

保护气对 304N 不锈钢 K-TIG 焊接接头组织性能的影响

柳 阳 王秋平

(太钢先进不锈钢材料国家重点实验室, 太原 030003)

摘要 使用小孔钨极氩弧焊(K-TIG, keyhole TIG) 焊接设备对 13.5 mm 厚度 304N 不锈钢板材进行了焊接, 不开坡口一道焊透成型。利用 SEM, XRD, 共聚焦显微镜, 铁素体仪, 显微硬度计分析了不同保护气体组成对焊缝化学成分、焊接接头各区域微观组织以及性能的影响。结果表明, 相对于母材, 当采用纯 Ar 作为保护气体时, 焊缝 N 含量下降了 18%, 铁素体含量增加了 20 倍, 焊缝中心的显微硬度下降了 15%; 当采用 Ar + 3% N₂ 作为保护气体时, 焊缝 N 含量增加了 90%, 铁素体含量下降了 84%, 甚至某些区域的铁素体含量为零, 焊缝的显微硬度提高了 14% 以上。

关键词: 含氮不锈钢 小孔钨极氩弧焊 铁素体含量

中图分类号: TG444.74

0 序 言

304N 不锈钢是在 304 不锈钢的基础上, 通过添加 N 元素, 不仅强度得到了大幅提高, 耐蚀性能也显著提升, 特别是在氯化物和海水中耐点蚀和耐缝隙腐蚀等^[1]。对于含氮钢, 焊接过程中抑制熔池氮的析出乃至增加氮含量已成为焊接研究的重点。有学者研究发现, 通过向氩气中加入一定量的氮气作为保护气体, 焊接熔池及随后焊缝中的 N 含量有所增加, 并且随着保护气体中氮气比例的增加, 焊缝中的 N 含量也随之增加^[2-5]。Hertzman 等人^[6]也发现此规律, 并且当保护气体中的氮气含量超过一定比例时, 焊缝中会出现氮气孔。当氮气比例达到 8% 时, 不仅促使了焊缝中气孔的形成, 而且加大了对钨极的烧损^[7]。

K-TIG, 即 Keyhole TIG Welding, 是一种高效的焊

接方法, 它在焊接过程中产生一道高强度电弧, 并控制电弧压力与熔池表面张力实现相对平衡, 形成一个全熔透的小孔实现深熔焊接^[8]。对于 16 mm 以下的材料, 可不填充焊丝, 一道焊接完成, 整个焊接过程为单程全熔透焊接, 焊缝为 100% 母材材质, 没有多条熔合线, 完全消除了夹渣、气孔以及许多焊接工艺常见的其它缺陷。K-TIG 焊与常规 TIG 焊比较, 具有以下优点: ①焊缝熔深大, 焊接速度快, 效率高; ②对于 16 mm 以下厚度的材料, 不需要开坡口直接焊接, 节约成本; ③易实现自动化焊接。

1 试验材料与方法

文中试验材料为 304N 板材, 化学成分见表 1。试板尺寸为 300 mm × 150 mm × 13.5 mm, 不开坡口。焊接参数见表 2。焊接接头截面组织分别由 OLYMPUSOLS4100

表 1 304N 化学成分(质量分数, %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Fe
0.043	0.415 7	1.103 4	0.024 1	0.001 3	19.217 7	8.171 6	0.125	余量

共聚焦显微镜和 FEI NovaNanoSEM430 测得。焊缝 N 含量根据 GB/T 20124 《钢铁氮含量的测定惰性气体熔融热导法(常规方法)》进行检测。焊缝 XRD 分析使用 PANalytical X'pert Pro X 射线衍射仪测量, 测试点位于焊缝中心。采用 MHV-2000 显微硬度仪测量焊缝各区域硬

