

# 钛/钢异种金属熔化焊研究现状与展望

刘自刚<sup>✉</sup>, 徐睦忠, 谭超, 傅如斌, 代锋先

浙江巴顿焊接技术研究院, 杭州 311215

钛/钢复合结构材料兼具两种材料的优点,在产品轻量化、低成本、节能降耗等方面具有极大的优势,故钛/钢异种金属焊接具有较高的经济价值和广阔的应用前景。钛/钢异种金属焊接目前主要通过钎焊、压力焊、熔化焊三种方式进行,钎焊普遍存在生产效率低、焊接接头强度差的问题;压力焊相比熔化焊也存在生产效率低的问题,同时对接头形式有严格要求;熔化焊适应性更强,焊接生产效率更高、接头的力学性能更好,更有利于应用在工业生产中。因此对于钛/钢异种金属的焊接,熔化焊是当前最有应用前景的技术。本文针对钛/钢异种金属熔化焊,从激光焊、弧焊、电子束焊等几方面总结了钛/钢异种金属熔化焊的研究现状,并概括了研究中存在的主要问题以及展望了未来的研究方向。

**关键词** 钛/钢 异种金属焊接 熔化焊 激光焊 电弧焊

**中图分类号**:TG444 **文献标识码**:A

## Research Status and Prospect of Titanium/Steel Dissimilar Metal Fusion Welding

LIU Zigang<sup>✉</sup>, XU Muzhong, TAN Chao, FU Rubin, DAI Fengxian

Zhejiang E.O. Paton Welding Technology Research Institute, Hangzhou 311215, China

Titanium/steel composite structural materials have the advantages of both materials, and have great advantages in product lightweight, low cost, energy saving and consumption reduction. Therefore, titanium/steel dissimilar metal welding has high economic value and broad applicative prospects. At present, titanium/steel dissimilar metal welding is mainly carried out by brazing, pressure welding and fusion welding. Brazing generally has the problems of low production efficiency and poor strength of welded joints. Pressure welding also has the problem of low welding production efficiency compared with fusion welding, and moreover, strict requirements on the joint form. Fusion welding has stronger adaptability, higher welding production efficiency, better mechanical properties of joints, and is more conducive to industrial production applications. Therefore, for titanium/steel dissimilar metal welding, fusion welding is the most promising technological route at present. This paper summarizes the research status of titanium/steel dissimilar metal fusion welding from the aspects of laser welding, arc welding, electron beam welding, etc., and offers a critical and prospective discussion about the existing problems and future trends.

**Key words** titanium/steel, dissimilar metal welding, fusion welding, laser welding, arc welding

### 0 引言

钛合金因具有密度小、比强度高、耐腐蚀性能好等优点,在石油化工、核电装备、船舶制造等领域得到广泛应用。但钛合金存在焊接性能差、热导率低、价格昂贵等缺点,严重限制了钛合金的广泛应用<sup>[1-3]</sup>。钢作为工业生产中应用最广泛的材料,大多数普通钢材都具有焊接性能好、可加工性能优良、价格低廉等优点,但也存在比强度低、耐腐蚀性能差等缺点。如果能实现两种材料的复合,使复合结构兼具两种材料的优点,例如高比强度、耐腐蚀、高耐磨性等,在产品轻量化、低成本、节能降耗等方面将具有极大的优势<sup>[4-5]</sup>。因此,钛/钢异种金属的焊接研究具有重大的现实意义和广阔的应用前景。

钛/钢异种金属焊接目前主要采用钎焊、压力焊、熔化焊三种方式。对于钛/钢钎焊的研究目前主要集中在工艺优化、新型钎料的开发及过渡金属的加入等方面,但钎焊普遍存在生产效率低、接头强度差等问题,不适用于工程承载结构件<sup>[6-9]</sup>。钛/钢异种金属的压力焊主要涉及电阻焊、扩散焊、爆炸焊等方法,以上焊接方法对接头形式都有严格要求,且结合面容易产生脆硬的金属间化合物,焊接生产效率较低,在工业生产上的广泛应用受限<sup>[10-14]</sup>。近些年焊接工作者针对钛/钢异种金属的熔化焊也开展了大量的研究工作,主要包括电弧焊、电子束焊、激光焊等方法,这些焊接方法的引

