

激光焊接铸造镍基高温合金工艺研究

熊建钢 胡席远 陈祖涛 胡伦璞

(华中理工大学材料系, 武汉 430074)

摘要 研究了铸造镍基高温合金(K3)激光焊接时工艺参数对焊缝熔深及熔宽的影响,讨论了焊缝及热影响区产生热裂纹的机制及防止措施。结果表明,采用合适的激光焊接工艺可得到有较高强度、没有裂纹和气孔等焊接缺陷的接头。

关键词 镍基高温合金,激光焊接

1 引言

铸造镍基高温合金是航空领域广泛使用的材料,用来制造航空喷气发动机的一些零部件如导向叶片、涡轮叶片等。我国研制的这类合金的典型之一的 K3,具有较高的中、高温强度,铸造性能好。但因为是铸造组织,比其它镍基合金组织更不均衡,且沉淀强化合金元素(Al,Ti)含量高,用常规焊接方法如氩弧焊焊接时,因热输入量较大,在焊缝金属(WM)中常出现结晶裂纹,在热影响区(HAZ)会出现液化裂纹,可焊性很差,难以保证焊接质量^[1,2]。K3 用作涡轮叶片时,使用温度可高达 1100~1300 °C,且叶片各部位温度不均匀,受力条件也很复杂,易造成热疲劳裂纹而导致叶片失效^[3]。本文针对某型发动机涡轮叶片使用的 K3 合金,进行了激光焊接研究,考察工艺参数对焊缝熔深及熔宽的影响,分析在 高能密度的激光作用下,接头的组织及性能,探讨热裂纹形成原因及防止措施。这一研究的进行,对叶片的制造及用激光修复叶片(重熔裂纹)有一定意义。

2 试验条件及方法

试验用材料为国产铸造镍基高温合金 K3,其主要成分如表 1 所示。

Table 1 Chemical composition of K3 (wt.-%)

Composition	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti
	0.14~0.18	9.5~11.0	4.8~5.2	3.5~5.0	3.5~5.0	2.5~3.0	2.2~2.7
Composition	Fe	Zr	Ce	B	Nb	Ni	
	0.2~1.0	<0.2	<0.02	<0.02	2.0~2.5	base	

试样尺寸为 60 mm×20 mm,厚 1.0~2.0 mm。

试验设备为 EFA-51 型 1.5 kW 轴流 CO₂ 激光器。

收稿日期: 1995 年 12 月 29 日; 收到修改稿日期: 1996 年 3 月 8 日

接头方式为对接和在试片上直接熔焊(堆焊)两种。对接试样焊接端面加工,但不开坡口,焊接时可留小于 0.15 mm 的间隙。焊前用丙酮将试样清洗干净。

3 试验结果及讨论

3.1 工艺参数对焊缝深度和宽度的影响

影响激光焊接质量的主要因素有激光束质量、光斑功率密度、焊接速度及等离子体驱除气体(种类、流量、吹气方向等)。光束质量常用其模式来评价。激光焊接时要求光束质量好,即用低阶模或基模(TEM₀₀)光束焊接。对光束模式的定量检测需用专门的测量仪,但在实际加工时常用烧斑法进行观测^[4]。先期试验表明,用横流 CO₂ 激光器焊接,因输出光束为高阶模,用 1.6~1.8 kW 的功率,在低的焊速(0.7~1.2 m/min)下,焊接熔深只有 0.5~0.8 mm,焊缝深宽比约为 1/3~1/2。而且接头存在裂纹等缺陷。本试验使用的激光器输出光束模式为基模,聚焦后焦斑直径(在透镜焦平面上的光斑直径)约为 0.3~0.4 mm,焦斑功率密度可达到或超过激光深熔焊要求的阈值(>10¹⁰W/m²)。而功率密度是决定激光深熔焊能否实现的重要因素,它与功率 P 、离焦量 ΔF (焦斑相对工件表面的距离)等因素有关。因此,这里取 P 、 ΔF 及与焊接线能量有重要关系的焊速 V 作为主要工艺参数研究。它们对焊接深度及宽度的影响如图 1 所示。由图 1 可看出,随着激光功率的增大或焊速的减小,焊接熔深 H 逐渐增大,焊缝宽 B 也随之变大。这是因为, P 越大,热输入量也越大;焊速慢时也是如此。热输入量或线能量大,显然焊缝深、宽均增大。离焦量 ΔF 的影响则复杂一些。因为,光束的焦斑功率密度并不是作用于工件上的光斑(焊接光斑)功率密度,后者与 ΔF 有关。 ΔF 不仅决定焊接光斑直径,而且决定光束的入射状况。从图 1(c) 看出,焦斑在工件表面之下(负离焦量)一定位置,可得到最大的熔深(参见图 4)及最大的深宽比。这种现象是激光深熔焊时小孔内的壁聚焦效应所致,因为 $\Delta F < 0$ 时,光束可在小孔侧壁反射后向孔底传播并进行二次聚焦,使小孔内部维持较高功率密度,从而加大熔深。但 $|\Delta F|$ 过大时焊接光斑直径大,功率密度不能达到深熔焊要求的阈值,从而熔深变小。

