

铍的 YAG激光焊接裂纹敏感性研究

李盛和 谢志强 姜云波 吴东周 张友寿

(表面物理与化学国家重点实验室, 绵阳 621907)

文 摘 分析了激光焊接时为克服焊接裂纹所采取的焊前预热、短焦距焊接及焊接工艺参数等因素对裂纹敏感性的影响。结果表明:选择合适的焊接参数可减少裂纹的产生,但其作用有限,还不能从根本上消除裂纹。焊前预热及焊后缓冷对抑制裂纹作用显著,且随着预热温度提高裂纹率呈下降趋势。此外焊接中减少铍的熔化量对减少裂纹亦发挥了重要作用。

关键词 铍, 铝硅钎料, YAG激光焊接, 预热, 裂纹敏感性

Sensitivity to Cracking of Beryllium by YAG Laser Welding

Li Shenghe Xie Zhiqiang Jiang Yunbo Wu Dongzhou Zhang Youshou

(State Key Laboratory for Surface Physics and Chemistry, Mianyang 621907)

Abstract Effect of preheat, smaller focus spot and welding processing parameter on sensitivity to cracking is studied. Results show that suitable welding parameter can reduce occurrence of cracking, but it is not the most important factor. Preheat before welding and post-heat can obviously diminish welding cracking. As preheat temperature increases, rate of beryllium welding cracking decreases. Moreover, decrease of melted beryllium plays a positive role to restrain sensitivity to cracking.

Key words Beryllium, Al-Si filler metal, YAG Laser welding, Preheat, Sensitivity to cracking

1 前言

铍具有密度低、弹性模量高、线膨胀系数小、比热容大、热导率大及中子截面较小等优点,作为结构材料在航空航天、核能等领域具有广泛应用前景,可作为国际核聚变堆(ITER)的等离子面壁材料。但铍同时也存在显著缺点,如室温时塑性差、焊接性差、剧毒、价格昂贵等,为最大限度地利用好铍,必须解决焊接中暴露的问题。文献[1~2]研究表明,铍焊接时会遇到裂纹、气孔及氧化等问题。氧化问题可通过完善实验条件、提高保护气体纯度等措施加

以解决,气孔问题可通过焊前真空热处理减少氢在铍及钎料中的含量得到缓解,但裂纹问题最难解决,所以研究裂纹敏感性具有重要的意义。

国外在20世纪50年代就开始研究铍的碳弧焊、气体保护焊等焊接工艺^[2],铍的高温氧化问题很难解决,即使在充氩的密封小室中,氧化同样严重,B₂O₃影响焊缝的表面成形,并增加焊缝及靠近焊缝母材产生裂纹的可能。Passmore^[3]在60年代开展了铍的钨极氩弧焊工艺试验,结果表明,输入线能量的大小与预热温度的高低及焊缝中铝含量是影响

收稿日期:2004-12-27

作者简介:李盛和,1968年出生,高级工程师,主要从事YAG激光焊接工艺的研究工作

裂纹敏感性的主要因素;同时减小熔化区,裂纹敏感性也会减小。Hauser与 Brundige^[4-5]随后开展了类似工作,所得结论与前者相似。Hicken^[6]利用高压与低压型电子束焊机开展了铍的钎焊研究工作,以 Al-Si Al-Cu或 Al-Mg合金作为钎料,只要选择适当的工艺参数,可得到没有裂纹等焊接缺陷的焊缝,但要避免或减少气孔、咬边等现象仍是很困难的。

焊缝中铝含量对焊缝的显微组织会产生一定的影响,并建议为确保得到无裂纹、高强度的焊接接头,焊缝中的铝含量应控制在 30% ~ 50%。Perkins^[7]利用中压电子束焊机开展了铍的钎焊研究,结果表明,焊接接头的拉伸强度高于母材,所有拉伸试件均断裂在母材上,为得到无裂纹的焊缝,焊缝中的铝含量应控制在 20% ~ 27%之间。

文献 [8]介绍了一种间接实现铍焊接的可行方法,其技术路线如下:(1)在铍材表面沉积铝合金;(2)将沉积有铝合金铍材两表面贴合在一起;(3)将贴合铍材的两表面焊接在一起。相对于其他焊接,激光焊接起步较晚,有关铍的激光焊接的文章,国内外公开报道的很少。秦有钧^[9]介绍了铍的 CO₂激光焊,指出激光焊比电子束焊困难,焊前用电阻或感应热源预热焊件,预热温度 350 。Lingenfelter^[10]用脉冲 Nd:YAG激光进行铍/钽准直器的激光焊接研究,并成功地实现了 25 μm厚的铍和钽箔组装焊接。本文利用 YAG激光焊接铍环,主要研究了激光焊接参数、预热温度及焦斑直径大小等因素对裂纹敏感性的影响。