人为钛/钢异种金属的焊接提供了新的研究思路,其焊接适用性更强,接头的强度更高,更有利于推动钛/钢异种金属焊接加工的产业化应用<sup>[15-16]</sup>。

### 1 钛/钢异种金属激光焊

钛、钢两种材料在热导率、线膨胀系数等物理性能方面差异较大,两种金属元素的互溶性极差,导致在激光熔化焊接过程中极易产生大量的脆硬金属间化合物(主要是TiFe和TiFe<sub>2</sub>),使得钛/钢异种金属焊接接头的力学性能较差,甚至出现焊后直接开裂的问题<sup>[17]</sup>。为了解决钛/钢异种金属激光焊存在的脆化问题,各国焊接工作者提出了不同的改进方案。

#### 1.1 激光焊接工艺改进

钛/钢异种金属焊接过程中,金属间化合物的产生受焊接温度场的影响很大。因此,可以通过调整激光焊接工艺,改变焊接温度场,从而减小脆硬金属间化合物产生的概率和数量。针对该思路,浙江大学单磊<sup>[18]</sup>采用数值计算和试验验证两种方式,主要从降低激光功率、提高焊接速度两个方面研究了工艺参数对焊接质量的影响。吉林大学史振富<sup>[19]</sup>以301L不锈钢和TA2钛合金异种金属激光焊为研究对象,研究了脉冲频率、脉冲电流、焊接速度、脉冲宽度、激光偏移量等工艺参数对焊缝形貌及组织性能的影响。研究结果表明,适当的激光偏移量可明显改善接头的抗拉强度。吉林大学

基金项目:国家重点研发计划(2023YFE0201400)

This work was financially supported by the National Key Research and Development Program of China (2023YFE0201400).

张岩等<sup>[20]</sup>以 301L 不锈钢和 304 钛合金为母材,研究了激光偏移对钛/钢异种金属激光焊缝力学性能的影响,结果表明通过采用激光偏移的方式可以使焊接接头的抗拉强度提高到 336 MPa。

### 1.2 引入中间层材料

从大多数研究结果来看,仅改变焊接工艺参数对钛/钢异种金属激光焊接接头性能的提高是有限的。为了进一步减少焊缝中金属间化合物的产生,很多学者提出在钛和钢中间增加过渡层材料,将钛和铁两种元素隔离开,从而阻止金属间化合物的生成。从目前的研究来看,钛/钢异种金属焊接使用的中间层材料主要有 Cu、Ni、V、Cr 等几种<sup>[21-22]</sup>。东北大学的李云龙等<sup>[23]</sup>以 Cu 作为中间层金属,采用环形振荡激光(焊接轨迹如图 1 所示)进行钛合金和不锈钢的异种金属焊接,研究了不同激光功率和焊接路径对焊缝温度场的影响。研究表明,通过调整激光功率和环形振荡激光的焊接位置可以获得较为理想的熔池宽度。采用合适的激光偏移量条件可最大限度地减小热影响区的面积,减少钛母材的熔化量,抑制钛-铜金属间化合物的产生,从而提高接头的力学性能。

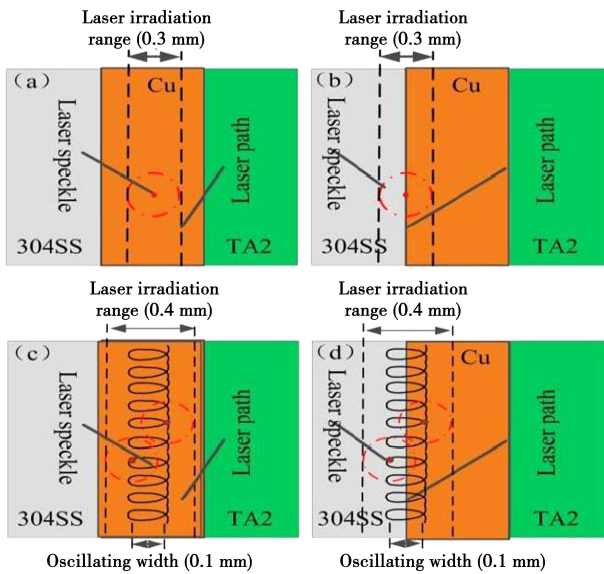


图 1 环形振荡激光焊接轨迹示意<sup>[23]</sup>  
**Fig.1** Schematic illustration for the trajectory of the circular oscillating laser welding<sup>[23]</sup>

