

激光冲击处理在核工业焊接结构上的应用

Application of Laser Peening on Weld Structure Nuclear Industry

中航工业北京航空制造工程研究所 宋 巍 邹世坤 曹子文

[摘要] 概述了国外激光冲击处理技术在核工业焊接材料结构上的应用情况,并介绍了国内在核工业不锈钢等材料焊缝激光冲击处理上的一些研究。根据日本东芝公司无吸收层激光冲击强化处理反应堆压力容器的特点,展望了焊接区激光冲击处理在我国核电技术发展上的应用前景,指出我国在核电站建设中如何利用激光冲击处理技术延缓设备老化和应力腐蚀开裂的问题。

关键词: 激光冲击处理 表面强化 核工业 焊接区 抗应力腐蚀裂纹

[ABSTRACT] As a novel surface strengthening technology, laser peening (laser shock processing) uses intense pulse laser to produce shock waves on metal surface, which induces strain hardening in the surface of metal. In this paper, the application of laser peening on weld structures is summarized, civil research works on laser peening weld zones are also introduced. According to the characteristics of laser peening without absorbing layer in TOSHIBA corporation, the future application of laser peening in nuclear plants in China is expected, some ideas of how to use laser peening prevent SCC and aging in nuclear equipments is presented.

Keywords: Laser peening Surface strengthen Nuclear industry Weld zone Anti-SCC

焊接结构广泛用于压力容器、管道等构件中,在每年的压力容器与管道国际会议上(Pressure Vessel and Pipe, PVP)上,对这些结构的抗应力腐蚀开裂性能研究一直是相关研究人员关注的方向。特别是对于大量使用的不锈钢结构,由于在熔焊过程存在化学成分和应力状态的改变,导致其焊缝在液体腐蚀介质环境中成为疲劳和腐蚀薄弱环节。压力容器与管道往往在静态环境下使用,其破坏主要由应力腐蚀导致,因此关键是提高焊缝的抗应力腐蚀性能。而发生应力腐蚀开裂的必要条件是要有拉应力(不论是残余应力还是外加应力,或者两者兼而有之)和特定的腐蚀介质,裂纹的形成和扩展大致与拉应力方向垂直。导致应力腐蚀开裂的应力

值要比没有腐蚀介质存在时材料断裂所需要的应力值小得多。因此,改变焊缝表面应力状态,获得表面残余压应力的后续处理工艺十分重要。目前常用的喷丸、超声冲击强化有时很难在压力容器、管道内部进行。激光冲击处理(Laser Shock Processing)由于不引入外来介质,具有激光传输灵活,强化后可保持很好的表面状态以及较深的残余压应力等特点,在焊接结构上的应用得到了较快发展。

激光冲击处理是利用强脉冲激光导致的冲击波在金属材料表层产生塑性应变,获得表面残余压应力从而提高结构疲劳性能的表面强化技术。由于激光冲击处理的强化原理类似喷丸,因此也称作激光喷丸(Laser Shock Peening/Laser Peening)。激光冲击处理由于在光学传输和强化位置的控制上具有很好的灵活性,因此在内部空间受限的一些压力容器、管道等焊接结构上应用,具有很好的技术优势。

1 国内外激光冲击处理技术研究与应用

1.1 国外激光冲击处理技术研究与应用

激光冲击处理早期的研究主要是针对铝合金焊接接头进行,但一直没有实质性的应用。随着搅拌摩擦焊的应用研究,美国开展了针对铝合金搅拌摩擦焊接头的激光冲击处理工艺研究,主要是为了降低焊接结构表面的残余拉应力和解决组织软化问题,以改善其疲劳和耐腐蚀性能。针对 2195 铝合金搅拌摩擦焊接头激光冲击处理工艺研究表明:搅拌摩擦焊接头激光冲击后疲劳强度接近没有焊接的母材,在 190MPa 载荷下激光冲击后疲劳寿命提高幅度是未强化或喷丸强化焊缝的 2 倍以上^[1]。目前,“搅拌摩擦焊+激光冲击处理”的技术已被美国用在部分航空、航天器结构上。

最早将激光冲击处理用在军用发动机结构上的是美国 LSP 技术公司,而美国大型跨国公司 MIC 公司巧妙地在以前喷丸强化技术应用场合引入激光冲击处理技术,形成了 Trent 系列商用发动机激光冲击处理应用市场,强化钛合金叶片表面、榫头等关键疲劳部位,在表面产生压应力并提高其疲劳性能^[2]。

