

## Nd YAG 激光用于热交换管的现场修复

彭 云 陈武柱

Kim Jae-Do

(清华大学机械工程系,北京,100084)

(仁荷大学机械工程系,仁川 402-751,韩国)

**摘要:** 介绍了可用于受损管件现场修复的内衬管环形 Nd YAG 激光深熔焊结构及装置。内衬管设计成内凹状,以减小轴向变形拘束度,降低焊接残余应力,从而降低应力腐蚀倾向。光导纤维将激光导入内衬管内,旋转斜面镜将激光反射到内衬管内壁并产生一深熔环形焊道。熔化金属凝固后将内衬管与外管连接在一起,并防止液体渗入损坏的外管部分。实验结果表明,激光焊母材热影响区晶粒长大较小,激光脉冲峰值影响焊缝连接宽度,而连接宽度影响拉伸剪切强度。焊接接头的拉伸剪切强度约为 Inconel 600 管拉伸强度的 62%。

**关键词:** Nd YAG 激光 脉冲焊接 热交换管 内衬管

## On-site repair of heat exchange tubes with Nd YAG laser

*Peng Yun, Chen Wuzhu, Kim Jae-Do\**

(Dept. of Mechanical Engineering, Tsinghuan University, Beijing, 100084)

(\*Dept. of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea)

**Abstract:** In the paper, the composition and equipment for on-site repair of damaged tubes by circular Nd YAG laser deep penetration welding of inner sleeves are introduced. The inner sleeve is designed to be concave to reduce their axial constraints so that the residual stress of the welded part can be reduced and the tendency of stress corrosion can be decreased. Laser light is transmitted into the inner sleeve through an optical fiber, then reflected by a rotating mirror onto the inner wall, finally a circular weld of deep penetration is produced. The melted metal connects the inner sleeve with the outer tube, and prevents liquid seeping to the damaged part of the tube. Experimental results indicate that the grain growth of heat affected zone of parent metal caused by laser welding is small, the connection width is influenced by pulse power and that the tensile shear strength is influenced by pulse power and that the tensile shear strength is influenced by connection width. The tensile shear strength of the welded joint is about 62% of the tensile strength of Inconel 600 tube.

**Key words:** Nd YAG laser pulsed welding heat exchange tube inner sleeve

- 3 Dupont G. Inside the Pentagon, 1999-06-03:11
- 4 Tirpak A. Air Force Magazine, September 1999-09:52
- 5 Department of Defense Laser Master Plan. High Energy Laser Executive Review Panel, 2000-03-24
- 6 McCall G H. New World Vistas: Air and Space Power for 21th Century, USAF Scientific Advisory Board.
- 7 Opall- Kome B, Ratnam G. Defense News, 2000-09-19:4
- 8 Gonrley S. Jane's Defense Weekly, 1999-10-27:4
- 9 Seffers I. Defense News, 2000-04-10:1
- 10 Vetrovec J. SPIE, 2000:3931:60

作者简介:任国光,男,1938 年出生。研究员。现从事激光技术发展策略研究工作。

收稿日期:2001-02-19

## 引 言

热交换管是核电站的重要部件。经过长期高温工作,管件会由于磨损和腐蚀而在局部区域发生损坏。为保证核电站安全工作、缩短维修时间、降低维修成本,需对损坏部件进行现场修复。

激光是一种高能量密度能源,激光焊接具有高的生产率和对基体金属较低的热影响。激光束具有一定的焦深,小的焦点尺寸,能产生大深宽比(熔深对熔宽比)的焊缝。 $\text{CO}_2$  激光是最早用于焊接的激光能源,大功率  $\text{CO}_2$  激光可用于厚板高速焊。与  $\text{CO}_2$  激光焊相比,Nd YAG 激光最引人注目的优点是其可用光导纤维传输,如 Nagshima<sup>[1]</sup> 等开发的 Nd YAG 激光焊接系统,可通过光导纤维将 2kW 激光束传输到 225m 远的焊接装置进行焊接。Nd YAG 激光的这些特点使其可用于核电站管件的现场修复焊接。并且,金属对 Nd YAG 激光能量的吸收率高于  $\text{CO}_2$  激光,有利于提高能量利用率。Nd YAG 激光在焊接方面可应用到薄板焊<sup>[2]</sup>、点焊<sup>[3]</sup>、镀层钢板焊<sup>[4]</sup>、不锈钢焊接<sup>[5]</sup>、太空焊接<sup>[6]</sup> 等。我们设计了适合核电站热交换管 Nd YAG 激光修复的焊接结构,介绍了实现管件内壁激光环缝焊的装置,进行了内衬管环行深熔焊接实验,分析了焊接接头的组织及力学性能。