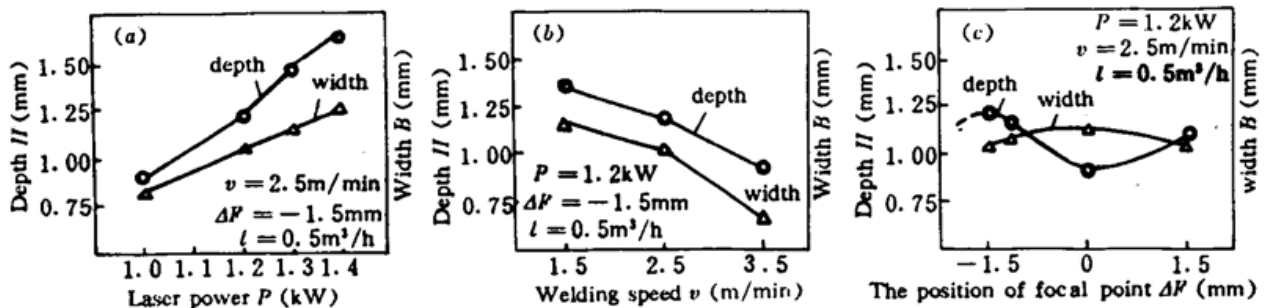


Fig. 1 Effects of parameters on the depth and width of weld bead
(a) effect of laser power; (b) effect of welding speed; (c) effect of ΔF

在试样上堆焊时,各工艺参数对 H, B 的影响与图 1 趋势相似,但 H 略小而 B 稍大,深宽比较小。对接接头的深宽比在 1~2 之间,堆焊时深宽比为 1 左右。图 2 是两种接头型式的焊缝。

3.2 保护气体及等离子体对焊接结果的影响

激光焊接 K3 时,也会产生小孔和等离子体效应(如图 3 所示),并伴有强烈的蓝色特征光。若不对等离子体加以控制或抑制,光束通过等离子体时,会改变聚焦条件,甚至出现成丝现

