

保护气体对激光-电弧复合焊接的影响

(邀请论文)

曾晓雁 高明 严军

(华中科技大学光电子科学与工程学院武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 激光-电弧复合焊接是焊接领域的研究热点,工业应用前景广阔。保护气体是实现激光-电弧有效复合、获得最大效能的关键参数。结合国内外研究及作者的研究工作,综述了保护气体成分、配比、流量等参数对激光-电弧复合焊接工艺特性、焊缝形貌特征和接头力学性能的影响及研究现状。

关键词 激光技术; 激光-电弧复合焊接; 保护气体; 工艺特性; 力学性能

中图分类号 TG174.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0601005

Effects of Shielding Gas in Laser-Arc Hybrid Welding

Zeng Xiaoyan Gao Ming Yan Jun

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronics Science and Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Laser-arc hybrid welding has absorbed wide interesting in the past years due to its potential industrial applications, in which shielding gas plays an important role to achieve the effective laser-arc synergy effect and stable process. The effects of the shielding gas on the bead quality for laser-arc hybrid welding are reviewed. The mechanisms about the parameters of the shielding gas on process characteristics, bead shape and joint mechanical properties are discussed.

Key words laser technique; laser-arc hybrid welding; shielding gas; process characteristic; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 140.3470

1 引 言

激光-电弧复合焊接是由 Steen^[1]首先提出的一种新型焊接技术。经过国内外学者与工程技术人员 30 余年的研究与推广,其技术优势得到了广泛认同。研究表明^[2~8],激光-电弧复合焊接不是热源简单叠加,在激光与电弧这两种物理性质、能量传输机制截然不同的热源之间存在强烈的相互作用。通过这种相互作用,激光和电弧的工艺特性,比如激光等离子体强度、小孔形貌特征、电弧稳定性、弧柱面积和热源能量分布等会相对于单热源焊接发生改变,最终得到一种高效复合的热源,实现焊接效率和适应能力的大幅度提高。

无论是激光焊接还是电弧焊接,保护气体都是影响工艺特性的关键因素。在激光焊接,尤其是 CO₂ 激光焊接中,保护气体是消除等离子体屏蔽效应、提高工艺稳定性并实现深熔焊的有效手

段^[9~11]。在电弧焊接中,保护气体是实现电弧稳定燃烧、决定弧柱热量分布和熔滴过渡方式的关键因素^[12,13]。而且,对焊接熔池来说,保护气体是防止高温焊接熔池氧化或污染的必要手段。因此,对于集成两种工艺的激光-电弧复合焊接来说,保护气体同样至关重要。如何选择合适的保护气体参数是开展激光-电弧复合焊接研究的必要前提。为此,本文结合国内外研究工作,概述激光-电弧复合焊接中保护气体对工艺特性、力学性能的影响及研究现状。

2 常用保护气体类型

在激光和电弧焊接中,常用的保护气体主要为 He, Ar, CO₂, N₂, O₂ 和 H₂。表 1 列出了这些气体的部分物性参数^[14],其中电离能是一个重要参数,因为它同时影响电弧引弧、电离能以及激光光致等离子体数量。

收稿日期: 2011-03-22; 收到修改稿日期: 2011-04-15

作者简介: 曾晓雁(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造技术等方面的研究。

E-mail: xyzeng@mail. hust. edu. cn

表 1 激光和电弧焊接常用气体物性参数

Table 1 Basic chemical and physical properties of the gases commonly used in laser and arc welding

Type of gas	Content in the air /%	Boiling point at $1.013 \times 10^5 \text{ Pa} / ^\circ\text{C}$	Atomic weight and mean molecular weight reps	Density at $15 \text{ }^\circ\text{C}$, $1 \times 10^5 \text{ Pa} / (\text{kg}/\text{m}^3)$	Relative density with regard to the air at $15 \text{ }^\circ\text{C}$, $1 \times 10^5 \text{ Pa}$	Dissociation and ionization energies / eV**	Chemical activity
H ₂	0.5×10^{-6} *	-252.9	2.016	0.085	0.06	4.48 13.59	Reducing
Ar	0.934	-185.9	39.948	1.669	1.38	— 15.76 27.50	Inert
He	5.2×10^{-6} *	-268.9	4.002	0.167	0.14	24.56 54.10 9.76	Inert
N ₂	78.084	-195.8	28.013	1.170	0.91	14.55 29.60	Reactive
CO ₂	0.033*	-78.5**	44.011	1.849	1.44	— 5.08	Oxidizing
O ₂	20.946	-183.0	31.998	1.337	1.04	13.62 35.20	Oxidizing

* It is not obtained from the atmosphere; ** sublimation temperature;

