Yu. Effects of scandium and erbium microalloying on microstructures and properties of weld joint of 7A52 alloys[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2013, 34(6): 854–858.
- [19] 彭小燕, 曹晓武, 段雨露, 陈国富, 尹志民. 7020 铝合金 MIG 焊焊接头的组织与性能[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(4): 912–918.
- PENG Xiao-yan, CAO Xiao-wu, DUAN Yu-lu, CHEN Ju-fei, XU Guo-fu, YIN Zhi-min. Microstructures and properties of MIG welded joint of 7020 aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(4): 912–918.
- [20] 盖红德, 唐 杰, 戴家辉, 张明贤. 7A52 铝合金交流钨极氩弧焊焊接电流对焊接接头组织性能的影响[J]. *材料导报*, 2013, 27(21): 329–331.
- GAI Hong-de, TANG Jie, DAI Jia-hui, ZHANG Ming-xian. Effect of welding current on microstructure and properties of welded joint in AC-TIG welding of 7A52 aluminum alloy[J]. *Materials Review*, 2013, 27(21): 329–331.
- [21] ENZ J, RIEKEHR S, VENTZKE V. Laser welding of high-strength aluminum alloys for the sheet metal forming process[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 18: 203–208.
- [22] LI K H, CHEN J S, ZHANG Y M. Double-electrode GMAW process and control[J]. *Welding Journal*, 2007, 86(8): 231–237.
- [23] OLSSON R. High-speed welding gives a competitive edge[D]. *Welding Review International*, 1995: 129–131.
- [24] 章友谊, 刘 华, 朱小兵. 7A52 铝合金 MIG 焊接接头显微组织与性能研究[J]. *热加工工艺*, 2013, 42(19): 172–174.
- ZHANG You-yi, LIU Hua, ZHU Xiao-bing. Microstructure and property of welded joint of 7A52 Al alloy by MIG welding process[J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(19): 172–174.
- [25] 杨春利, 刚 铁, 林三宝, 崔洪波. 高强铝合金厚板双丝 MIG 焊工艺的初步研究[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(S1): s259–s264.
- YANG Chun-li, GANG Tie, LIN San-bao, CUI Hong-bo. Tandem MIG welding of high-strength thick aluminum alloy plate[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(S1): s259–s264.
- [26] 张传臣, 陈芙蓉, 高云喜. 7A52 铝合金单双丝焊工艺对比分析[J]. *焊接学报*, 2008, 29(9): 67–70.
- ZHANG Chuan-cheng, CHEN Fu-rong, GAO Yun-xi. Analysis on single and double wire welding technology of 7A52 aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(9): 67–70.
- [27] 余 进, 王克鸿, 徐越兰, 刘 永. 7A52 铝合金双丝焊接头的组织与性能[J]. *焊接学报*, 2005, 26(10): 87–90.
- YU Jin, WANG Ke-hong, XU Yue-lan, LIU Yong. Microstructures and properties of 7A52 aluminum alloy welded joint by twin wire welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(10): 87–90.
- [28] 朱 军, 王有祁, 陈东高, 明 珠, 谭 兵, 刘红伟. 单丝、双丝 MIG 对 7A52 铝合金焊缝性能和变形的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2009, 32(9): 39–42.
- ZHU Jun, WANG You-qin, CHEN Dong-gao, MING Zhu, TAN Bing, LIU Hong-wei. Distortion and properties of 7A52 aluminum alloy welded joint by single and twin wire MIG welding[J]. *Ordinance Material Science and Engineering*, 2009, 32(9): 39–42.
- [29] 张智慧, 董世运, 王玉江, 徐滨士, 何 鹏, 方金祥, 夏 丹. 7A52 铝合金光纤激光焊接接头组织与性能研究[J]. *应用激光*, 2014, 34(6): 567–571.
- ZHANG Zhi-hui, DONG Shi-yun, WANG Yu-jiang, XU Bing-shi, HE Peng, FANG Jin-xiang, XIA Dan. Microstructure and properties of fiber laser welded 7A52 alloy joints[J]. *Applied Laser*, 2014, 34(6): 567–571.
- [30] STEEN W M. Arc augmented laser processing of materials[J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(11): 5636–5641.
- [31] TUSEK J, SUBAN M. Hybrid welding with arc and laser beam[J]. *Science and Technology of Welding & Joining*, 1999, 4(5): 308–311.
- [32] PETRING D, KAIERLE S, KASIMIR M. Extended range of applications for laser beam welding by laser-MIG hybrid technique[J]. *Laser Opto*, 2001, 33(1): 50–56.
- [33] 钱红丽. 7A52 铝合金光纤激光焊及激光-MIG 复合焊工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014: 1–77.
- QIAN Hong-li. Research on fiber laser welding and laser-MIG welding process of 7A52 aluminum alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014: 1–77.
- [34] 陶传琦, 王 认, 崔云龙. 15 mm 厚 A7N01 铝合金 MIG 与激