随着核工业的广泛发展,针对原子反应堆压力容器

和管道焊缝的维修问题,日本东芝公司进行了激光冲击处理工艺研究,并开发了一套独特的激光冲击处理设备和工艺^[3],如图1所示。采用小能量和小光斑(光斑 $\phi 0.8\text{mm}$,能量 200mJ ,脉宽 8ns)激光分别对核反应堆压力容器、管道接头等焊缝进行了激光冲击处理,以提高焊缝的抗应力腐蚀裂纹性能。由于核反应堆中空间限制,不能按照常规冲击处理方式布置吸收层,该公司采用的是无吸收层的激光冲击处理技术,并采用光纤传导激光的方式,直接在作为约束介质的水中冲击。为消除表面激光烧蚀导致的拉应力,日本东芝公司采用了大于 1000% 的高搭接率的激光冲击处理。

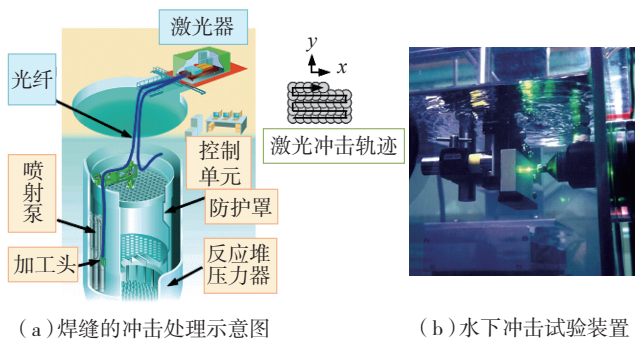


图1 日本东芝公司能源中心核工业激光冲击应用
Fig.1 Application of laser peening on nuclear plants of TOSHIBA

2011年前,日本东芝公司每年需要对 $6\sim 10$ 个核反应堆进行激光冲击处理,日本大地震后,福岛第一核电站损毁极为严重,大量放射性物质泄漏到外部。2013年,这座世界上最大的核电站被永久废弃,日本东芝公司丧失了最大的国内市场,但欧洲、美国、韩国等开始重视激光冲击处理在核工业上的应用前景。

1.2 国内激光冲击处理焊接结构的研究

国内虽然尚未开展在核工业焊接结构上的激光冲击处理应用研究,但针对GH30高温合金和 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 不锈钢材料不同焊接方法的焊缝进行了激光冲击处理工艺研究,为该工艺在核工业方面的应用奠定了基础。在国内,开展激光冲击处理技术应用研究的单位主要有北京航空制造工程研究所、空军工程大学、江苏大学等。

北京航空制造工程研究所针对GH30氩弧焊和 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 等离子焊焊接接头进行了激光冲击处理。激光冲击处理的GH30焊接接头强度提高了 12% 左右,但对疲劳寿命影响不明显;激光冲击处理的 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 焊接接头强度提高仅为 5% ,但疲劳寿命提高 300% 以上^[4-5]。GH30高温合金在焊接前为单相奥氏体组织,氩弧焊后焊缝中形成明显的枝晶组织,如图2所示。枝晶基体为奥氏体,轴晶为碳化物。经激光冲击处理后,焊

接区的显微硬度明显提高,在激光冲击区中心最大值达到 330HV ,整个冲击区平均显微硬度为 280HV ,比冲击前的显微硬度水平明显提高。根据以前同一参数下激光冲击处理GH30显微硬度随层深分布规律^[5],激光冲击处理后显微硬度随层深加大而下降,总的硬化层深约 0.5mm 。所以激光冲击处理GH30焊接接头后,由于冲击波产生的应变硬化,焊接区的显微硬度和接头抗拉强度均有明显的提高。 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 不锈钢等离子焊接后焊缝的显微硬度从母材的 $\text{HV}195$ 降为 $\text{HV}170$ 。北京航空制造工程研究所激光冲击处理后焊缝硬度水平略有提高,达到母材水平。经分析,由于激光冲击处理减弱了形变马氏体对显微硬度强化作用,因此,冲击处理对接头抗拉强度影响不大。但北京航空制造工程研究所研究表明,激光冲击处理后焊缝表面残余拉应力转化为 -200MPa 压应力状态,有利于提高接头疲劳性能。

