引用格式:雷家璇,林雨浩,李丽坤,等.不同保护气氛的 GTAW 焊接现状及发展[J].热加工工艺,2026,55(1):14-21. LEI Jiaxuan, LIN Yuhao, LI Likun, et al. Current Status and Development of GTAW Welding with Different Shielding Gas[J]. Hot Working Technology, 2026, 55(1): 14-21.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20241961

不同保护气氛的 GTAW 焊接现状及发展

雷家璇[1,2], 林雨浩[1,2], 李丽坤[2], 黎振龙[2], 牛 犇[2], 蔡漫霞[2]

(1.五邑大学 机械与自动化工程学院, 广东 江门 529000; 2.广东省科学院中乌焊接研究所 广东省材料连接与先进制造重点实验室, 广东 广州 510650)

摘 要:保护气体作为钨极气体保护焊(gas tungsten drc welding,GTAW)焊接过程中的关键因素,其选择直接影响电弧形态和电弧热效率,进一步对焊缝成形质量及焊接效率产生深远影响。从介绍不同气体在 GTAW 焊接中的影响机制出发,发现单一保护气氛存在一定局限性,进而提出混合保护气氛的优势,分类综述二元、三元保护气氛的 GTAW 焊接数值模拟和实验研究。阐明不同气氛保护对电弧物理性能、接头质量性能、焊缝微观组织的影响规律,并探讨电弧的物理性能影响熔池成形机理。提出综合全面对比电弧性能优劣势,优化保护气氛配比,以提高焊接质量和效率。最后,对未来 GTAW 混合气体的研究方向进行了展望,并强调开发低成本、高性能的新型三元保护气体的重要性,以适应更广泛的焊接需求和应用场景。

关键词:钨极气体保护焊;多元保护气;电弧物理性能;焊缝成形

中图分类号:TG444+.74 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-3814(2026)01-0014-08

Current Status and Development of GTAW Welding with Different Shielding Gas

LEI Jiaxuan[1,2], LIN Yuhao[1,2], LI Likun[2], LI Zhenlong[2], NIU Ben[2], CAI Manxia[2]

(1. School of Mechanical and Automation Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529000, China; 2. Guangdong Key Laboratory of Material Connectivity and Advanced Manufacturing, China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: The selection of shielding gas as a key factor in GTAW welding process affects the arc morphology and arc thermal efficiency, which further has a profound impact on the quality of weld formation and the welding efficiency. The influence mechanism of different gases in GTAW welding were introduced firstly, and it was found that single shielding gas exhibited limitations, then the advantages of the mixed shielding gas were presented, and then the numerical simulation and experimental study of GTAW welding with binary and ternary shielding gases were taxonomic reviewed. The influence of different atmosphere protection on the physical properties of arc, joint quality and microstructure were clarified, and the mechanism of the physical properties of the arc affecting the forming of the molten pool is further discussed. Comprehensively comparison of the advantages and disadvantages of arc performance, and optimization of the shielding gas ratio to improve welding quality and efficiency were proposed. Finally, the review provided an outlook on the future direction of research on GTAW gas mixtures, importance of developing new low cost, high performance ternary shielding gases which meet a wider range of welding needs and the application scenarios were further emphasized.

Key words: gas tungsten drc welding; multiple shielding gas; arc physical properties; weld formation

在 GTAW 焊接过程中,保护气体的选择和使用至关重要, 保护气的作用主要体现为向弧间提供气体介质和保护电弧、电极和焊件避免空气侵蚀[1-6]。气体电离能影响电弧持续燃烧的能力和控制电弧长度的稳定性。气体热导率影响电弧区域热量和维持电弧电压的稳定。所以,保护气是电弧形态和焊缝成形的关键因素。随着焊接技术的飞速发展,现代工业对焊接质量和生产效率要求日益提高,另外,对生产成本的控制也愈发严格。保护气体的选择和应用对于提高焊接质量和效率至关重要, 虽然其成本仅占焊接总成本的 5%左右, 却能够显著提升焊接电弧的

收稿日期:2024-09-28 **修回日期**:2025-05-15

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFE0205300);广东省科学院发展专项项目(2022GDASZH-2022010203, 2020GDASYL-20200301001)

作者简介:雷家璇,男,硕士,主要研究方向:GTAW 焊接工艺与性能、电弧熔池模拟;E-mail:18009220484@163.com

通讯作者:黎振龙,教授级高级工程师,主要研究方向:钨极氩弧焊、镍基合金;E-mail:lizhl@gwi.gd.cn

稳定性与焊缝的组织性能。适量的保护气就能有效保护熔池和电弧，并减少焊接过程中的缺陷和返工率，进一步提高焊接效率。表现出低投入高产出的经济特性[7]。合适的气体选择能明显提高焊接工件的生产效率和良品率。因此，焊接工艺的降本增效研究中，保护气体的选用及配比尤为重要。

氩气(Ar)由于其保护的电弧稳定且焊缝成形较好，被普遍应用[8-10]，但其存在电弧能量低、对工件清理要求高等缺点。氦气(He)和氮气(N_2)均能有效提高焊接热输入，但各自存在明显缺陷：氦气(He)电弧能量虽高却不稳定，氮气(N_2)则会导致电弧产生飞溅现象。研究人员基于一元保护气氛的研究基础发现适当比例的二元保护气氛能有效改善一元保护气氛的焊缝深宽比不足、焊缝气孔多等诸多问题，然而二元保护气氛无法满足所有的焊接需求。为了进一步降低生产成本、改善焊缝成形以及更精确地控制焊缝熔深，研究人员开发了三元保护气氛。例如向氩氦(Ar+He)二元保护气中添加氮气(N_2)减少达到特定焊接深度所需的氦气(He)量，或在氩氦(Ar+He)二元保护气中加入氧气(O_2)进一步提高焊缝深宽比等[11]。三元保护气氛相较于二元保护气氛能在一定程度上减少保护气成本，获得成形及性能更佳的焊接接头。多元保护气体有效综合各组元气氛的优点，优化焊接过程中的温度控制、电弧稳定性以及熔池行为，从而提升焊接质量和效率，进一步推动了工厂生产效能的全面提升。