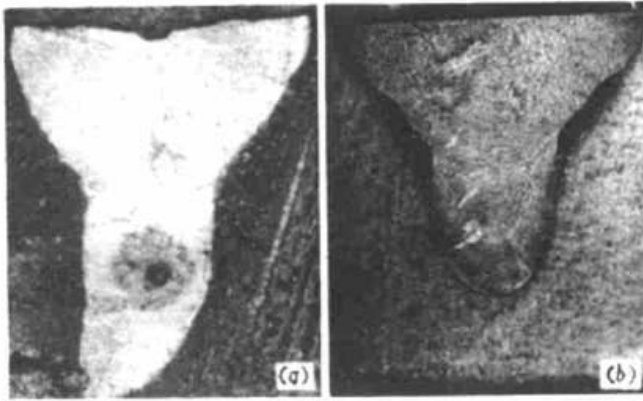


Fig. 2 Weld bead shape of two joints, 50×

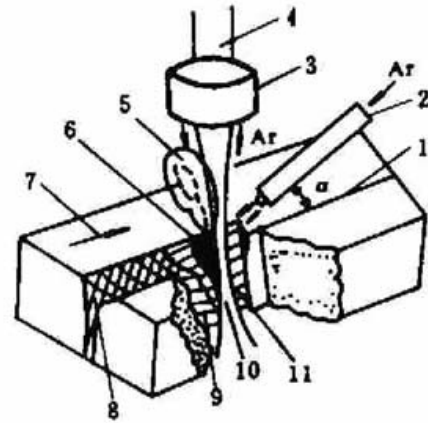


Fig. 3 Penetration welding diagram

1, butt joint; 2, plasma-controlling gas; 3, focusing mirror; 4, laser beam; 5, plasma; 6, keyhole; 7, welding direction; 8, penetration weld bead; 9, solid metal; 10, laser-through-keyhole; 11, molten metal.

象^[5],破坏光束的均匀性。另外,等离子体还吸收部分激光能量而使到达工件的有效能量减少,从而阻碍焊接过程的正常进行。因此必须用侧吹惰性气体的方法将其驱离熔池上方或抑制其产生。试验证明,等离子体驱除气流量过大或过小均不能得到满意的焊缝。过大时,熔池搅拌激烈,易产生气孔等缺陷,并带走大量的热能。过小时,不能起到驱除等离子体的作用,对工件的保护效果也差。等离子体驱除气流量为 $0.5 \sim 0.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 时较合适。吹气喷嘴角度也影响抑制或驱除等离子体的效果,这个角度 α 为 $30^\circ \sim 40^\circ$ 范围最佳,本试验取 35° 。

喷嘴位置或称吹气方向对焊接深度也有影响,图 4 是逆吹(喷嘴在图 3 所示位置,吹气方向与焊接方向相反)与顺吹(喷嘴在光束另一侧)时 H 的变化。从图可知,逆吹时熔深较大。这是因为,逆吹时将等离子体吹向熔融的小孔一侧(图 3 中 5, 6 所示),而等离子体本身具有较高的温度,从而可以将部分能量传递给熔融的工件,出现增加熔深的效果。

与光束同轴的气体主要是保护聚焦透镜免受焊接时产生的烟尘、飞溅等的污染,并对其起一定的散热作用,还有保护熔池不受空气污染等作用。它对焊接过程的顺利进行同样有重要作用,其流量也有一最佳值,本试验取 $0.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 。顺便指出,保护气体一般认为用 He 最好,但成本高昂,因此本试验用价廉的 Ar,其保护效果也能满足要求。

3.3 接头的组织及性能

K3 铸造高温合金母材组织如图 5 中的左侧所示,粗大的枝晶组织主要由 γ 基体、 γ' 、 $(\gamma + \gamma')$ 共晶组成。 $(\gamma + \gamma')$ 是铸造合金凝固时液析的产物,分布于枝晶间。另外还有一些碳化物相(图中黑点)如 MC , M_6C , M_{23}C_6 等。图 5 中间区域是 HAZ,主要是过热或半熔化后生成的 $(\gamma + \gamma')$ 白亮共晶组织,其中分布有未熔化并发生一定程度长大的碳化物。右侧为焊缝。放大 250 倍

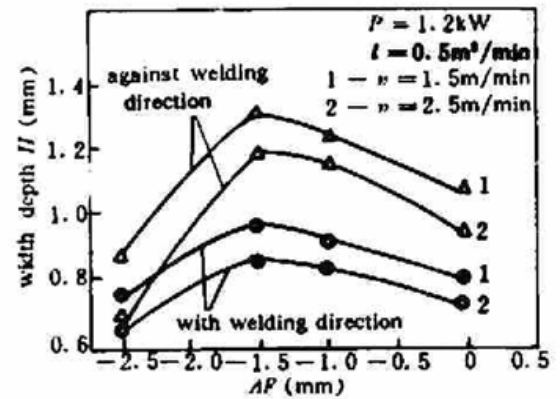


Fig. 4 Effect of the direction of plasma-controlling gas, welding speed and the focal point position on welding penetration

