

## 激光与光电子学进展

## Co 含量和微裂纹对 WC 喷嘴抗激光冲击性能的影响

岳武<sup>1,2\*</sup>, 龚成功<sup>1</sup>, 胡伟<sup>1,2</sup>, 武子茂<sup>1</sup><sup>1</sup>兰州工业学院材料工程学院, 甘肃 兰州 730050;<sup>2</sup>甘肃省无损检测新技术工程研究中心, 甘肃 兰州 730050

**摘要** 以激光喷射锡球键合时使用的抗激光冲击性能存在明显差异的 WC 喷嘴为研究对象, 借助扫描电子显微镜/能量色散 X 射线光谱仪对比观察了微观组织及成分之间的差异, 结合材料与光束相互作用理论, 研究了 Co 含量和微裂纹影响 WC 喷嘴抗激光性能的微观机制。测试结果显示, WC 颗粒尺度、贯通状微裂纹和金属黏结剂 Co 含量存在明显不同。分析表明: 因烧结压强过大引起的贯通状微裂纹会对激光产生“光陷”现象, 并在其周围形成温度较高的热影响区, 该区域内熔点较低的 Co 易于熔化; 在喷嘴小孔前端热影响区附近, 熔化后的 Co 和锡球容易发生冶金反应, 形成沾锡, 严重时喷嘴失效; 裂纹越严重、Co 含量越高, WC 喷嘴的抗激光冲击性能越差。由此可知, 降低 Co 含量和烧结压强, 可以有效改善喷嘴的抗激光冲击性能。

**关键词** 激光技术; WC 喷嘴; 微观组织; 抗激光冲击性能; 激光束

中图分类号 TG456.7 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222498

## Effect of Co Content and Microcracks on Laser Shock Resistance of WC Nozzle

Yue Wu<sup>1,2\*</sup>, Gong Chenggong<sup>1</sup>, Hu Wei<sup>1,2</sup>, Wu Zimao<sup>1</sup><sup>1</sup>School of Materials Engineering, Lanzhou Institute of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;<sup>2</sup>Nondestructive Testing New Technology Engineering Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730050, Gansu, China

**Abstract** Taking the WC nozzle with obvious difference in laser shock resistance performance used in laser jet solder ball bonding as the research object, the difference between microstructure and composition was observed by means of scanning electron microscope/energy dispersive X-ray spectrometer. Combined with the theory of material beam interaction, the micro mechanism of the influence of Co content and microcracks on the laser resistance of WC nozzle was studied. The test results show that WC particle size, through microcrack, and metal binder Co content are obviously different. The analysis shows that the through microcracks caused by excessive sintering pressure will produce light trapping phenomenon to the laser, and form a heat affected zone with higher temperature around it, in which the Co with lower melting point is easy to melt. Near the heat affected zone at the front end of the nozzle small hole, the molten Co and tin ball are prone to metallurgical reaction, forming tin, and the nozzle will fail in severe cases. The more serious the crack and the higher the Co content, the worse the resistance to laser shock of WC nozzle. Therefore, reducing Co content and sintering pressure can effectively improve the laser shock resistance of the nozzle.

**Key words** laser technique; WC nozzle; microstructure; laser shock resistance; laser beam

## 1 引言

因具有定向性、单色性和能量集中等优点, 激光可以完成切割、焊接、快速成型、表面处理和增材制造等加工工序, 因此, 设计和开发性能更好的激光发生器及

成套设备已成为装备制造业最具活力的研究领域之一<sup>[1-2]</sup>。通常, 激光加工设备由激光发生器、传输系统、控制系统和机械系统组成<sup>[3-5]</sup>, 其中机械系统实现加工零件的固定和转运, 以满足对零件形状和尺寸等技术要求。以增材制造、激光熔覆和微纳连接为例, 激光经

收稿日期: 2022-09-07; 修回日期: 2022-10-03; 录用日期: 2022-10-17; 网络首发日期: 2022-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(51565024)、甘肃省重点人才项目、甘肃省教育厅产业支撑项(2021CYZC-47)