* * * $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-6} \text{ J}$; ionization energy of the majority of metals ranges between 6 and 9 eV

在激光焊接中,惰性气体 He 和 Ar 是最常用的保护气体。He 具有高电离能,可很好地抑制光致等离子体屏蔽效应,因此成为激光焊接的首选保护气体。Ar 主要应用于波长较短的固体激光焊接中。但是,He 的价格比较昂贵,大约是 Ar 的 15 倍左右,因此部分研究考虑采用 He-Ar 混合气体来降低激光焊接成本。Kern 等^[9,11]的研究表明,在 He-Ar 的体积比为 3:1 时,CO₂ 激光焊接能够取得较好的焊接效果。但是在工业应用中,为了提高 CO₂ 激光焊接的稳定性及厚板焊接能力,He 是唯一可用的气体^[15~17]。此外,在激光焊接中,N₂ 因为在受热分解为原子时会大量吸热,对减少激光光致等离子体也有良好的效果。但是,因为氮气孔及氮化合物的原因,它主要应用于一些对接头性能要求不高的场合。

在电弧焊接中,Ar 是最常用且稳定性最好的保护气体,而且,相对较大的密度使其在熔池保护上更具优势^[18]。He 因为电离能较大,用作保护气体时会提高电弧电压和温度,主要应用于需要增加焊接熔深或焊接速度的领域。但是,He 的高电离能会提高熔滴上的斑点压力,增加其过渡难度。此外,一些活性气体,如 CO₂, O₂ 和 H₂ 添加进入惰性气体后能够提高电弧稳定性、改善熔池冶金行为。比如

Lu 等^[19~21]就研究了 Ar-O₂ 混合气体中 O₂ 含量对钨极惰性气体保护焊(TIG 焊)的影响。当 O₂ 的体积分数增加至 0.3% 时,O₂ 在高温下分解成为 O 原子进入熔池后会改变熔池的表面张力,并改变其流动方向,形成一个深窄的焊缝。在熔化极惰性气体保护焊(MIG 焊)中,CO₂ 和 O₂ 的加入会减小熔滴直径,并降低喷射过度的阈值电流。在焊接不锈钢和镍基合金时,有时候会考虑加入部分 H₂ 来提高焊接效率,或者利用其还原能力来降低焊缝氧化倾向,但是其体积分数通常控制在 4%~8%,以避免产生氢气孔。

3 保护气体对复合焊接的影响

3.1 工艺特性和复合效果

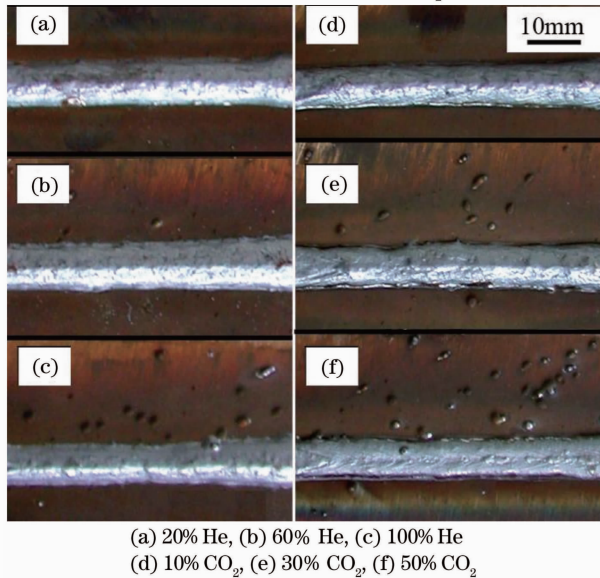
3.1.1 气体成分及流量的影响

通常认为要实现稳定高效的复合焊接,保护气体需要满足以下原则^[3, 22~24]:1) 气体成分针对焊接材料来说是惰性的,但是可以添加部分活性气体来改善电弧稳定性和焊缝成形;2) 气体流量能消除光致等离子体的屏蔽效应,同时又不会吹散液态熔池;3) 保护气体应具有较高的电离能,以便抑制等离子体膨胀,获得足够的焊接熔深。单一气体通常很难同时满足上述需求,实现提升复合焊接工艺稳定性

和增加焊接熔深的目的。因此,根据采用的激光器、电弧类型和焊接材料的特性,在保护气体成分及相关参数的选取上有很大不同。

在采用固体激光器的激光-电弧复合焊接中,因为光致等离子体对激光束的散焦屏蔽作用很小,通常采用纯 Ar 作为保护气体就能够获得稳定工艺和良好的复合效果。在 Fujinaga 等^[25]开展的铝合金 YAG 激光-TIG 复合焊接中,采用纯 Ar 获得了 2 倍于单纯激光焊接的焊接熔深(10 mm)。但是,在 Yasuaki 等^[26]有关 304 不锈钢的 YAG 激光-TIG 复合焊接中,同样采用纯 Ar,焊接熔深相对于激光焊接仅增加 10%。产生差异的原因可能和母材对激光的反射率不同有关。