2 实验

实验使用固体激光器作为焊接热源,激光波长为 1.06 μm,光束质量为 12 mm·mrad,激光用直径为 0.4 mm的光纤传输,光束输出可根据需要设定为连续或脉冲输出,使用石英透镜作为聚焦镜,焦斑直径分别为 0.46 mm和 0.67 mm。试验中使用环状试件,焊前在铍环外止口处预置 Al-Si12钎料,焊前用焊接夹具将试件固定到转台上。焊接参数对裂纹敏感性的影响见表 1。在得到合适的激光功率与焊接速度基础上,考察了焊前预热及激光焦斑直径大小对裂纹形成的影响,试验参数见表 2。

表 1 60 mm 铍环激光焊接参数

Tab 1 Welding parameters used for 60 mm beryllium cylinder

数量	激光功率 /kW	焊接速度 /mm·min ⁻¹	Al-Si钎料厚度 /mm
20	1.2~1.4	600	0.40
7	1.2	700	0.40
4	1.2	800	0.40

表 2 120 mm 铍环焊接参数

Tab 2 Welding parameters used for 120 mm beryllium cylinder

数量	预热温度 /	焦斑直径 /mm	激光功率 /kW	焊接速度 /mm·min ⁻¹
9	未预热	0.67	1.2	700
8	60	0.46	1	650
6	80	0.46	1	650
10	100	0.46	1	650

3 结果及讨论

3.1 焊接参数的影响

裂纹是铍焊接中最难克服的问题,解决铍焊接裂纹主要方法:(1)将 Fe/Al原子比控制在 2:1;(2)降低铍材中 BeO的含量;(3)细化母材晶粒尺寸;(4)合理选择焊接工艺参数;(5)焊接时减少热应力。前三个因素可从铍的生产过程中解决。

图 1是功率 1.2 kW时扫描速度与裂纹率的关系曲线,可以看出,焊接速度为 600 mm/m in时,焊缝的裂纹率(裂纹率是指有裂纹的试件与焊接试件的百分比)高达 83%。

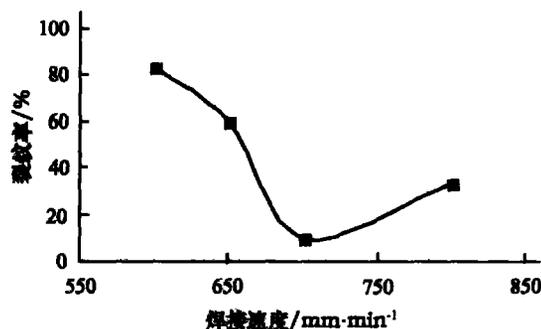


图 1 焊接速度与裂纹率关系曲线

Fig 1 Curve of welding speed and cracking percent

随着速度增加到 700 mm/m in,焊缝的裂纹率降低到 10%,该工艺参数的重复性较好。进一步将

速度提高到 800 mm/m in,焊缝的裂纹率又提高到 33%,可见裂纹对焊接速度的变化相当敏感。

图 2 是焊接速度为 600 mm/m in时激光功率与裂纹率的关系曲线,从中看出随着功率的变化,裂纹率有微小的变化,激光功率对裂纹的影响并不明显。图 3 是焊缝与熔合线的显微组织。

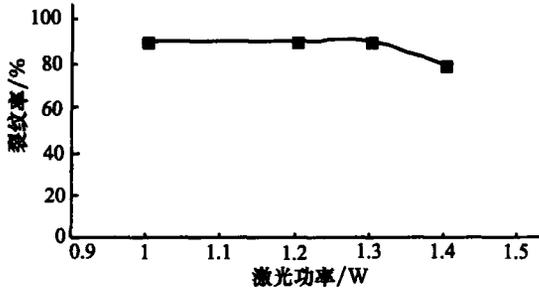
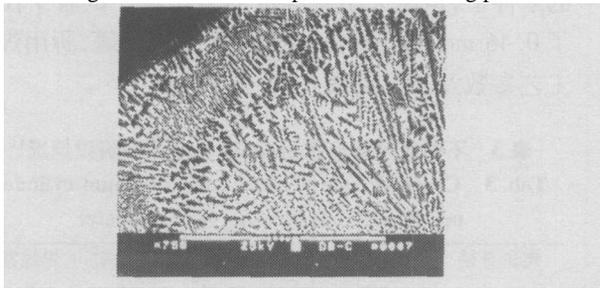
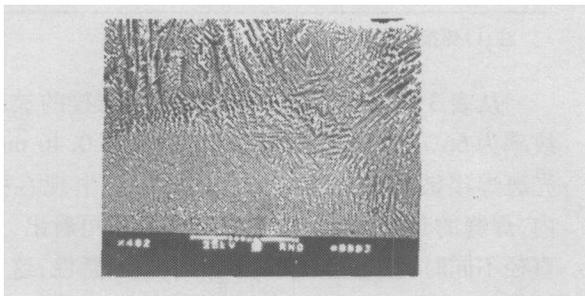