本文结合近年来不同保护气氛的 GTAW 焊接实验研究与数值模拟，综述了不同保护气在电弧物理性能、熔池成型大小、接头力学性能及焊缝微观组织影响的研究进展，为未来研究保护气氛的广泛性及多元性提供理论支持。

1 一元气氛性能

不同一元保护气氛在 GTAW 焊接中，由于保护气本身物理性能差异所表现出不同的电弧形态、熔池成型、焊缝性能等。气体电热物理性能见表 1[12]。

表 1 气体电热物理性能[12]

Tab.1 Electrothermal physical properties of gases[12]

气体	相对分子质量或相对原子质量	体积比热容 /(4.187 J·cm^{-3}·K^{-1})		热导率(237 K) /(4.187 J·cm^{-3}·s^{-1}·K^{-1})	5000 K 时解离度	密度(0 ℃，101.3 kPa) /(kg·m^{-3})	电离势 /V	电弧电场强度比(空气=1)
		273 K	2000 K					
Ar	39.940	0.125	-	0.378×10^{-4}	-	1.782	15.7	0.5
He	4.003	1.250	-	3.320×10^{-4}	-	0.178	24.5	-
N_2	28.020	0.248	0.310	0.580×10^{-4}	0.038	1.250	14.5	1.1
CO_2	44.010	0.196	0.328	0.380×10^{-4}	0.990	1.976	14.4	1.5
O_2	32.000	0.217	-	5.900×10^{-4}	0.970	1.428	13.2	2.0
H_2	2.016	3.400	4.160	4.720×10^{-4}	0.960	0.089	13.5	10.0
空气	29.000	0.243	-	-	-	1.293	-	1.0

Ar 与 He 作为惰性气体具有不会与其他物质发生化学反应的特性，能够对电弧、电极、被焊件整体起到保护作用。Ar 因为密度大于空气，且热容量和热导率小于空气，所以能够极大保护焊接区域免受大气污染，同时对电弧起到保温作用，显著提高电弧的稳定性。He 由于较高的电离势和热导率，在相同电弧长度和焊接电流下能显著提高起弧电压和电弧温度，增强对母材的热输入。但 He 密度低于空气，导致焊接保护效果较差，使得焊接使用的气体流量多，但 He 作为稀缺资源，价格昂贵，因此较少大量应用。Villarreal-Medina 等[13]研究了 Ar 弧和 He 弧中的五种传热机制，模拟焦耳热、热对流、热辐射、热传导和汤姆逊效应 5 种传热机制在 Ar 弧和 He 弧中的分布。模拟结果表明，Ar 弧中焦耳热、辐射占传热机制主导地位，而 He 弧中对流、热传导占主导地位。

N_2 无色、无味，在大气中含量 78vol%，来源多，价格便宜。相较于 Ar，其应用于焊接过程的能量密度更大，但焊接过程中会伴有烟雾和飞溅产生，导致焊缝表面较粗糙，甚至可能产生气孔，所以 GTAW 焊接较少选用纯 N_2。Savas 等[14]采用 COMSOL 软件构建了二维轴对称数值模型，以解决 GTAW 过程中，Ar、He、N_2 等不同气体环境的电弧二维磁流体动力学问题。研究发现：COMSOL 模拟了多物理场现象，得到与实验结果较为一致的电弧温度和速度曲线。进一步研究电弧发现，相较于 Ar 和 He，由于 N_2 具有较高的热导率和比热，导致 N_2 弧的电弧温度最高；另外，在热收缩效应和阳极处所受压力方面，N_2 弧也表现出最大值。

H_2 作为还原性气体，能使部分金属氧化物或氮化物还原。另外，H_2 密度小、热导率高的特性，能对

电弧起到冷却作用，同时高温条件下，H_2 电离会吸收热量，能够显著提高电弧电场强度和温度，压缩电弧，增大电弧热功率。CO_2 与 O_2 都为活性气体，具有强氧化性，焊接时会烧毁钨极，在保护作用为主的 GTAW 焊接中并不适用。焊接奥氏体不锈钢，适当添加 O_2 可以控制焊缝中的含氧量，进而改变马兰戈尼对流，精确控制焊缝成形。

单一保护气的保护效果和焊缝成形效果存在局限性，且不同金属材料和焊接工艺对保护气要求不同，单组分保护气通常难以满足所有焊接场景需求。但二元或三元保护气结合各种组分的优点，能显著提升电弧性能、焊缝成形及接头性能。因此，为了进一步提高焊接质量、更好适应不同焊接需求以及提高生产效率，二元及三元保护气的开发显得尤为重要。

2 二元保护气氛 GTAW 焊接

相较于一元保护气，二元保护气通常在减少飞溅、提高电弧稳定性、改善成形和熔深、提高电弧温度、提高焊接生产率等方面展现出显著优势[15]，能充分融合两种气体的优点。但是，二元保护气的制备和使用成本较高，且在需要精确控制焊缝飞溅、成形和焊接速度的高要求焊接工艺中仍显不足。