在 CO₂ 激光-电弧复合焊接中,因为强烈的等离子体屏蔽效应,必须使用 He 才能获得良好的复合焊接效果。但是,He 对电弧稳定性不利,尤其是对熔滴过渡不利,而且价格昂贵。因此,CO₂ 激光-电弧复合焊接通常采用 He-Ar 混合气体^[27~29]。在低碳钢和不锈钢复合焊接研究中,加入少量 CO₂ 和 O₂,采用 He-Ar-O₂ 或者 He-Ar-CO₂ 三元混合气体也能够一定程度上提高 CO₂ 激光-电弧复合焊接的稳定性,减少焊接飞溅。研究证明,无论是二元还是三元混合气体,He 的体积分数必须高于 30%,才



(a) 20% He, (b) 60% He, (c) 100% He
(d) 10% CO₂, (e) 30% CO₂, (f) 50% CO₂

图 1 CO₂ 和 He 含量对低碳钢 CO₂ 激光-MAG 复合焊接稳定性的影响规律(激光功率 4.5 kW,电弧电流 180 A)

Fig.1 Effect of shielding gas on hybrid laser-MAG welding of mild steel (laser power 4.5 kW, arc current 180 A)

能够保证光致等离子体屏蔽效应得到有效抑制,两热源获得增强的协同效应,并得到更大的焊接熔深。但是,一旦等离子体屏蔽效应得到有效抑制,继续增加 He 或 CO₂ 含量,对增加焊接熔深没有显著帮助,反而会导致工艺稳定性下降,焊接飞溅增加。图 1 为 He-Ar 和 CO₂-Ar 混合气体对 CO₂ 激光-电弧复合焊接工艺稳定性的影响规律。当 He 体积分数高于 60%或 CO₂ 体积分数高于 30%时,焊接飞溅显著增加、工艺稳定性降低^[30]。研究发现,He-Ar 混合气体中 He 含量的变化对激光-MIG 复合焊接熔深同样有较显著的影响。如图 2 所示,在 He 体积分数高于 50%后,焊接熔深显著提高,并在 60%时得到最大焊接熔深。作者在研究中也发现有类似的实验结果,而且 He-Ar 混合气体所得的最大焊接熔深几乎是纯 Ar 焊接熔深的 2 倍。这是因为在采用纯 Ar 保护时,激光束被屏蔽散焦,两热源缺乏增强的复合效应,焊缝缺乏激光“小孔”特征,焊接熔深迅速降低。

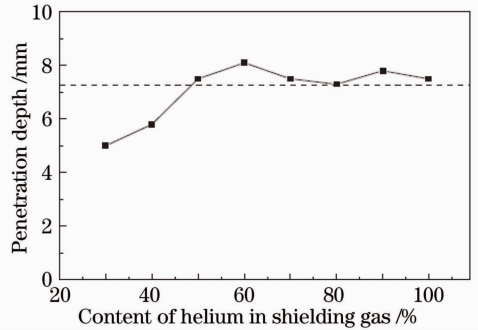


图 2 He-Ar 混合气体中 He 体积分数对 CO₂ 激光-MIG 复合焊接熔深的影响(激光功率 4.5 kW,送丝速度 12 m/min,电弧电压 31.5 V)

Fig.2 Effect of He content in He-Ar mixture on weld depth of CO₂ laser-MIG hybrid welding (laser power 4.5 kW, feeding rate 12 m/min, arc voltage 31.5 V)

另一方面,保护气体流量对复合焊接工艺特性和复合效率也有一定的影响。图 3 为 CO₂ 激光-MIG 复合焊接熔深随 He-Ar 混合气体流量的变化规律。对应不同的气体配比,存在一个获得最大熔深的气体流量,且随着 He 体积分数的增加而增加。这是因为 He 密度相对较小,气体流量过小时,不足以形成有效的保护;过大时又容易形成紊流,使保护效果变差。综合现有的研究结果可以发现,复合焊接中合适的保护气体流量应该为 15~30 L/min^[24, 30, 31]。

此外,Bagger 等^[32]还尝试采用纯氮开展了 4 mm X6Cr17 钢和 2 mm 316L 不锈钢的 CO₂ 激光-TIG

复合焊接,同样获得了良好的焊接质量。但是,除此之外,在复合焊接保护气体中添加氮、氢的研究工作还非常少。结合电弧焊接的研究成果,在铜合金、镍基高温合金、不锈钢等特殊材料的复合焊接工作中,添加这两种气体对改善工艺特性接头质量应该会发挥重要作用。