北京航空制造工程研究所与南京工业大学合作开展了激光冲击处理焊缝抗应力腐蚀裂纹的研究^[6]。采用的试验材料为 76mm (长) $\times 72\text{mm}$ (宽) $\times 5\text{mm}$ (厚)的 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 块,沿长度方向在试块中间进行TIG焊接(如图3所示)。以黑漆为吸收层,流水为约束层,采用光斑搭接方式对整个焊缝及热影响区进行激光冲击

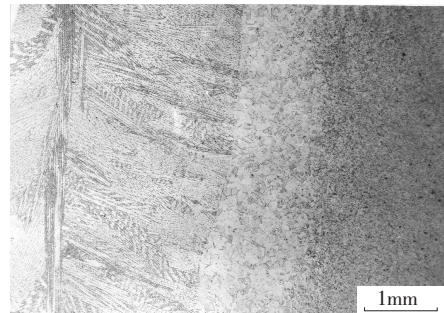


图2 激光冲击处理后焊缝剖面组织
Fig.2 Welding line cross section after laser peening

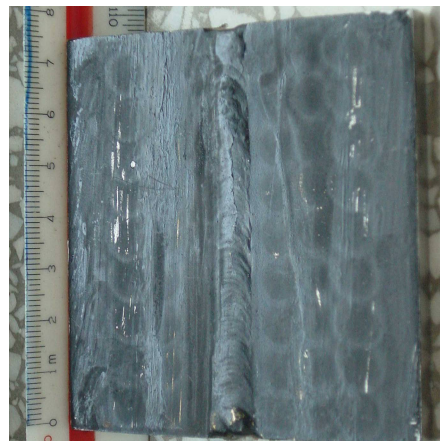


图3 完成焊接的不锈钢板
Fig.3 Welded stainless steel plate

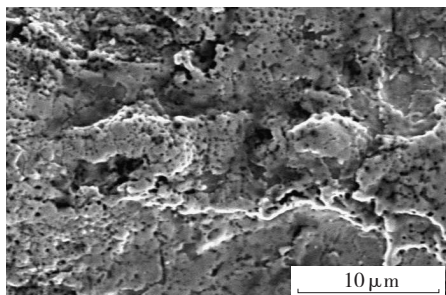
处理。研究表明激光冲击处理后焊缝区表现为压应力。为了揭示其机理,北京航空制造工程研究所对激光冲击处理后焊缝的显微组织进行了分析。研究表明激光冲击处理提高了焊缝及热影响区的位错密度,从而使焊缝区残余应力得到改善。随后将焊缝浸泡在 42% 沸腾 $MgCl_2$ 溶液中进行加速腐蚀试验。没有经过强化的焊缝在 25h 即产生应力腐蚀开裂,而 45% 和 80% 激光冲击处理覆盖率的焊缝产生应力腐蚀开裂时间为分别为 300h 和 985h。产生开裂的原因初步分析是,在实际激光冲击处理过程中,热影响区没有被完全覆盖到。因此可以预测在 100% 以上的覆盖率情况下,焊缝激光冲击强化后产生应力腐蚀开裂的时间会更长。

1.3 国内外研究的对比

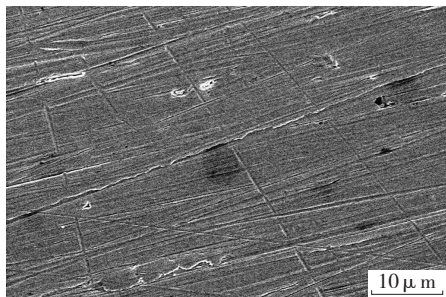
针对核工业钢结构材料的激光冲击处理,国内采用了带吸收层的激光冲击处理方式,而日本采用的是无吸收层的激光冲击处理方式。

日本东芝公司对其焊缝的激光冲击处理没有采用常规的吸收涂层,只依靠焊缝结构自身吸收激光能量在水中产生高温高压的等离子体,并产生激光冲击波。由于其激光冲击处理覆盖率很高,相当于每点要承受 10 次的激光直接烧蚀,这样会导致冲击区表面产生一层黑色氧化皮,如图 4 (a) 所示。由于吸收层的存在以及其工艺特点,国内的激光冲击处理后焊缝看不出激光烧蚀痕迹,表面只能看见机械加工的细小划痕,如图 4 (b) 所示。

