

20Cr2Ni4A-20 g 异种钢 Slab CO₂ 激光 深熔焊接工艺研究

石 岩 刘 佳 张 宏

(长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 为提高 20Cr2Ni4A-20 g 异种钢中厚板的焊接效率,采用 5 kW Slab CO₂ 激光器对 20Cr2Ni4A 合金渗碳钢与 20 g 锅炉钢进行异种钢激光深熔焊工艺研究。研究了离焦量、保护气体配比、激光功率和焊接速度对焊缝形貌的影响。采用材料试验机对异种钢激光焊接焊缝拉伸性能进行了测试,采用扫描电子显微镜对断口微观形貌进行了表征。研究发现通过调节离焦量、同轴保护气体成分、激光功率和焊接速度可以优化焊缝成形,最终获得了厚度为 8 mm 的 20Cr2Ni4A-20 g 异种钢 CO₂ 激光焊接的最佳工艺参数为:离焦量为 +2 mm,激光功率为 5 kW,焊接速度为 2.5 m/min,保护气体采用由 5 L/min He 与 20 L/min Ar 组成的混合气体,在此工艺参数条件下,激光焊接接头的抗拉强度高于 20 g 母材,母材为韧性断裂,断口呈典型的韧窝形态。

关键词 激光技术;激光焊接;异种钢;深熔焊;工艺参数;拉伸强度

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0603011

Study on Deep Penetration Laser Welding of 20Cr2Ni4A-20 g Dissimilar Steel by Slab CO₂ Laser

Shi Yan Liu Jia Zhang Hong

(College of Electromechanical Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract The deep penetration laser welding of 20Cr2Ni4A-20 g dissimilar steel is studied to increase the welding efficiency. The effects of laser welding parameters on the morphology of welding seam are investigated using 5 kW Slab CO₂ laser. The tensile strength is tested by material testing machine, and the fracture morphologies are observed by scanning electron microscopy. The results show that the welding joint can be optimized by adjusting the defocusing distance, coaxial shielding gas flow rate, laser power and welding speed. The optimum process parameters of 8 mm thickness of 20 g and 20Cr2Ni4A dissimilar steel are: a laser power of 5 kW, a welding speed of 2.5 m/min, a shielding gas of 5 L/min He and 20 L/min Ar and a focusing distance of +2 mm. Under the optimum process parameters, the tensile strength of the welded joint is better than 20 g matrix, which is ductile fracture and the fracture presents dimple.

Key words laser technique; laser welding; dissimilar steel; penetration welding; welding parameters; tensile strength

OCIS codes 000.2658; 140.3390; 350.3390

1 引 言

齿轮是机械传动系统中不可缺少的重要零部件,为了减小体积、改善结构工艺性能、合理利用材料,很多复杂结构齿轮常常采用分体加工再组焊成形工艺。由于这类分体结构所预留的焊接空间较

小,焊接变形要求更为苛刻。因此,对于此类精密复杂结构零部件的焊接主要是电子束焊及激光束焊^[1~4]。目前已有许多关于车用齿轮激光焊接研究与应用的报道^[5,6],但许多研究与应用仍局限于小熔深的焊接,对于深熔焊接国内厂家普遍采用的是

收稿日期: 2011-03-18; 收到修改稿日期: 2011-05-08

作者简介: 石 岩(1972—),男,工学博士,副教授,主要从事激光加工技术方面的研究。E-mail: shiyan@cust.edu.cn

电子束焊接^[7]。由于电子束焊接存在工序繁杂、生产效率低和工艺成本高等缺点,因而不能被广泛应用。

近年来随着大功率激光的出现,尤其是高功率 Slab CO₂ 激光器的研究,高的光束质量使很多以前 Nd:YAG 和轴快流激光无法实现的大熔深高速焊接成为可能。由于 5 kW 的 Slab CO₂ 激光器在国内研究时间较短,有关其深熔焊接工艺的研究及报道还很少。本文以某重型机械传动系统中复杂结构分体齿轮制造所用的 20Cr2Ni4A 和 20 g 两种高级优质合金钢为研究对象,通过研究激光束离焦量、保护气体成分、激光功率及焊接速度等工艺参数对焊接

质量的影响,理论探索及总结 5 kW Slab CO₂ 激光焊接工艺对异种钢激光深熔焊接质量影响的内在规律,解决其焊接工艺参数优化关键问题,为激光焊接技术的深入广泛应用提供技术支持与参考。

2 试验材料和方法

试验所用材料为 20Cr2Ni4A 高级优质合金渗碳钢和 20 g 锅炉常用钢,其材料成分如表 1 所示。试样为 80 mm×30 mm×12 mm 平板。激光设备采用 5 kW Slab CO₂ 激光器,输出激光模式为基模。应用自制夹具将工件装夹在四轴联动数控机床上进行激光对接焊接试验。

表 1 20 g 钢和 20Cr2Ni4A 钢主要成分(质量分数,%)

Table 1 Composition of 20 g steel and 20Cr2Ni4A steel (mass fraction, %)

	C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	Fe
20Cr2Ni4A	0.17~0.23	1.25~1.65	3.25~3.65	0.17~0.37	0.30~0.60	≤0.03	≤0.03	Bal.
20 g	0.17~0.24	—	—	0.15~0.30	0.50~0.90	≤0.035	≤0.035	Bal.