2.1 二元非氧化性保护气体

二元非氧化性保护气指向 Ar 中添加另一种非氧化性气体来组成二元保护气，例如 Ar+He、Ar+N_2 等。这类气体通常应用于有色金属的焊接，以提高电弧能量、增强接头性能以及改善焊缝成形。但也有相关研究，报道 Ar+N_2 或 Ar+H_2 两种混合气可用于不锈钢焊接，来提高焊缝金属的抗腐蚀性能与抗点蚀性能。

2.1.1 氩气+氦气(Ar+He)

He 的加入能显著提高电弧冷却效果，从而集中电弧能量，获得更大的穿透力。刘甲等[16]采用焊枪中心纯 Ar，喷嘴保护气 30vol%Ar+70vol%He 的等离子焊接方法，探索 1 次焊透 16 mm 厚 TC4 板材工艺。研究发现，由于 Ar+He 混合气电弧电压更高，电弧拥有更大的功率，且 He 热导率较高，对电弧冷却效果好，使得电弧能量密度变大，弧柱细且集中，增强了电弧穿透力。

选用合适比例的 Ar+He 二元混合气可以显著改善焊缝熔深，并提高焊缝金属的润湿性。Xiang 等[17]采用轴对称计算模型研究铁工件 GTAW 中的 Ar+He 混合气进行计算，结果发现：当 Ar 的摩尔分数超过 0.3 时，电弧由 He 弧特征向 Ar 弧特征过渡。陈怡等[18]采用 TIG 焊研究不同比例 Ar+He 保护气对镁合金铸件焊道修复熔深的影响。结果发现，随着 He 含量的增加，极大提高了电弧电压，增强了电弧能量密度。随着焊道熔深不断增加，显著影响焊缝成形质量。

黄思俊等[19]在铝合金焊接实验中，采用不同比例的 Ar+He 保护气进行 GTAW 焊接。实验结果表明 He 的加入能够细化焊缝及熔合区的晶粒。当混合气比例为 50vol%Ar+50vol%He 时，焊接速度最大为 8.8 cm/min，接头抗拉强度和硬度达到最高值，分别为 182 MPa 和 80 HV，但伸长率最低为 6.3%。由此可见，Ar+He 混合气不仅带来了更高的焊接速度，还显著影响了铝合金焊接接头力学性能。更高的焊接速度不仅减小热影响区宽度，还对焊缝与热影响区组织产生共晶体熔化、晶界沉淀、过时效以及抑制晶粒生长等作用[20]。

Traidia 等[21]通过构建瞬态有限元模型研究了不同 Ar+He 混合气体对传递到工件的能量和焊接熔池尺寸时间演变的影响，发现 He 的加入会增加轴向上的热通量密度，产生内向涡流，增加混合气的电导率，从而加速熔池流动，提高焊接熔池深度。

刘凤磊等[22]建立了阴极、电弧、阳极的完整耦合二维平面瞬态统一模型，设置了不同的 Ar+He 混合比例。研究结果显示，随着 He 含量的增加，电弧收缩加剧，工件附近处电弧上扬量增加，致使电弧作用工件的有效加热面积逐渐减小；电弧温度有所提高，其稳定性获得进一步提高；熔池熔深以较高速率逐渐增加，而熔宽逐渐减小，直至趋于稳定。

将 He 添加至 Ar，对电弧形态、熔池深宽和接头性能有较大影响，这是因为 He 的比热容、电导率、热导率等物性参数的综合作用，特别是高热导率引起的弧温和等离子体速度增加，导致整体电弧热通量与热输入加大，显著增加了焊缝熔深熔宽。另一方面，He 的加入也起到细晶强化的关键作用。

2.1.2 氩气+氮气(Ar+N_2)

使用 Ar+N_2 混合气，电弧温度比纯 Ar 时高，电弧的挺直性以及焊缝成形有一定改善，但由于 N_2 的存在，焊接过程中常伴有烟雾，致使焊后表面较为粗糙，焊缝外观较 Ar+He 混合气差。另外，N_2 的添加会增加输入热量，电弧将更多热量传递至焊缝从而产生更大的熔深[23]。Huang[24]对比了活化助焊剂和

2.5vol%～10.0vol%N_2 含量的 Ar+N_2 混合气对焊缝形态、角变形、焊缝铁素体含量和热裂纹敏感性的影响。结果发现：随着 N_2 的加入，焊缝熔深和截面积均有所增加；同时，角度变形现象和焊缝 δ 铁素体含量降低。此外，电弧电压、抗拉强度和硬度有所提高，但热裂纹敏感性也相应增加。

Ar+N_2 混合气普遍应用于不锈钢金属的焊接中，用于改变焊缝中的凝固模式，减少铁素体生成，并提高奥氏体含量。Panmongkol 等[25]采用不同比例的 N_2 作为焊缝背面保护气，进行不同厚度的 304 不锈钢 GTAW 焊接实验。研究结果发现：N_2 用量越大，焊缝形成的铁素体含量越低，焊接热输入与 N_2 添加量同时会影响焊接奥氏体-铁素体凝固模式向铁素体-奥氏体凝固模式转变，并影响焊缝铁素体含量。进行点蚀实验和一般腐蚀实验时，发现随着 N 含量增加，点蚀电位显著提高和腐蚀速率显著降低，表明 N_2 有利于提高焊缝金属的耐腐蚀性和耐点蚀性能。

