

激光增材制造WC-12Co硬质合金圆柱形内部结构及其微波后处理

季文彬 吴润禾 戴士杰 郭延昭 李明洋

Forming process of WC-12Co cemented carbide cylindrical-shaped inner structure by selective laser melting and its microwave post-treatment

Ji Wenbin, Wu Runhe, Dai Shijie, Guo Yanzhao, Li Mingyang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240913.003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

选区激光熔化 B_4C/Al 复合材料的组织与性能

Microstructure and properties investigation of B_4C/Al composite materials fabricated by selective laser melting

复合材料学报. 2024, 41(6): 3239–3247 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231007.001>

超高温氧化物陶瓷激光增材制造技术与缺陷控制研究进展

Research progress on laser additive manufacturing technology and its defect control for ultra-high temperature oxide ceramics

复合材料学报. 2021, 38(3): 668–679 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201022.001>

激光增材制造镍基复合材料界面连接机制与断裂行为

Interface connection mechanism and fracture behavior of nickel-based composites fabricated by selective laser melting

复合材料学报. 2023, 40(3): 1797–1806 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220419.006>

无金属粘结剂WC硬质合金增强增韧的研究进展与展望

Research progress and prospect of strengthening and toughening WC cemented carbide without metal binder

复合材料学报. 2020, 37(10): 2376–2385 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200701.001>

激光熔化沉积60wt%不同粒径WC复合NiCu合金耐磨性及电化学腐蚀性能

Wear resistance and electrochemical corrosion properties of 60wt% coarse and fine WC composite NiCu alloy by laser melting deposition

复合材料学报. 2022, 39(7): 3498–3509 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210915.001>

面内压缩超轻质点阵夹芯板的优化、试验与仿真

Optimization, experiment and simulation of lightweight lattice sandwich plates under in-plane compression load

复合材料学报. 2019, 36(4): 1045–1051 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180530.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

激光增材制造 WC-12Co 硬质合金圆柱形内部结构及其微波后处理



分享本文

季文彬*, 吴润禾, 戴士杰, 郭延昭, 李明洋

(河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401)

摘要: 首先采用了选区激光熔化 (SLM) 不同扫描策略制备了 WC-12Co 硬质合金试样, 研究了扫描策略对成形试样的影响规律, 优化出最佳成形工艺。使用优化后的参数成形了圆柱形内部结构试样并进行微波后处理, 分析微波后处理工艺对试样相对密度、维氏硬度和形状精度的影响规律。结果表明, 最适用于打印 WC-12Co 硬质合金的是棋盘格扫描策略, 在成形能力、相对密度、维氏硬度和组织均匀性方面均优于其他扫描策略, 调整扫描间距为 30 μm 后, 试样相对密度达到最高 91.6%, 维氏硬度则达到 1 324 HV, 且棋盘格扫描策略成形圆柱形内部结构的精度也更佳; 当微波热处理升温速率为 40 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、温度为 1 300 $^{\circ}\text{C}$ 、保温时间为 20 min 时, 试样微观缺陷数量与热处理前相比大幅减少, 材料相对密度与维氏硬度显著提高, 但热处理会导致部分 WC 晶粒尺寸增大, 此时试样相对密度达到 96.1%, 维氏硬度达到 1 435 HV, 且热处理后圆柱形内部结构试样的精度没有被破坏。

关键词: 选区激光熔化; 扫描策略; WC-12Co; 圆柱形内部结构; 微波后处理

中图分类号: TB331

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2025)07-4054-12

Forming process of WC-12Co cemented carbide cylindrical-shaped inner structure by selective laser melting and its microwave post-treatment

JI Wenbin*, WU Runhe, DAI Shijie, GUO Yanzhao, LI Mingyang

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Firstly, different scanning strategies of selective laser melting (SLM) were used to prepare WC-12Co cemented carbide specimens, and the influence of scanning strategies on the formed specimens was investigated to optimize the best forming process. The optimized parameters were used to form the specimens with cylindrical-shaped inner structure and microwave post-treatment, to analyze the influence of microwave post-treatment process on the relative density, Vickers hardness and shape accuracy of the specimen. The results show that the most suitable for printing WC-12Co cemented carbide is the checkerboard scanning strategy, which is better than other scanning strategies in terms of forming ability, relative density, Vickers hardness and tissue uniformity. After adjusting the scanning spacing to 30 μm , the relative density of the specimen reaches the highest 91.6%, and the Vickers hardness is up to 1 324 HV, and the checkerboard scanning strategy has a better precision of forming the cylindrical-shaped inner structure. When the microwave heat treatment heat rate is 40 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, the temperature is 1 300 $^{\circ}\text{C}$ and the holding time is 20 min, the number of microscopic defects of the specimen is greatly reduced compared with that before heat treatment, and the relative density, Vickers hardness of the material are significantly improved, but some of the WC grain sizes increase because of heat treatment, at this time, the relative density of the