试验方案设计:首先根据文献查阅和前期工艺摸索,研究在激光功率 P 为 4 kW、焊接速度 v 为 1.5 m/min、保护气体流量 L 为 25 L/min[Ar 与 He 的体积(V)比为 10:15]条件下,离焦量对焊缝尺寸的影响,确定最佳离焦量。然后依次研究保护气体配比对焊缝形貌的影响,确定最佳保护气体配比;研究激光功率对焊缝形貌的影响,确定最佳激光功率;研究焊接速度对焊缝形貌的影响,确定最佳焊接速度。最后用试验确定的最佳工艺参数焊接 8 mm 厚 20Cr2Ni4A-20 g 样件,并在拉伸试验机上测试拉伸性能。

焊接前用丙酮将试件表面特别是焊接面清洗干净,以除去表面的杂物和油污等。焊接后将焊接试样用线切割机在焊缝处横向切开,经研磨、抛光和腐蚀后制备焊缝观察试样,采用 OLS3000 型激光共聚焦显微镜观察焊接接头截面形貌,并测量焊缝熔深和焊宽等参数。

根据 GB/T 228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》,将最佳工艺参数试件沿垂直焊缝方向用线切割机及磨床打磨制备出 3 个 120 mm×12.5 mm×5 mm 标准比例,试样如图 1 所示。图 1(a)所示试样一是为了比较激光焊接后,焊缝与母材抗拉强度的大小。图 1(b)所示试样二是为了测试激光焊接接头拉伸强度值。拉伸试验在美国 MTS 810.22M 电、液伺服材料试验系统上进行。

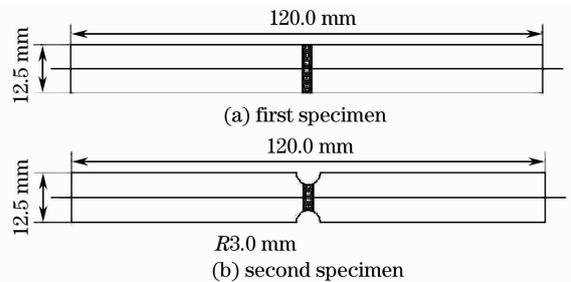


图 1 焊接接头拉伸试样尺寸

Fig. 1 Tensile specimen size of welded joints

3 试验结果及分析

3.1 离焦量对焊缝形貌的影响

作用于工件表面的功率密度除了和激光束的焦斑功率密度有关外,还取决于工件表面和焦平面的相对位置即离焦量 D_f ,定义焦平面在工件表面之上为正离焦,当焦平面在工件表面以下时为负离焦。不同离焦量的激光作用于焊接试样内部的功率密度不一样。图 2,3 分别为在激光功率 4 kW、焊接速度 1.5 m/min、保护气体流量 25 L/min [$V(\text{Ar}):V(\text{He})=10:15$]条件下,不同离焦量的焊缝表面及横截面形貌照片。由图 2,3 可见,随着离焦量从 +4 mm 到 -1 mm 逐渐减小,焊缝表面逐渐变得平直、连续。图 4 为由图 3 所测得的离焦量对焊缝形貌尺寸的影响曲线。由图 4 可见,随着离焦量从 -1 mm 到 +4 mm 变化,焊缝的熔深先增加后减小,

