

# 激光冲击次数对 TC4 氩弧焊焊缝微结构及性能的影响

许海鹰 邹世坤 车志刚 曹子文

(北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

**摘要** 采用脉宽 30 ns, 能量 40 J 的调 Q 掺钕玻璃激光对 TC4 钛合金钨极惰性气体(TIG)焊焊缝进行了 1~3 次的激光冲击强化(LSP)处理, 并与未经 LSP 处理的焊缝的表面显微硬度、焊缝微观组织、接头的拉伸力学性能和拉伸断口的扫描电镜(SEM)照片进行比较, 研究 LSP 处理次数对 TC4 钛合金 TIG 焊焊缝组织性能的影响。结果表明, LSP 能够使焊缝横截面靠近材料表面的区域针状  $\alpha'$  相数量减少, 热影响区靠近材料表面的区域细小等轴晶数量增加; 随着 LSP 处理次数的增加, TC4 钛合金 TIG 焊接头表面的显微硬度增加; 焊接接头的抗拉强度和屈服强度变化不明显, 而断后延伸率出现降低趋势。

**关键词** 激光技术; 激光冲击处理; TC4 钛合金; 钨极惰性气体焊焊缝; 表面硬度; 微观组织; 拉伸力学性能

**中图分类号** TN249; TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0303002

## Influence of Laser Shock Processing Times on TC4 Argon Arc Welding Joint Microstructure and Properties

Xu Haiying Zou Shikun Che Zhigang Cao Ziwen

(National Key Laboratory of High Energy Density Beam Processing Technology, AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

**Abstract** Q-switched Nd: glass laser with 30 ns pulse-width and 40 J energy is introduced to shock TC4 titanium alloy tungsten inert gas (TIG) welding joints once, twice and three times, separately. In order to study the influence of laser shock processing (LSP) disposal times on TC4 TIG welding joints microstructure and properties, surface HV hardness, microstructure, tensile property and scanning electron microscope (SEM) fracture photos of these joints are analyzed. Comparing with those joints without LSP treatment, surface HV hardness of weld beads treated by LSP is decreased. HV hardness on weld bead surface and that on the heat affected zone (HAZ) surface are hardly different. The amount of  $\alpha'$  phase near LSP treatment weld bead surface is reduced, and fine grains are increased in the HAZ. With the increase of LSP treatment times, HV hardness is improved on weld joints surface. Although LSP treatment joints tensile strength and yield strength are not distinctly change, specific elongation is shown fall trend along with LSP treatment times increased.

**Key words** laser technique; laser shock processing; TC4 titanium alloy; tungsten inert gas welding joint; surface micro-hardness; microstructure; tensile property

**OCIS codes** 140.2540; 140.3538; 140.3580

## 1 引 言

激光冲击处理(LSP)技术可使金属材料表面获得残余压应力,能大幅提高金属材料的表面硬度和疲劳寿命<sup>[1~5]</sup>。目前,美国已经将 LSP 技术广泛应用于航空发动机的生产过程中,不但增强了飞行器的安全系数,提高了其可靠性和使用寿命,而且取得

了显著的经济效益<sup>[6,7]</sup>。金属材料 LSP 的处理效果除了受激光功率密度的影响外,还与 LSP 处理的次数密切相关。文献[8]的研究表明,LSP 处理的激光功率密度一定时,金属表面获得的残余压应力随着冲击次数的增加而增大。LSP 处理次数增加,残余压应力增大,说明金属表面层产生塑性变形大,金

收稿日期:2010-08-11; 收到修改稿日期:2010-10-20

作者简介:许海鹰(1973—),男,博士,工程师,主要从事高能束加工技术方面的研究。E-mail: xhyxhy@126.com

属表层的微观组织会发生变化,相应的力学性能也会受到影响。

开展了多次 LSP 处理 TC4 钛合金钨极惰性气体(TIG)焊接头的研究工作,这对于正确选择能够提高 TC4 钛合金 TIG 焊接头组织性能的 LSP 焊后处理工艺具有重要意义。采用优化的 LSP 处理工艺对在航空航天工业领域及其他工业领域得到大量应用的 TC4 钛合金 TIG 焊接头进行焊后处理,不但可以避免由于焊后热处理工艺选择不当导致的接头组织粗大及母材性能弱化的问题<sup>[9,10]</sup>,而且可以不受空间限制,对大型焊接构件进行焊后处理。