度。焊接设备由广东福维德焊接股份有限公司提供。

表 2 焊接参数

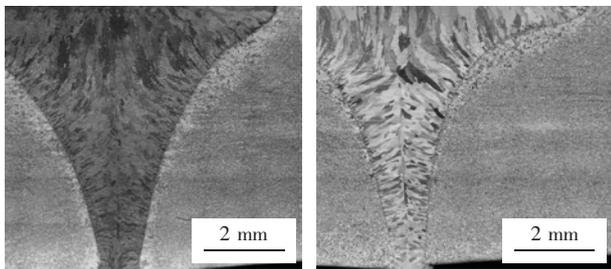
焊接电流 I/A	焊接速度 v/(mm · s ⁻¹)	保护气 (正面)	保护气 (背面)
520	3.000	Ar	Ar
460	3.667	Ar + 3% N ₂	N ₂

收稿日期: 2017-03-08

2 试验结果与讨论

2.1 焊缝组织

图1为不同气体保护的K-TIG焊接接头截面金相图,图1a为Ar气保护,图1b为正面Ar+3%N₂保护,背面为N₂保护。对比两图可见,焊缝外观方面,Ar保护的焊缝熔宽较窄,焊缝表面中心较高,而边缘有轻微咬边。Ar+3%N₂保护的焊缝熔宽较宽,焊缝表面也较为平坦。这是因为保护气中添加了N₂后,电弧的温度比纯Ar电弧的温度高,熔池液态金属润湿性较好,焊缝成形也更好。焊缝组织方面,Ar保护的焊缝奥氏体晶粒内树枝状铁素体较为细密,导致宏观上看奥氏体晶粒之间的取向色差不明显。而Ar+3%N₂保护的焊缝奥氏体晶粒则清晰许多,析出的铁素体枝晶也不明显。为了进一步研究焊缝不同区域的组织特点,选取了焊缝4个典型区域进行扫描电镜观察,与母材进行对比,选区示意图如图2所示。



(a) Ar气保护 (b) 正面Ar+3%N₂保护, 背面N₂保护

图1 K-TIG焊接接头截面组织

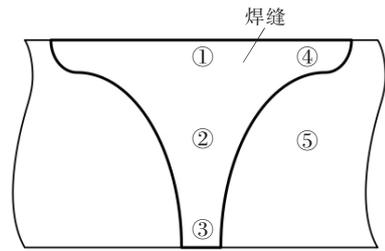


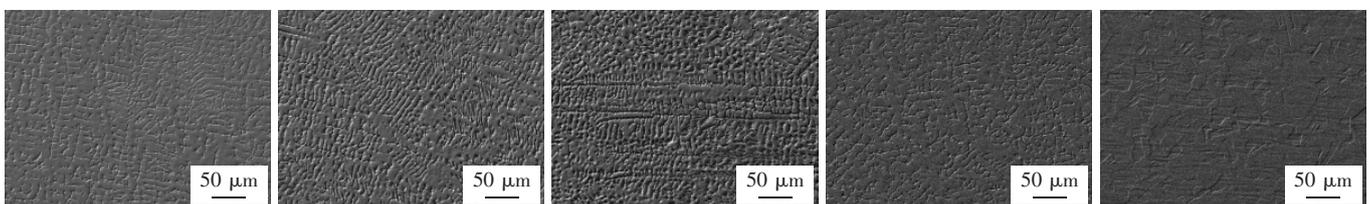
图2 局部放大选区示意图

图3和图4分别为Ar保护和Ar+3%N₂保护K-TIG焊接接头不同区域的SEM形貌,表面凸出的为耐腐蚀性相对较好的奥氏体相,凹下的为耐腐蚀性相对较差的铁素体相。

图3a与图4a分别为K-TIG焊缝上部,即区域①,对比两图可见,Ar保护的K-TIG焊缝上部铁素体较多,将奥氏体相分割地较为细小,已经看不到明显的奥氏体晶界;而Ar+3%N₂保护的K-TIG焊缝上部奥氏体比例较大,并可隐约看到奥氏体晶界。