- 光-MIG 复合焊接对比[J]. 电焊机, 2015, 45(1): 108–111.
- TAO Chuan-qi, WANG Ren, CUI Yun-long. Contrast of MIG welding and laser-MIG hybrid welding on 15 mm thickness A7N01 aluminum alloy[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(1): 108–111.
- [35] SHARMA C, DWIVEDI D K, KUMAR P. Effect of post weld heat treatments on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of Al-Zn-Mg alloy AA7039[J]. Materials & Design, 2013, 43: 134–143.
- [36] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering R, 2005, 50: 1–78.
- [37] FULLER C B, MAHONEY M W, CALABRESE M. Evolution of microstructure and mechanical properties in naturally aged 7050 and 7075 Al friction stir welds[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(9): 2233–2240.
- [38] SONG You-bao, YANG Xin-qin, CUI Lei. Defect features and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar AA2024-AA7075 aluminum alloy sheets[J]. Materials & Design, 2014, 55: 9–18.
- [39] RAO T S, REDDY G M, RAO S R K. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA7075-T651 aluminum alloy thick plates[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25: 1770–1778.
- [40] 宋友宝, 杨新岐, 崔 雷. 异种高强铝合金搅拌摩擦焊搭接接头的缺陷和拉伸性能[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(5): 1167–1174.
- SONG You-bao, YANG Xin-qin, CUI Lei. Defects and tensile properties of friction stir welded lap joints for dissimilar high-strength aluminum alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5): 1167–1174.
- [41] SHARMA C, UPADHYAY V, DWIVEDI D K, KUMAR P. Mechanical properties of friction stir welded armor grade Al-Zn-Mg alloy joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(3): 493–506.
- [42] 马志华, 陈东高, 刘红伟, 郭海林, 刘泽林, 杨武林, 叶 晨. 30 mm 厚 7A52 铝合金搅拌摩擦焊接组织与性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(2): 63–65.
- MA Zhi-hua, CHEN Dong-gao, LIU Hong-wei, GUO Hai-lin, LIU Ze-lin, YANG Wu-lin, YE Chen. Microstructure and properties of welding joints of 30 mm thickness 7A52 aluminium alloy plate by friction stir welding [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37(2): 63–65.
- [43] 刘红伟, 李京龙, 马 冰, 周 琦. 7A52 铝合金 FSW 与双丝 MIG 焊接接头性能比较研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(9): 117–111.
- LIU Hong-wei, LI Jing-long, MA Bing, ZHOU Qi. Comparison of joint properties of 7A52 alloy welded by friction stir welding and double wire MIG[J]. Hot Working, 2011, 40(9): 117–111.

Research status and perspective of 7xxx series aluminum alloys welding

SONG You-bao^{1,2}, LI Long¹, LÜ Jin-ming², YAN An², ZHOU De-jing¹

(1. Yinbang Clad Material Company Limited, Jiangsu Key Laboratory for Clad Materials, Wuxi 214145, China;

2. Yinbang Defense Technology Company Limited, Wuxi 214145, China)

Abstract: The characteristics of welding for 7xxx series aluminum alloys were combined, and the selection and optimization of wires were introduced. Three new welding methods, such as double wire MIG welding, laser-MIG hybrid welding and friction stir welding, were stated. Compared with traditional welding methods, the three new methods have superiority and foreground in the welding of 7xxx series aluminum alloys. Alloying optimization design of base metal and wire for 7xxx series aluminum alloys, developing of new welding method are the important research direction in the future.

Key words: 7xxx series aluminum alloy; welding; selection of wire; welding method

Foundation item: Project(CZE02H1504) supported by Wuxi City Science and Technology Development Fund, China; Project (BZ2016004) supported by Key National and Organizational Industry Technical Cooperation, China; Project(BM2014006) supported by Program of Key Laboratory of Jiangsu Province of Metal Layered Composite Materials, China

Received date: 2016-07-21; **Accepted date:** 2017-04-26

Corresponding author: SONG You-bao; Tel: +86-510-88997000; E-mail: ybstju@163.com

(编辑 王 超)