### 1 修复焊接结构及激光焊接装置

将修复焊接结构设计成一内衬管,置于管件损坏部位内侧,在内衬管两端用 Nd YAG 激光进行环缝深熔穿透焊,激光将内衬管穿透并将外管件熔化一定深度,溶化金属凝固后将内衬管与外管件连接在一起,同时焊缝可防止液体渗入外管件损坏部位。

应力腐蚀是核电站热交换管损坏的一个重要原因。为了延长管件修复后的使用寿命,应尽量减小修复焊接后的残余应力。为此,将内衬管设计成内凹状,如图 1 所示,使内衬管在轴向变形的拘束力减小。这种轴向拘束小的结构可减小焊接残余应力,从而降低应力腐蚀倾向。

热交换管和内衬管材料分别为 Inconel 600 和 Inconel 690,它们的化学成分如表 1 所示。热交换管的外径为 22.2mm,厚度为 1.2mm。内衬管两端焊接部位的外径为 20.8mm,厚度为 1mm。

Table 1 Chemical compositions of Inconel 600 and Inconel 690

	Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu
Inconel 600	75.1	15.40	8.00	0.010	0.10	0.30	—	0.001	—	0.20
Inconel 690	58.3	29.81	10.68	0.021	0.39	0.28	0.008	0.002	0.34	0.01

脉冲式 Nd YAG 激光用来进行焊接,平均功率为 400W,脉冲宽度分别采用 7ms 和 12ms。Nd YAG 激光波长为  $1.06\mu\text{m}$ ,可用光导纤维传导,这个特性使它可用于现场焊接。激光的反射特性使其行进方向可被转折,从而可焊接内衬管的内壁。激光束是一种高能量密度能源,可产生深熔焊缝,因此,能够穿透内衬管并部分熔化外管,使内衬管与外管连接在一起。

所设计的焊接装置如图 2 所示。光导纤维将激光导入内衬管内,旋转斜面镜用来将激光

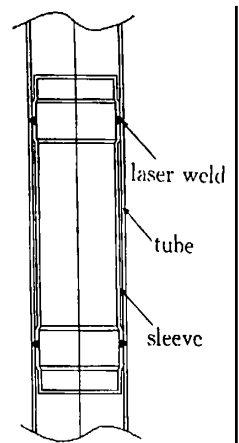


Fig. 1 Schematic illustration of the designed structure

反射到内衬管内壁并产生一环形焊道。氩气用来保护熔池以防其在高温下氧化,焊接速度为 160 ~ 260mm/min。

## 2 实验及讨论

图 3 所示为焊接接头横截面,激光将内衬管熔透并部分熔化外管,熔化金属将内衬管与外管连接在一起,并防止液体渗入损坏的外管部分。图 4 为焊接接头的金相组织,内衬管、外管和焊缝金属组织均为奥氏体。在内衬管和外管的热影响

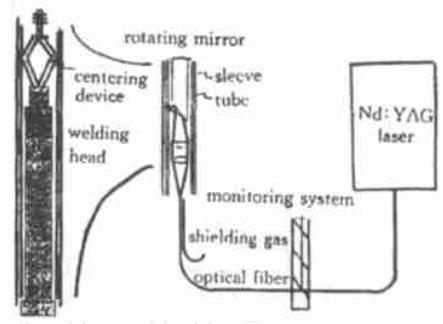


Fig. 2 Equipment for the welding of inner wall of sleeve

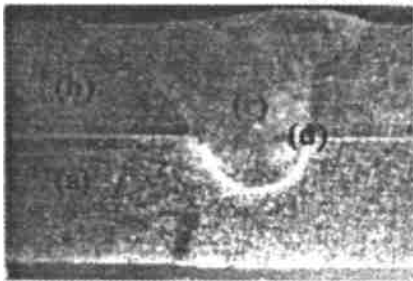


Fig. 3 Cross section of the welded joint

区,晶粒长大程度很小,表明激光焊对基体金属的热影响较小。在熔池,晶粒从熔合线向熔池中心生长,形成柱状晶结构,表明焊缝金属冷却速度较快。在焊缝金属和热影响区中无热裂纹,这是因为金属中硫含量很低,且焊接热应力较小。