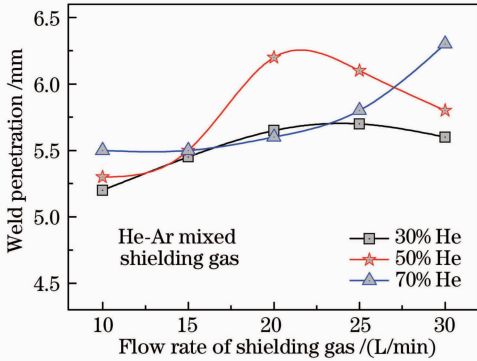


图3 气体流量对CO₂激光-MIG复合焊接熔深的影响 (激光功率4.5 kW,电弧电流180 A)

Fig.3 Effect of shielding gas flow on the weld penetration of hybrid laser-MIG welding for mild steel (laser power 4.5 W, arc current 180 A)

3.1.2 气体喷嘴组合方式的影响

气体喷嘴的排列方式是影响复合焊接协同效应的另一个重要参数,也是复合焊接头工业设计需要考虑的重要因素。作者在试验中发现,激光-MIG复合焊接仅采用电弧焊炬即能够获得稳定的复合焊接效果;在激光-TIG复合焊接中,仅仅依靠电弧焊炬,虽然能够实现两热源的复合,但是很难达到最佳效果、获得最大的焊接熔深。针对这一情况,开展了CO₂激光-TIG复合焊接气体喷嘴组合方式的研究^[33]。图4为喷嘴排列的示意图,其中包括同轴、侧吹和焊炬3种气体喷嘴,研究了3种喷嘴组合方式,分别为单独焊炬(Com1方式)、同轴+焊炬(Com2方式)以及侧吹+焊炬(Com3方式)。如图5所示,在单独电弧焊炬保护方式下,无论采用什么配比的He-Ar混合气体,都无法获得理想的焊接熔深;但是在焊炬+同轴喷嘴的组合方式下,当焊炬气体中的He体积分数达到50%以后,即可获得全熔透的焊缝(厚度3 mm)。该组合方式能够获得更好的复合效果的原因在于:同轴气流能够抑制激光等离子体的上升,增强激光-电弧等离子体相互作用,提高电弧燃烧稳定性,从而获得更好的复合效果。

3.2 焊缝形貌特征

保护气体在影响激光-电弧复合焊接工艺特性

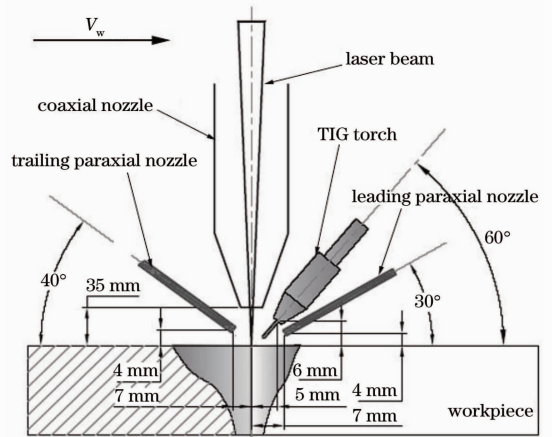


图4 CO₂激光-TIG复合焊接气嘴排列方式
Fig.4 Gas nozzle arrangement for hybrid CO₂ laser-TIG welding

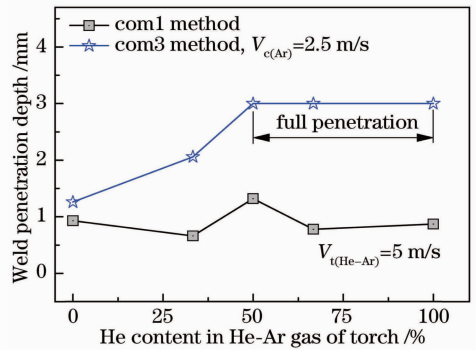


图5 气体喷嘴排列方式对316L不锈钢CO₂激光-TIG复合焊接熔深的影响(板厚3 mm,激光功率2.5 kW,电弧电流100 A)

Fig.5 Effects of gas nozzle arrangement on weld penetration depth of hybrid CO₂ laser-TIG welding (sheet thickness 3 mm, laser power 2.5 kW, arc current 100 A)

