

有色合金 A-TIG 焊研究现状

马 壮,张 莉,王义伟

(辽宁工程技术大学材料科学与工程学院,阜新 123000)

摘要 活性化 TIG 焊(A-TIG 焊)可以用于焊接不锈钢、碳钢、铝合金、镁合金、钛合金和镍基合金等材料。根据国内外关于 A-TIG 焊接技术研究、发展及应用的实际情况,综合论述了 A-TIG 焊接技术这一新型焊接方法在铝合金、镁合金、钛合金和镍基合金焊接领域中的研究现状。

关键词 活性焊剂 A-TIG 焊 铝合金 镁合金 钛合金 镍基合金

中图分类号:TG444

文献标识码:A

Research Status of A-TIG Welding for Non-ferrous Alloy

MA Zhuang, ZHANG Li, WANG Yiwei

(College of Materials Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000)

Abstract The TIG with active agent(A-TIG) can be used in stainless steel, carbon steel, titanium alloy, aluminum alloy, magnesium alloy and nickel-based alloy. In accordance with the actual situation at home and abroad on the A-TIG welding technology research, development and application, the research status of the A-TIG welding technology applied in titanium alloy, aluminum alloy, magnesium alloy and nickel-based alloy are reviewed.

Key words activating flux, A-TIG welding, aluminum alloy, magnesium alloy, titanium alloy, nickel base alloy

0 引言

普通 TIG 电弧焊能够实现高品质焊接,可以得到优良的焊缝,但焊接时,由于电弧热量分散和电弧力数值低等原因,在正常的规范参数下,单层焊接只能获得较小熔深。A-TIG 焊就是在被焊材料表面均匀地涂上一层很薄的细粒状活性助焊剂,然后实施常规 TIG 焊的方法。用 A-TIG 进行焊接,在相同的焊接规范下,可使焊接熔深得到大幅度的提高,同时使焊接过程简化,提高了焊接生产效率,并大大降低了生产成本^[1]。目前,世界上 3 个最著名的焊接研究所(PWI、EWI、TWI)正积极致力于这一新型焊接工艺的研究、发展和应用。其研究热点主要集中在以下两方面:一是适用于各种金属材料的活性剂的研制;二是活性剂增加焊接熔深机理的研究。本文结合已有的 A-TIG 焊相关试验研究结果,对铝合金、镁合金、钛合金和镍基合金焊接工艺研究现状进行探讨。

1 铝合金 A-TIG 焊研究现状

到目前为止,已有不少研究人员针对铝合金活性化 TIG 焊接法活性剂开发和活性剂增加 TIG 焊熔深机理等几方面内容进行了初步研究。

1.1 铝合金 A-TIG 活性焊剂研究现状

将铝合金 TIG 焊与活性焊接法结合起来,可有效地使铝合金焊缝熔深增加。构成铝合金的焊剂通常可分为卤化物和氧化物两类。另外,不同化学试剂物理化学性质不同,作

为焊剂组分所起到的作用也不同,同时不同配比对工艺性能也有重要影响。

甘肃工业大学黄勇等^[2]进行了 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MnO_2 、 TiO_2 、 Cr_2O_3 、 B_2O_3 、 V_2O_3 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 NaCl 、 CaF_2 、 SrCl_2 等常见氧化物和卤化物的铝合金(LF21)交流 A-TIG 焊,研究了单一组分活性剂对焊缝熔深的影响。实验结果表明,有的活性剂在一定程度上能增加 LF21 铝合金焊缝熔深,有的反而使熔深减小。氧化物中 SiO_2 增加熔深效果最好, Cr_2O_3 、 B_2O_3 、 V_2O_3 次之, MnO_2 、 Al_2O_3 使熔深减小。卤化物中 CaF_2 使焊缝熔深增加, NaCl 、 SrCl_2 使焊缝熔深减小。另外,卤化物增加焊缝熔深的效果没有氧化物的效果好。张学军等^[3]以 NaCl 、 CaCl_2 、 SrF_2 、 AlF_3 、 CaF_2 、 LiF 、 MgF_2 作为单组分焊剂,对 5A06 铝合金进行焊接。结果表明,焊剂对深宽比的影响由大到小为: $\text{AlF}_3 > \text{CaCl}_2 > \text{MgF}_2 > \text{SrF}_2 > \text{CaF}_2 > \text{NaCl} > \text{LiF}$ 。周泽杰等^[4]对 3003 铝合金进行交流活性钨极氩弧焊(A-TIG)焊接实验,选用氧化物 SiO_2 、 TiO_2 和卤化物 MnCl_2 、 NaCl 、 CaF_2 作为活性剂,研究了单一成分表面活性剂对焊接熔深的影响。实验结果表明:涂敷活性剂可以一定程度增加焊缝熔深;氧化物增加焊缝熔深的作用比卤化物大。