而焊缝宽度逐渐变窄,当离焦量位于+2 mm 时,焊缝的熔深达到最大。

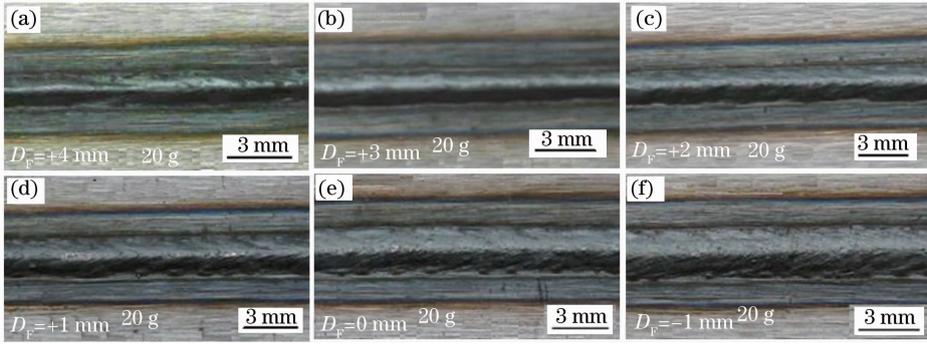


图 2 离焦量对焊缝表面形貌的影响

Fig. 2 Effect of defocusing on the surface of weld seam

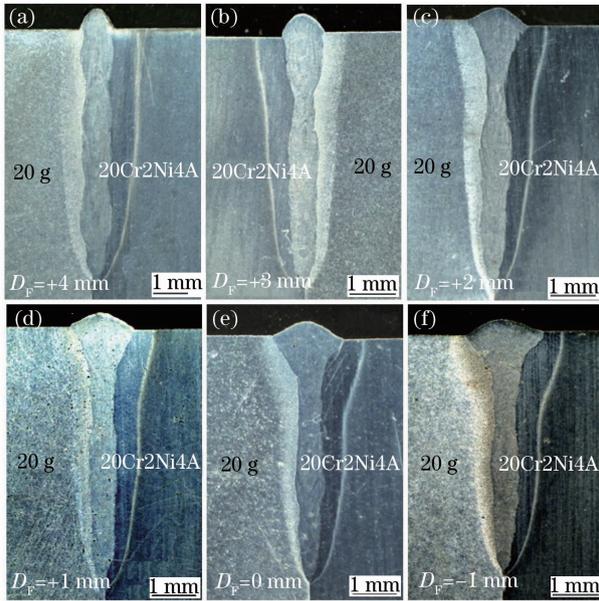


图 3 离焦量对焊缝截面形貌的影响

Fig. 3 Effect of defocusing on the cross section of weld seam

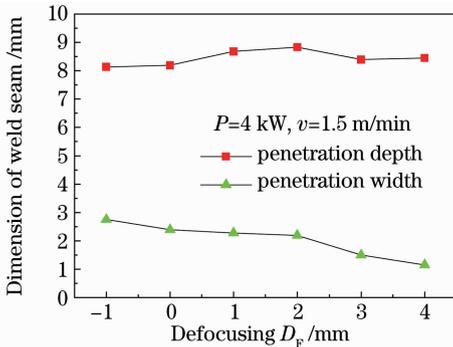


图 4 离焦量对焊缝形貌尺寸的影响曲线

Fig. 4 Effect of defocusing on the morphology of weld seam

这种变化是由 Slab CO₂ 激光器高的光束质量引起的^[8]。离焦量不仅影响工件表面光斑的大小及激光功率密度分布,而且影响光束的入射方向,因而

对焊缝形状、熔深和横截面积有很大影响,离焦量的选择要根据激光的光束质量来进行。在激光深熔焊接时,主要是通过“小孔”壁的非涅耳反射来实现金属与能量的耦合,将入射到小孔内的功率几乎全部吸收,这种机制叫作非涅耳吸收。图 5 为一个简单锥形小孔孔壁上前两次非涅耳反射的几何光学示意图,锥形小孔的圆锥半角为 α ,入射到圆锥顶部的激光入射方向与圆锥轴线方向的夹角为 γ , ϕ 表示入射光线的入射角。

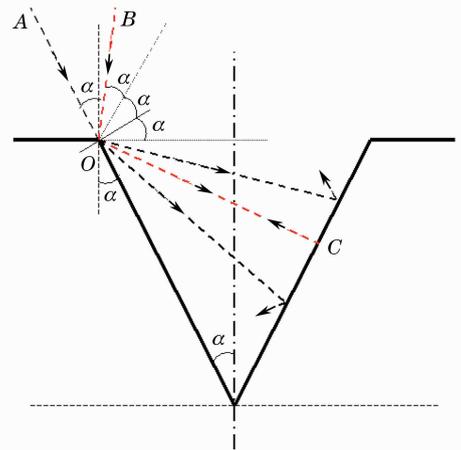


图 5 锥形小孔孔壁上非涅耳反射的几何光学示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the geometrical optics of Fresnel reflections in a cone

由几何光学可以说明,当 $\alpha \leq \pi/6$ 时,只有发散状态的激光束才可以完成在小孔壁的多次反射,也即深宽比大约超过 0.9 时,即使在正离焦情况下,激光束以发散状态入射到工件表面,仍然可以使激光束不断向小孔内部耦合,从而达到更大熔深,而 Slab CO₂ 激光具有很强“穿透性”,在所有试验参数下深宽比均超过 3。由此可以看出,深熔焊接过程中离焦量的变化主要影响小孔对激光功率密度的吸收(非涅耳吸收),当离焦量为负值时,工件表面激光

功率密度和同值正离焦相等,但通过小孔壁的非涅耳吸收进入到小孔内的能量却减少,工件表面获得能量较多,因而表面金属熔化较多,熔深较小,这样就表现为如图 3(e),(f)所示负离焦时的大焊宽丁字状焊缝;当采取正离焦时,有利于激光功率密度向小孔内部耦合,能量几乎被小孔吸收,表面获得能量较少,因而熔深较大,焊宽很小,深宽比大,显示出如图 3(a)所示的大深宽比焊缝,焊缝熔池两侧壁近似平行,且不存在负离焦量时的“鼓腰”焊缝,如图 6 所示。

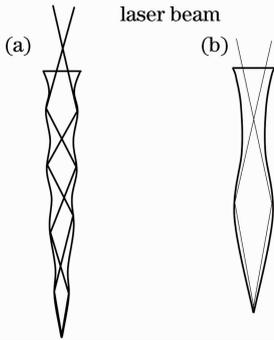


图 6 (a)正(b)负离焦量对熔池形状及熔深的影响

Fig. 6 Effect of (a) positive and (b) negative defocusing on the welding shapes

当离焦量为 +4 mm 时,出现了连续性较差的珠状窄焊缝。随着离焦量的再次增加,焊缝的连续性逐渐下降。因此,当离焦量为 +2 mm 时,可以获得焊缝表面质量好,且熔深较深的焊缝,因此选取 +2 mm 为最佳离焦量。