的同时,还会对焊缝成形产生重要影响。如图6所示,Yasuaki等^[26]在304不锈钢YAG激光-TIG复合焊接中发现,增加保护气体中的O₂含量会降低焊缝表面宽度,增加焊接熔深。而且在高O₂含量情况下,焊缝电弧区和激光区的界线甚至会消失,焊缝形貌相对于纯Ar发生了很大的改变。在低碳钢CO₂激光-MIG/MAG复合焊接研究中发现,He和CO₂也有类似的效果^[30,31]。如图7所示,增加He含量会降低焊缝宽度,增加电弧区的深度,使电弧区和激光区的过渡更平滑。而且,当混合保护气体中的CO₂体积分数在2%~10%时,焊接飞溅、咬边和根部缺陷会得到有效抑制。这是因为He含量增加后,电弧具有更大的能量和熔透能力,同时对消除激光光致等离子体屏蔽效应有更好的效果,从而复合

热源的能量更集中,能够获得更窄且电弧区更深的复合焊缝。CO₂ 和 O₂ 导致复合焊缝形貌变化的主要原因在于,两者会在高温下分解形成 O 原子,O

原子进入熔池后,会改变熔池的表面张力,使熔池从边缘向中心流动,从而降低了焊缝表面宽度和电弧区深度。

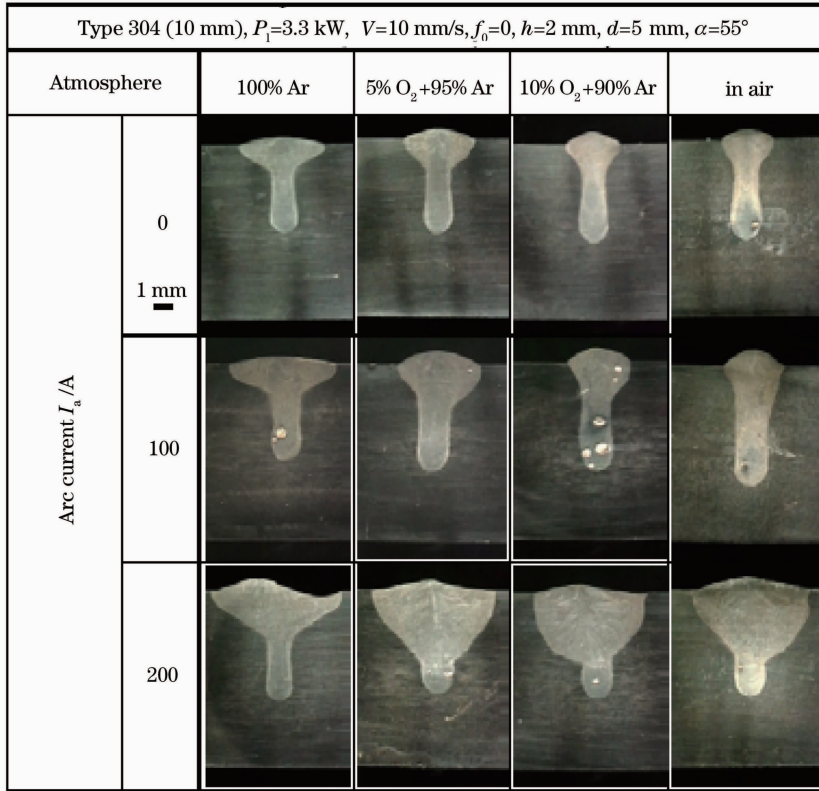


图 6 Ar-O₂ 混合气体中 O₂ 体积分数对 304 不锈钢 YAG 激光-TIG 复合焊接焊缝形貌的影响

Fig. 6 Effects of O₂ content in Ar-O₂ mixture on the hybrid YAG laser-TIG weld shape of 304 stainless steel

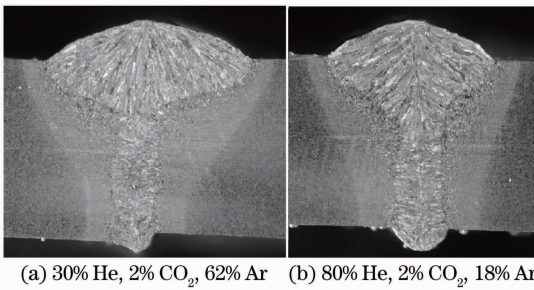


图 7 He-Ar-CO₂ 三元混合气体中 He 体积分数对低碳钢 CO₂ 激光-MIG 复合焊接焊缝截面形貌的影响(板厚 6 mm)

Fig. 7 Effect of He content in He-Ar-CO₂ mixture on CO₂ laser-MIG hybrid weld shape (sheet thickness 6 mm)