1.2 铝合金 A-TIG 活性焊剂对焊缝力学性能的影响

郑勤等^[5]主要研究了在 LY12 铝合金 TIG 焊中添加 SiO_2 活性剂对焊接接头显微组织的影响。结果表明,LY12 铝合金 TIG 焊时,其他工艺参数相同的情况下,在母材表面涂覆 SiO_2 活性剂(5.3 mg/cm^2),可以得到较为细小的显微

组织;最后对试样进行冲击韧性试验,得到的结果如表 1 所示。由表 1 可以明显看出,涂覆活性剂试样的冲击韧性比没有涂覆活性剂的冲击韧性要好。

表 1 LY12 铝合金冲击韧性

Table 1 Impact toughness of LY12 aluminum alloy

试样编号	试样尺寸 (长×宽×高)/mm	冲击功 J	冲击韧性 J/cm ²
1(涂活性剂)	100×11×6	17.0	25.8
2(无活性剂)	100×11×6	13.5	20.5
3(涂活性剂)	100×11×6	16.0	24.2
4(无活性剂)	100×11×6	11.2	17.0
5(涂活性剂)	100×11×6	15.0	22.7
6(无活性剂)	100×11×7	10.8	14.0

1.3 铝合金 A-TIG 焊影响因素

樊丁等^[6]采用多组分活性剂对 LF21 铝合金进行焊接,并分别研究了焊接电流、焊接速度、氩气流量和弧长对熔深的影响,其影响规律如图 1 所示。由图 1 可以看出:(1)无活性剂时焊缝熔深 h_0 随着电流增加缓慢增大,而有活性剂时焊缝熔深 h 随着电流增加先增加后减小(图 1(a));(2)无活性剂时焊缝熔深 h_0 随着焊接速度增加变化不大,而有活性剂时焊缝熔深 h 随着焊接速度的增加先减小后增大(图 1(b));(3)无活性剂时焊缝熔深 h_0 随着焊接速度增加先减小后缓慢增大,而有活性剂时焊缝熔深 h 随着氩气流量的增加先增大后减小(图 1(c));(4)无活性剂时焊缝熔深 h_0 和有活性剂时焊缝熔深 h 都随着弧长增长缓慢增加(图 1(d))。

1.4 铝合金 A-TIG 焊接熔深的机理研究现状

关于活性剂增加铝合金焊接熔深的机理,目前研究得还很少,是“电弧收缩理论”起主要作用,还是“表面张力温度梯度改变理论”起主要作用,或是两者同时起作用,以及另外有其他熔深增加的机理,目前还有待于进一步研究。法国学者 S. Sire^[7]在进行铝合金交流 FB-TIG 焊时发现,当采用 SiO_2 作为活性剂且间隙很小时,电弧明显收缩,电压升高; AlF_3 作为活性剂时,焊渣成片分布在焊缝表面,熔深增加。黄勇等^[2,8]在熔深增加机理方面做了大量的工作,在对铝合金进行 A-TIG 焊研究时,指出导电通道电阻对铝合金 A-TIG 焊焊接熔深有较大的影响。黄勇等^[9]针对 3003 铝合金采用单组元活性剂进行金交流 A-TIG 焊时, SiO_2 增加熔深最明显,并对其增加熔深的机理进行了研究,结果表明:(1) SiO_2 不是通过改变焊接熔池表面张力温度梯度,而是通过影响焊接电弧行为来增加熔深的;(2)在电弧作用下, SiO_2 使得熔池表面氧化膜变厚;(3)电弧极性区收缩和热输入增加是 SiO_2 增加铝合金交流 A-TIG 焊熔深的主要机理。