日本国家先进工业科学技术研究院 Seto 等<sup>[24]</sup>以 Cr 为中间层材料,研究了钛/钢异种金属激光焊过程中 Cr 的稀释率对焊缝金属间化合物形成的影响。研究表明,通过调整激光的偏移量可以改变 Cr 的稀释率,当 Cr 的稀释率低于 40% 时可以抑制金属间化合物的生成。为了解决激光偏移导致未熔合的缺陷问题,向焊缝中添加 Ti 丝(如图 2 所示),最终获得了理想的 Cr 稀释率,提高了焊接接头的力学性能。德国卡塞尔大学 Wiegand 等<sup>[25]</sup>以钼板作为中间层材料进行了钛/钢激光搭接焊,如图 3 所示。通过改变激光脉冲时间和脉冲峰值功率,可获得无裂纹的焊缝,并且单条长度 2.5 mm 的焊缝的抗剪能力可以达到 140 N。搭接接头上布置四条相邻的焊缝,最大载荷可以达到 320 N,超过了不锈

钢母材的强度。吉林大学张岩和南京理工大学吕攀<sup>[26-27]</sup>还采用了两种或三种材料作为中间层进行钛/钢异种金属的激光焊研究,结果表明 Cu-V 复合中间层可以有效阻止 Ti 元素与 Fe 元素的接触,但接头的力学性能仍不是特别理想。采用 Ta-V-Fe 复合中间层结合双道激光焊接(如图 4 所示),可以明显提高钛/钢异种金属焊接接头的拉伸性能,抗拉强度达 627 MPa。

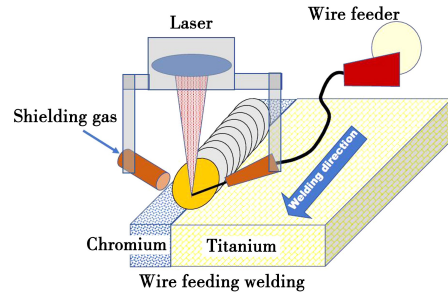


图 2 激光填丝焊示意图<sup>[24]</sup>  
**Fig.2** Laser wire filling welding diagram<sup>[24]</sup>

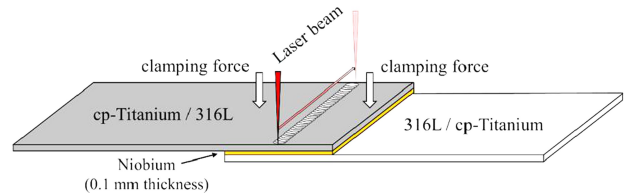


图 3 激光搭接焊示意图<sup>[25]</sup>  
**Fig.3** Laser lap welding diagram<sup>[25]</sup>

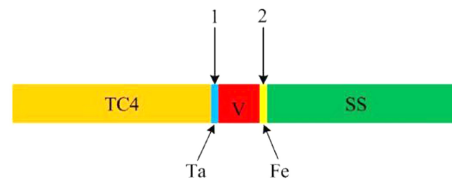


图 4 Ta-V-Fe 复合中间层双道激光焊接示意图<sup>[27]</sup>  
**Fig. 4** Ta-V-Fe composite intermediate layer double laser welding diagram<sup>[27]</sup>

### 1.3 其他改进方案

为了提高钛/钢异种金属激光焊接接头的性能,焊接工作者还提出其他的一些改进方案。东北大学李云龙等<sup>[28]</sup>对钛/钢异种金属激光焊接接头分别施以 400、550、700 °C 下保温 30 min 的焊后热处理,发现热处理后接头的伸长率从 0.3% 提高到 2.21%。当热处理温度为 550 °C 时,接头的平均抗拉强度达到 340 MPa,断裂伸长率为未经热处理时的 7.4 倍。华中科技大学高明等<sup>[29]</sup>采用激光电弧复合焊的方法,通过向焊缝中填入 Cu<sub>3</sub>Si 焊丝,可以将焊接接头的抗拉强度提高到 212 MPa,但是由于焊接方法热输入量相比单纯的激光焊较大,焊缝内还是会形成大量的金属间化合物,从而导致接头力学性能恶化。