3.2 保护气体的影响

同轴保护气体主要用于吹散焊缝表面的等离子体气体,减少等离子体对激光的吸收、散射和折射,同时起到隔绝空气,防止氧化的作用。在焊接过程

中,比较常用的侧吹气体有 N_2 , He 和 Ar 等。其中对减弱等离子体云的效果由好到坏依次排列为 $He > N_2 > Ar$ 。由于 Ar 容易电离,所以对等离子体云的减弱效果不明显。 N_2 , He 和 Ar 密度的大小关系为 $\rho(Ar) > \rho(N_2) > \rho(He)$,所以它们对焊缝的保护效果好坏依次为 $Ar > N_2 > He$ 。其中只有 Ar 的密度比空气大,所以保护效果比其他两种气体好很多。

采用 Ar 和 He 的混合气体进行同轴保护。图 7 为在离焦量 +2 mm、激光功率 4 kW、焊接速度 1.5 m/min 条件下,不同保护气体配比(总流量 25 L/min)的焊缝表面形貌照片。由图 7 可见,保护气体为纯 Ar 气时,焊缝表面凸起较平,熔宽和热影响区很大。随着 He 气比例逐渐增加,熔宽和热影响区不断减小。图 8 为其横截面形貌照片。图 9 为由图 8 所测得的焊缝形貌尺寸。从图 8,9 中可以看出,当 He 的体积分数小于 20% 时,随着保护气体中 He 浓度的增加,焊缝的熔深显著增加,熔宽显著变窄。这是由于 He 不易发生电离,随着 He 的浓度的增加,保护气体整体防电离的能力增强,在吹散等离子体的同时保护气体被电离的量减少,因此,整体等离子体的量在减少。所以,等离子体对激光的吸收、散射和折射降低,更多的激光能量可以到达被加工工件表面,从而获得更大的熔深。随着等离子体的减少,等离子体对焊缝表面的热作用下降,因此熔宽变窄。当 He 的体积分数大于 20% 时,焊缝的熔深仍在增加,熔宽仍在变窄。但是增加和变窄的幅度较小,几乎可以忽略,且焊缝的表面平整性、均匀性和连续性下降明显。因此,保护气体采用 5 L/min 的 He 与 20 L/min 的 Ar 的混合气体时,可以获得较好的表面形貌和较大的熔深,且成本较低。

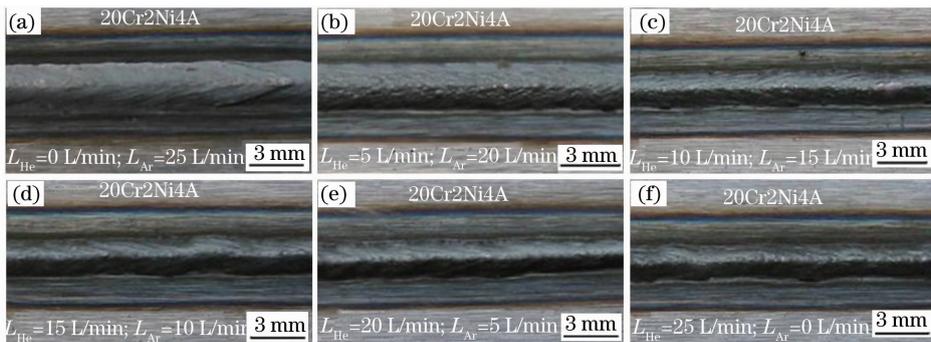


图 7 保护气体对比对焊缝表面形貌的影响

Fig. 7 Effect of shielding gas proportion on the surface of weld seam

3.3 激光功率的影响

在焊接速度不变的前提下,随着激光功率的增

大,功率密度变大,激光的熔透能力增强。图 10,11 分别为在离焦量 +2 mm、保护气体流量 25 L/min

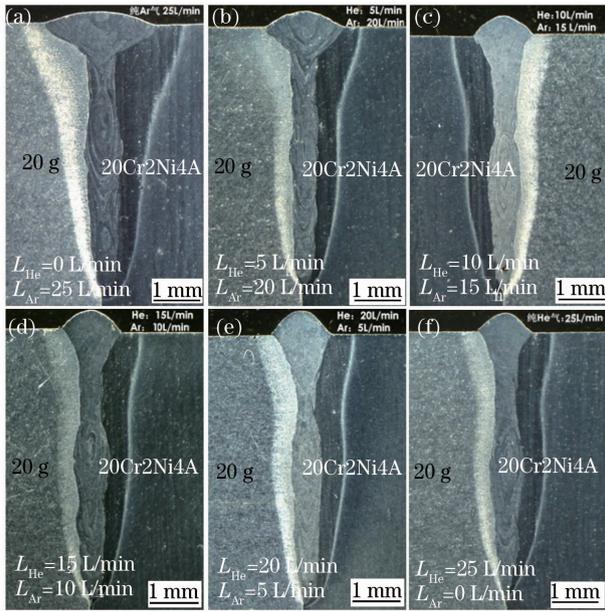


图 8 保护气体配比对焊缝截面形貌的影响
Fig. 8 Effect of shielding gas proportion on the cross section of weld seam