李彩辉[26]设置 4 组不同比例 Ar+N_2 混合气体进行TIG 电弧模拟，分别为 100vol%Ar、85vol%Ar+15vol%N_2、70vol%Ar+30vol%N_2、50vol%Ar+50vol%N_2。研究发现，随着混合气中 N_2 含量增加，电弧温度、电流密度、电弧压力及等离子体速度整体呈现增加趋势，且温度和速度的最大值逐渐向阳极方向移动。雷玉成等[27]采用 ANSYS 对二维稳态轴对称 Ar+N_2 混合气体保护的 TIG 焊接电弧进行数值分析，将不同 N_2 含量气氛的电弧温度、压力、等离子体速度与 Ar 弧进行比较。研究发现：随着 N_2 的加入，提高了电弧的电弧压力、电弧温度和等离子体速度，进一步获得能量密度更高的焊接电弧。以上模拟实验证明，N_2 的加入明显提高整个电弧的热物理特性。这是因为 N_2 作为双原子气体，高温电离时会发生气体解离并伴随吸热反应，带来了更高的电弧温度和电压。

N_2 的加入虽然会提高电弧能量，但同样会增加焊缝金属的含 N_2 量与气孔数，因此选择合适比例的 Ar+N_2 混合气至关重要。强伟等[28]通过调控保护气中的 N_2 含量，研究对高氮钢双面同轴 TIG 自融焊实验的影响，发现随着 N_2 比例的提高，平均弧压增大，电弧收缩，熔透能力显著增强。然而，这一变化也导致焊接稳定性降低，并伴随着大量飞溅产生。另外，N_2 含量的增加还导致焊缝中气孔数量增多，气孔尺寸增大。实验进一步发现，焊缝含氮量随着 N_2 比例的增加而先提高后稳定，最终得出 N_2 添加比例应低于 20vol%，以平衡焊接性能与焊缝质量。

综上，Ar+N_2 混合气中的 N_2 作为双原子气体，电离过程中能产生显著的热量增加，为电弧压力、温度等特性提供能量，从而增加焊缝熔深与截面积。不仅如此，焊接过程中所吸收的氮会通过固溶强化和晶粒细化机制来强化焊缝组织[29]，进而显著提高接头的力学性能。但由于 N 对奥氏体有着强大的稳定作用，能促进铁素体向奥氏体的转变过程，降低焊缝中 δ 铁素体含量，导致热裂纹敏感性的提高，对焊缝性能极为不利。因此，在平衡 N_2 对气孔、热裂纹敏感性的不利影响与其提高电弧能量等有利影响时，寻找性能最佳的混合气体比例，仍是当前亟待解决的关键问题。

2.1.3 氩气+氢气(Ar+H_2)

H_2 的还原性在焊接镍基合金时具有重要作用，H_2 能够还原熔池中的氧化物，将这些氧化物重新转化为金属，从而降低气孔形成几率，获得成形更好的焊缝。特别是处理容易氧化的镍基金属时，H_2 的还原性表现尤为出色，它不仅能有效抑制氧化物的生成，还能改善熔池流动性，促进气体溶解与析出，进而显著改善焊缝质量。但是，H_2 的添加量必须严格控制，不能过高，以免额外产生 H_2 孔。和广庆等[30]采用 TIG 焊研究管子-管板对接全位置焊，对 Inconel690 堆焊分别采用不同气氛进行焊接实验。研究发现，95vol%Ar+5vol%H_2 混合气下的焊缝表面最光亮，焊接质量最佳，因此被认定为最适宜用于 AP1000 蒸汽发生器全位置焊接的气体组合。龚祺龙[31]采用氩弧焊与等离子弧焊工艺分别研究 Hastelloy C276 合金的焊接性能变化。其中氩弧焊采用 99.99vol%Ar，等离子弧焊采用 95vol%Ar+5vol%H_2。研究发现，等离子弧焊虽然余高较氩弧焊较高，但整体焊缝成形优良美观，焊接过程稳定性高，焊接质量重复性高，焊后修整较少。

Lowke 等[32]模拟并比较了 Ar 和不同比例 Ar+H_2 混合气的 GTAW 电弧温度、半径和电压。结果表明，含有 H_2 的混合气所产生的电弧更加狭窄，电弧温度和电弧电压更高。这是由于 H_2 分子的解离效应，使得 Ar+H_2 混合气具有更高的热传导率，极大增加了焊接熔池中熔融材料的体积。刘政军等[33]将传统 Ar 弧与 90vol%Ar+10vol%H_2 混合气电弧阳极热进行深入分析与对比。发现添加 H_2 后，电弧电磁力达到 Ar 弧的 2 倍，同时电弧轮廓略微收缩，温度、等

离子体流速及电流密度等参数都明显增加。这些变化导致传递给阳极的热量显著增加，进一步提高了焊接热效率。上述电弧特性的显著改变主要归因于H_2气双原子分子的特性，相较于 Ar，H_2电离会吸收更多热量，促使电弧收缩，并增加热输入，提高弧温。

H_2的加入能够提高焊接热输入，允许工艺使用更大的焊接速度，Chuaiphan 等[34]使用 GTAW 焊接工艺在 AISI 201LN 和 214 之间的不锈钢异种焊接接头中添加 H_2来补偿热输入。结果发现，H_2的加入有助于补偿焊接速度提高时的热量损失，但在焊速较高时，必须适当增加 H_2体积，注意不宜超过 5vol%。此外，H_2的加入会带来更多热量，使 GTAW 焊缝面积增大，帮助改善焊缝成形，同时促进铁素体相变，减少焊缝铁素体含量。Huang[35]对比了使用活化助焊剂 GTAW 和 Ar+H_2混合气保护的 GTAW 焊接性能。研究发现，增加保护气中的 H_2量有助于提高焊缝的穿透深度和横截面积。此外，H_2添加量的增加还会提高电弧电压，增大热输入，延缓凝固过程，促进铁素体到奥氏体的相变。这种相变过程有助于减少焊缝中的铁素体含量，但同时会导致焊接角变形增大。同时，Chuaiphan 等[36]发现由于 H_2含量和焊接速度的增加，平衡了熔池中的热输入，减少了焊缝中 δ 铁素体含量，导致焊缝硬度和拉伸强度的降低。但另一方面，铁素体含量的减少，有助于提高焊缝金属的抗点蚀性能。因此，焊接时需要均衡焊缝铁素体含量减少所带来的利弊，根据具体的焊接需求和条件来合理控制 H_2添加量。