## 2 钛/钢异种金属电弧焊

### 2.1 钛/钢异种金属 TIG 焊

与激光焊相比,采用钨极惰性气体保护焊(TIG 焊)进行钛/钢异种金属的焊接难度更大,因为 TIG 焊电弧能量密度

小,热影响区大,Ti和Fe反应充分,更容易生成脆硬的金属间化合物。大连理工大学郝晓虎等<sup>[30-31]</sup>采用富Cu合金焊丝来抑制钛/钢异种金属TIG焊焊缝中脆硬金属间化合物的产生,结果表明随着合金焊丝中Ni元素含量的增加,接头抗拉强度升高,这与Ni元素可以抑制TiFe<sub>2</sub>脆性相的生成有关,采用Cu-Ni复合填充材料可最终获得无脆性金属间化合物生成的焊缝,接头平均抗拉强度达到432 MPa。塔克西拉工程技术大学Jawad等<sup>[32]</sup>采用脉冲TIG焊接方法,以Cu、Nb材料作为填充材料进行了钛/钢异种金属的焊接,研究了焊接速度、填充材料的送给方式及电弧偏移对焊缝微观组织和力学性能的影响。结果表明,在焊接速度为200 mm/min、以Nb作为过渡层金属、以Cu作为焊丝、电弧无偏移的条件下获得的接头抗拉强度最高,达到327 MPa。

针对钛/钢异种金属TIG焊,国内焊接工作者根据金属高熵化思路,提出通过向焊缝中引入高熵合金来改善焊缝的力学性能。中国石油大学的裴龙基<sup>[33]</sup>以Co<sub>13</sub>Cr<sub>28</sub>Cu<sub>31</sub>Ni<sub>28</sub>高熵合金作为过渡层材料进行了钛/钢异种金属的脉冲TIG焊研究,结果表明高熵合金在焊接过程中可以避免Ti和Fe的接触,与高熵合金作为填充材料相比,接头的抗拉强度提高了20.4%。西安理工大学翟秋亚等<sup>[34-35]</sup>通过基于密度泛函理论的热力学第一性原理设计并制备出塑性良好的多组元Ti<sub>10</sub>Fe<sub>29</sub>Ni<sub>32</sub>Cu<sub>22</sub>V<sub>7</sub>合金焊材并进行钛/钢异种金属TIG焊研究,结果表明采用该合金焊材可以避免TiFe和TiFe<sub>2</sub>金属间化合物的形成,对焊缝的力学性能也有一定的提升。高熵化是一个很有前景的研究思路,但目前的研究结果还不是特别理想,有待进一步开发成分更为合适的高熵合金。

## 2.2 钛/钢异种金属CMT焊

冷金属过渡焊接技术(CMT焊)具有焊接过程稳定、焊接热输入低的优点,可以降低异种金属焊接过程中冶金反应速率,从而减少金属间化合物的产生。沈阳理工大学张义弓等<sup>[36-37]</sup>在进行钛/钢异种金属焊接时,先在16MnR表面堆焊一层Ni,然后采用冷金属过渡焊接技术与钛合金TA2进行搭接焊,结果表明Ni层可在一定程度上减少金属间化合物的产生,但对焊缝力学性能的提高有限。克兰菲尔德大学Goncalo等<sup>[38]</sup>使用CuSi<sub>3</sub>焊丝在钛合金TC4和不锈钢316L之间进行CMT焊研究,结果表明接头的最大抗拉强度可以达到200 MPa,但接头力学性能相比母材还有待提高。兰州理工大学常敬欢等<sup>[39-41]</sup>分别以Cu基和Cu-Ni基材料作为填充材料进行了钛/钢异种材料的CMT焊,发现两种填充材料的使用均可以提高接头的抗剪强度,降低焊缝中脆硬金属间化合物的生成,但同时会产生Cu-Al-Fe-Ni-Ti金属间化合物,带来晶间腐蚀问题。