[V(He):V(Ar)=5:20]、焊接速度1.5 m/min条

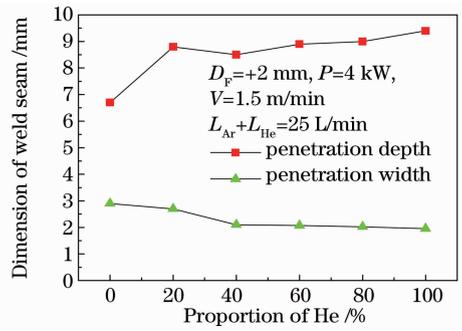


图 9 保护气体对比对焊缝形貌尺寸的影响曲线
Fig. 9 Effect of shielding gas proportion on the morphology of weld seam

件下,不同激光功率的焊缝表面和横截面形貌照片。由图 10可看出,各功率条件下焊缝均可获得较好的表面质量,无飞溅产生,且随着功率的增加焊缝表面变得平滑。图 12 为由图 11 所测得的焊缝形貌尺寸。由图 11,12 可以看出,随着激光功率的增加,焊缝的熔深呈直线上升,熔宽先减小后增大。为增加焊接熔深,提高焊接速度,更加有效地利用大功率激光器,激光深熔焊接最佳焊接功率选择 5 kW。

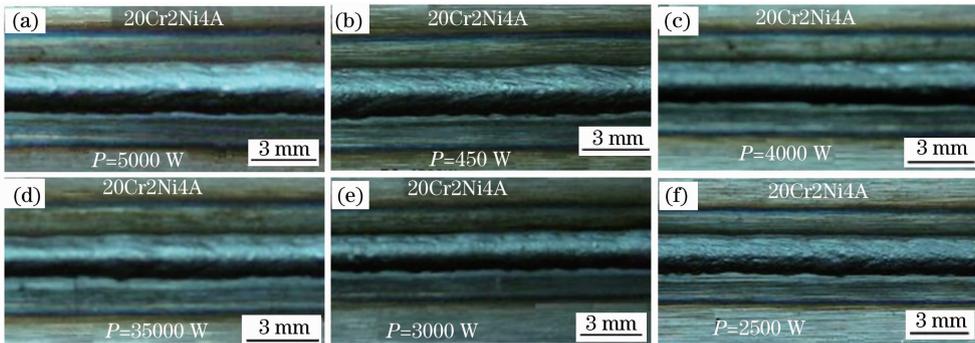


图 10 激光功率对焊缝表面形貌的影响
Fig. 10 Effect of laser power on the surface of weld seam

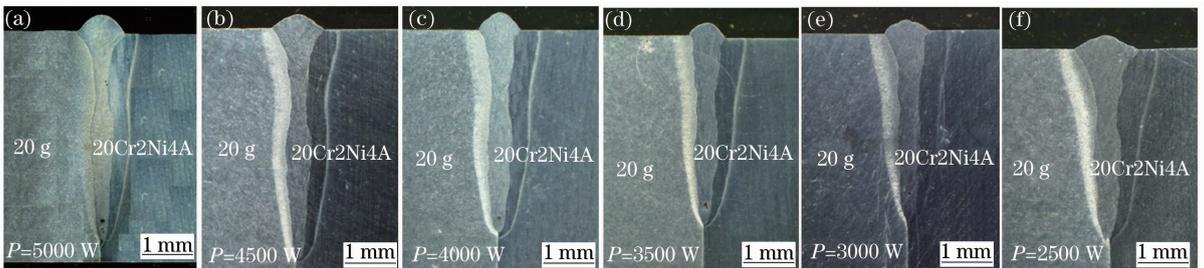


图 11 激光功率对焊缝截面形貌的影响
Fig. 11 Effect of laser power on the cross section of weld seam

3.4 焊接速度的影响

图 13,14 分别为在离焦距+2 mm、保护气体流量 25 L/min[V(He):V(Ar)=5:20]、激光功率 5 kW条件下,不同焊接速度的焊缝表面和横截面形貌照片。由图 13 可看出,激光功率一定时,焊接速

度过低,焊缝金属熔化烧损比较严重,焊缝及热影响区很宽,焊缝表面横向与纵向的不平度急剧增加;随着焊接速度的增加,焊缝的不平度减小,表面状态得以改观。图 15 为由图 14 所测得的焊缝形貌尺寸。由图 14,15 可以看出,随着焊接速度的增加,焊缝熔

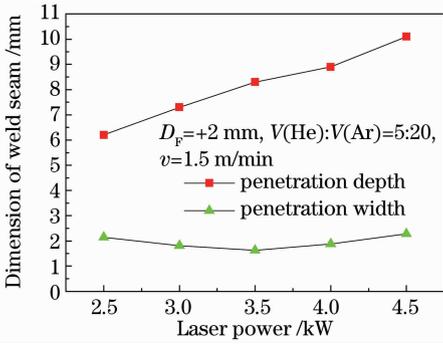


图 12 激光功率对焊缝相貌尺寸的影响曲线
Fig. 12 Effect of laser power on the morphology of weld seam