后的焊缝组织如图 6 所示,为细小的铸造状枝晶组织,枝晶具有一定的方向性,类似定向结晶,晶粒均匀,没有链状碳化物的聚集。这种细小均匀的组织,是由激光焊接具有的高速加热、冷却的特点决定的,它有利于减小显微偏析,能提高对结晶裂纹的扩展阻力,减小焊缝对结晶裂纹的敏感性,并有利于后续的固溶、时效处理。

激光焊接的高焊速和低线能量,可以抑制粗大的 $(\gamma + \gamma')$ 共晶在焊缝或 HAZ 中产生,并可避免因成分偏析而形成 σ 脆性相等的出现。另外激光焊接热影响区很窄(0.2~1 mm),焊接残余应力很小,基本没有变形,接头组织及性能优于氩弧焊。

对接接头的拉伸试验表明,用焊缝深度最大或焊缝深宽比最大的工艺参数获得的接头,其强度并不最高。这显然是与接头中存在缺陷有关,在下一节再对其作较详细的讨论。接头的室温抗拉强度值较分散,最高可达母材的 85%。当激光功率在 1.0~1.2 kW,焊速为 2.5 m/min, ΔF 为 -1~-1.5 mm 时,室温抗拉强度 σ_s 较高(约 580~650 MPa)。

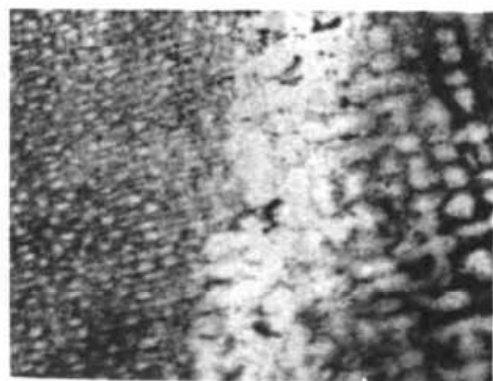


Fig. 5 Microstructure of weld bead, 100 \times



Fig. 6 Microstructure of WM, 250 \times

接头的硬度测试结果为:焊缝区硬度为 HV_{0.05N}440~500,与母材硬度(HV_{0.05N}400~460)相差不多;而 HAZ 的硬度值波动较大,从 HV_{0.05N}380 到 HV_{0.05N}560 不等,最高值与最低值都在该区出现,说明该区组织极不均匀。

3.4 焊缝及热影响区的热裂纹

激光焊接铸造镍基高温合金时,若工艺参数选择不当,在焊缝及热影响区也会出现热裂纹。图 7(a) 是沿焊缝中心纵向开裂的结晶裂纹和树枝状晶之间的结晶裂纹。HAZ 及熔合线的液化裂纹如图 7(b) 所示,HAZ 的裂纹呈沿晶扩展特征;熔合线裂纹,起源于母材与焊缝交接处,沿晶扩展至焊缝中。图 7(c) 是焊缝中结晶裂纹的电镜照片,可以看到,裂纹中及边缘有部分未熔的碳化物及 $(\gamma + \gamma')$ 共晶,成分分析表明,Zr 的成分有很大偏析(相对重量百分比为 0.69~1.07%),远高于母材含 Zr 量。可以认为,结晶裂纹的产生是与焊缝中存在 $(\gamma + \gamma')$ 低熔共晶、富 Zr 低熔物等形成的液态薄膜有关。在焊接应力作用下,这种液态薄膜极易开裂而形成裂纹。焊缝中心纵向裂纹是由焊缝金属的结晶特点决定的,因先凝固的金属较纯,结晶后期低熔点共晶被排挤到柱状晶体的中心部位而形成液态薄膜,此时若存在较大应力即形成裂纹^[6]。另外,K3 合金中加有较多 Al,Ti,Nb 合金元素,易形成 $(\gamma + \gamma')$ 共晶,若焊接线能量(热输入)控制不当及拘束力较大,极易造成热裂纹。值得指出的是,激光焊接的线能量要远小于氩弧焊,因而热裂纹敏感性相对要小一些。熔合区及 HAZ 中的液化裂纹产生机理与此类似。