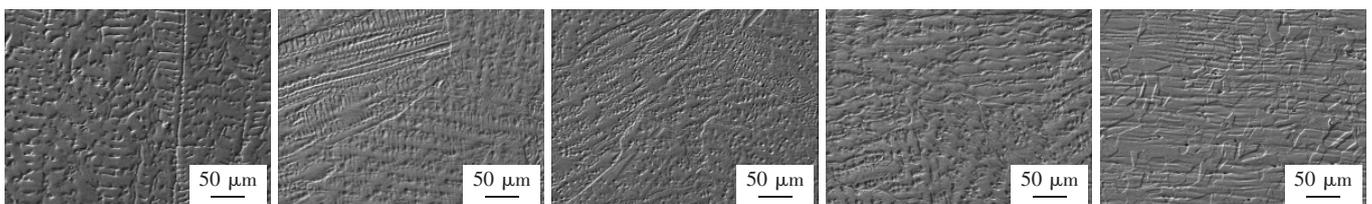
对于图3b和3c来讲,铁素体已经非常多了。而与之对比,图4b和4c中铁素体含量较少,奥氏体晶界明显。图3d中铁素体含量比图3b和3c少一些,与图3a相近,看不到明显的奥氏体晶界。图4d中的铁素体含量则较图4a,4b和4c都少,腐蚀坑也较浅,更接近于母材组织。图3e和图4e为母材组织,可清晰观察到浮雕状奥氏体晶粒。

综上,从组织上观察,Ar保护焊缝的铁素体含量均高于Ar+3%N₂保护焊缝的对应区域。



(a) 区域① (b) 区域② (c) 区域③ (d) 区域④ (e) 区域⑤

图3 Ar保护焊接接头不同区域SEM形貌



(a) 区域① (b) 区域② (c) 区域③ (d) 区域④ (e) 区域⑤

图4 Ar+3%N₂保护焊接接头不同区域SEM形貌

2.2 焊缝相比例

2.2.1 N 含量及铁素体含量

文中依照 GB/T 20124 对焊缝区域 N 含量进行检测,使用铁素体分析仪对焊缝区域铁素体含量进行分析,结果见表 3。由表 3 可知,母材 N 含量为 0.130%,与质保书给出的化学成分 N 含量 0.125% 相符。Ar 保

护的焊缝 N 含量为 0.107%,下降了 18%,铁素体含量也从母材的 0.37% 增至 7.69%,提高了 20 倍,在组织照片中也有明显的体现。而 Ar + 3% N₂ 保护的焊缝 N 含量达到了 0.248%,与母材的 N 含量相比,提高了 90%。由此,铁素体含量也显著下降至 0.06%,下降了 84%,甚至某些区域检测不到铁素体相。

表 3 不同区域的 N 含量和铁素体含量

测量区域	N 含量(质量分数,%)	铁素体含量(%)	铁素体含量均值(%)
母材	0.130	0.37,0.51,0.36,0.21,0.42	0.37
焊缝(Ar 气保护)	0.107	8.80,8.00,6.21,8.42,7.01	7.69
焊缝(Ar + 3% N ₂)	0.248	0,0,0,0.13,0.19	0.06

对于熔化焊时 N 的溶入和逸出,文献 [9] 认为,焊缝中的 N 主要来源于焊接材料、保护气体和母材,空间气氛、熔池以及随后凝固过程中 N 的行为将最终决定焊缝中的 N 含量。对于 K-TIG,由于不填充焊丝,焊接材料则不必考虑。在高温电弧作用下,保护气体中的 N 会发生一系列的反应,如解离、电离、复合等,在电弧和熔池的界面处也会发生 N 的溶入与逸出的反应。以普通奥氏体不锈钢的 TIG 焊为例,可将整个熔焊过程分为 4 个阶段:①预熔阶段;②电弧熔化阶段,此阶段 N 的溶入占主导;③熔池冷却阶段,此时熔池焊缝仍处于液态,在冷却阶段,N 的平衡溶解度随温度的变化而不断变化,此阶段 N 的逸出占主导;④凝固阶段,由于液相和固相对 N 的溶解度存在较大差距,即 N 的溶解度会出现阶跃式变化,过饱和的 N 会被排出并形成气孔。在固相形成后,由于 N 在固相中扩散率低,N 的损失可被忽略。在相同热输入条件下,熔池与保护气体中 N 的流动取决于 N 的活度,而保护气体中 N 的活度取决于其分压^[10]。当采用纯氩气保护时,保护气氛中 N 的活度为零,远低于熔池中 N 的活度,N 由熔池向保护气体中过渡,从而由于 N 的逸出,焊缝 N 含量低于母材。随着保护气体中 N 含量的增加,保护气体中 N 的活度增加,当保护气体中 N 的活度大于熔池 N 的活度时,N 由保护气体向熔池过渡,因此由于 N 的溶入使焊缝中 N 含量高于母材。