图 2 激光功率与裂纹率关系曲线

Fig 2 Curve of laser power and cracking percent



(a) 焊缝熔合线 750 ×



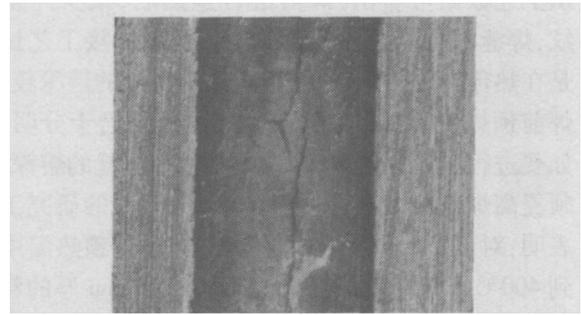
(b) 焊缝中心 400 ×

图 3 焊缝与熔合线的显微组织

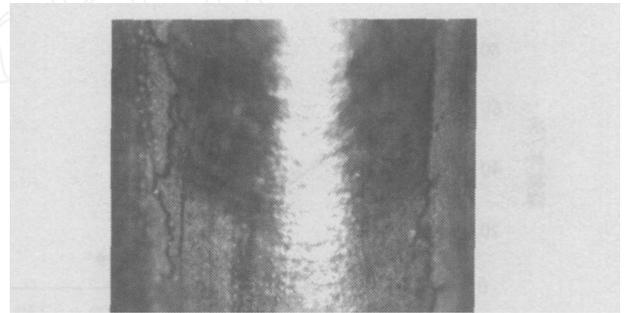
Fig 3 Microstructures at the weld/base metal and welding seam center area

从图 3(a)中可看出,焊缝组织均垂直基体外延生长,组织形态为一次树枝状结晶。图 3(b)是焊缝中心的显微组织,焊缝组织同样为一次树枝晶,在靠焊缝的顶部,组织呈现胞状枝晶。从整体看,焊缝的

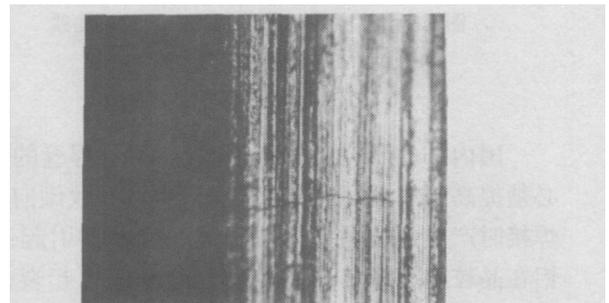
组织非常细小,这主要是由于激光焊接形成的熔池具有快速加热与快速冷却的特点所造成,再加之热传导焊形成的熔池深度较浅,熔池的热量易于向基体扩散,使冷却速度大大提高,有利于细小枝晶的形成。在 60 mm 钹环上得到的功率 1.2 kW、速度 700 mm/m in 参数过渡到 120 mm 钹环时,钹焊缝仍出现裂纹,裂纹如图 4 所示。