## 3 钛/钢异种金属电子束焊

电子束作为一种高能束,用于焊接时具有能量密度大、焊接热输入低、焊接变形小、焊接残余应力小等优点,且电子束焊在真空环境中进行,因此,电子束焊的焊缝纯净度较高,不易产生气孔、夹渣等焊接缺陷。另外,电子束焊的参数精准易控,工艺适应性强,焊接工艺可重复性较好,在异种金属的焊接领域具有较好的应用前景,目前逐渐成为研究热点<sup>[42-43]</sup>。

国内哈尔滨工业大学较早开展钛/钢异种金属电子束焊的研究。段潇恢<sup>[44]</sup>首先采用数值模拟的方式研究了TA15钛合金和304不锈钢异种金属电子束焊接过程中的温度场和应力场,结果表明两母材直接的对接焊与中间添加填充层的对接焊具有基本一致的温度场特征,但添加填充层时熔池的峰值温度明显降低,且两侧的温度梯度明显减小,这一特征对接头性能有利。同时还发现随着中间填充层厚度的增加,焊缝的熔宽逐渐减小,且不锈钢侧的熔宽始终比钛合金侧小,填充层的厚度要控制在0.7 mm以内。张艳桥等<sup>[45-46]</sup>设计了添加形状优化的Cu/V填充层和QCr0.8过渡段两种形式的焊接接头(如图5所示),进行钛/钢异种金属电子束焊,结果表明采用Cu/V复合填充层的接头平均抗拉强度为298.9 MPa,采用QCr0.8过渡段的接头平均抗拉强度为338 MPa;当采用Cu-Cr/V复合中间层且先进行V一侧的焊接时,获得的接头具有304SS/ss(Fe, Cr)/Cu(s, s)/V(s, s)/Cu(s, s)/ss(Ti, V)的组织结构,平均抗拉强度较高,达419 MPa。

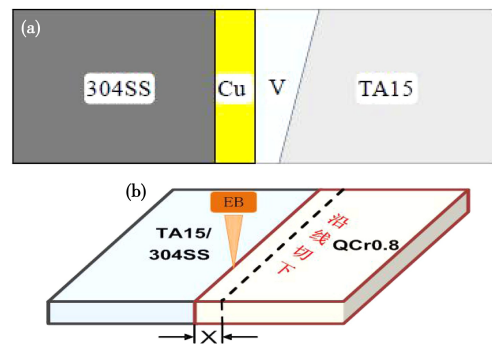


图5 添加(a)形状优化的Cu/V复合填充层和(b)QCr0.8过渡段的焊接接头形式<sup>[45]</sup>

Fig.5 Welding joint form of (a) shape-optimized Cu/V composite filler layer and (b) QCr0.8 transition segment added<sup>[45]</sup>

德国卡塞尔大学Wiegand等<sup>[47]</sup>分别采用Ta、Nb、Hf三种材料作为中间层进行钛/钢异种金属电子束焊接研究,主要研究了中间层材料种类和电子束偏移量对接头组织性能的影响。结果表明,当电子束偏移量为0.075 mm时,接头的抗拉强度最好;以三种材料作为中间层获得的接头中,Nb作中间层时接头平均抗拉强度最高,达453 MPa,Hf作中间层时平均抗拉强度最低,约为325 MPa。西南交通大学方永建<sup>[48]</sup>分别以Cu/Nb复合箔材、V/Fe复合箔材作为过渡层材料进行钛/钢的异种金属电子束焊,发现Nb箔材厚度的增加可以促进钛合金侧焊缝区中Ti固溶体的形成,有利于提高焊接接头的韧性;V/Fe复合中间层的引入可以有效避免焊缝中脆性金属间化合物的产生,提高接头的焊接质量。

## 4 存在的问题与展望

随着经济社会的发展,以及低碳、环保的发展思路受到越来越多的重视,钛/钢异种金属的焊接需求也越来越多。近几年,钛/钢异种金属熔化焊的研究虽取得了一定的成就,但在很多方面仍存在问题。亟需解决的问题主要包括:①未找到比较合适的焊接方法和焊接工艺,当前所有的熔化焊接方法都无法完全避免生成金属间化合物、焊缝力学性能较差的问题。②多采用添加中间层的手段来减少金属间化合物