深变浅, 熔宽变窄。这是由于当焊接功率不变时, 随

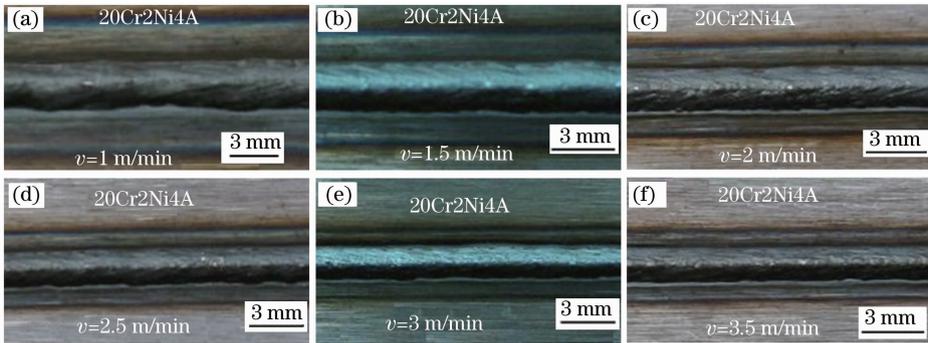


图 13 焊接速度对焊缝表面形貌的影响

Fig. 13 Effect of welding speed on the surface of weld seam

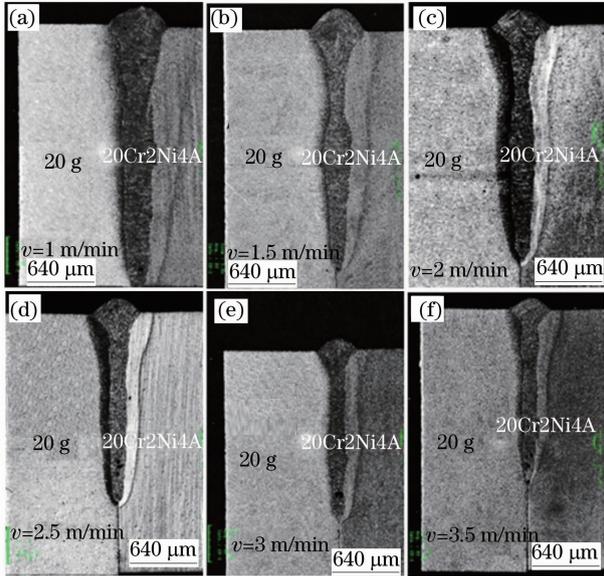


图 14 焊接速度对焊缝截面形貌的影响

Fig. 14 Effect of welding speed on the cross section of weld seam

着焊接速度的增加, 焊缝所获得的激光线能量降低, 焊缝的熔深变浅, 焊接速度与熔深近似呈反比例关系。随着焊接速度从 1 m/min 增加到 3.5 m/min, 熔宽总体上不断减小。这是由于随着焊接速度的增加, 使得焊缝所获得的激光线能量降低, 焊缝熔池热量向基体的热传导作用减小, 同时冷却速度却相对加快, 势必导致熔池表面宽度减小。

焊接速度对熔深的影响较大, 提高速度会使熔深变浅, 但速度过低又会导致材料过度熔化、烧蚀及工件焊穿等缺陷产生。所以, 对一定激光功率和一定厚度的某种特定材料有一个合适的焊接速度范围。本项目要求焊接熔深为 8 mm, 因此根据图 14, 15 将最佳焊接速度确定为 2.5 m/min。

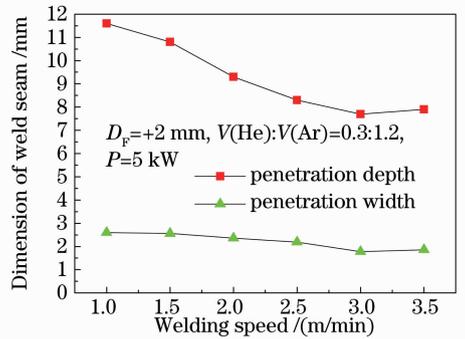


图 15 焊接速度对焊缝形貌的影响

Fig. 15 Effect of welding speed on the morphology of weld seam

流量可以优化焊缝成形。厚度为 8 mm 的 20 g 和 20Cr2Ni4A 异种金属 Slab CO₂ 激光焊接的最佳工艺参数为: 激光功率为 5 kW, 焊接速度为 2.5 m/min, 保护气体为 5 L/min 的 He 和 20 L/min 的 Ar 的混合气体, 离焦量为 +2 mm, 其焊缝表面形貌和焊缝截面图如图 16 所示。可见 20 g 与 20Cr2Ni4A 激光深熔焊的焊缝形貌为 T 形, 且焊缝截面不对称。这是由于 20Cr2Ni4A 合金钢中含有 Cr, Ni 和 Mn 等合金元素, 提高了