3.3 接头力学性能

因为保护气体对复合焊接工艺特性、焊缝形貌和熔池冶金行为的显著影响,其对接头力学性能也会产生一定的影响。在 Kujanpaa 等^[31]的研究中发现,保护气体成分为 60%Ar+40%He 和 50%Ar+40%He+10%CO₂ (体积分数)时,低碳钢 CO₂ 激光-

电弧复合焊接接头能够获得最好的冲击韧性,如图 8 所示。而且,在保护气体为 50%Ar+40%He +10%CO₂ (体积分数)时,接头的显微硬度最低,满足船舶焊接中不高于 350 HV 的使用需求。作者研究了保护气体对低碳钢 CO₂ 激光-电弧复合焊接接头力学性能的影响,发现保护气体对接头抗拉强度和冲击韧性影响有限,但是对显微硬度有相对明显的影响^[30, 34],如图 9 所示。He 体积分数在 20%~100% 的范围内变化时,接头抗拉强度和冲击韧性只有微弱的变化。图 10 表明保护气体成分对接头显微硬度有较大的影响:在 He-Ar 混合气体中,随着 He 体积分数的增加,显微硬度逐步增加;在 CO₂-Ar 混合气体中,当 CO₂ 体积分数高于 30% 时,显微硬度显著降低。

这些研究表明,保护气体对复合焊接接头力学性能的影响相对有限。但是这方面的研究工作较少,而且局限于低碳钢材料,尚不足以揭示保护气体对复合焊接接头力学性能的影响规律和作用机制。有关保护气体对其他材料复合焊接接头力学性能的影响还有待更深入的研究。

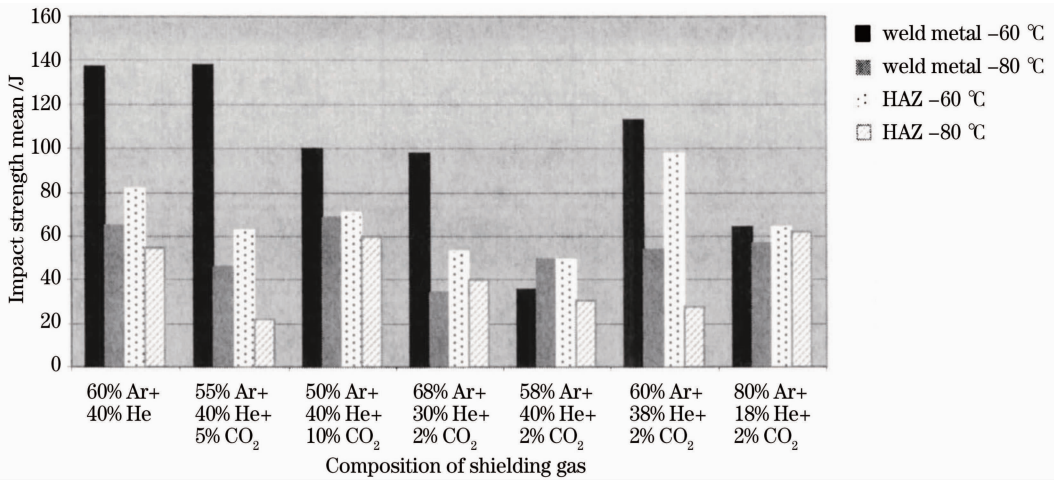


图 8 保护气体对 RAEX 275 低碳钢 CO₂ 激光-MIG 复合焊接接头冲击韧性的影响

Fig. 8 Effects of shielding gas on impact strength of hybrid CO₂ laser-MIG welded RAEX 275 mild steel

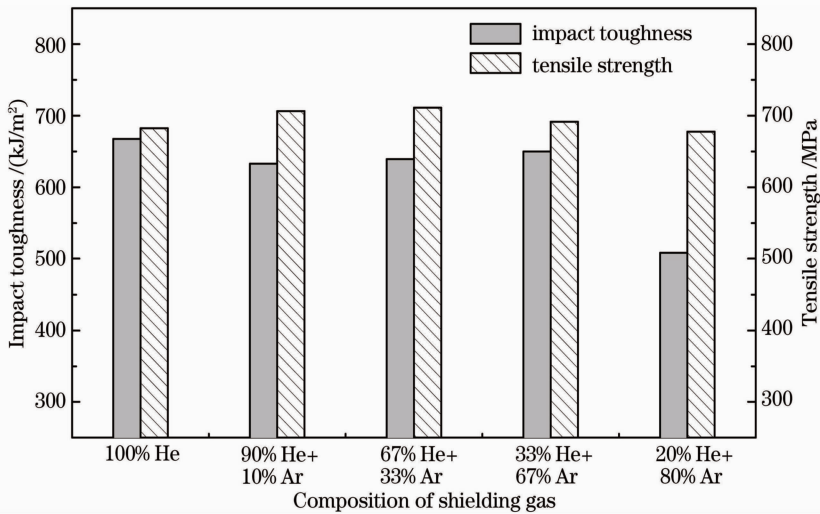


图 9 保护气体对低碳钢 CO₂ 激光-MIG 复合焊接接头抗拉强度和冲击韧性的影响(板厚 6 mm, 激光功率 4.5 kW, 电弧电流 180 A)