本文采用波长 1064 nm,脉宽 30 ns,脉冲能量

40 J 的调 Q 掺钕玻璃激光对 TC4 钛合金 TIG 焊缝进行了不同次数的 LSP 处理,对于经过不同次数 LSP 处理过的焊缝,对比分析了焊缝的表面硬度、微观金相组织、接头的拉伸力学性能和拉伸断口的扫描电镜(SEM)照片,研究 LSP 处理次数对 TC4 钛合金 TIG 焊缝组织性能的影响,这对于 LSP 技术在航空航天工业领域的推广应用可提供有益的借鉴。

## 2 实验材料与工艺方案

TC4 是一种中等强度的  $\alpha + \beta$  两相型钛合金,其化学成分的质量分数如表 1 所示。

表 1 TC4 钛合金化学成分

Table 1 Chemical ingredient of TC4

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
5.5~6.8	3.5~4.5	≤0.3	≤0.1	≤0.05	≤0.015	≤0.2	Balance

表 2 TC4 钛合金 TIG 焊工艺参数

Table 2 TIG weld parameters of TC4

Weld current /A	Weld voltage /V	Weld speed /(mm/min)	Arc length /mm	Protection argon /(L/min)		
				Back	Drag cover	Muzzle
165	11	200	3	1~2	15	13

TC4 板材焊接工件的规格为 200 mm × 150 mm × 2.5 mm,采用常规直流 TIG 焊工艺进行填丝对接焊,焊丝为直径 1.0 mm 的 TA1,焊接工艺参数如表 2 所示。

对于焊后的 TC4 钛合金,根据 HB5484-91 的要求对焊缝进行 X 射线探伤检测,对于接头质量达到 I 级标准的焊接接头,进行 LSP 处理。

实验时,对于需要进行 LSP 处理的焊缝区域,用铝箔做吸收层材料,均匀的流水层做约束层,脉冲能量 40 J 激光经聚焦后垂直辐照在待处理的工件表面,光斑形状为直径 4.5 mm 的圆形光斑,用如图 1 所示的光斑搭接形式进行 LSP 处理。垂直于焊缝的焊接方向,依次冲击 5 次,使 LSP 处理的范围覆盖焊缝、热影响区(HAZ)和部分母材的区域。实验

时所选择的 LSP 处理次数为 1~3 次。为避免铝箔吸收层破裂而失去保护作用,对于 LSP 处理 2 次以上的工艺,采用多次更换铝箔的方式进行处理,焊缝正面和反面的 LSP 处理方式相同。

## 3 实验结果分析

### 3.1 表面硬度检测结果

采用 DHV-1000 显微硬度仪测试了焊接试样背面焊缝表面的维氏硬度,测试载荷为 500 g,加载后停留时间为 15 s。从焊缝中心线至母材每隔 0.5 mm 选取一个测试点,分别对经过 0~3 次 LSP 处理的焊缝进行维氏硬度检测,将所获得的数据绘制成如图 2 所示的微观显微硬度分布曲线。

由图 2 可见,未经 LSP 处理的 TC4 钛合金 TIG 焊接头,焊缝区材料表面的微观显微硬度较高,热影响区材料表面的显微硬度降低,焊缝区显微硬度与热影响区相差 70~40 HV,显微硬度波动较大,表明焊缝区与热影响区材料的微观组织有较大差别;与未经 LSP 处理的 TC4 钛合金 TIG 焊接头相比,经过 1,2 和 3 次 LSP 处理的焊接接头,焊缝区的材料表面显微硬度降低,热影响区材料表面的显微硬度升高,焊缝区与热影响区材料表面的显微硬度波动不大,表明这两个区域材料表面的微观硬