2 镁合金 A-TIG 焊研究现状

将 A-TIG 焊方法应用于镁合金的焊接可以大大提高镁合金的焊接质量和效率,解决了制约其广泛应用的主要障碍之一,对镁合金的产业化应用具有重要的现实意义。镁合金的活性焊接研究在国内外已经取得了初步的研究结果。

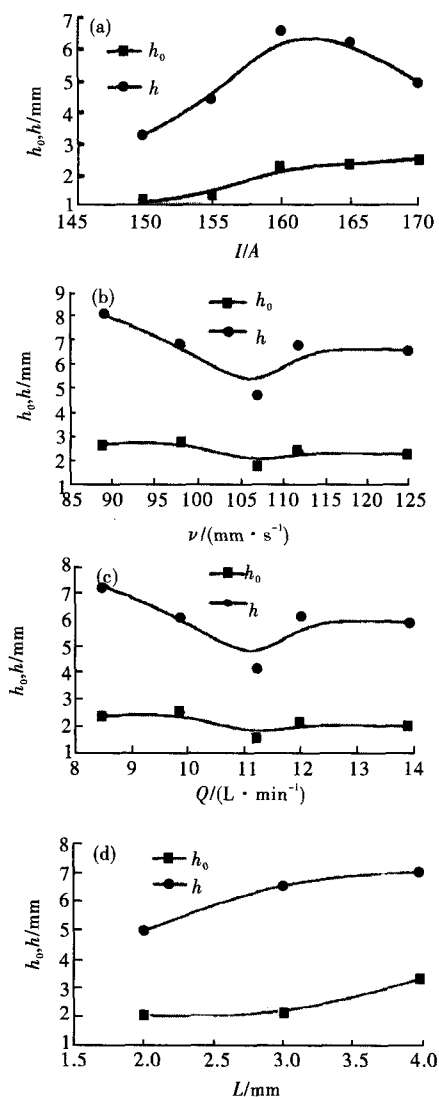


图 1 焊接参数对熔深的影响

Fig. 1 Effect of welding parameters on weld penetration

2.1 镁合金 A-TIG 活性焊剂研究现状

张兆栋等^[10]研究了 9 种常见氯化物、氧化物、氟化物助焊剂在 AZ31B 变形镁合金交流 TIG 焊及变极性等离子焊弧中的行为,结果表明:助焊剂 NiCl_2 、 CdCl_2 、 ZnCl_2 、 MgCl_2 、 TiO_2 、 Cr_2O_3 、 AlF_3 使镁合金交流 TIG 焊焊缝熔深增加; MgF_2 、 SiO_2 使镁合金交流 TIG 焊焊缝熔深减小; TiO_2 、 SiO_2 、 Cr_2O_3 、 AlF_3 、 NiCl_2 、 CdCl_2 使镁合金变极性等离子弧焊焊缝熔深增加; ZnCl_2 、 MgCl_2 、 MgF_2 使镁合金变极性等离子弧焊焊缝熔深减小。张帆等^[11]利用 ZnCl_2 和 TiO_2 对 AZ31B 变形镁合金进行 TIG 焊,结果发现,在相同的实验条件下, ZnCl_2 活性剂增加熔深的效果优于 TiO_2 活性剂。

Liu Liming 等^[12]用 A-TIG 焊焊接 AZ31B 变形镁合金,研究发现添加氧化物 TiO_2 、 Cr_2O_3 和氯化物 CdCl_2 、 ZnCl_2 可以增加镁合金接头的熔深,但添加氯化物时增加熔深的效果要好一些。焊接接头的薄弱区是热影响区的粗晶区,A-TIG 焊焊接可通过减少热影响区中粗晶区宽度和晶粒尺寸来提高接头质量。齐果等^[13]采用 TIG 焊和 A-TIG 焊对 AZ31 镁

合金进行焊接,研究发现采用 TIG 焊时,析出相主要在晶界上,而采用 A-TIG 焊时,由于活性剂的加入,在晶界与晶粒上都存在析出相。力学性能测试表明 TIG 焊与 A-TIG 焊的焊接接头平均抗拉强度均为 207 MPa,抗拉强度基本一致。另外,他们又对焊接接头硬度进行测试,结果如表 2 所示。由表 2 可见,两种方法所得到的焊接接头硬度分布规律基本一致,都是焊缝区硬度最高,热影响区硬度最低。