Ar+H_2混合气的应用，面临着与 Ar+H_2混合气相似的难题。主要体现在焊缝气孔控制、铁素体含量调节同电弧能量的均衡方面。如何精确选取合适配比的 Ar+H_2混合气，以同时实现焊缝气孔减少、铁素体含量优化以及电弧能量提高，是当前亟需解决的难点。

2.2 二元氧化性保护气体

二元氧化性保护气指往 Ar 中添加 CO_2或 O_2这两种氧化性气体，通常来说，GTAW 焊接中首先要保证保护气对大气的屏蔽作用，从而更好保证焊接过程的稳定性。但相关研究发现，适当添加氧化性气体能更好控制熔池中的氧元素含量，改变熔池表面的马兰戈尼对流模式，达到精确控制焊缝成形的效果。另外，少量添加氧化性气体或采用外层氧化性混合气，内层 Ar 的焊接工艺，并不会降低保护气的保护效果。

在 Ar+O_2混合气中，O_2的质量分数大小会引起不同程度的解混现象，这种解混现象加强了等离子体的冷却作用。而解混现象可以归咎于 O_2质量分数浓度梯度和电弧等离子体温度梯度共同引起的扩散效果。Wang 等[37]研究了不同 O_2含量的 Ar+O_2混合气中 TIG 电弧等离子体的特性，发现通入 Ar+O_2混合气后，O_2主要集中在电弧轴线和电极附近。且随着电流增大，等离子体流速随之增大，进一步导致阴极区域氧浓度降低，而阳极区域氧浓度提高。此外，随着 O_2气的加入，电弧收缩温度增大，特别是 20 vol%O_2较 5vol%O_2，电弧温度显著提高。

采用 GTAW 焊接奥氏体不锈钢时，向保护气中添加 CO_2，会导致抗拉强度、焊缝面积以及熔深有所增加。Kumar 等[38-39]研究了不同含量 Ar+CO_2混合气条件下，GTAW 和 GMAW 焊接对 316L 奥氏体不锈钢力学性能的影响。发现使用 92vol%Ar+8vol%CO_2保护气时，GTAW 焊缝拉伸强度达到最高。由于热影响区的高热输入和热量滞留特性，导致该区域的硬度普遍低于母材。另外，采用 92vol%Ar+8vol%CO_2保护气焊接时，焊缝晶粒组织细小，硬度最高。并且焊缝冲击韧性随 CO_2含量增多逐渐提高。其次发现，电流的增加，会使所有气体焊接后的焊缝冲击韧性降低。

活性气体 CO_2和 O_2用于 GTAW 焊接会被电离分解，将氧元素溶解在熔池内，控制熔池表面的马兰戈尼对流模式，改变焊缝形状。Lu 等[40]以纯 Ar 为内层保护气，Ar+CO_2或 CO_2气体作为外层保护气，研究 SUS304 不锈钢 GTAW 焊接过程时，不同保护气对钨电极保护和焊缝形貌变化的影响。研究发现，当外层保护气由 Ar+1vol%CO_2更换为纯 CO_2时，焊缝形状由宽浅变为窄深，焊缝深宽比也由 0.28 增加至 0.41。此外，即使外层保护气使用纯 CO_2，内层 Ar 气依然可以有效地保护钨极免受氧化。研究进一步指出，外层保护气的 CO_2会提高熔池中的氧含量，特别当氧含量超过 70×10^{-6}时，马兰戈尼对流由外向变为内向，进一步导致焊缝形状由宽浅变为窄深。

O_2虽然也能影响焊缝形状，但随着电弧快速移动，O_2在熔池中的溶解是有限的。尤其当保护气中的 O_2浓度超过 0.6vol%时，重氧层会覆盖熔池表面，阻碍熔池对 O_2的吸收，导致焊缝金属含氧量保持不变。Lu 等[41]发现向 Ar 中添加少量的 O_2或 CO_2可以有效地控制焊缝金属的含 O_2量。当 O_2或 CO_2浓度

低于 0.6vol%时，焊缝深宽比随气体浓度提高而逐渐增大；当浓度超过 0.6vol%时，焊缝深宽比先增加后减少。研究还表明，当焊缝金属含 O_2 量低于 100×10^{-6} 时，马兰戈尼对流作用会使焊缝形状由深窄变为浅宽。因此，加入适量的 O_2 或 CO_2，能够显著增加焊缝熔深。

上述研究表明：混合气中的 O_2 与 CO_2 均会渗透熔池，改变熔池含氧量，并进一步影响马兰戈尼对流模式，进而改变焊缝形状。但是，与 CO_2 不同的是，O_2 浓度过高时，会在熔池表面产生重氧层来阻止熔池进一步吸收 O_2。此外，电弧中的 O_2 气还会产生解混效果，加强等离子冷却，收缩外围电弧，使电弧温度升高。