与国内带有吸收层的冲击处理相比,日本东芝公司



(a) 无吸收层



(b) 有吸收层

图4 有无吸收层情况下不锈钢激光冲击处理后的表面形貌
Fig.4 Surface appearance of laser peened stainless steel with and without absorbing layer

激光冲击处理后焊缝有明显的烧蚀疏松组织。在表面残余应力测试中,两者的表面残余压应力均在 $-600 \sim -700MPa$ 左右,并且 2 种激光冲击处理方式对薄板试件单面冲击后产生的弧高也接近。在试验中,国外无吸收层激光冲击处理表面微米级厚度的疏松表面组织很快被腐蚀或者被流体冲刷干净,露出致密波纹状的残余压应力层,此组织延缓了应力腐蚀裂纹的萌生和生长。

综合分析,在实际结构中,虽然焊缝表面本来就是一层氧化皮,并直接充当了常规激光冲击处理的吸收层;但对于焊缝结构,采用吸收层进行激光冲击处理是必要的,否则会造成表面的烧蚀和疏松。

2 激光冲击处理在我国核工业领域的展望

我国目前是世界上能源消耗和环境污染排放量最大的国家之一,以煤为主发电的能源结构对经济的可持续发展提出了严峻挑战。加大先进核电技术的引进、消化和吸收,加快核电发展速度在我国迫在眉睫。在设计时就考虑节能减排,考虑核电设施的抗老化和应力腐蚀开裂等问题对我国核电技术的发展具有重大的意义。

目前国际上激光冲击处理技术已成功用于航空、核电等领域,国内北京航空制造工程研究所、苏州热工研究院合作开展了激光冲击处理不锈钢结构抗应力腐蚀裂纹的研究。与日本东芝公司早期的核电站在维修过程中才引入激光冲击处理不同,我国的核电站建设处于初期,也是建设的高峰期,在研制之初即考虑激光冲击处理的应用非常必要,而开放式焊接结构的激光冲击处理实施难度会大大降低。

北京航空制造工程研究所在焊接结构抗应力腐蚀强化过程中可以根据不同结构特点采用大光斑激光冲击处理、有吸收层激光冲击处理、小光斑无吸收涂层冲击处理以及与其他强化方式相结合的方式,在提高表面强化效率、强化质量和降低运行成本的同时,也为后期的维护保养储备了相关技术。相信通过立足于国内开发,辅以适当的国际合作,我国在激光冲击处理核反应堆焊接结构提高抗应力腐蚀性能方面必将取得突破性进展,为我国清洁能源的发展做出巨大贡献。

另外,随着航空制造技术的发展,在我国新型飞机和发动机结构上也越来越多地采用了焊接技术。因此,在航空焊接结构研制中,激光冲击强化不仅具有广泛的应用前景,而且能改善接头的性能。

参考文献

- [1] Clauer A H, Fairand B P, Wilcox B A. Laser shock hardening of weld zones in aluminium alloy. *Met Trans A*, 1977, 8A: 119-125.

(下转第 94 页)

表1 与故障电弧相似情况下的判据排除

| 相似条件的干扰 | 排除判据 |
|-----------|----------------|
| 接触器, 开关开合 | 100ms 内达不到 8 次 |
| 外部干扰 | 硬件滤波即可排除 |
| 电源品质的突变 | 硬件滤波即可排除 |
| 周期负载 | 周期远大于 100ms |

以后, FAA 和 EASA 在适航里面加入了电气线路互联系统, 并且加强了对于线路电弧的检测。

在飞机的配电系统的应用中, 电气负载可分为一般负载、重要负载和关键飞行任务负载。一般负载, 多是增加乘客舒适、便携和提供娱乐的负载, 失去这些负载对飞行任务及安全性无影响。一般负载中, 特别是连接有大功率设备的电路(如厨房和机载娱乐设施), 工作时电流大, 一旦发生电弧, 将产生很大的能量, 进而引起线路燃烧。此类电路需要电弧保护, 且一旦发生电弧, 可以立即切断电路, 并且通过通信总线把状态返回到驾驶舱显示面板。