4 最佳焊接工艺的确定

工艺研究表明, 通过调节离焦量和同轴保护气

20Cr2Ni4A 合金钢的淬透性,从而使得 20Cr2Ni4A 一侧的热影响区大于 20 g 一侧的热影响区(HAZ)。

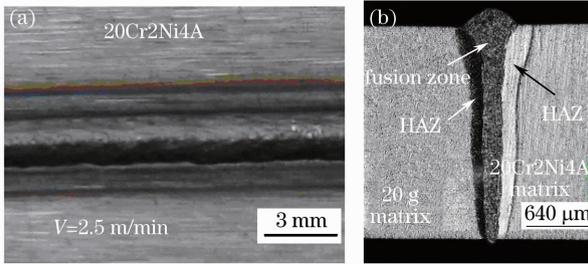


图 16 (a)焊缝表面形貌和(b)焊缝截面

Fig. 16 (a) Surface morphology and (b) cross section of joint

5 拉伸性能测试

图 17(a)为上述最佳工艺参数焊接试样一样品拉伸试验后的断裂件宏观形貌。所有试样一的样件经拉伸试验后,均在 20 g 母材处发生韧性断裂,断口呈 45°角。这说明焊缝位置的抗拉强度超过了 20 g母材,20 g 母材的抗拉强度为 440~450 MPa。图 17(b)为试样二样品拉伸试验后的断裂件宏观形貌。所有试样二的样件经拉伸试验后,均首先从近缝处 20 g 热影响区发生剪切,裂纹扩展至 20 g 基材后很快发生断裂。这说明焊接熔合区的强度高于 20 g 热影响区的强度,远远高于 20 g 母材的强度,20 g 热影响区的抗拉强度不低于 800~860 MPa。

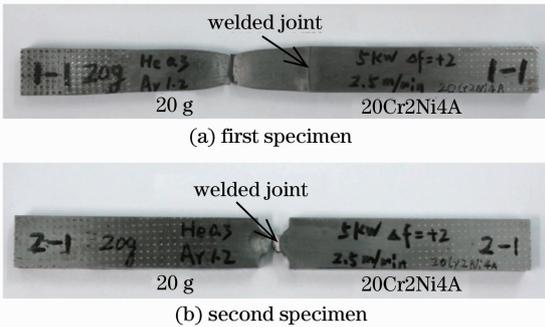


图 17 试样拉伸断裂样品宏观形貌

Fig. 17 Macro-morphology of fracture samples

图 18 为试样一拉伸试验过程中的应力应变曲线,该曲线很明显的说明试样一的断裂方式为韧性断裂,出现锯齿状屈服。图 19 为扫描电子显微镜(SEM)下观察试样一的断口形貌,其断裂方式为典型的韧窝断裂。韧窝断裂机制是众所周知的显微空穴聚集长大,其中黑色部分为韧窝,白色条形部分为晶界滑移带。在韧窝底部都一般有第二相质点存在。许多研究证明,韧窝的形状与形成韧窝源的析出相质点和基体材料的塑性变形特性无关,而与材

料断裂时的受力状态有关,作用力平行于断裂平面(剪切应力)产生拉长韧窝,作用力垂直于断裂平面主要产生等轴韧窝,其中剪切韧窝的开口指向该剪切层的位移方向。由于局部断裂平面往往偏离宏观平面,并且断裂通常是拉伸和剪切应力综合作用的结果,因此断口上一般显示出不同形状和方向的韧窝。图 19(a)为断口边缘韧窝形态,呈现拉长状韧窝,韧窝底部发现存在第二相质点;图 19(b)为断口中心等轴韧窝形态。

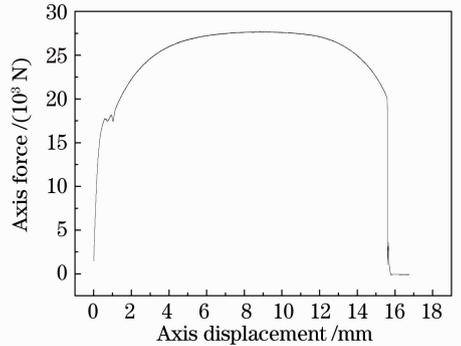


图 18 试样一拉伸应力应变曲线

Fig. 18 Tensile stress-strain curve of the first specimen

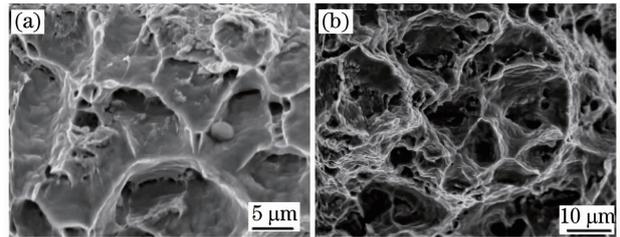


图 19 试样一断口形貌

Fig. 19 Fractography of the first specimen

图 20 为试样二拉伸试验过程中的应力应变曲线,该曲线很明显的说明试样二的断裂方式为脆性断裂。图 21 为 SEM 下观察试样二的断口形貌,其断裂方式为韧窝断裂和脆性断裂混合断裂。图 21(a)从右至左断口模式分别为脆性断口、拉长状韧窝断口和等轴韧窝断口。右侧为发生在 20 g热影响区内的剪切断裂区;中部为 20 g热影响区到 20 g母材过渡的拉长状韧窝断裂区;左侧为发生在 20 g母材的等轴韧窝断裂区[如图 21(b)所示]。图 21 所示断口形貌与图 20 所示拉伸应力应变曲线不符合。这是由于 20 g 热影响区的抗拉强度远远大于 20 g 母材的抗拉强度。当断口从 20 g 热影响区向 20 g 母材发展时,此时拉伸试验机的拉力已经超过了 20 g 母材断裂强度所能承受的拉力。因此,在拉伸应力应变曲线上未出现明显的屈服过程。