影响接头形状的焊接参数包括平均功率、脉冲峰值、脉冲宽度、焊接速度。在平均功率相同的情况下,连接宽度随脉冲峰值增大明显增大,如图 5 所示。当

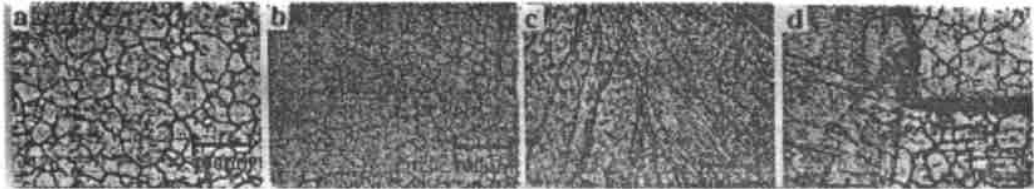


Fig. 4 Microstructure of the welded joint

a - Inconel 600 b - Inconel 690 c - center of weld d - melting line

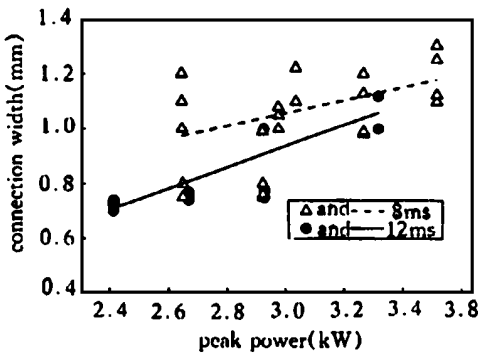


Fig. 5 Relationship between connection width and peak power

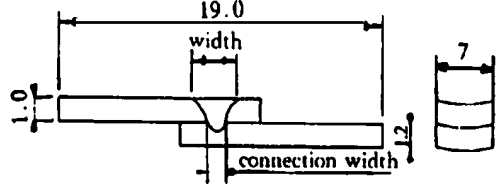


Fig. 6 Specimen for tensile shear test (mm)

脉冲宽度为 12ms 时,脉冲峰值对连接宽度的影响,比脉冲宽度为 7ms 时更明显。这里连接宽度指内衬管和外管之间的焊缝宽度,如图 6 所示。图 6 为接头拉伸剪切试验用试样。图 7 为试样拉伸剪切强度。焊接接头的拉伸剪切强度

在 310 ~ 440MPa 之间,当连接宽度为 0.65mm 时,拉伸剪切强度最高。焊缝金属的拉伸剪切强度主要取决于其化学成分和冷却速度,而冷却速度则由焊接参数决定。较小的连接宽度对应于较快冷却速度,故拉伸剪切强度较高。但当连接宽度过小时,焊缝成形不好,有时不能

与外管很好结合,导致试验所得拉伸剪切强度值较分散,平均值降低。拉伸剪切强度的总平均值为 340MPa,相当于 Inconel 600 管拉伸强度 550MPa 的 62%。因焊缝主要起连接作用及防止液体渗入损坏的外管部分,较低的拉伸剪切强度不影响结构的服役。

### 3 结 论

(1)Nd YAG 激光可用光导纤维传导,能被反射而使其行进方向转折,可产生深熔焊缝,利用这些特性可进行管件的现场内衬管环形深熔焊修复。(2)将内衬管设计为内凹状,可使其轴向变形拘束度减小,降低焊接残余应力,从而降低修复管件的应力腐蚀倾向。(3)激光焊对外管和内衬管的热影响较小。激光脉冲峰值影响焊缝连接宽度。当连接宽度为 0.65mm 时,拉伸剪切强度最高。焊接接头的拉伸剪切强度在 310~440MPa 之间,平均值为 Inconel 600 管拉伸强度的 62%。

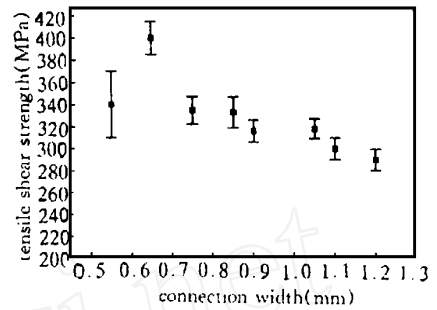


Fig. 7 Tensile shear strength of welded joints at different connection width

### 参 考 文 献

- 1 Nagashima T, Yokoyama A, Akaba T *et al.* Weld World, 1994; 34: 133 ~ 138
- 2 Lingenfelter A C. Laser Welding Thin Cross Sections. Conference: LAMP '87: Laser Advanced Materials Processing-Science and Applications, Osaka, Japan, 21-23 May 1987. Publ: High Temperature Society of Japan, c/o Welding Research Institute of Osaka University, 11-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567, Japan, 1987: 211 ~ 216
- 3 Nakajima Y. Weld Int, 1987; 1(5): 485 ~ 48
- 4 Graham M P, Hira D M, Kerr H W. J Laser Appl, 1994; 6(4): 212 ~ 222
- 5 Goswami G L. Indian Welding Journal, 1991; 23(2): 80 ~ 82
- 6 Kaukler W F, Workman G L. Laser Welding in Space. Conference: Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by Welding, New Carrollton, Maryland, USA, 24-26 Sept 1991. Publ: American Welding Society, 550 N W LeJeune Rd, Miami, Florida 33126, USA, 1991: 318 ~ 334

作者简介:彭 云,男,1963年3月出生。高级工程师,博士后。从事材料加工工程及自动化方面的研究工作。

收稿日期:2000-06-02 收到修改稿日期:2000-07-31

请向邮局订阅 2002 年度激光技术

国内刊号:CN51-1125/TN 邮发代号:62-74