表 2 AZ31 镁合金焊接接头维氏硬度值

	magnesium alloy	
	TIG 焊接头(均值)	A-TIG 焊接头(均值)
焊缝区	56.4	55.6
热影响区	52.6	52.5
基体	54.5	53.7

2.2 镁合金 A-TIG 焊接熔深的机理研究现状

美国的 M. Myarasl^[14]对镁合金的 A-TIG 焊熔深增加机理进行了研究,发现在卤化物作用下,焊接电压发生变化的同时熔深和熔宽也发生相应变化,指出焊接电压升高引起热输入的增加是熔深和熔宽变化的主要原因。刘黎明等^[15]采用 TiO₂、Cr₂O₃、CdCl₂ 和 ZnCl₂ 活性剂对 AZ31B 变形镁合金进行交流 TIG 焊,并研究了这 4 种活性剂对熔深的影响,指出氯化物活性剂增加熔深的机理主要是活性剂与电弧的相互作用;氧化物活性剂增加熔深的机理主要是活性剂与熔池金属的相互作用。

3 钛合金 A-TIG 焊研究现状

钛合金进行焊接时易出现气孔,而 A-TIG 焊最能有效抑制这种缺陷产生。活性焊剂最先由乌克兰巴顿焊接研究所于 20 世纪 60 年代研制。随后的研究成果被引入到钛合金的焊接中,该焊剂主要是由卤化物和氧化物组成,可使 12 mm 厚的钛合金板一次 A-TIG 焊接完成^[16]。焊缝熔宽窄,热影响区小,逐步形成最初的 A-TIG 焊接工艺。目前有

许多研究者对钛合金 A-TIG 焊进行研究。

3.1 钛合金 A-TIG 活性焊剂研究现状

活性剂对焊缝最主要的影响表现在熔深增加效应上。北京航空制造工程研究所张连峰等采用 2.5 mm 厚的钛合金(TC4)、TA2 焊丝、FT-01 钛合金活性焊剂进行 A-TIG 焊和常规 TIG 焊工艺试验。

图 2 显示了相同焊接工艺规范下,钛合金的 A-TIG 焊焊缝熔深与常规 TIG 焊熔深的对比^[17]。从图 2 中可以看出,A-TIG 焊可以明显减小焊缝宽度,改善焊缝成形。陈俐等^[18]的研究表明,氟化物对钛合金焊接熔深影响显著。黄勇等^[19]采用卤化物(CaF₂, ZnF₂, MnCl₂)、氧化物(SiO₂, TiO₂, V₂O₅)和单质 Te 作为活性剂对钛合金(TC4)进行 A-TIG 焊。研究结果表明:卤化物能够增加熔深;氧化物对钛合金的焊缝形成几乎没有影响;Te 能明显增加焊接熔深,减小焊缝熔宽。

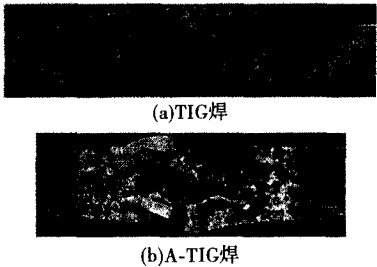


图 2 常规 TIG 焊与 A-TIG 焊宏观金相对比

Fig. 2 Macro metallographic contrast of conventional TIG welding with A-TIG welding

采用活性剂对钛合金进行焊接,能够获得高质量焊缝^[17,20,21]。李晓红等^[22]采用自制活性焊剂 FT-01 和 FT-02 对 TC4 钛合金进行焊接,并对其焊接接头进行力学性能测试。实验结果如表 3 所示,可见,与普通 TIG 焊相比,A-TIG 焊可以提高焊接接头的力学性能。杜晓晓等^[23]研究表明,A-TIG 接头的抗拉强度比 TIG 接头高出约 50 MPa,并且弯曲性能也略有提升。

表 3 TC4 钛合金焊接接头力学性能

焊接方法	抗拉强度	屈服强度	断后伸长率	断面收缩率	弯曲角/(°)	疲劳性能 (700 MPa)
	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	Ψ /%		
TIG	1014.0	911.4	7.5	9.8	30	循环次数小于 10 ⁵
A-TIG	1038.9	948.5	10.0	11.5	34	循环次数大于 3×10 ⁶