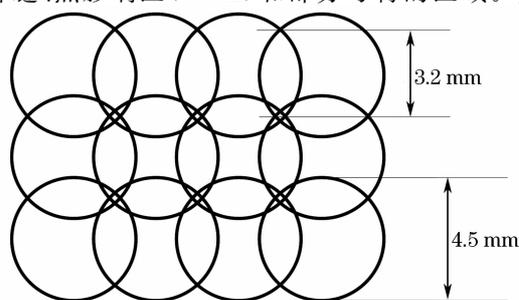


图 1 LSP 处理时的光斑搭接形式

Fig. 1 Overlap type of laser spot for LSP

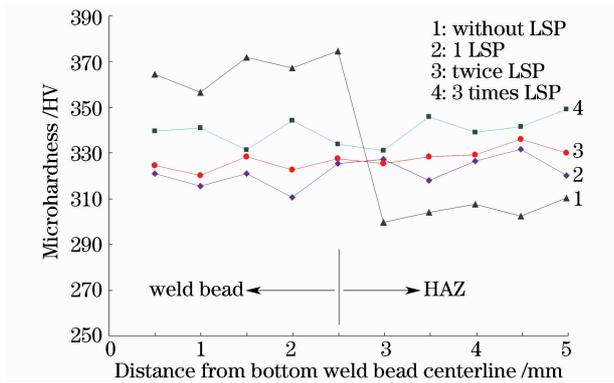


图2 不同次数 LSP 处理的焊缝从焊缝中心线到母材区的微观显微硬度分布

Fig. 2 Micro-hardness of different times LSP disposal weld bead from bead centerline to base material

度趋于一致。对比不同次数 LSP 处理的 TC4 钛合金 TIG 焊接头焊缝区、热影响区材料表面的显微硬度,发现随着 LSP 处理次数的增加,焊缝区和热影响区材料表面的显微硬度逐渐增大。

### 3.2 焊缝微观金相组织

图 3(a)和(b)分别为未经 LSP 处理与经过 3 次 LSP 处理的焊缝横截面靠近材料表面的 SEM 显微组织,可以看出未经 LSP 处理的焊缝,其微观组织为长针状  $\alpha'$  相及板条状  $\alpha$  相贯穿整个  $\beta$  相晶粒,针状  $\alpha'$  相之间相互平行。针状  $\alpha'$  相组织的出现造成了大量的相界,使焊缝区的硬度被加强。经过 LSP 处理的焊缝,靠近材料表面几乎没有看到贯穿整个  $\beta$  相晶粒的长针状  $\alpha'$  相,针状  $\alpha'$  相数量减少。通常  $\alpha+\beta$  型钛合金,焊缝硬度增加是由于针状马氏体  $\alpha'$  相大量产生引起的, $\alpha'$  相数量减少会使得焊缝硬度

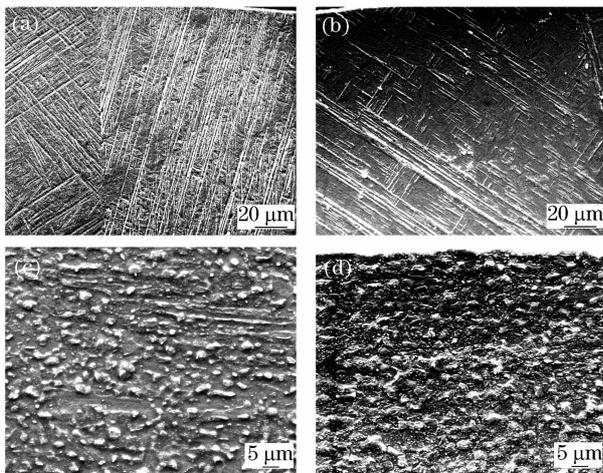


图3 经过 3 次 LSP 处理及未经 LSP 处理的 TC4 焊接接头显微组织

Fig. 3 Microstructure SEM photos of welding joints shocked by three times LSP and without LSP

降低。在图 3(b)中离材料表面较远的区域,大板条和粗大针状组织得以保留,说明在所选择的 LSP 处理工艺条件下,激光冲击作用对于离材料表面较远  $\beta$  相晶粒内的大板条和粗大针状组织的影响较小。