的产生,但中间层在阻止 Ti 和 Fe 之间产生金属间化合物的同时,可能又会生成别的金属间化合物。③添加中间层来抑制金属间化合物在理论上具有一定可行性,但会给焊接生产带来许多困难,例如中间层的制备,中间层金属与钛、钢之间的组对,焊接工序的增多,焊接生产效率的降低。并且对于一些复杂结构的焊接,制备形状尺寸合适的中间层难度更大。④研究主要集中在激光焊、电子束、TIG 焊、CMT 焊等几个方面,且以实验室研究为主,更多关注焊接冶金、接头力学性能方面,聚焦于工程应用的实践研究很少见。⑤研究结果大多缺乏工艺稳定性和可重复性,相关成果的工业应用价值不大。

针对当前钛/钢异种金属熔化焊研究存在的问题,在今后的研究中可以重点开展以下几方面的工作:①根据合金相图和金属材料的物理化学性能筛选更为合适的中间层金属。单一成分的中间层金属很难实现钛/钢异种金属的良好焊接,可以借助金属高熵化的原理,制备具有多种成分的复合过渡层,以实现过渡层金属与钛、钢均可以良好互溶的目的。②由于过渡层金属在工程应用上的局限性,可以考虑以填充材料的形式过渡到焊缝内,例如焊丝、焊条等。选择合适成分的过渡金属制成填充材料在焊接过程中送入熔池内,从而实现钛/钢异种金属的良好焊接。这种方式可以避免过渡层金属对形状尺寸要求高、工序复杂、组对要求高的局限性,在复杂接头形式上也可以灵活应用。③焊接方法方面,还可以考虑等离子弧焊、焊条电弧焊、MIG/MAG 焊等比较常见的焊接方法,尤其是焊条电弧焊和 MIG/MAG,这些方法可以很方便地向焊缝填充过渡金属。④重视焊接工艺稳定性和可重复性方面的研究。⑤加强钛/钢异种金属熔化焊在工程应用方面的研究,例如工艺参数的容忍度、组对装配精度的要求、焊接接头的综合力学性能、工艺评定要求等方面。