通信作者: \*pony.yue@163.com

过光纤传输、透镜整形和喷嘴约束后到达工件表面<sup>[1,6]</sup>,其中光纤和透镜的作用是激光传输和光斑调整,能量衰减极少,而喷嘴在激光冲击作用下逐渐烧损,当累积到一定程度时失效,延误生产。因此,喷嘴虽然不是此类激光加工设备的核心零件,却是关键零件,值得对其抗激光冲击性能进行改善。对于工作区域有较大空间的激光熔敷和增材制造设备,可以对喷嘴加设冷却水套避免烧损<sup>[1,6-7]</sup>。但对激光微纳连接设备,工作空间极其有限难以增设水套,因而只能用难熔或硬质材料加工成喷嘴,尽量避免因烧损而引起的缺陷,以满足设备长时间运行要求。

激光喷射锡球键合(LJSBB)是微电子封装领域近些年发展起来的新兴连接技术,除具有激光的优点外,该技术还具有非接触性特点,因此,特别适合于连接温度敏感元器件和制备尺寸极小的三维微纳焊点<sup>[8-9]</sup>,其中所使用的无冷却水套喷嘴结构及其工作原理如图 1

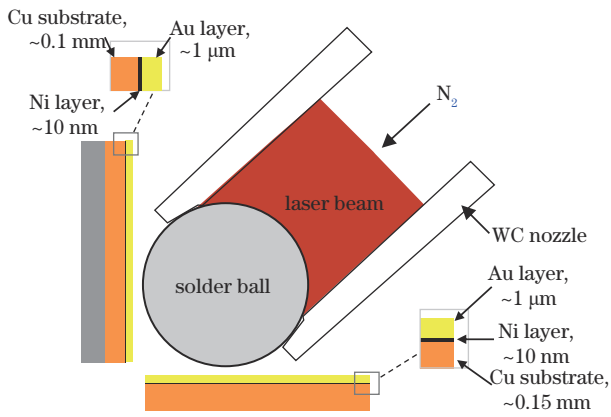


图 1 激光锡球键合制备直角型 Au/SnAgCu/Au 微焊点结构示意图

Fig. 1 Sketch of right-angle Au/SnAgCu/Au micro solder joints prepared by laser solder ball bonding

所示,常用 WC 和 Co 粉末混合均匀后在高温高压下烧结而成。最初,生产中使用的喷嘴抗激光冲击平均次数可以达到  $3.0 \times 10^5$  次,但所使用的喷嘴毛坯采购自国外,价格居高不下。后期使用国内价格低廉毛坯加工成的喷嘴,抗激光冲击平均次数曾低至  $2.0 \times 10^5$  次,个别喷嘴甚至更少。因频繁更换喷嘴的时间延误和沾锡引起的微焊点失效,给生产带来不小损失。众所周知,零件的性能与组织密切相关,喷嘴也不例外,因此,本研究通过对比抗激光性能差异明显的喷嘴之间的微观组织,分析其与激光束之间的相互作用,揭示 Co 含量和 WC 颗粒微裂纹影响喷嘴抗激光冲击性能的微观机理,进而为工程领域生产抗激光冲击性能良好的 WC 喷嘴毛坯及其类似材料提供理论依据和工艺参考。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 WC 喷嘴失效判断

图 2 是利用直径为  $80 \mu\text{m}$  锡球键合直角型微焊点时所使用的 WC 喷嘴实物,键合时,激光照射图 2(b) 中喷嘴前端吸附的锡球,锡球瞬间熔化后被  $\text{N}_2$  吹落到 Au 焊盘表面,然后在 Au-Sn 的润湿力作用下扩展形成微焊点。理论上,激光的焦点和光斑大小可以按生产要求调节,即焦点位置能够调节到锡球中心位置、束斑直径可以调整至要求的  $50 \mu\text{m}$  以内,从而保证喷嘴不受激光冲击和烧损。但是,受调试和加工误差影响,激光束的焦点一般会偏离锡球中心,而且喷嘴小孔很难与激光束保持完全平行,因此生产时喷嘴会受到激光不断地辐射和热冲击,导致 WC 喷嘴小孔前端与锡球接触部分极易烧损。当烧损累积到一定程度时容易出现图 2(c) 所示的沾锡现象,严重时导致熔融的锡球难以从喷嘴前端的小孔中吹落,最终形成锡球缺失或桥连缺陷,此时可认为喷嘴已经失效。