3.2 钛合金 A-TIG 焊接熔深的机理研究现状

电弧收缩现象是乌克兰学者^[24]在研究钛合金活性焊时观察到的,于是提出了“电弧收缩理论”。该理论认为,在焊接电弧的作用下,蒸发的活性剂分子通过捕捉电弧外围区的电子而使电弧收缩。电弧收缩导致电弧导电面积减小,电流密度增加,从而使得电弧力和熔池内的 Lorentz 力增加,最终导致焊接熔深增加。为了了解 A-TIG 焊接熔深增加的机理,需要对 A-TIG 焊接电弧的内部物理过程及现象进行深入研究。北京航空制造工程研究所张连锋^[25]采用单组分活性焊

剂 CaF₂ 进行了 A-TIG 焊及常规 TIG 焊接钛合金(BT20)工艺的对比试验,利用光谱仪检测 A-TIG 焊接过程中电弧的局部光谱,发现焊剂的引入没有改变电弧中氩谱线的分布趋势,但使近熔池表面区域的氩谱线强度增大,使远离熔池表面区域的氩谱线强度降低。

4 镍基合金活性焊的研究

随着国内外学者对活化焊接机理的进一步研究以及工艺应用方面的日趋成熟,适用于更多材料的活性焊将被开发

出来。A-TIG 焊在镍基合金中的应用也引起了人们的注意,并开始了初步的研究。

范成磊等^[26]针对 Nimonic263 高温合金,选择 TiO_2 、 CaO 、 SiO_2 、 AlF_3 、 SrF_2 、 NaF 、 LiF 、 CaF_2 、 MgF_2 和 NaCl 为活性剂进行 TIG 焊。试验结果表明,NaF-MgF₂-CaO 系和 NaF-MgF₂-CaF 系混合型活性剂增加熔深的能力均比单一成分活性剂突出,其中,成分配比为 $m(\text{NaF}):m(\text{MgF}_2):m(\text{CaO})=5:6:5$ 的混合型活性剂使熔深增加了 122%,而 $m(\text{NaF}):m(\text{MgF}_2):m(\text{CaF}_2)=5:4:1$ 混合型活性剂使熔深增加高达 164%。王西昌等^[27]选用镍基高温合金 GH4169 进行试验,分析了不同种类活性剂对焊缝成形的影响规律。结果发现,活性剂电子束焊接能改善焊缝表面成形,并可进一步消除咬边等表面缺陷。另外,他们还发现氟化物(NaF、CaF₂、AlF₃)对焊缝上下表面成形、熔深基本没有影响,而氧化物的影响较大。在氧化物中, TiO_2 、 SiO_2 增加熔深效果明显,但表面成形稍差; ZrO_2 能改善焊缝成形,但对熔深影响不大; Cr_2O_3 既能改善焊缝成形又能增加熔深。姚宏伟等^[28]介绍了采用 A-TIG 焊对蒙乃尔合金 400 进行焊接的工艺进行评定,指出使用 A-TIG 焊,在现有的条件下可以实现全焊透的结构型式,其焊接工艺安全、经济,在蒙乃尔合金的焊接中具有可观的应用前景。

5 结束语

活性焊接是近 10 年发展起来的增大焊接熔深、改善焊缝成形和焊接质量、提高焊接生产效率的新技术。关于活性剂提高焊缝熔深的机理,目前存在两种比较流行的理论,即电弧收缩理论和表面张力理论。而这两种理论的作用与表现又与焊接方法、焊接材料和活性剂成分等有关,究竟是哪一种理论适用还有待于进一步研究。总之,A-TIG 焊接技术在许多方面仍有待于进一步完善,但该技术因具有焊接质量良好、焊接生产率高、生产成本低廉的显著优点而保持着巨大的发展潜力。