## 参考文献

- Zhang Y, Bi Y B, Zhou J P, et al. *International Journal of Materials Research*, 2021, 112(10), 826.
- 胡奉雅, 许国敬, 陈伟, 等. *焊接学报*, 2021, 42(6), 30.
- 钟素娟, 张丽霞, 龙伟民, 等. *电焊机*, 2020, 50(9), 118.
- 高成龙, 李宪爽, 徐祥久. *电站辅机*, 2024, 45(1), 23.
- 余腾义, 陈树海, 刘珂, 等. *钢铁钒钛*, 2023, 44(2), 92.
- Li Y Q, Chen Z, Liu S H, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26, 8192.
- 刘夫, 李士凯, 蒋鹏, 等. *材料开发与应用*, 2020, 35(2), 67.
- Chu Q L, Xia T, Zhang L, et al. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(8), 6509.
- Mao G, Zheng K K, Shen C, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15, 6758.
- Taufiqurrahman I, Ginta L T, Mustapha M. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 14, 1129.
- Iqbal T, Azlan A, Mazli M, et al. *Materials*, 2021, 14(5), 1563.
- 邵甄腴, 陈天赐, 宋庭丰, 等. *材料热处理学报*, 2017, 38(5), 79.
- 郭悦, 高福洋, 高奇, 等. *材料开发与应用*, 2020, 35(2), 62.
- 蔡俊清. *轻工科技*, 2021, 37(7), 14.
- 吕攀, 王克鸿, 朱和国. *热加工工艺*, 2017, 46(13), 26.
- 宋庭丰, 蒋小松, 莫德锋, 等. *材料导报*, 2015, 29(11), 81.
- 祝要民, 李青哲, 邱然锋, 等. *电焊机*, 2016, 46(11), 78.
- 单磊. TC4 钛合金—钢复合激光焊接工艺研究. 硕士学位论文, 浙江大学, 2006.
- 史振富. 不锈钢 301L 和工业纯钛 TA2 激光焊接头组织及性能研究. 硕士学位论文, 吉林大学, 2021.
- Zhang Y, Zhou J P, Sun D Q, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(2), 1662.
- Zhang L, Wang Q, Guo X, et al. *Materials*, 2023, 38(16), 1.
- 杨胜, 李军兆, 刘一搏, 等. *电焊机*, 2020, 50(8), 101.
- Li Y L, Di H S, Chen L Q, et al. In: Ninth International Conference on Mechanical Engineering, Materials, and Automation Technology (MMEAT 2023). Dalian, 2023, pp. 12801.
- Seto N, Tachibana K, Nakano K, et al. *ISIJ International*, 2024, 64(3), 587.
- Wiegand M, Kimm A, Sommer N, et al. *Photonics*, 2023, 10(9), 1.
- 吕攀. 不同中间层对钛—钢激光焊接焊缝组织与性能的影响. 硕士学位论文, 南京理工大学, 2017.
- 张岩. 钛合金/不锈钢异种材料激光焊接头微观组织及力学性能的研究. 博士学位论文, 吉林大学, 2019.
- Li Y L, Di H, Wang X N, et al. *Materials Today Communications*, 2023, 36, 1.
- Gao M, Chen C, Wang L, et al. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2015, 46(5), 2007.
- 郝晓虎. TC4 钛合金/304 不锈钢薄板钨极氩弧焊接头组织及性能研究. 博士学位论文, 大连理工大学, 2020.
- Hao X H, Dong H G, Yu F Y, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 13, 48.
- Jawad M, Jahanzaib M, and Ilyas M. *Materials Research Express*, 2022, 9, 1.
- 裴龙基. 基于高熵合金中间层的钛/钢异种金属焊接性研究. 硕士学位论文, 中国石油大学(华东), 2021.
- 翟秋亚, 刘帅宾, 田甜, 等. *焊接学报*, 2021, 42(4), 79.
- 徐佳佳, 惠风鸽, 翟秋亚. 2016 年陕西省焊接学术会议. 西安, 2016, pp. 217.
- 张义弓, 刘爱国. *沈阳理工大学学报*, 2016, 35(6), 39.
- 张义弓. 钛/钢异种金属冷金属过渡焊接工艺研究. 硕士学位论文, 沈阳理工大学, 2016.
- Pardal G, Ganguly S, Williams S, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86(5-8), 1139.
- 常敬欢, 曹睿, 闫英杰. *焊接学报*, 2021, 42(6), 44.
- 常敬欢. 钛/钢冷金属过渡焊接头的连接机理及腐蚀行为研究. 博士学位论文, 兰州理工大学, 2021.
- Chang J H, Cao R, Yan Y. *Materials*, 2019, 12(15), 2413.
- 熊进辉, 吴敏华, 安飞鹏, 等. *热加工工艺*, 2016, 45(17), 13.
- Tomashchuk I, Sallamand P, Belyavina N, et al. *Materials Science & Engineering A*, 2013, 585, 114.
- 段潇恢. 钛/钢异种金属电子束焊接温度场与应力场模拟研究. 硕士学位论文, 哈尔滨工业大学, 2011.
- 张艳桥. 钛合金与不锈钢电子束焊接工艺优化研究. 硕士学位论文, 哈尔滨工业大学, 2013.
- 王廷, 张秉刚, 张艳桥, 等. *焊接学报*, 2014, 35(8), 71.
- Michael W, Linda M, Niklas S, et al. *Welding in the World*, 2022, 67(1), 77.
- 方永建. 4J29/4J36 铁基合金与 TC4 钛合金异种金属焊接组织及性能研究. 硕士学位论文, 西南交通大学, 2020.



刘自刚, 通信作者, 高级工程师, 国际焊接工程师。2013 年毕业于兰州理工大学, 获工学硕士学位。现就职于浙江巴顿焊接技术研究院, 主要从事新型高效焊接方法、焊接自动化装备方面的研发工作。已发表论文 10 余篇, 获授权发明专利 14 项、实用新型专利 22 项。