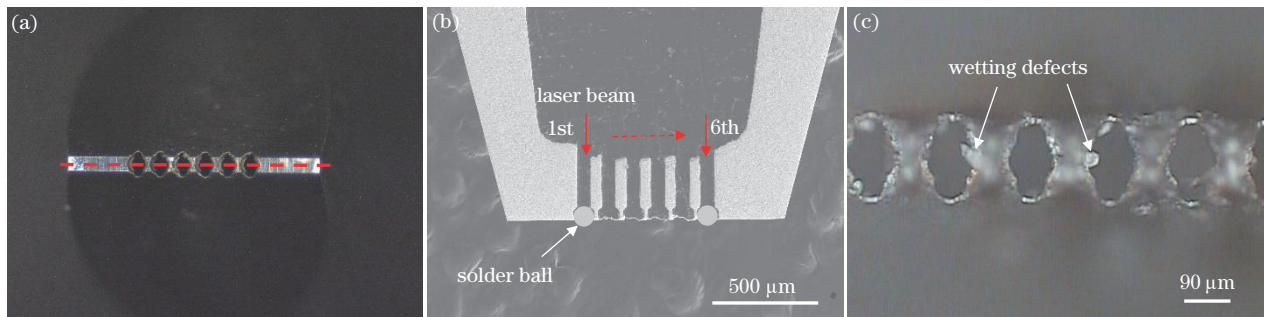


图 2 LJSBB 所使用的 WC 喷嘴。(a) 喷嘴正面像; (b) 沿(a)中虚线剖开的横截面像; (c) 沾锡缺陷

Fig. 2 WC nozzle using in LJSBB. (a) Front view image of nozzle; (b) cross section at the dash line in Fig. (a); (c) tinning defects

### 2.2 微观组织及缺陷观察

为了研究 WC 喷嘴微观组织和抗激光冲击性能之间的关系,首先将喷嘴按生产批次分组,从中任意选择 15 个试样投入 LJSBB 设备生产,根据微焊点数量统计每一批次喷嘴的平均抗激光冲击次数。然后从平均可

经受激光冲击  $2.0 \times 10^5$  次和  $3.0 \times 10^5$  次批次的喷嘴中随机抽取样品并制作横截面试样。利用扫描电子显微镜/能量色散 X 射线光谱仪(SEM/EDS)观察横截面试样的微观组织和缺陷,选择特征点和微区测定其成分,依据测试结果的差异,初步分析判断金属黏结剂



Co 含量、WC 颗粒中的贯通微裂纹和 WC 颗粒尺寸是影响喷嘴抗激光冲击性能的主要原因。再将烧结压强由 4000 MPa 提高至 4500 MPa 制备毛坯,通过观察喷嘴微观组织和统计抗激光冲击次数以验证压强对贯通状裂纹和喷嘴抗激光冲击性能的影响。选择名义尺寸约为  $1.0\ \mu\text{m}$  的 WC 颗粒并在 3800 MPa 下制备毛坯,重复上述步骤验证 WC 颗粒尺度对喷嘴抗激光冲击性能的影响。最后,根据光束作用于材料表面时的吸收、

反射和散射等理论,结合微观组织和成分之间的差异,分析烧结组织削弱 WC 喷嘴抗激光性能的微观机理。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同抗激光冲击次数 WC 喷嘴的微观组织差异