图 3(c)和(d)分别为未经 LSP 处理与经过 3 次 LSP 处理的接头熔合线附近指向母材一侧,靠近材料表面的显微组织。如图 3(c)所示未经 LSP 处理的接头,熔合线附近靠近母材区域组织为粗大等轴  $\alpha+\beta$  组织,并且还能较明显看到母材的轧制方向。如图 3(d)所示的显微组织,母材上的轧制方向几乎看不见,除了较粗大的等轴  $\alpha+\beta$  组织外,还出现大量的细小等轴晶粒,在材料表面,细小等轴晶粒弥散分布在表面附近区域,离材料表面较远的区域,细小等轴晶分布在粗大的等轴  $\alpha+\beta$  组织之间。经过 LSP 处理的接头,材料表面出现大量细小等轴晶,有助于提高材料表面的显微硬度。

### 3.3 拉伸力学性能

根据国标 GB/T228-2002,在室温 25 °C,以 1 mm/min 的速率分别对不同次数 LSP 处理的 TC4 钛合金 TIG 焊接头进行了拉伸力学性能检测。经过 1 次 LSP 处理的 TC4 钛合金 TIG 焊接头,拉伸断口均出现在热影响区边缘未经 LSP 处理的母材区。其他工艺处理的接头,其拉伸断口均出现在热影响区。获得的实验数据如表 3 所示。

表 3 不同次数 LSP 处理后 TC4 钛合金接头拉伸力学性能

Table 3 Tensile properties of TC4 welding joints shocked by different times LSP

LSP times	Tensile strength $\sigma_b$ /MPa	Yield strength $\sigma_{p0.2}$ /MPa	Specific elongation $\delta$ /%
0	1017.56	901.53	6.5
	1006.24	890.06	7.02
	1010.09	903.25	6.61
1	1071.02	954.14	11.34
	1066.22	986.05	11.12
	1069.03	975.02	10.98
2	1060.45	952.26	7.64
	1071.10	960.56	8.68
	1063.13	970.51	8.00
3	999.24	879.54	7.04
	1015.90	904.53	7.00
	1012.35	899.06	7.21

由表 3 可见,与未经 LSP 处理的焊接接头相比,经过不同次数 LSP 处理后,TC4 钛合金 TIG 焊接头抗拉强度、屈服强度增加不是很明显,断后延伸率有不同程度提高。对于经过 LSP 处理过的接头,

处理次数对接头的抗拉强度和屈服强度影响不大,但接头的断后延伸率随着 LSP 处理次数的增加都出现了较明显的下降趋势。2 次 LSP 处理的接头与 1 次 LSP 处理的相比,其抗拉强度和屈服强度的平均值降低很小,在 1% 以下,但断后延伸率平均值降低了 27%;3 次 LSP 处理的接头与 1 次 LSP 处理的相比,其抗拉强度、屈服强度和断后延伸率的平均值分别降低 5.5%,8% 和 36.5%。在所选择的实验条件下,经过 1 次 LSP 处理的接头,其接头的拉伸力学性能较好,与未经 LSP 处理的接头相比,其抗拉强度、屈服强度和断后延伸率的平均值分别增加了 5.6%,8.2% 和 66%。

### 3.4 拉伸断口形貌

对于拉伸断口,沿熔深方向,用 SEM 观察距离焊缝表面 0.5 mm 左右区域拉伸断口的韧窝。所有试样拉伸断口的宏观形貌为韧窝型韧性断口,韧窝形状与所采用的焊后处理工艺有关,图 4 是不同次数 LSP 处理的钛合金接头拉伸断口晶界处韧窝的 SEM 照片。图 4(a) 为未经 LSP 处理的 TIG 焊接头拉伸断口处的韧窝,粗大与细小韧窝相互交错。表明由 TC4 钛合金熔池凝固结晶过程中,由  $\beta$  相相变产生的  $\alpha$  相与针状  $\alpha'$  相的大小不均匀。图 4(b) 为经过 1 次 LSP 处理的 TIG 焊接头拉伸断口处的韧窝,由于断口出现在靠近熔合线附近的母材区,因此韧窝为大量等轴韧窝。经过 2 次和 3 次 LSP 处理的 TIG 焊接头拉伸断口均出现了如图 4(c) 和 (d) 所示的韧窝,只是经过 3 次 LSP 处理的接头,拉伸断口中存在如图 4(d) 所示的韧窝所占比例更大一些。

