

钨极氩弧焊、激光焊接等。

熔化极气体保护焊焊接时熔敷量大, 焊接速度快, 效率高, 通常用于厚板的焊接。焊接时熔池相对较大并存在搅动, 必须进行良好的气体保护。然而英国一直没有将熔化极气体保护焊的方法用于化工设备或航空设备制造上, 可能是由于缺陷出现过频, 侧壁熔合明显不足, 维持均匀熔深困难, 偶尔有氧化现象。美国某公司曾开发过钛的 MIG 焊, 但后来因作业条件难以确定而中断^[3]。

电子束焊接是解决厚板焊接的比较先进的焊接方法。焊接时电子束能量非常集中, 焊接效率高。焊后焊缝的熔深大、熔宽小、晶粒细、HAZ 窄, 适用于焊缝质量要求极高的场合, 尤其是航空工业^[2]。采用此方法进行焊接一旦出现质量问题, 必须切开重新焊接, 返修困难。

等离子弧焊具有能量密度高, 线能量大, 效率高的特点, 适用于钛及钛合金的焊接。液态钛的表面张力大、密度小, 有利于采用小孔法进行等离子弧焊。采用小孔法可一次焊 2.5 mm~15 mm 厚的板材, 熔透法一次焊透的厚度较小, 3 mm 以上的厚板一般需要开坡口^[4]。

钨极氩弧焊 (TIG 焊) 是焊接钛及钛合金最常用的一种方法, 可适用于各种厚度钛及钛合金板材的焊接。俄罗斯中央结构材料研究院研制出了一种窄间隙 TIG 焊焊接技术, 成功的应用于大厚度钛合金结构及造船、航空、航天各领域。用这种方法进行焊接, 可以较早发现并清除焊接缺陷, 进行重新焊接。电子束, 激光等高能密度密度的焊接工艺可以成功的实现钛及钛合金厚板的焊接, 然而这些焊接工艺往往很难应用于操作现场。手工钨极氩弧焊工艺简单, 操作灵活, 可以有效解决大多数焊接结构问题^[2,5~7]。

3.2 窄间隙 TIG 焊的工艺特点

钛合金同其他材料一样, 实现高质量、高可靠性的 TIG 窄间隙焊接并非易事, 因为在深而狭窄的坡口内进行电弧焊接, 传统工艺技术难以保证焊接质量。在窄间隙焊接条件下, 电弧轴线基本与坡口侧壁平行, 侧壁均匀熔合可靠性差。对工艺参数的稳定和电弧空间作用位置的控制要求极高^[1]。

俄罗斯采用的这一焊接工艺, 坡口被加工成“I”型, 对于双面焊的焊接接头用机加工或堆焊方法形成凸台, 对于单面焊的焊接接头可加工出同样的凸台或者采用一个背面垫板 (如图 2 所示)。

当钛板厚度小于 60 mm 时, 采用圆形喷嘴进行焊接 (图 3a), 当厚度超过 60 mm 时, 可将特殊扁平式的喷嘴 (图 3b) 内置于窄间隙进行焊接。

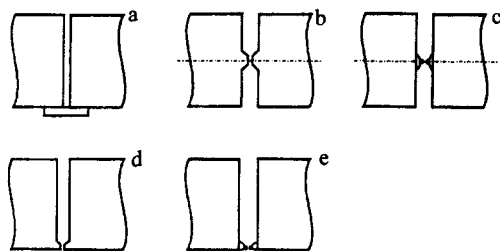


图 2 窄间隙接头坡口的制备

- (a) 带背面垫板; (b) 机加工形成的凸台 (双面焊);
(c) 堆焊形成的凸台 (双面焊);
(d) 机加工形成的凸台 (单面焊);
(e) 堆焊形成的凸台 (单面焊)

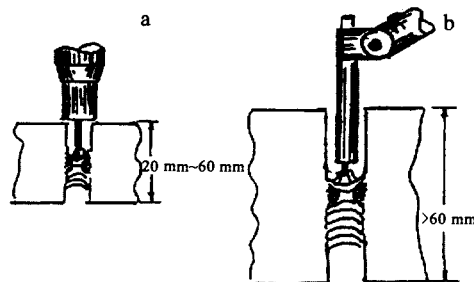


图 3 不同厚度下喷嘴的应用

- (a) 圆柱型喷嘴; (b) 编平型喷嘴

3.3 窄间隙 TIG 焊的强化效应

按常规工艺方法, 每一种钛合金基材都需要有一种在成分和性能上能与之配套使用的焊丝, 使得焊后焊缝的力学性能达到母材的水平。

俄罗斯中央结构材料研究院研制出的这种应用于钛合金的窄间隙 TIG 焊接技术, 对于钛合金的焊接是一重大突破。突破之处在于使用强度比母材低而塑性比母材高的焊丝进行窄间隙焊接, 焊后的接头不仅塑性能达到要求, 其强度也可以达到母材水平, 接头无需再进行强化热处理^[6,7]。

焊接接头与母材的等强度是由啮合强化效应来实现的。当焊缝金属宽度和板厚达到一定比例时, 焊接后接头在载荷作用下就会出现啮合强化效应, 此时的接头就是一个没有加强余高的等强接头。焊缝金属强度的增加与焊缝宽度和被焊金属的厚度有一定的比例关系。文献^[7]中给出了一个坐标系, 横坐标为相对焊缝宽度 K , 是焊接间隙 C 与板厚 S 的

比值（窄间隙的接头尺寸关系如图 4 所示），纵坐标为相对焊缝强度，是母材的屈服强度与焊缝金属的屈服强度的比值。处于这个坐标系中阴影部分的强度与接头间隙的组合就可以实现啮合强化效应（见图 5）。