Fig. 9 Effects of shielding gas on mechanical properties of hybrid CO₂ laser-MIG welded mild steel (sheet thickness 6 mm, laser power 4.5 kW, arc current 180 A)

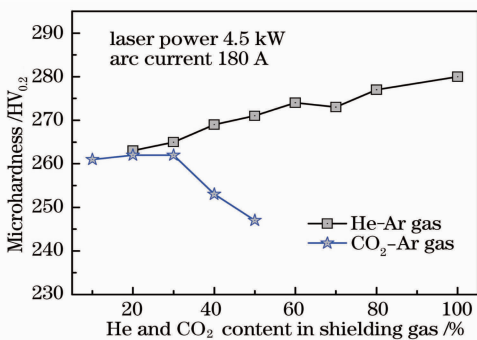


图 10 保护气体对低碳钢 CO₂ 激光-MIG/MAG 复合焊接接头显微硬度的影响

Fig. 10 Effects of shielding gas on microhardness of hybrid CO₂ laser-MIG/MAG welded mild steel

4 结 论

上述研究结果表明保护气体对激光-电弧复合焊接工艺稳定性、复合效应、焊缝形貌特征及接头力学性能都有重要的影响,而且在有关复合焊接保护气体成分、流量、喷嘴组合方式的研究上已经取得了一定成果。这些成果对于复合焊接研究中保护气体参数的选取和加深对该工艺的理解很有帮助。但是,现有工作仍然存在很大的局限性,主要表现在以下几个方面。首先,理论研究相对较少,有关复合焊接保护气体的数值模型还非常缺乏。其次,除了钢材和铝合金外,针对其他对保护气体有特殊要求的材料,比如铜合金、镁合金、钛合金等,还缺乏相应的研究工作。另外,在保护气体喷嘴设计和优化组合