图 3 是抗激光冲击性能具有明显差异的 WC 喷嘴之间的对比像。同时测定图中用“+”标记特征点和方框微区的成分,结果见表 1。

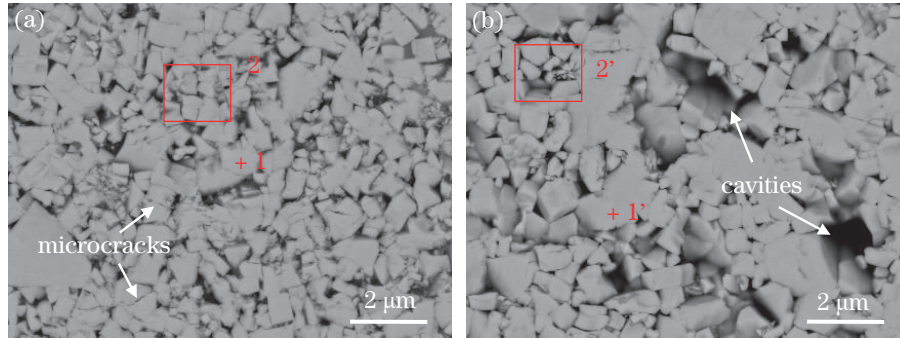


图 3 经受不同激光冲击次数的 WC 喷嘴微观组织。(a)  $2.0 \times 10^5$  次; (b)  $3.0 \times 10^5$  次

Fig. 3 Microstructure of WC nozzle enduring different laser shocks. (a)  $2.0 \times 10^5$  times; (b)  $3.0 \times 10^5$  times

表 1 图 3 中标记点的成分结果

Table 1 Elements result of marked points in Fig. 3

Shock resistance times	Point	Mass fraction / %				
		C	Al	Co	W	O
$2.0 \times 10^5$	1	5.79	—	—	62.46	31.74
	2	4.56	0.53	7.62	57.57	29.72
$3.0 \times 10^5$	1'	4.89	—	—	65.08	30.03
	2'	4.55	2.06	2.02	60.95	30.42

结合图 3 和表 1 可以看出,喷嘴基体都是典型的 WC-Co 系烧结组织,由尺寸大小不一且外形不规则的 WC 颗粒及其周围的 Co 构成。对比图 3(a) 和 (b) 可以看出: $2.0 \times 10^5$  次喷嘴中 WC 颗粒平均粒径约为  $0.6\ \mu\text{m}$ ,略小于  $3.0 \times 10^5$  次喷嘴的  $1.0\ \mu\text{m}$ ;  $2.0 \times 10^5$  次喷嘴几乎每个 WC 颗粒内部存在贯通状微裂纹,而后者仅有不到 50% 的颗粒存在类似裂纹。从图 3(b) 可以看出,  $3.0 \times 10^5$  次喷嘴横截面试样中存在明显的空洞,这与图 3(a) 中  $2.0 \times 10^5$  次喷嘴组织有所不同。另外,表 1 中的成分结果显示,  $2.0 \times 10^5$  次喷嘴微区的 Co 含量(质量分数, 7.62%) 远高于  $3.0 \times 10^5$  次喷嘴(2.02%)。

利用 WC、TiC、NbC 或 TiN 粉末烧结的硬质合金,加入其中的 Fe、Co 和 Ni 等成分是最常见的金属黏结剂<sup>[10-12]</sup>。如果低熔点的黏结剂含量较少,则 WC 颗粒之间的结合力小,受外力作用后颗粒容易松动,甚至掉落;如果黏结剂太多,则烧结材料的高温性能肯定会受到削弱。对于本研究中 WC-Co 系烧结组织,由于 Co 的熔点( $1495\ ^\circ\text{C}$ ) 远低于 WC( $2870\ ^\circ\text{C}$ ),在设定温度  $1400\ ^\circ\text{C}$  下烧结时已接近半固态,同时在  $(4000 \pm 500)$  MPa 高压作用下充填于 WC 颗粒之间,冷却后形成的微观组织如图 3 所示。进一步观察图 3(b) 中空洞

特征可以发现,其四周多为典型的直线多边形,与 WC 颗粒多边形轮廓外形特征一致,而且没有任何残留 WC 碎屑附着在空洞的内壁上,由此推断因为 Co 含量较少、WC 颗粒之间黏结力小,图 3(b) 中的空洞是制备横截面试样过程中受到摩擦或冲击等外力作用脱落形成,毛坯内部并不存在该缺陷。从图 3 还可以看出, WC 颗粒中贯通状裂纹多为直线,符合脆性材料的断裂特征,说明这些裂纹是由较大的烧结压强而引起的。需要指出的是,表 1 中列出的 Al 和 O 为干扰元素,主要来自于制备横截面试样时使用的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  研磨剂,因此可以忽略。由以上论述可见, WC 颗粒的大小、由较高的烧结压强引起的贯通状裂纹和较高的 Co 含量可能是喷嘴抗激光冲击较差的原因。由于 Co 熔点较低,激光冲击后较 WC 容易熔化,如果熔化区在喷嘴小孔前端,则熔化后的 Co 和熔融的钨料极易发生冶金反应,可以判断低熔点黏结剂肯定会削弱喷嘴抗激光冲击性能,建议尽量降低 Co 的含量。另外,还需进一步确认烧结压强是否会加剧贯通状裂纹,以及裂纹和 WC 颗粒尺度是否会对喷嘴抗激光冲击性能产生影响。