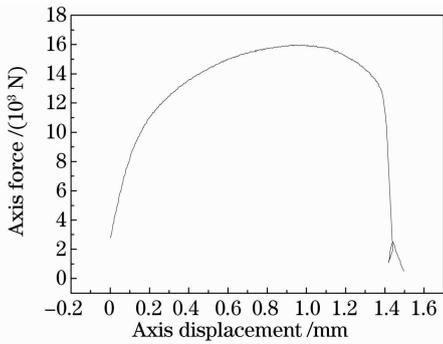


图 20 试样二拉伸应力应变曲线

Fig. 20 Tensile stress-strain curve of the second specimen

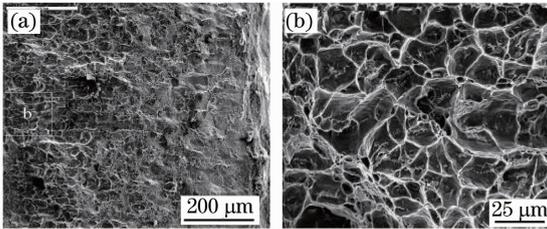


图 21 试样二断口形貌

Fig. 21 Fractography of the second specimen

6 结 论

1) 激光深熔焊接时,由于“小孔”壁的反射原理及 Slab CO₂ 激光高的光束质量,在离焦量为 +2 mm 时焊缝达到最大焊接熔深;保护气体配比在 V(He):V(Ar)=5:20(总流量 25 L/min)时,可以获得较好的表面形貌和较大的熔深,且成本较低;

2) 随着激光功率的增大,激光的熔透能力增强,焊缝的熔深呈直线上升,提高速度会使熔深变浅,速度过低又会导致材料过度熔化、烧蚀及工件焊穿等缺陷产生;

3) 在激光功率 5 kW,焊接速度 2.5 m/min,离焦量 +2 mm,总流量 25 L/min 的 He, Ar 混合气体作为保护气体,配比 V(He):V(Ar)=5:20 条件下,8 mm 厚 20Cr2Ni4A-20 g 异种钢可获得良好的激光熔透焊接接头。激光焊接接头的抗拉强度高于母

材,母材的断裂方式为韧性断裂,断口呈典型的韧窝形态;在焊缝区拉伸强度测试过程中,裂纹首先在 20 g 热影响区产生,然后斜向扩展至 20 g 母材后在母材发生韧窝断裂,20 g 钢热影响区的断裂方式表现为脆性和韧窝混合断裂。

参 考 文 献

- 1 Shi Yan, Zhang Hong, Takehiro Watanabe *et al.*. CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1132~1137
- 2 石 岩, 张 宏, 渡部武弘 等. 连续脉冲双激光束焊接钢铝合金 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1132~1137
- 3 Pang Ming, Yu Gang, Liu Zhao *et al.*. Dissimilar metal of K418 and 42CrMo full penetration laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1122~1126
- 4 庞 铭, 虞 钢, 刘 兆 等. K418 与 42CrMo 异种金属的激光穿透焊接 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1122~1126
- 5 Wu Dongjiang, Yin Bo, Zhang Weizhe *et al.*. Nd:YAG laser beam welding invar36 alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1773~1777
- 6 吴东江, 尹 波, 张维哲 等. Nd:YAG 激光焊接殷钢材料的工艺研究 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1773~1777
- 7 Wu Shikai, Xiao Rongshi, Chen Kai. Laser welding of heavy section stainless steel plants [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2422~2425
- 8 吴世凯, 肖荣诗, 陈 铠. 大厚度不锈钢板的激光焊接 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2422~2425
- 9 Wu Shikai, Yang Wuxiong, Dong Peng *et al.*. Microstructure and properties of welded joint for narrow gap laser welding of 42CrMo steel bevel gear shaft [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, **28**(4): 25~29
- 10 吴世凯, 杨武雄, 董 鹏 等. 42CrMo 钢伞形齿轮轴窄间隙激光焊接接头组织与性能 [J]. *焊接学报*, 2007, **28**(4): 25~29
- 11 Wang Yu, Yang Xichen, Lei Jianbo *et al.*. Study on microstructure and properties of laser welding of automobile double linked gears [J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(6): 483~486
- 12 王 雨, 杨洗陈, 雷剑波 等. 汽车双联齿轮激光焊接组织与性能研究 [J]. *应用激光*, 2007, **27**(6): 483~486
- 13 Zhang Jin, Yu Qi, Wu Hulin. The development of materials and heat treatment of high speed and heavy-load gear [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2002, (7): 52~54
- 14 张 津, 喻 奇, 吴护林. 高速及重载齿轮材料和热处理发展趋势 [J]. *现代制造工程*, 2002, (7): 52~54
- 15 Chen Hong. Influence of Beam Quality on Propagation and Focus of Lasers Beam and Quality of Laser Materials Processing [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006. 84~91
- 16 陈 虹. 激光光束质量对光束传输聚焦和加工质量的影响 [D]. 北京: 北京工业大学, 2006. 84~91