收稿日期: 2024-07-30; 修回日期: 2024-08-30; 录用日期: 2024-09-03; 网络首发时间: 2024-09-13 15:30:52

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240913.003>

基金项目: 国家自然科学基金 (52005154); 科技创新 2030-“新一代人工智能”重大项目 (2021ZD0113100)

National Natural Science Foundation of China (52005154); Science and Technological Innovation 2030-"New Generation Artificial Intelligence" Major Project of China (2021ZD0113100)

通信作者: 季文彬, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为硬质合金增材制造 E-mail: 2017082@hebut.edu.cn

引用格式: 季文彬, 吴润禾, 戴士杰, 等. 激光增材制造 WC-12Co 硬质合金圆柱形内部结构及其微波后处理 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(7): 4054-4065.

JI Wenbin, WU Runhe, DAI Shijie, et al. Forming process of WC-12Co cemented carbide cylindrical-shaped inner structure by selective laser melting and its microwave post-treatment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(7): 4054-4065(in Chinese).

specimen reaches 96.1%, and the Vickers hardness reaches 1 435 HV, and the precision of the specimen of cylindrical-shaped inner structure is not destroyed after the heat treatment.

Keywords: selective laser melting; scanning strategy; WC-12Co; cylindrical-shaped inner structure; microwave post-processing

WC-Co 硬质合金是陶瓷/金属复合材料的典型代表,具有高硬度、耐高温和耐磨损等特性,在国内外都广泛作为优选的工具材料,在刀具和模具上应用颇多^[1]。传统成形硬质合金方法主要为粉末冶金,存在较大的局限性,例如尺寸和几何复杂性的限制、耗时的后处理等,限制了硬质合金应用领域的拓宽^[2-3]。

增材制造 (AM) 的发展为复杂结构零件的生产提供了更多可能性,它是以三维模型为基础,通过逐层堆积的方式成形实体零件的制造方法^[4]。目前,应用在陶瓷/金属复合材料的增材制造技术主要有选择性激光烧结 (SLS)^[5]、选区激光熔化 (SLM)^[6]、选区电子束熔化 (SEBM)^[7] 和粘结剂喷射增材制造 (BJAM)^[8] 等。SLM 作为一种使用广泛的金属增材制造工艺,具有材料利用率高、成形精度高等特点,目前其成形钛合金^[9]、铝合金^[10]、不锈钢^[11] 等材料已经较为成熟。但 SLM 在成形过程中工艺参数较多,对成形的零件性能影响规律较复杂,导致使用其成形硬质合金时仍存在诸多问题。例如,试样成形过程中极易产生翘曲变形、孔隙、裂纹等缺陷,从而导致试样力学性能较差,因此往往会对成形的试样进行后处理^[12]。此外,也缺少对 SLM 成形硬质合金复杂结构能力的研究。

目前,SLM 成形硬质合金的研究集中在工艺参数优化和零件后处理上。Papy 等^[13] 评估了在沒有预热基板的情况下使用 SLM 制造了 WC-17Co 试样,发现使用 602 J/mm³ 的能量密度获得了孔隙率最低的试样,并发现热等静压可以显著改善样品的结构、密度和硬度,从而实现较低的孔隙率和无裂纹;Uhlmann 等^[14] 报道,热等静压后,通过 SLM 制备的 WC-12Co 硬质合金的相对密度可提高 0.7%~1%,最高可达 96.4%±0.5%;Fries 等^[15] 分析了热后处理对 SLM 成形 WC-12Co 组织和力学性能的影响,发现在烧结热等静压后,SLM 中形成的过饱和粘结剂池形成了新的 WC 晶粒,还观察到了 η-碳化物的生长;Bricín 等^[16] 研究了能量密度和热等静压后处理对 SLM 制备 WC-13Co 硬质合金相对密度和微观结构的影响,结果表明,SLM 成形试样的最佳相对密度为 88%,在