热裂纹的敏感性还与接头形式有关。直接熔焊时,热裂纹敏感性较小。另外,合金成分对热裂纹敏感性有很大影响,母材中 B,C,Al,Ti,Nb 的含量越高,越易产生热裂纹^[1],因此,应控

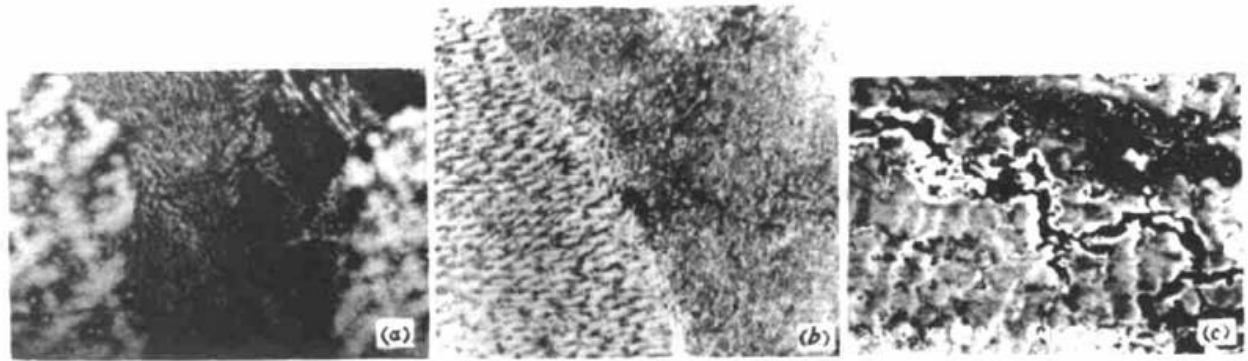


Fig. 7 Hot crackings in HAZ and WM

制这些合金元素在母材中的含量。

(1) 铸造镍基高温合金 K3 可以采用激光焊接,其接头室温抗拉强度可达到母材的 85% (650MPa); (2) 焊接时必须严格控制工艺参数,尽量减小热输入量及接头拘束应力,才能得到强度较高、没有裂纹、气孔等缺陷的接头; (3) 焊缝深宽比不是决定焊接强度的唯一因素,本试验中较佳工艺参数:激光功率为 1.0~1.2 kW,焊速为 2.5~3.0m/min,离焦量-1.5mm,等离子体驱除气流量为 0.5m³/h; (4) 研究结果对航空发动机叶片的制造及修复有一定意义。接头的高温性能及耐蚀性能还需进一步研究。

致谢 感谢刘建华副教授、李志远教授对本工作的关心与支持。

参 考 文 献

- 1 张延生,钟祖桂. 高温合金氩弧焊时冶金及工艺因素对形成热裂纹的影响. 焊接学报. 1982, 3(2): 57
- 2 张延生,柯明,史常瑾. GH99 镍基合金焊接热裂纹的动态过程研究. 焊接学报. 1986, 17(4): 181
- 3 许昌淦,周鹿宾. 合金钢与高温合金. 北京:北京航空航天大学出版社,1993
- 4 李力钧. 现代激光加工及装备. 北京:北京理工大学出版社,1993. 16~21
- 5 常铁强等. 激光等离子体相互作用与激光聚变. 长沙:湖南科技出版社,1991. 54~58
- 6 周振丰,张钧,张家泰等. 焊接冶金与金属焊接性. 北京:机械工业出版社,1998年,第二版. 196~209

Study on Laser Welding of Cast Nickel-base Superalloy

Xiong Jiangang Hu Xiyuan Chen Zutao Hu Lunji

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract An investigation on CO₂ laser welding of cast nickel-base superalloy has been carried out. The effects of the main parameters, including the laser power, the welding speed, the position of the focal point and the direction of plasma-suppressing gas on the depth and width of the bead were studied. The mechanism of hot-cracking in the weld metal and the heat-affect-zone (HAZ) was investigated while the methods to reduce the cracking susceptibility were discussed. The results show that a defects-free joint with high tensile strength can be obtained when using proper laser welding parameters.

Key words cast nickel based superalloy, CO₂ laser welding