3 三元保护气 GTAW 焊接

目前，有研究报告了三元气体可用于 GTAW 焊，如 Ar+He+N_2、Ar+He+CO_2、以及 Ar+He+O_2 等。以上三元保护气能在提高焊接性能的同时降低成本，进一步提升焊接质量，相关研究都证明了三元保护气的实用性与可行性。然而，尽管现阶段取得了一定研究进展，关于三元气体 GTAW 焊接的研究应用仍然较少，说明仍有较多具有潜在应用价值的三元气体组合尚未被开发。

3.1 三元非氧化性保护气体

Ar+He 二元保护气中添加适量 N_2，不仅能够减少 He 的使用量，且能结合 He 弧热输入大的特点和 N_2 对焊缝奥氏体的稳定作用，进一步强化焊缝性能。其应用于不锈钢焊接，不仅起到细化晶粒和强化焊缝力学性能的效果，还可以起到减少铁素体生成和显著提高焊缝耐腐蚀性能的作用。

Ar+He+N_2 混合气，一方面，因为 He 的高热导率特性，能有效促进热量的传递，增加金属流动，产生更大的熔深熔宽；另一方面，活性的 N_2 会与大气中的氧气发生氧化反应，可能导致焊缝力学性能与焊接质量的降低。但同时，N_2 也会增强焊接过程中熔融金属的流动性，有利于更精确地控制焊缝几何形状，促进焊缝精确成形。

杨秀青[42]深入研究了 He 和 N_2 添加至 Ar 用于 GTAW 对电弧形态及电信号特征的影响。并对比了 70vol%Ar+30vol%He+0.015vol%N_2、70vol%Ar+30vol%He 的混合气以及 Ar 电弧的形态与波形。研究结果发现，相较于 Ar+He，含有微量 N_2 的 Ar+He+N_2 混合气产生的电弧亮度更低，电弧收缩更为明显，直径达到最小值，同时电弧电压略有上升。Khrais 等[43]采用 Ar+He+N_2 三元气体焊接 316L 不锈钢，并进一步评估其对微观组织结构的影响。研究表明，无论添加 N_2 或 He，都能有效增加焊接接头的深度和横截面积。N_2 能够稳定奥氏体相减少铁素体生成，提高接头力学性能和耐腐蚀性，但 N_2 的加入会导致表面氧化更严重。进一步对焊接区组织研究发现，He 和 N_2 的加入同时起到了细化晶粒的作用。

上述研究表明，三元气中适量添加 N_2 能够收缩并稳定电弧，有效减小电弧飘荡现象，同时提高电弧电压增大热输入，使焊缝金属具有更好的流动性。此外，N_2 的加入还能减少铁素体生成，提高接头力学性能和耐腐蚀性。而且，还能增加焊缝熔深和截面积，并起到细化晶粒的作用。但 N_2 的添加会导致焊缝表面的氧化现象加剧。因此，如何在有效控制氧化干扰的同时，充分发挥 Ar+He+N_2 保护气体的性能优势，是当前研究的重点方向。

3.2 三元氧化性保护气体

通过向 Ar+He 二元保护气添加 CO_2 或 O_2 组成三元氧化性保护气。同二元氧化性保护气一样，CO_2 与 O_2 的加入同样能够控制熔池内的含氧量，进而精确控制焊缝成形。另外，He 的加入，极大提高了电弧能量，增加焊缝熔深和熔宽，进一步扩大焊缝成形的控制范围。

不锈钢管道 GTAW 焊接工艺中，Ar 常被用作正面和背面的保护气体，但因为其焊前准备工作繁琐，并不适用于长距离管道的施工[44]。相比之下，采用 Ar+He+CO_2 三元气配合实芯焊丝，在背面不充 Ar 时进行不锈钢管道 GTAW 打底焊，能够取得较好的效果。李国栋等[45]研究 Ar+He+CO_2 三元混合气对电弧形态及焊缝成形的影响规律。发现随着 He 含量的增加，焊接电压逐渐提高。当 He 气含量大于 75vol%时，电弧呈现典型的 He 弧特性。表 2 为不同比例 Ar+He+CO_2 气氛(vol%)焊缝的熔深、熔宽。通过测量焊缝的熔深和熔宽，进一步发现，He 的添加显著增大了焊缝的熔深和熔宽，且熔深增加相较于熔宽更为明显。

向惰性保护气体内添加活性气体相比在焊板上涂抹活性助焊剂，能更精准地控制熔池含氧量。而且 Ar+He 混合气中添加少量的 O_2，不仅能够提高焊缝的深宽比，还能调节熔池含氧量，增加焊接穿透深

表 2 不同比例 Ar+He+CO_2 气氛焊缝的熔深、熔宽[45]
Tab.2 Weld depth and width of different proportions of Ar+He+CO_2 atmosphere[45]

气体	电流 /A	电压 /V	焊接速度 /(mm·min^{-1})	熔宽 /mm	熔深 /mm
100vol%Ar	120	18	110	9.00	1.00
37.5vol%Ar+60vol%He+2.5vol%CO_2	120	18	110	9.55	1.20
22.5vol%Ar+75vol%He+2.5vol%CO_2	120	18	110	9.62	1.38
7.5vol%Ar+90vol%He+2.5vol%CO_2	120	18	110	9.70	1.98

度[46]。Lu 等[47]研究 SUS304 不锈钢焊珠-板焊接时，深入探讨 Ar+He 保护气对 GTAW 焊接效果的影响，并特别关注了 Ar+He 混合气体加入少量 O_2 后的效果。发现随着 O_2 的加入，焊缝形状由宽浅型转变为窄深型。实验进一步研究在不同的钨极高度，使用 30vol%Ar+He+O_2 和 50vol%Ar+He+O_2 混合气对焊缝形状的影响规律。结果发现，当氧气含量超过 0.1vol%时，在 1mm 的电极高度下，焊缝呈窄而深型；当氧气含量超过 0.3vol%时，在 3mm 的钨极高度下，焊缝呈宽而浅型。