方面的研究还相对较少,不利于工业复合焊接头的改进提升。针对这些不足,还需要继续深入研究。

参 考 文 献

- W. M. Steen. Arc augmented laser processing of materials[J]. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**(11): 5636~5641
- W. Robert, J. R. Messler. What's next for hybrid welding[J]. *Welding Journal*, 2004, **83**(3): 30~34
- C. Bagger, F. O. Olsen. Review of laser hybrid welding [J]. *Journal of Laser Applications*, 2005, **17**(1): 2~14
- T. Ishide, S. Tsubota, M. Watanabi *et al.*. Development of TIG-YAG and MIG-YAG hybrid welding [J]. *Welding International*, 2003, **17**(10): 775~780
- Ono Moriaki, Shinbo Yukio, Yoshitake Akihida *et al.*. Development of laser-arc hybrid welding[J]. *NKK Technology Review*, 2002, **86**(1): 8~12
- A. Mahrle, E. Beyer. Hybrid laser beam welding-classification, characteristics, and applications [J]. *Journal of Laser Applications*, 2006, **18**(3): 169~180
- B. Ribic, T. A. Palmer, T. DebRoy. Problems and issues in laser-arc hybrid welding[J]. *International Materials Reviews*, 2009, **54**(4): 223~244
- Xiao Rongshi, Wu Shikai. Progress on laser-arc hybrid welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1680~1685
肖荣诗, 吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1680~1685
- M. Kern, M. Beck, P. Berger. Process stabilizing potential of shielding gas mixtures[C]. *SPIE*, 1997, **3092**: 526~529
- Hong Lei, Wu Gang, Chen Wuzhu. Influence of shielding gas flow on welding quality for CO₂ laser welding of aluminum alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(11): 1571~1576
洪 蕾, 吴 刚, 陈武柱. 保护气流对 CO₂ 激光焊接铝合金的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(11): 1571~1576
- Tang Xiahui, Zhu Haihong, Zhu Guofu. Study of plasma control in high-power CO₂ laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(2): 174~178
唐霞辉, 朱海红, 朱国富. 高功率 CO₂ 激光焊接等离子体控制试验研究[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(2): 174~178
- Bennett Bernard. Effects of shielding gas in pulsed MIG welding [J]. *Joining & Materials*, 1989, **2**(6): 279~280
- M. Suban, J. Tusek. Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2001, **119**(1-3): 185~192
- J. Tusek, M. Suban. Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel [J]. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2000, **25**(4): 369~376
- T. Jokinen, M. Karhu, V. Kujanpaa. Welding of thick austenitic stainless steel using Nd:yttrium-aluminum-garnet laser with filler wire and hybrid process[J]. *J. Laser Applications*, 2003, **15**(4): 220~224
- K. Ono, K. Adachi, I. Miyamoto *et al.*. Influence of oxide film on weld characteristics of mild steel in CO₂ laser welding[J]. *J. Laser Applications*, 2002, **14**(2): 73~77
- Tsukamoto Susumu, Kawaguchi Isao, Arakane Goro *et al.*. Suppression of porosity using pulse modulation of laser power [C]. Proceedings of ICALEO 2001, 2001. 1702
- Jiang Huanzhong. Arc Welding and Electroslag Welding [M]. Beijing: China Machine Press, 1994. 183~186
姜焕中. 电弧焊与电渣焊 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994. 183~186
- S. P. Lu, H. Fujii, K. Nogi. Sensitivity of marangoni convection and weld shape variations to elding parameters in O₂-Ar shielded GTA welding[J]. *Scripta Materials*, 2004, **51**(3): 271~277
- S. P. Lu, H. Fujii, K. Nogi. Marangoni convection and weld shape variations in Ar-O₂ and Ar-CO₂ shielded GTA welding[J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2004, **380**(1): 290~297
- S. P. Lu, H. Fujii, K. Nogi *et al.*. Effect of oxygen content in He-O₂ shielding gas on weld shape in ultra deep penetration TIG [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2007, **12**(8): 689~695
- G. Campana, A. Ascari, A. Fortunato *et al.*. Hybrid laser-MIG welding of aluminum alloys: The influence of shielding gas[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **255**(10): 5588~5590
- A. Fellman, P. Jernstrom, V. Kujanpaa. CO₂-GMA hybrid welding of carbon steel-the effect of shielding gas composition [C]. Proceedings of ICALEO 2003, 2003. 56~65
- G. Tani, G. Campana, A. Fortunato *et al.*. The influence of shielding gas in hybrid laser-MIG welding [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **253**(19): 8050~8053
- S. Fujinaga, R. Ohashi, S. Katayama. Improvements of welding characteristics of aluminum alloys with YAG laser and TIG arc hybrid system [C]. *SPIE*, 2003, **4831**: 301~306
- Natio Yasuaki, Mizutani Masami, Katayama Seiji. Effect of oxygen in ambient atmosphere on penetration characteristics in single yttrium-aluminum-garnet laser and hybrid welding[J]. *J. Laser Applications*, 2006, **18**(1): 21~27
- C. Bagger, F. O. Olsen. Comparison of plasma, metal inactive gas (MIG) and tungsten inactive gas (TIG) processes for laser hybrid welding [C]. Proceedings of ICALEO 2003, 2003. 11~20
- Chen Yanbin, Lei Zhenglong, Li Liqun. Study of welding characteristics in CO₂ laser-TIG hybrid welding process [C]. Proceedings of ICALEO 2003, 2003. 41~47
- R. S. Xiao, C. Ambrosy, T. C. Zuo *et al.*. New approach to improve the laser welding process of aluminum by using an external electrical current [J]. *J. Mater. Sci. Lett.*, 2001, **20**(23): 2163~2165
- Gao Ming, Zeng Xiaoyan, Hu Qianwu *et al.*. Effects of shielding gas in CO₂ laser-MAG hybrid welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, **28**(2): 85~88
高 明, 曾晓雁, 胡乾午等. CO₂ 激光-MAG 复合焊接保护气体的影响规律[J]. *焊接学报*, 2007, **28**(2): 85~88
- Fellman A. Kujanpaa. The effect of shielding gas composition on welding performance and weld properties in hybrid CO₂ laser-gas metal arc welding of carbon manganese steel [J]. *J. Laser Applications*, 2006, **18**(1): 12~20
- C. Bagger, L. C. Sondrup, F. O. Olsen. Laser/TIG hybrid welding of pot for induction heater[C]. Proceedings of ICALEO 2004, 2004. 60~69
- Gao Ming, Zeng Xiaoyan, Hu Qianwu *et al.*. Shielding gas method of CO₂ laser-TIG hybrid welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1422~1427
高 明, 曾晓雁, 胡乾午等. CO₂ 激光-TIG 电弧复合焊接中气体保护方式的研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1422~1427
- Gao Ming. Study on Technology, Mechanism and Quality Controlling of CO₂ Laser-Arc Hybrid Welding [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. 57~58
高 明. CO₂ 激光-电弧复合焊接工艺、机理及质量控制规律研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007. 57~58