参考文献

- 1 张秋萍. 活性焊剂氩弧焊技术及其应用[J]. 飞航导弹, 2006(6):57
- 2 黄勇,樊丁. 铝合金交流 A-TIG 焊熔深增加机理的研究——导电通道电阻对焊缝熔深的影响[J]. 焊接, 2003(4):9
- 3 张学军,李艳,张文扬,等. 铝合金活性焊剂研究[J]. 焊接, 2012(7):38
- 4 周泽杰,黄志超,曹高浩. 3003 铝合金 A. TIG 焊表面活性剂实验[J]. 华东交通大学学报, 2012, 29(1):20
- 5 郑勤,李文,杨春娟. SiO_2 活性剂对铝合金 TIG 焊接接头性能影响[J]. 中国水运, 2009(6):131
- 6 樊丁,黄勇. 铝合金交流 A-TIG 焊中活性剂和焊接参数对焊缝熔深的影响[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(3):6
- 7 Sire S, Marya S. New perspectives in TIG welding of alumi-

num through flux application FBTIG process[C]//Proc. of the 7th Symp. Kobe, Japan, 2001

- 8 黄勇,樊丁,樊清华. 表面活性剂对铝合金直流正接 A-TIG 焊熔深的影响[J]. 焊接学报, 2004, 10(5):60
- 9 黄勇,樊丁. SiO_2 增加铝合金交流 A-TIG 焊熔深的机理[J]. 焊接学报, 2008, 29(1):45
- 10 张兆栋,刘黎明,沈勇,等. 镁合金的活性电弧焊接[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(6):912
- 11 张帆,张兆栋,刘黎明. ZnCl_2 和 TiO_2 活性剂对镁合金 TIG 焊的影响[J]. 焊接学报, 2008, 29(6):61
- 12 Liu Liming, Zhang Zhaodong, Song Gang, et al. Mechanism and microstructure of oxide fluxes for gas tungsten arc welding of magnesium alloy[J]. Metall Mater Trans A, 2007, 38:649
- 13 齐果,张丽君,王健,等. 镁合金活性 TIG 焊与 TIG 焊接头组织与性能分析[J]. 兵器材料科学与工艺, 2009, 32(2):77
- 14 Marya M. Theoretical and experimental assessment of chloride effects in the ATIG welding of magnesium[J]. Weld World, 2002, 46(7-8):7
- 15 刘黎明,张兆栋,沈勇,等. 活性剂对镁合金 TIG 焊接熔深的影响[J]. 金属学报, 2006, 42(4):399
- 16 Gurevich S M, Zamokov V N, Kushirenko N A. Improving the penetration of titanium alloys when they are welded by tungsten arc process[J]. Automatic Weld, 1965, 18(9):1
- 17 张连锋,李晓红,杜欲晓,等. 钛合金活性焊剂氩弧焊接头组织分析[J]. 焊接, 2006(7):16
- 18 陈俐,胡伦骥. 活性剂焊接技术的研究[J]. 新技术新工艺, 2005(4):39
- 19 黄勇,樊丁,张涵,等. 表面活性剂对钛合金 A-TIG 焊熔深的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(10):1586
- 20 刘黎明,杜鑫,张兆栋,等. TA15 钛合金接头活性剂补焊的组织特征[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(12):1910
- 21 高瑞,孙耀峻,徐希军,等. 船用 Ti31 合金的活性化 TIG 焊接[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1):722
- 22 张连锋,李晓红,杜欲晓. 活性焊剂对钛合金氩弧焊接接头性能的影响[C]//航空航天焊接国际论坛. 北京, 2004:184
- 23 杜欲晓,王大鹏,郭德伦,等. 活性剂对 TA15 钛合金对接及 T 形穿透焊接头的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(7):98
- 24 Simonik A G. The effect of contraction of the arc discharge upon the introduction of the electro-negative elements[J]. Weld Product, 1976(3):49
- 25 张连锋,等. 钛合金活性焊剂氩弧焊电弧局部光谱分析[J]. 航空制造技术, 2006(5):73
- 26 范成磊,等. Nimonic263 合金混合型焊接活性剂及效果研究[J]. 材料科学与工艺, 2007, 15(5):640
- 27 王西昌,左从进,柴国明,等. 活性剂对 GH4169 薄板电子束焊接焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2009, 30(2):83
- 28 姚宏伟,张京海. 蒙乃尔合金活性化 TIG 焊工艺[J]. 材料开发与应用, 2005, 20(4):34

(责任编辑 余波)