#### 3.2 烧结压强和 WC 颗粒尺度对组织和抗激光冲击性能的影响

按照以上思路,首先对图 3 中试样的烧结压强进行了现场确认,其中图 3(a) 和 (b) 中试样的烧结压强分别为 4200 MPa 和 4000 MPa,虽然相差不大,而且都在烧结工艺规定的  $(4000 \pm 500)$  MPa 范围内,但已造成 WC 颗粒中的贯通微裂纹出现差异。进一步地,将烧结压强提高至 4500 MPa 后重新制备毛坯,得到喷嘴的微观组织见图 4。显然,除 WC 颗粒中存在明显的

贯通状裂纹外,横截面上还出现了用虚线圆环标明的微小颗粒团簇,其中部分团簇的微小颗粒分布呈放射状,而类似组织在图 3(a)中靠近左下侧出现一处,在图 3(b)中未观察到。另外,虽然图 4 中的 WC 颗粒比图 3(a)要小,但部分小颗粒是在高压作用下破裂而形成的,原 WC 颗粒的大小已无法测量,难以统计 WC 颗粒的平均尺度。对 5 个毛坯加工成的喷嘴生产统计数据表明,平均抗激光冲击寿命次数约为  $1.7 \times 10^5$  次,甚至 1 个喷嘴  $1.4 \times 10^5$  次时已烧损失效。可见,随着烧结压强升高,不仅 WC 颗粒中的贯通状裂纹增多,而且喷嘴抗激光冲击次数会相应减少。

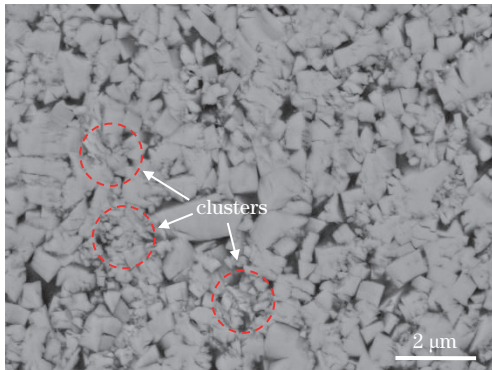


图 4 烧结压强为 4500 MPa 时的 WC 喷嘴微观组织,抗激光冲击次数为  $1.7 \times 10^5$  次

Fig. 4 Microstructure of WC nozzle at 4500 MPa sintering pressure, laser shock resistance is about  $1.7 \times 10^5$  times

图 5 是在压强设定为 3800 MPa 时烧结得到的微观组织,其中 Co 的含量控制在 2.5% 左右。图中 WC 颗粒直径约为  $1.1 \mu\text{m}$ ,可认为其与图 3(b)中的 WC 颗

粒尺度相同。进一步对比可以看出,图 5 中的贯通状裂纹明显少于图 3(b),更少于图 3(a)中的裂纹,且未出现图 4 中的团簇状裂纹,说明烧结压强是影响 WC 颗粒中贯通状裂纹的重要因素。另外,图 5 右下角还出现了与图 3(b)中类似的空洞。对 5 个喷嘴的抗激光冲击性能统计数据表明,该组平均次数约为  $2.9 \times 10^5$  次,可认为与图 3(b)中试样的抗激光冲击性能相同,说明 WC 颗粒尺寸对喷嘴抗激光冲击性能没有明显的影响。

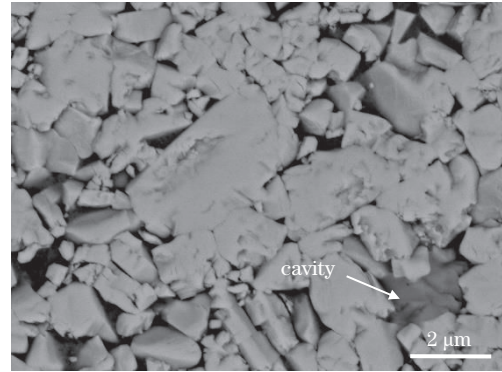


图 5 烧结压强为 3800 MPa 时喷嘴的微观组织,对应抗激光冲击次数为  $2.9 \times 10^5$  次

Fig. 5 Microstructure of WC nozzle at 3800 MPa sintering pressure, laser shock resistance is  $2.9 \times 10^5$  times