(a) 焊缝中心裂纹



(b) 热影响区裂纹



(c) 母材裂纹

图 4 焊缝裂纹形状 30 ×

Fig 4 Typical optical micrograph of welding seam cracking

从大尺寸钹环焊接结果来看,焊接参数的合理选择只能部分抑制裂纹的出现,不能从根本上消除裂纹,可能是由于大尺寸钹环具有较大的冷却速率造成的。

3.2 预热的作用

图 5 为预热温度与焊缝裂纹率的关系曲线,可以看出,未进行焊前预热的铍环,有 55% 的焊缝出现裂纹,经光学显微镜检查发现,在焊缝上存在裂纹,裂纹形貌如图 4 所示。预热到 60 后焊接,其裂纹率降低到 25%,预热到 80 时,其裂纹率降低到 16.7%,预热到 100 时,其裂纹率降低到 10%。从上述数据可看出:焊前进行预热后,很少产生裂纹,焊缝的质量得到很大提高。但该焊接工艺试验是在热传导焊接条件下进行,由于焊缝的熔深较浅,焊前预热仅到 100,抑制裂纹的效果已十分明显。如要进行激光深熔焊接,进一步增加焊缝的熔深,必须提高焊前预热温度,据 M. Hill^[11] 等人的研究工作表明:对 1.5 mm 厚的铸造铍材,其焊前预热温度要到 400 才能有效抑制裂纹,而对 2.5 mm 厚的粉末热压铍材焊接性要优于铸造铍,预热到 340 就可成功抑制裂纹。

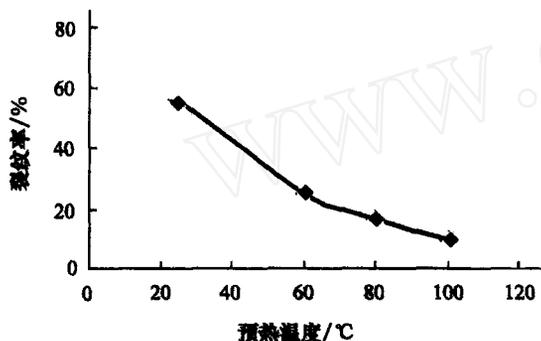


图 5 预热温度与焊缝裂纹率的关系曲线

Fig 5 Curve of preheat temperature and cracking percent

国内外的研究工作均表明:要增加焊缝的深度必须提高预热温度才能克服铍焊缝的裂纹倾向。铍焊接时产生裂纹主要是由下述三个因素引起:(1) 铝在晶粒边界富集;(2) 从母材有缺陷处起裂;(3) 铍固有的低塑性。由于低塑性能承受热应力的作用十分有限,在焊接时导致裂纹产生。通过预热可增加铍材塑性,伸长率与温度关系曲线(图 6^[12])表明:等静压铍材在 25 时伸长率为 3.4%,150 时为 12.7%,300 时为 18.4%,可见随着温度上升,铍的塑性得到了一定提高。此外焊前预热还可降低试件的冷却速度与温度梯度,这些都会改善焊接性。由此可见,预热导致铍试件塑性增加及冷却速度的

降低对消除裂纹起到了十分重要的作用。

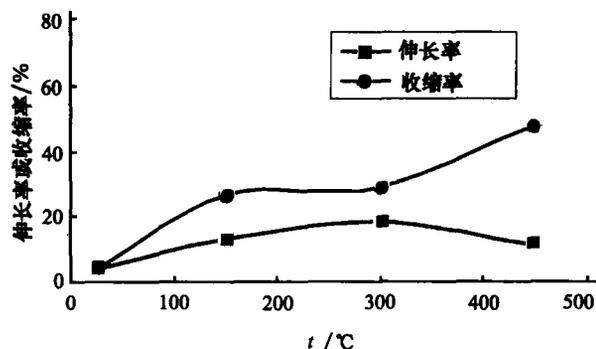


图 6 伸长率、断面收缩率与温度的关系

Fig 6 Relation curve of temperature with prolngation and shrinkage percent

3.3 铍材熔化量的影响

不同焦距有不同的焦斑大小,在钎料厚度一定的条件下,焦斑大小影响铍的熔化量。试验中使用了 0.46 mm 和 0.67 mm 两种直径的光斑,所用焊接工艺参数及结果见表 3。

表 3 不同直径焦斑作用 120 mm 铍环裂纹情况¹⁾
Tab 3 Cracking rate of 120 mm beryllium cylinder under different focusing spot diameter

焦斑直径 /mm	激光功率 /kW	焊接速度 /mm·min ⁻¹	裂纹率 /%	焊缝宽度 /mm
0.67	1.2	700	66	0.91
0.46	1.2	700	40	0.82