三元氧化性气氛的使用能够显著改变焊缝成形，并有效增加焊缝熔深。但是该类混合气在电弧行为及焊缝微观组织方面的研究仍显不足，整体影响规律尚不明确。此外，Ar+He+CO_2 中 He 的加入可能会增强电弧力，帮助减小焊缝的晶粒尺寸，关于这一影响机制的具体探索，仍需通过试验及检测研究来进一步论证。

4 结语

针对目前不同保护气氛的 GTAW 焊接研究存在的问题，未来研究方向建议向以下 3 个方面开展：

（1）现阶段工业中常用二元混合保护气，其中各气体的成分含量和物理特性的变化对于焊接保护效果、焊缝成形以及焊接质量方面的影响，具有双面性。未来研究需要注意均衡保护气在不同方面的作用，通过传感器采集焊接过程中的数据，训练机器学习模型来建立气体配比与焊接质量、焊接性能、保护效果之间的映射关系，并通过优化算法对配比进行迭代和优化，寻找最佳配比方案，对保护气成分进行更精确的调控，以获得焊缝成形良好、焊缝性能优异、保护效果显著、焊接质量卓越的焊缝。

（2）三元保护气能有效综合各气体组元的优点，不仅能够提升焊缝质量，更能够适应多元化焊接需求，提高生产效率并降低成本。目前，三元保护气的应用与研究相对较少。三元保护气的开发与应用是 GTAW 焊未来的研究热点，研究者需要综合考虑焊接材料、焊接位置、焊接速度和质量要求等因素，通过试验测试结合模拟计算来确定最佳气氛配，发掘性能优异的三元气配比，进一步拓展三元保护气的应用场景。推动更高效、高质量的焊接技术在航空、航天、航海等领域的广泛应用。

（3）保护气氛在焊接中的应用与研究虽然已有百年历史，但仍缺乏保护气对提高焊接质量和焊接效率机理的深入研究。因此，将来可以利用更优异的数值方法和算法，模拟熔池中的物理现象和化学反应，有效预测焊缝和热影响区的相变及组织演变规律，结合焊接凝固过程中的分子热力学及动力学分析，优化 GTAW 焊接供气技术。

参考文献：

[1] Hilton D E, Norrsih J, 黄迅. 电弧焊保护气体[J]. 锅炉技术，1990(6)：13-21.
[2] 刘自刚，梅亚泽，张建峰，等. 深熔 TIG 焊研究现状与展望[J]. 热加工工艺，2023，52(1)：6-11.
[3] 郭纪龙，付娟，赵勇，等. TA18 钛合金 TIG 焊接头组织及耐腐蚀性能研究[J]. 热加工工艺，2024，53(7)：11-15.
[4] 刘自刚，张建峰，钱雪娇，等. 大熔覆速率 TIG 焊研究现状与展望[J]. 热加工工艺，2024，53(1)：12-16.
[5] 周传昆，王伟，娄双涛，等. 不锈钢薄板高频冷焊与 TIG 焊接头的性能对比[J]. 热加工工艺，2023，52(7)：122-124.
[6] 肖宏，史朝军，张鑫，等. 不同焊丝 2A14 铝合金 TIG 焊接头微观组织和力学性能对比分析[J]. 热加工工艺，2023，52(3)：57-61.
[7] 贾时君. 焊接保护气体的选择[J]. 金属加工：热加工，2014(6)：26-28.
[8] Kutelu B J, Seidu S O, Eghabor G I, et al. Review of GTAW welding parameters[J]. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering，2018，6(5)：541-545.
[9] 郭立祥，李小平，陈阳，等. 基于 TIG 焊的电弧增材制造工艺研究现状及展望[J]. 热加工工艺，2023，52(5)：7-12.
[10] 张广成，高俊，朱子越，等. TIG 电弧堆焊条件下 Ni 基熔覆层的微观组织及性能研究[J]. 热加工工艺，2022，51(24)：63-67.
[11] Ikegami Y I, Miyauchi H, Yamamoto S, et al. Shielding gases for improved GMAW and GTAW processes[J]. Welding International，2012，26(3)：187-195.
[12] 殷树言. 气体保护焊工艺基础及应用[M]. 北京：机械工业出版社，2012：66.

[13] Villarreal-Medina R, Murphy A B, Méndez P F, et al. Heat transfer mechanisms in arcs of various gases at atmospheric pressure[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing,2023,43(4):787-803.

[14] Savaş A, Ceyhun V. Finite element analysis of GTAW arc under different shielding gases [J]. Computational Materials Science,2012,51(1):53-71.

[15] 杨春利,林三宝. 电弧焊基础[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003:49.

[16] 刘甲,陈高澎,马照伟,等. 钛合金混合保护气等离子弧焊接头组织及性能[J]. 材料导报,2021,35(Z1):371-373.

[17] Xiang J,Tanaka K,Chen F F,et al. Modelling and measurements of gas tungsten arc welding in argon-helium mixtures with metal vapour[J]. Welding in the World,2021,65:767-783.

[18] 陈怡,郭龙涛,祁同福,等. 镁合金铸件氦-氩保护 TIG 焊修复工艺[J]. 焊接学报,2021,42(9):35-41.

[19] 黄思俊,宋瑶,许聪磊. 不同保护气体对 6082-T6 铝合金 GTAW 焊接接头组织和力学性能的影响[J]. 机械工程材料,2014(9):43-46.