文献[11]研究表明,在 LSP 处理时,冲击区域

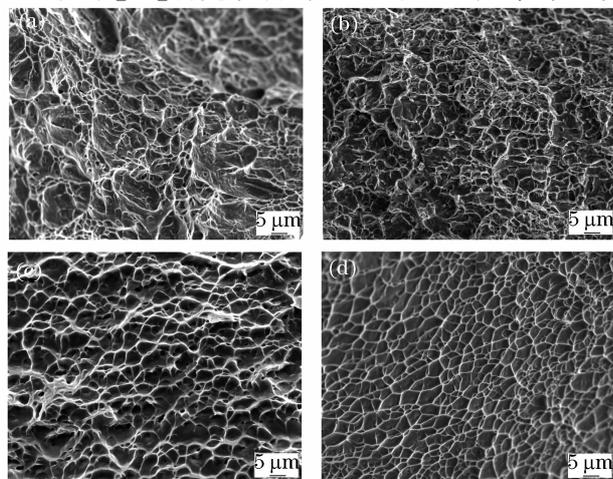


图 4 不同次数 LSP 处理接头拉伸断口韧窝

Fig. 4 Tough-nests appearance of TC4 welding joints shocked by different times LSP

的材料会产生强烈的塑性变形,并伴随瞬时急热急冷过程,使得冲击区材料发生相变。对于 TC4 钛合金 TIG 焊缝,其原始的焊缝组织为粗大  $\beta$  相包围着  $\alpha$  相与针状  $\alpha'$  相,不同的  $\beta$  相内, $\alpha$  相与针状  $\alpha'$  相的取向不一致,这就造成了不同取向的  $\alpha$  相与针状  $\alpha'$  相与激光冲击作用力的方向之间存在角度差,使得在承受同等激光冲击作用力的情况下,与激光冲击作用力方向夹角大的  $\alpha$  相与针状  $\alpha'$  相出现严重的塑性变形。又由于受到 LSP 处理时伴随的瞬时急热急冷,使  $\alpha$  相与针状  $\alpha'$  相发生相变。上述 LSP 处理过的焊缝靠近材料表面区域微观组织中  $\alpha'$  相数量的减少也说明了所述观点的正确性。

随着冲击次数增加,焊缝表面、热影响区表面的显微硬度增加,说明随着冲击次数增加,由 LSP 处理产生的塑性变形诱发材料相变的效果越明显。LSP 处理使材料表面变形诱发的相变是一个急热急冷的过程,相变产生的等轴晶长大过程迅速终止,但等轴晶向外长大的痕迹得到保留,这样拉伸断口中便出现了如图 4(d) 所示的韧窝。至于在经过不同次数 LSP 处理的同一接头中会出现如图 4(c) 和 (d) 所示的韧窝,可能由于不同的原始  $\beta$  相内  $\alpha$  相和  $\alpha'$  相产生的塑性变形不一样,由塑性变形诱发的相变程度也不一致,从而导致同一个拉伸断口中,不同区域出现的韧窝形状不同。

## 4 结 论

1) 经过不同次数 LSP 处理后,焊缝表面的显微硬度低于未经 LSP 处理的 TC4 氩弧焊接头,热影响区表面的显微硬度高于未经 LSP 处理的 TC4 氩弧焊接头;与未经 LSP 处理的 TC4 氩弧焊接头相比,焊缝表面与热影响区表面的显微硬度相差不大,随着 LSP 处理次数增加,焊缝表面和热影响区表面的显微硬度逐渐得到提高。

2) 与未经 LSP 处理的 TC4 氩弧焊接头相比,经过 LSP 处理的接头,焊缝横截面靠近材料表面的区域针状  $\alpha'$  相数量减少,热影响区靠近材料表面的区域细小等轴晶数量增加。