重要负载及一些关键飞行任务负载非常重要, 这些负载和飞机起降、飞行的安全性有直接的关系, 所以, 这些负载将优先确保供电。比如, 起落架装置、过燃油箱的一些负载的线缆, 此类负载的线路中如果产生电弧, 首先将会把电弧故障的告警信号传到驾驶舱, 按照当前的情况, 由飞行员综合考虑是否切断负载的电源。

飞机上故障电弧发生后危险区域, 一般可以归结为:

- (1) 飞行过程中的娱乐系统及厨房设备;
- (2) 货舱和行李舱;
- (3) 燃油箱;

(4) 比较潮湿的区域, 比如: 起落架装置的线缆、驾驶舱窗口加热器和机翼防冰加热器的线缆;

(5) 一些平常震动较平常的区域, 可能由于年代问题而线路老化的区域, 如图 4 所示。

一般的负载, 采用固态配电后, 都可以采用带有电弧检测功能的 SSPC (即电子断路器) 进行配电。飞机配电中引入电弧检测保护, 将会给飞机带来更高的安全性。

4 结束语

目前, 对于故障交流电弧的检测方法, 国外已经成熟, 并且电弧检测的断路器已经通过适航并且用于民用飞机中。国内, 这方面的检测刚刚起步。此方案后续试验中, 对于故障电弧还是能很好地进行判断及检测。在故障电弧的检测中, 最需要的是要准确, 后续将着力于减少误判次数、禁止误判, 所以必须在软件中对判据进

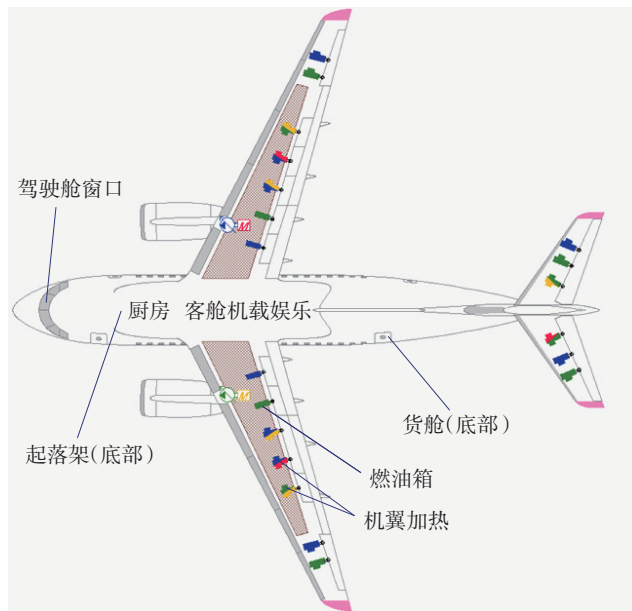


图4 机上特别需要电弧保护的区域
Fig.4 Zones needing arc-fault protection in aircraft

行更加准确的计算, 如可以在信号采集调理后进行傅里叶变换等计算, 在频域中放大故障数据, 再者, 增加新的甄别逻辑, 从而能更准确地进行检测判断。

参考文献

[1] 石海平. 飞机配电固态功率控制器组研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2010.
 [2] George D G, Kon W, Robert F D. More about arc-fault circuit interrupters. IEEE Transactions on Industry Application, 2004: 1006-1011.
 [3] 吴卓奇. 具有电弧检测功能的直流固态功率控制器的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
 [4] 王莉. 航空交流故障电弧特性的研究. 低压电器, 2011(2): 19-23.
 [5] UL 1699. Arc-fault circuit-interrupters. UL Stand for Safety for Arc-Fault Circuit-Interrupters, 2002:31.

(责编 亿霖)

(上接第 91 页)

[2] King A, Evans A D. The effect of fatigue on residual peening stresses in aerospace components. Materials Science Forum, 2005, 490-491: 340-345.
 [3] Sano Y, Adachi T. Enhancement of surface property by low-energy laser peening without protective coating. Key Engineering Material, 2007, 345-346: 1589-1592.
 [4] 邹世坤, 王健, 王华明. 激光冲击处理对焊接接头力学性能的影响 (I). 焊接学报, 2001, 3: 79-81.
 [5] 邹世坤, 王健, 王华明. 激光冲击处理对焊接接头力学性能的影响 (II). 焊接学报, 2001, 4: 66-68.
 [6] 彭薇薇. 喷丸对不锈钢焊接接头应力腐蚀开裂影响的研究 [D]. 南京: 南京工业大学, 2006.

(责编 志一)