为了更清晰地对比 Co 含量、WC 颗粒尺度、烧结压强和贯通裂纹等因素与喷嘴抗激光冲击次数之间的关系,根据测试和验证顺序将所有结果进行归纳整理,具体见表 2。可以看出,黏结剂 Co 的含量和由较高烧结压强引起的微裂纹是决定喷嘴抗激光冲击性能的主要因素。

表 2 不同因素与抗激光冲击次数之间的关系

Table 2 Relationship between different factors and laser shock resistance times

Status	Mass fraction of Co / %	Size of WC particle / $\mu\text{m}$	Sintering pressure / MPa	Microcrack	Shock resistance times
Testing	7.62	0.6	4200	Middle	$2.0 \times 10^5$
	2.06	1.0	4000	Slight	$3.0 \times 10^5$
Verifying	2.50	-	4500	Severe	$1.7 \times 10^5$
	2.50	1.2	3800	Slight	$2.9 \times 10^5$

### 3.3 分析

和其他光线一样,激光辐射材料表面时会产生吸收、反射、散射、透射和折射等现象<sup>[13-14]</sup>。当其通过 WC 喷嘴小孔时,受小孔表面粗糙度影响,激光在孔内和微裂纹处可能会产生多次反射(如图 6 中光束 1 所示),即“光陷”现象<sup>[14-15]</sup>,并在裂纹周围形成温度较高的热影响区。喷嘴小孔周边的烧结组织中贯通状裂纹越多,热影响区域越大,附近的温度越高,意味着周围的黏结剂 Co 更加容易熔化。如果喷嘴小孔前端存在由微裂纹引起的热影响区,且该区域内黏结剂 Co 含量较高,则 Co 的熔化区域也较大,熔化后的 Co 和钎料极易发生冶金反应,形成沾锡。值得说明的是,小孔内壁的粗糙度是由非接触式的电火花加工引起的,期间不会对

毛坯产生较大的压力,所以微裂纹不会影响小孔内壁的粗糙度。可见,较高的 Co 含量和由较高烧结压强引起的贯通状微裂纹是喷嘴抗激光冲击性能较差的主要原因,而 WC 颗粒尺度不会对喷嘴的抗激光冲击寿命产生明显影响。

根据上述思路对 WC 喷嘴的烧结工艺进行了不断优化,由最初追求致密性到后来逐步降低烧结压强和减小黏结剂 Co 含量,最终将 Co 含量降低至 2.5% 以内、烧结压强由 4000 MPa 降低至 3700 MPa 以下,得到较好的效果,对 2 批次共 24 个样品的冲击次数统计表明,喷嘴的平均寿命接近预期目标  $3.0 \times 10^5$  次。



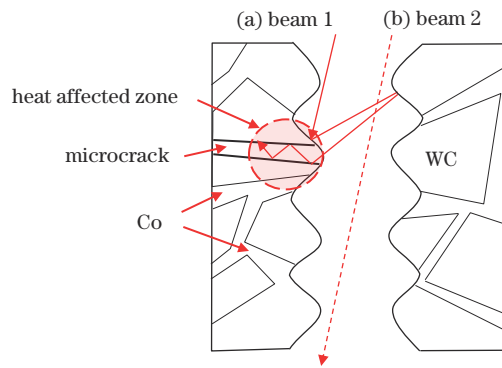


图6 激光穿过 WC 喷嘴内孔示意图。(a) 多次折射后进入微裂纹; (b) 直接通过内孔

Fig. 6 Sketch of laser beam passed inner hole of WC nozzle.  
(a) Entered microcrack after multi-reflecting; (b) directly passed inner hole

## 4 结 论

通过对比观察烧结 WC 喷嘴的微观组织和缺陷,结合光束传输相关理论,探讨了贯通状裂纹和黏结剂含量对喷嘴抗激光冲击性能的影响机制,得到的结论如下:

1) 较大烧结压强引起的贯通状裂纹,会对激光形成“光陷”现象,导致裂纹周围形成温度较高的热影响区;2) 喷嘴小孔前端热影响区附近的低熔点黏结剂 Co 熔化后,与熔融态的钨料球极易发生冶金反应,出现沾锡现象,黏结剂含量越多,沾锡越严重;3) 贯通状裂纹和含量较多的 Co 是 WC 喷嘴抗激光冲击性能较差的根本原因,通过适当降低 Co 含量和烧结压强,可以明显延长 WC 喷嘴的使用寿命。

## 参 考 文 献

- [1] 杨永强, 吴世彪, 张越, 等. 光纤激光器在金属增材制造中的应用进展及展望[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500012.  
Yang Y Q, Wu S B, Zhang Y, et al. Application progress and prospect of fiber laser in metal additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500012.
- [2] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500002.  
Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500002.
- [3] 黄威, 周智越, 崔宇龙, 等. 4.5 W 中红外 3.1  $\mu\text{m}$  光纤气体激光器[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101024.  
Huang W, Zhou Z Y, Cui Y L, et al. 4.5 W 3.1  $\mu\text{m}$  mid-infrared fiber gas laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101024.
- [4] 陈良惠, 杨国文, 刘育衍. 半导体激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500001.  
Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of

semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500001.

- [5] 王飞, 丁曼曼, 沈德元, 等. 半导体激光泵浦的 3  $\mu\text{m}$  掺铟固体激光研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101008.  
Wang F, Ding M M, Shen D Y, et al. Research progress of LD-pumped 3  $\mu\text{m}$  Er-doped solid-state lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101008.
- [6] 郭翔宇, 倪茂, 刘华明, 等. 宽带激光熔覆同轴送粉喷嘴的设计与数值模拟[J]. 激光技术, 2018, 42(3): 362-368.  
Guo X Y, Ni M, Liu H M, et al. Design and numerical simulation of broad coaxial powder feeding nozzles for laser cladding[J]. Laser Technology, 2018, 42(3): 362-368.
- [7] 周致富, 王锐, 王国祥, 等. 激光手术中喷嘴尺寸对制冷剂闪蒸喷雾冷却表面传热特性的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0303005.  
Zhou Z F, Wang R, Wang G X, et al. Effect of nozzle size on the surface heat transfer dynamics during cryogen spray cooling in dermatologic laser surgery[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 0303005.
- [8] 岳武, 龚成功, 张俊喜, 等. 激光喷射锡球键合微焊点溅射缺陷分析[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0802010.  
Yue W, Gong C G, Zhang J X, et al. Analysis on tin spattering of a micro solder joint during laser jet solder ball bonding process[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0802010.
- [9] Kasulke P, Schmidt W, Titerle L, et al. Solder ball bumper SB<sup>2</sup> - a flexible manufacturing tool for 3-dimensional sensor and microsystem packages[C]// Twenty Second IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium IEMT-Europe 1998, April 29, 1998, Berlin, Germany. New York: IEEE Press, 1998: 70-75.
- [10] Li H N, Yan L, Zhang H M, et al. Effects of sintering temperature on interface microstructure and element diffusion of WC-Co-Ni-Fe/high-speed steel composites[J]. Materials Letters, 2022, 310: 131449.
- [11] García J, Ciprés V C, Blomqvist A, et al. Cemented carbide microstructures: a review[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 80: 40-68.
- [12] Wu X, Shen J Y, Jiang F, et al. Study on the oxidation of WC-Co cemented carbide under different conditions[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021, 94: 105381.
- [13] Matthews M, Trapp J, Guss G, et al. Direct measurements of laser absorptivity during metal melt pool formation associated with powder bed fusion additive manufacturing processes[J]. Journal of Laser Applications, 2018, 30(3): 032302.
- [14] Han Z W, Jiao Z B, Niu S C, et al. Ascendant bioinspired antireflective materials: opportunities and challenges coexist[J]. Progress in Materials Science, 2019, 103: 1-68.
- [15] 矫知真, 李纪超, 陈招弟, 等. 激光加工减反射表面研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(2): 0202011.  
Jiao Z Z, Li J C, Chen Z D, et al. Research progress on laser processing of antireflection surfaces[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(2): 0202011.