3) 与未经 LSP 处理及其他次数 LSP 处理的 TC4 钛合金 TIG 焊接头相比,经过 1 次 LSP 处理的接头的拉伸力学性能较好,其抗拉强度、屈服强度、断后延伸率的平均值分别提高了 5.6%,8.2% 和 66%;在 LSP 处理次数从 1 次增加到 3 次过程中,接头的抗拉强度和屈服强度变化不明显,断后延伸率逐渐降低。

参 考 文 献

- 1 A. H. Clauer, D. F. Lahrman. Laser shock processing as a surface enhancement process [J]. *Key Engineering Materials*, 2001, **197**:121~144
- 2 C. Rubio-Gonzalez, J. L. Ocaña, G. Gomez-Rosas *et al.*. Effect of laser shock processing on fatigue crack growth and fracture toughness of 6061-T6 aluminum alloy [J]. *Mater. Sci. Eng.*, 2004, **386**(1-2):291~295
- 3 Li Qipeng, He Weifeng, Tong Chonglou *et al.*. Study of laser shock processing used in aero engine blades [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2008, **44**(4):37~39  
李启鹏,何卫锋,仝崇楼等. 航空发动机叶片的激光冲击强化研究[J]. 航空精密制造技术, 2008, **44**(4):37~39
- 4 Zhang Yongkang, Zhou Lichun, Ren Xudong *et al.*. Experiment and finite element analysis on residual stress field in laser shock processing TC4 titanium alloy [J]. *Journal of Jiangsu University (National Science Edition)*, 2009, **30**(1):10~13,18  
张永康,周立春,任旭东等. 激光冲击 TC4 残余应力场的试验及有限元分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2009, **30**(1):10~13,18
- 5 Wu Xianqian, Huang Chenguang, Song Hongwei. Parameters analysis of residual stress induced by laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10):2632~2637  
吴先前,黄晨光,宋宏伟. 激光冲击强化诱导的残余应力影响因素分析[J]. 中国激光, 2010, **37**(10):2632~2637
- 6 Zou Shikun. The application of laser shock processing in aeronautical industry [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2006, (5):36~38  
邹世坤. 激光冲击处理在航空工业中的应用[J]. 航空制造技术, 2006, (5):36~38
- 7 Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong *et al.*. Effect of laser shock processing on vibration fatigue properties of K417 material [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8):2197~2201  
李伟,何卫锋,李应红等. 激光冲击强化对 K417 材料振动疲劳性能的影响[J]. 中国激光, 2009, **36**(8):2197~2201
- 8 Ren Xudong, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong *et al.*. Study of the effect of laser shock processing on titanium alloy [J]. *J. Huazhong University of Science & Technology (Nature Science Edition)*, 2007, **35**(z1):150~152  
任旭东,张永康,周建忠等. 航空钛合金的激光冲击研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2007, **35**(z1):150~152
- 9 Liu Weihong, Cao Chunxiao, Li Yan *et al.*. Influence of postweld heat treatment on microstructure and mechanical properties of TIG welded joint of TD3 alloy [J]. *Material Engineering*, 2008, (1):68~72  
刘卫红,曹春晓,李艳等. 焊后热处理工艺对 TD3 合金钨极氩弧焊接头显微结构与力学性能影响[J]. 材料工程, 2008, (1):68~72
- 10 Wang Dayong, Feng Jicai, Xu Wei. Effect of heat treatment on microstructures and mechanical properties of Al-Li-Cu alloy TIG welded joint [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, **24**(6):23~24,50  
王大勇,冯吉才,许威. 热处理对 Al-Li-Cu 合金 TIG 焊接头组织及力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2003, **24**(6):23~24,50
- 11 Wang Huaming, Li Xiaoxuan, Sun Xijun *et al.*. Study of surface mechanical properties of laser shock processed austenitic steel and Ni-based superalloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(8):756~760  
王华明,李晓轩,孙锡军等. 激光冲击处理不锈钢及镍基合金后表面力学性能的研究[J]. 中国激光, 2000, **A27**(8):756~760