除了保护气体的影响,焊接工艺参数亦能影响焊接过程中 N 的溶入和逸出,主要体现在熔池的体积和焊缝的表面积、电弧对熔池的搅拌作用。Kuwana 等人^[11]研究了 GTAW(传统 TIG)焊接电流和焊接速度对焊缝 N 含量的影响,发现焊缝的 N 含量随着焊接电流

的增加而降低,焊接速度的增加而提高,并认为焊接参数对焊缝中 N 含量的影响是由于焊缝断面面积或焊缝体积变化所引起的,熔池凝固时间越长,析出的 N 就越多;表面积越大,析出的 N 也越多。

对于文中采用的 K-TIG 方法来讲,与传统 TIG 相比,有以下特点:①一次性熔透 13.5 mm,熔池体积比 TIG 要大;②焊接过程中有小孔形成,熔池表面积和搅拌均显著高于 TIG。所以,K-TIG 焊缝 N 的溶入和析出较传统 TIG 更为强烈。对于 Ar 保护的焊缝来讲,焊接过程中只存在 N 的析出,故 N 含量降低明显,铁素体含量大幅升高。而对于 Ar + 3% N₂ 保护的焊缝来讲,由于保护气中的 N 分压使得焊缝中 N 含量高于母材,铁素体含量远低于母材。

2.2.2 XRD

图 5 为 Ar 气保护和 Ar + 3% N₂ 保护 K-TIG 焊缝 XRD 扫描图谱,可见 Ar 保护 K-TIG 焊缝(黑色曲线)在铁素体相特征角度有少量体现。而 Ar + 3% N₂ 保护的 K-TIG 焊缝则几乎没有发现铁素体的特征峰。这与前文对铁素体含量的测定结果相符。

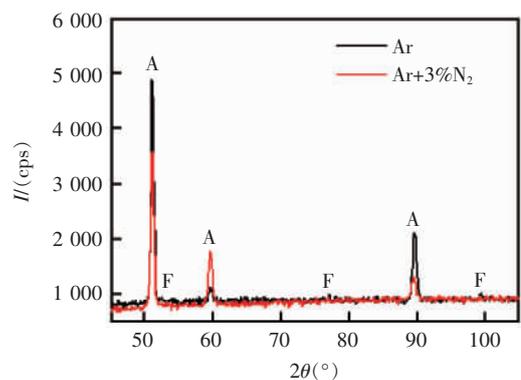


图 5 焊缝 XRD 图谱

2.3 硬度分布

图6为不同气体保护的K-TIG焊接接头截面硬度分布图。硬度在焊缝上表面下2 mm平行线上测得,以熔合线为中心,分别向两侧每0.7 mm测一个点,焊缝侧测三个点,另一侧一直测至母材,熔合线上测三个点。另外,在焊缝中心各测了三个硬度点,Ar保护的焊缝中心硬度均值为238 HV,Ar+3% N₂保护的焊缝中心硬度均值为317 HV。

由图6可以看出,在右侧距离熔合线4 mm以外,Ar保护和Ar+3% N₂保护焊接接头的硬度基本相等,即母材的硬度,均为280 HV左右。左侧距熔合线4 mm以内为热影响区,晶粒受热粗化,硬度略高于母材。

对于Ar保护的K-TIG焊接接头,熔合线和焊缝侧的硬度均与母材相当,而焊缝中心硬度值为238 HV,下降了15%。这是由于焊缝中心电弧温度高,且存在小孔,N逸出量大;而焊缝边缘N逸出量较少所致。