[20] 胡一铭. 共轭主凸轮磨削开裂原因分析[J]. 纺织机械,2007(1):48-50.

[21] Traidia A, Roger F, Chidley A, et al. Effect of helium-argon mixtures on the heat transfer and fluid flow in gas tungsten arc welding [J]. Journal of Chemistry and Chemical Engineering, 2011,5(9):854-861.

[22] 刘凤磊. GTAW 电弧熔池行为的数值模拟[D]. 太原:太原理工大学,2016:45-56.

[23] Lin Y C, Chen P Y. Effect of nitrogen content and retained ferrite on the residual stress in austenitic stainless steel weldments [J]. Materials Science and Engineering A,2001,307(1/2):165-171.

[24] Huang H Y. Effects of shielding gas composition and activating flux on GTAW weldments [J]. Materials & Design,2009,30(7):2404-2409.

[25] Panmongkol P, Phungon I. Effect of backing gas mixtures on corrosion properties of stainless steel grade 304 weld metal by autogenous GTAW[J]. Journal of Materials Research and Technology,2021,11:1559-1570.

[26] 李彩辉. 氩氮保护 TIG 焊电弧特性的模拟研究[D]. 镇江:江苏大学,2006:54-57.

[27] 雷玉成,李彩辉,郁雯霞,等. 氮氩保护的 TIG 焊电弧等离子体的数值分析[J]. 中国机械工程,2007,18(15):1846-1850.

[28] 强伟,王克鸿,侯瑶. 保护气体中氮气比例对高氮钢双面同轴 TIG 焊接工艺性的影响[J]. 焊接学报,2017,38(9):70-74.

[29] Shankar V, Gill T P S, Mannan S L, et al. Effect of nitrogen addition on microstructure and fusion zone cracking in type 316L stainless steel weld metals [J]. Materials Science and Engineering A,2003,343(1/2):170-181.

[30] 和广庆,李翠翠,田洪志. 保护气体对管子-管板全位置 TIG 焊接接头质量的影响[J]. 机械工程材料,2015(10):70-73.

[31] 龚祺龙. Hastelloy C276 填丝等离子弧焊与氩弧焊工艺及力学性能对比分析[J]. 金属加工,2024(7):1674-1685.

[32] Lowke J J, Morrow R, Haidar J, et al. Prediction of gas tungsten arc welding properties in mixtures of argon and hydrogen[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,1997,25(5):925-930.

[33] 刘政军,李宇航,苏允海. Ar 与 H_2 混合气体保护下 GTAW 电弧特性数值模拟[J]. 焊接学报,2019,40(7):67-71.

[34] Chuaiphan W, Kaewsakul N, Nansaarng S. Roles of hydrogen in shielding gas for compensate heat input on dissimilar joints of stainless steel series 200 between AISI 201LN and 214 by GTAW[J]. Journal of Alloys and Metallurgical Systems,2024,5:100052.

[35] Huang H Y. Argon-hydrogen shielding gas mixtures for activating flux-assisted gas tungsten arc welding[J]. Metallurgical and Materials Transactions A,2010,41(11):2829-2835.

[36] Chuaiphan W, Srijaroenpramong L. Optimization of TIG welding parameter in dissimilar joints of low nickel stainless steel AISI 205 and AISI 216[J]. Journal of Manufacturing Processes,2020,58:163-178.

[37] Wang X, Luo Y, Chi L, et al. Numerical investigation of transport phenomena of arc plasma in argon-oxygen gas mixture [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2020,154:119708.

[38] Kumar K V S, Gejendhiran S, Prasath M. Comparative investigation of mechanical properties in GMAW/GTAW for various shielding gas compositions [J]. Materials and Manufacturing Processes,2014,29(8):996-1003.

[39] Kumar K V S, Srikishore K A, Shek Mohammed Asiq A, et al. Experimental investigation of tensile strength and hardness in GMAW/GTAW butt welded joints with various shielding gas compositions [C]//Materials, Design, and Manufacturing for Sustainable Environment:Select Proceedings of ICMDMSE 2020. Springer Singapore,2021:57-78.

[40] Lu S, Fujii H, Nogi K. Weld shape variation and electrode oxidation behavior under Ar- (Ar-CO_2) double shielded GTA welding[J]. Journal of Materials Science & Technology,2010,26(2):170-176.

[41] Lu S, Fujii H, Nogi K. Marangoni convection and weld shape variations in Ar-O_2 and Ar-CO_2 shielded GTA welding[J]. Materials Science and Engineering A,2004,380(1/2):290-297.

[42] 杨秀青. 混合保护气体对铝合金 TIG/MIG 焊的影响[D]. 石家庄:河北科技大学,2016:48-56.

[43] Khrais S, Mohammed A, Al A A, et al. Effect of TIG welding parameters on 316 L stainless steel joints using taguchi L27 approach[J]. Materials Research Express,2024,11(1):016512.

[44] 栗卓新. 不锈钢管打底工艺的进展[J]. 兵器材料科学与工程,2001,25(6):54-57.

[45] 李国栋,栗卓新,魏琪,等. 氩-氦-二氧化碳混合气体电弧行为及其对焊缝成形的影响[J]. 材料工程,2007(3):38-41.

[46] Thakur P P, Chapgaon A N. A review on effects of GTAW process parameters on weld[J]. IJRASET,2016,4(1):136-140.

[47] Lu S, Fujii H, Nogi K. Arc ignitability, bead protection and weld shape variations for He-Ar-O_2 shielded GTA welding on SUS304 stainless steel [J]. Journal of Materials Processing Technology,2009,209(3):1231-1239.