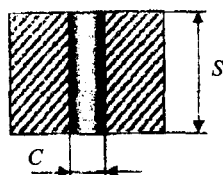


图 4 窄间隙的接头尺寸

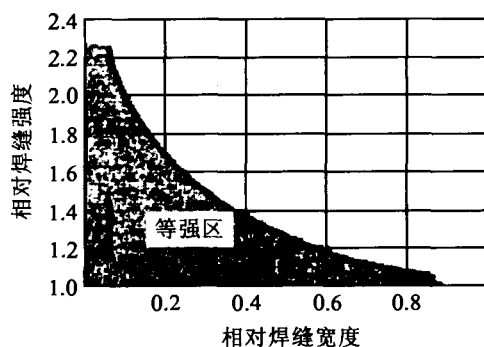


图 5 窄间隙焊接接头等强面积图

4 啮合强化的原因

钛合金窄间隙 TIG 焊引起焊缝啮合强化的因素有：

对于钛合金而言，焊接后焊缝接头组织由基体等轴晶组织和焊缝马氏体 α' 相针状组织组成^[8,9]。针状 α' 相尺寸及形状取决于焊缝的化学成分，焊件厚度，焊接工艺，焊接线能量等各种因素。针状 α' 相随着被焊金属厚度的增加和线能量的减少而细化。厚板钛合金进行窄间隙手工 TIG 焊接时，焊缝冷却速度快，会形成细针状 α' 相。在外加载荷作用下，焊缝组织相互交错，发生啮合，焊缝机械性能得到提高。

窄间隙条件下，当焊接接头承受的外加载荷增加到一定程度时，会在接头部位出现比较复杂的应

力分布，从而提高了接头的承载能力。

钛合金窄间隙 TIG 焊在较窄的间隙内用合金化程度和强度级别较低的焊丝进行焊接，母材中的合金元素会渗入到焊缝，使得焊缝的合金元素增多，对于焊缝强度的提高也起到一定作用。

5 结 语

钛合金的窄间隙 TIG 焊是一项重大的技术突破，关键之处在于用低强度级别的焊丝来焊接高强度级别的母材，得到与母材等强的焊缝，而焊缝的其他性能指标没有降低。钛合金窄间隙 TIG 焊条件下啮合强化效应机理有待进一步的研究。这一技术的突破将有助于解决高强钛合金的焊接，简化配套焊丝的研究周期及其焊接工艺。如果能够根据试验数据建立准确的模型，将可以为以后钛合金及其他材料的窄间隙焊接提供理论指导。同时，这一理论的深入研究对世界各国正在大力开发的超细晶粒钢技术也具有指导意义。

参考文献

- [1] 张富巨, 罗传红. 焊接技术[J], 2000, 29(6): 33
- [2] 胡存根, 张富巨. 焊接技术[J], 2001, 30(2): 47
- [3] 戚运莲, 洪 权, 刘 向等. 钛工业进展[J], 2004, 21(6): 25
- [4] 李亚江. 特殊及难焊材料的焊接[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003
- [5] 吴全兴. 稀有金属快报[J], 2004, 23(12): 44
- [6] Academician I V Gorynn. Titanium99': Science and Technology Central Research "Prometey" [C]. Russia: St.Petersburg, 1999: 1
- [7] Ushkov S, Khesin J D, Suvorov N V. Titanium99': Science and Technology Central Research "Prometey" [C]. Russia: St.Petersburg, 1999: 1050
- [8] 张喜燕, 赵永庆, 白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005
- [9] C 莱茵斯, M 皮特尔斯编, 陈阵华等译. 钛与钛合金 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005

Research on Narrow-gap TIG Welding Technology of Titanium Alloys

Zheng Xigang, Zhao Yong, Jiang Chengyu

(Key Lab of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: A new technology of narrow-gap TIG welding of titanium alloys developed by the Central Research Institute in Russia is focused, based on introductions of various welding processes adopted for titanium alloys and the advantages of narrow-gap welding. Relative merits of this technology, and the effect of contact strengthening in the gap, are also analyzed. The cause of contact strengthening effect is discussed in the end.

Key words: titanium alloys; narrow-gap welding; TIG; strengthening

信息导报

稀有金属杂志社书讯

本社现有如下少量文集，需要者请与本社联系（联系人：翟惠玲，电话：029-86269273）。

- 1 《新材料发展现状及 21 世纪发展趋势》；
- 2 《先进陶瓷及其制备技术文集》；
- 3 《第 12 届全国高技术陶瓷学术年会论文集》；
- 4 《第 13 届全国高技术陶瓷学术年会论文集》；
- 5 《2000 年国外材料科学与工程特辑》；
- 6 《2004 年新材料与新工艺文集》；
- 7 《2005 年新材料与新工艺》；
- 8 《溶胶—凝胶法新材料制备工艺进展文集，2004 年》；
- 9 《中国核材料分会学术交流会文集，2002 年》；
- 10 《难熔金属科学与工程，第 7 届全国难熔会文集，1991 年》；
- 11 《难熔金属科学与工程，第 8 届全国难熔会文集，1994 年》；
- 12 《难熔金属科学与工程，第 9 届全国难熔会文集，1998 年》；
- 13 《难熔金属科学与工程，第 10 届全国难熔会文集，2002 年》；
- 14 《中日环境材料及循环产业论文集，2004 年》；
- 15 《第 5 届国际金属间化合物及金属基材料论文选》；
- 16 《西北有色金属研究院院庆 40 周年纪念文集，2005 年》；
- 17 《2004 年全国钛协会年会文集》；
- 18 《钛应用实例》；
- 19 《钛科学与工程，2005 年第 12 届全国钛会文集》。