对于Ar+3% N₂保护的K-TIG焊接接头,熔合线和焊缝硬度均有显著提高,达到了300 HV以上,焊缝中心和距熔合线较远区域硬度达到了320 HV左右,提高了14%以上。这便于焊缝中溶入N导致N含量升高有关,焊缝组织得到N的固溶强化。

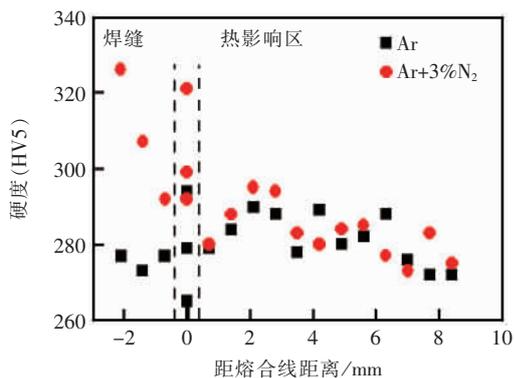


图6 焊接接头硬度分布

3 结 论

(1) 使用K-TIG焊接设备将13.5 mm厚的304N板材不开坡口一次焊透。

(2) 当使用纯Ar作为焊接保护气时,焊缝中N含量相对于母材降低了18%,铁素体含量相对于母材增加了20倍。

(3) 当使用Ar+3% N₂作为焊接保护气时,焊缝中N含量相对于母材提高了90%,铁素体含量下降至

0.06%,某些区域甚至检测不到铁素体相。

(4) 焊接接头各区域硬度与N含量正相关,N含量越高,硬度值越大。经Ar+3% N₂保护的K-TIG焊缝硬度高于母材。

参 考 文 献

- [1] 沈国雄,刘 斌. 氮对304奥氏体不锈钢组织和力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报,1997,9(6):33-36.
- [2] Kodama S, Sugiura K, Nakanishi S, et al. Nitrogen absorption phenomenon of GTA welding with nitrogen-mixed shielding gases: effect of plasma characteristics on nitrogen content in GTA welded metal [J]. Welding International, 2015, 29(4): 262-269.
- [3] 刘奇凡,韩怀月,吴 玖,等. TDS2101经济型双相不锈钢焊接接头性能研究[J]. 焊接,2011(9):26-29.
- [4] 李 伟,栗卓新,李国栋,等. 国内外双相不锈钢焊接的研究进展[J]. 焊接,2007(1):11-15.
- [5] 杨 柏,彭 云,田志凌,等. 高氮奥氏体不锈钢氩弧焊的重熔特征[J]. 焊接,2007(6):34-36.
- [6] Hertzman S, Parrerson R J, Blom R, et al. Influence of shielding gas composition and welding parameters on the N-content and corrosion properties of welds in N-alloyed stainless steel [J]. ISIJ International, 1996, 36(7): 968-976.
- [7] Harzenmoser M, Rennhard C, Hereth M, et al. Recent developments on the weldability of a new high nitrogen stainless steel [J]. Materials Science Forum, 1999, 318-320 (12): 591-596.
- [8] Cui S L, Liu Z M, Fang Y X, et al. Keyhole process in K-TIG welding on 4 mm thick 304 stainless steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 217-228.
- [9] 赵 琳. 高氮钢焊接过程氮的行为及接头组织性能[D]. 北京:钢铁研究总院博士学位论文,2007.
- [10] Hosseini V A, Wessman S, Hurtig K, et al. Nitrogen loss and effects on microstructure in multipass TIG welding of a super duplex stainless steel [J]. Materials & Design, 2016, 98: 88-97.
- [11] Kuwana T, Kokawa H. The nitrogen absorption of iron weld metal during gas tungsten arc welding [J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 1984, 2(4): 669-675.

作者简介: 柳 阳,1988年出生,博士,工程师。主要从事不锈钢焊接工作,已发表论文10余篇。