注:1) 焊接未预热。

从表 3 可看出,0.67 mm 的光斑焊接的铍环裂纹率为 66%,裂纹形貌与图 3 相似。而 0.46 mm 的光斑焊接铍环裂纹率为 40%,且裂纹出现在弧坑内,焊缝的其余部分完好。从上面数据可看出,焦斑直径不同时,铍焊缝具有不同的裂纹敏感性,这主要是由于 0.46 mm 的光斑得到的焊缝宽度 0.82 mm,小于 0.67 mm 的光斑时焊缝的宽度 0.91 mm,在钎料厚度相同的条件下,0.46 mm 的光斑熔化的铍要少些,焊缝内铝含量增加,而铝含量会影响裂纹的产生,焊缝抗裂性能比较好。据此认为,在不同光斑直径作用下铍焊缝抗裂纹能力有一定差异,光斑直径越小,铍材熔化量越小,铝含量越高,铍焊缝抗裂能力越好。

(下转第 61 页)

宇航材料工艺 2005 年 第 3 期

域的电导率是否变化为思路,选取多个测量点进行测试,若火烧区和非火烧区电导率值有明显差异,说明构件的强度已明显下降,可以判断构件已烧伤,不能继续使用;若火烧区和非火烧区的电导率相同,但两区之间有一过渡区,若过渡区的电导率发生明显变化(有明显峰值),则也可以判断构件已烧伤。

(4)应用结果表明:涡流电导率法可以准确、快速确定飞机结构热损伤的范围和程度,能够为战机抢修提供可靠的理论依据,对构件不会造成任何破坏,成本低、效率高,这对于飞机修理厂修理热损伤构件有着广泛的应用前景。需要注意的是:由于目前缺乏相应的电导率检测标准,笔者建议,为保证检测的安全与可靠,除采用涡流电导率法外还需与硬度等检测方法相结合,以相互补充和印证。

由于条件的限制,本试验仅对厚度为 1.5 mm 的 LY2CZ、LC4CS 两种金属材料进行了不同温度、保温 5 min 的烧伤模拟试验。还可将试验扩大到其

他金属材料的烧伤检测研究上,再进一步扩展到飞机常用金属材料烧伤检测规范的研究上,使各种导电材料的电导率验收极限值有标准可循。

参考文献

- 1 许占显.飞机蒙皮烧损伤检测.无损检测,1998;20(10):294~296
- 2 关伟平.LY12铝合金热处理工艺、电导率和机械性能关系的实验研究.航空工艺技术,1998;21(4):34~36
- 3 任吉林.涡流检测技术近20年的进展.无损检测,1998;20(5):121~128
- 4 侯日立.飞机铝合金烧伤检测方法研究.无损检测,2001;23(12):518~519
- 5 崔忠圻.金属学与热处理.北京:机械工业出版社,1988:201~202
- 6 Roper F. A high frequency eddy current method for the thickness measurement of thin metallic foils using ferrite-core transmission. NDT—E International, 2000; 33(3): 163~172

(编辑 吴坚)

(上接第 46 页)

4 结论

焊接工艺对克服铍材焊接裂纹的形成具有重要作用,选择合适的焊接参数可减少裂纹的产生,但其作用有限,不能从根本上消除裂纹,焊前预热及焊后缓冷对抑制铍材焊接裂纹作用更为显著,预热温度根据焊缝的深度而改变,随着焊缝深度增加预热温度相应增加。光斑直径越小,铍材熔化量越小,铝含量越高,铍焊缝抗裂纹能力越好。

参考文献

- 1 Harries D R. Welding techniques for the rarer metals Nuclear Power, 1958; 3(5): 219~221
- 2 Gilliland R G. Fusion welding end caps in beryllium tubes Welding Journal, 1963; 42(1): 29s
- 3 Passmore E M. Fusion welding of beryllium. Welding Journal, Research Supplement, 1964; 43(3): 116s
- 4 Brundige E L. Welding of beryllium. Welding Journal, Research Supplement, 1959; 38(10): 410s
- 5 Hauser D. Electron beam welding of beryllium. Weld-

ing Journal, Research Supplement, 1967; 46: 525s

- 6 Hicken G K. Joining beryllium by electron beam braze welding technique. Welding Journal, Research Supplement, 1967; 46(12), 541s
- 7 Perkins M A. Electron beam braze welding of beryllium. USDOE Y - 2138, 1978
- 8 Dixon et al. Method for welding beryllium. The United States 5 615 826, 1997
- 9 秦有钧.铍的激光束焊接相关问题.四川:中国工程物理研究院,2000:4~5
- 10 Lingenfelter A C et al. Laser welding of a beryllium/tantalum collimator CONF - 8504128 - 4, 1985
- 11 Hill M A. Beryllium weldability. DE 90 014 696, 1990: 3~4
- 12 张鹏程,何立峰等.铍的高温力学性能研究.四川:中国工程物理研究院,1995:2~3

(编辑 任涛)