较低的能量密度水平下,形成的孔隙通常为尺寸大于 50 μm 的不规则形状,热等静压处理后试样中的气孔消除,WC 晶粒粗化,相对密度提升,最高可达 96%。分析文献可知,工艺参数方面,缺少扫描策略对硬质合金零件有何影响的研究,有文献表明,SLM 工艺中,扫描策略对成形质量的影响同样至关重要^[17];热处理方面,以热等静压为主,虽然具有一定的效果,但存在能耗较高、周期较长、温度梯度大等问题,微波热处理则具有节能、加热效率高、整体加热、加热温度均匀等特点^[18],但微波热处理对 SLM 成形 WC-12Co 硬质合金微观组织、相对密度与维氏硬度以及热处理后是否会影响 SLM 原本成形精度还有待研究。

理论上,SLM 具有成形任何复杂形状零件的能力,如内冷刀具^[19] 和具有随形冷却结构的模具^[20-21]。这类零件不可避免地具有圆形内部流道,尤其是轴线平行于基板的悬垂圆孔,成形过程中存在非实体支撑的区域,是给金属增材制造成形复杂零件带来困难的原因之一。国内外学者对此已展开了相关研究,Kempen 等^[22] 研究了圆孔孔径大小对 SLM 成形悬垂内流道尺寸精度的影响;辛艳喜^[23] 研究了铝合金悬垂圆孔结构的成形质量,并进一步优化了其成形工艺参数;Pakkanen 等^[24] 通过成形铝合金和钛合金圆孔内流道结构,分析了不同倾斜角度下悬垂面形貌特征,得到了其成形质量随倾斜角度的变化规律;Mao 等^[25] 比较了 SLM 成形钛合金矩形孔和圆孔的表面质量,结果表明,矩形孔悬垂表面质量不如圆形孔。

上述两类研究分别注重 SLM 成形零件的力学性能与形状精度。实际上,当用调整工艺参数的方法优化成形试样的形状精度时,得到试样形状精度虽然提高,但工艺参数可能并不是能获得较优力学性能的参数,没有做到“形”与“性”结合。因此,从使用价值的角度考虑,在基本力学性能较好的情况下考察形状精度、再使用后处理进一步优化更有意义,而关于 SLM 成形硬质合金零件形状精度方面的研究还未见报道。

本研究在已有工艺参数的基础上,使用不同的扫描策略成形了硬质合金试样,讨论了扫描策

略对试样相对密度和维氏硬度的影响规律，观察分析了其微观组织，进一步优化了 SLM 成形硬质合金零件的工艺参数。在较优工艺参数下、即保证一定相对密度与维氏硬度的前提下，对 SLM 成形硬质合金圆柱形内部结构的能力做了初步的探索，研究了 SLM 工艺自身成形圆柱形内部结构零件的形状精度，分析了圆柱形内部结构参数对其形状精度的影响规律，并将其进行了微波后处理，在发现微波后处理对硬质合金零件相对密度与维氏硬度有较大改善的基础上，观察热处理是否破坏了零件原有成形精度。

1 实验材料及方法

1.1 原材料

实验使用的是亚洲新材料有限公司生产的 WC-12Co 硬质合金粉末，原材料通过团聚烧结法制备，表 1 为其主要化学成分，表 2 为其物理性能。

表 1 WC-12Co 粉末化学成分

Table 1 WC-12Co powder chemical compositions

Element	Fe	Co	Ct	Cf	O	W
Mass fraction/wt%	0.015	11.92	5.38	0.06	0.03	Bal.

表 2 WC-12Co 粉末物理性能

Table 2 WC-12Co powder physical properties

Testing program	Test result	
Particle size distribution/ μm	D_{10}	23.68
	D_{50}	35.39
	D_{90}	49.42
Bulk density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	4.64	
Flowability(s/50 g)	13.6	

Note: D_{10} , D_{50} , D_{90} —The values of particle sizes corresponding to cumulative size distributions of 10%, 50% and 90% are indicated, respectively

粉末的原始形貌及粒径分布图如图 1 所示，粉末呈现球形或近似球形，表面较粗糙，且该粉末具有良好的流动性，较低的氧含量和较高的球形度，有利于提高铺粉质量，提高成形件的致密度和微观组织的均匀性；粒径分布在 15~53 μm ，平均粒径 35.39 μm ，具有较窄的分布范围，符合正态分布。

1.2 实验方法

实验设备为国产 LIM-X150A 型选区激光熔化设备(镭明激光科技有限公司)，其具有 20~200℃ 的预热温度，配备 200 W 和 500 W 的 IPG 激光器。热处理在型号为 WBMW-JS4 的多模微波烧结炉

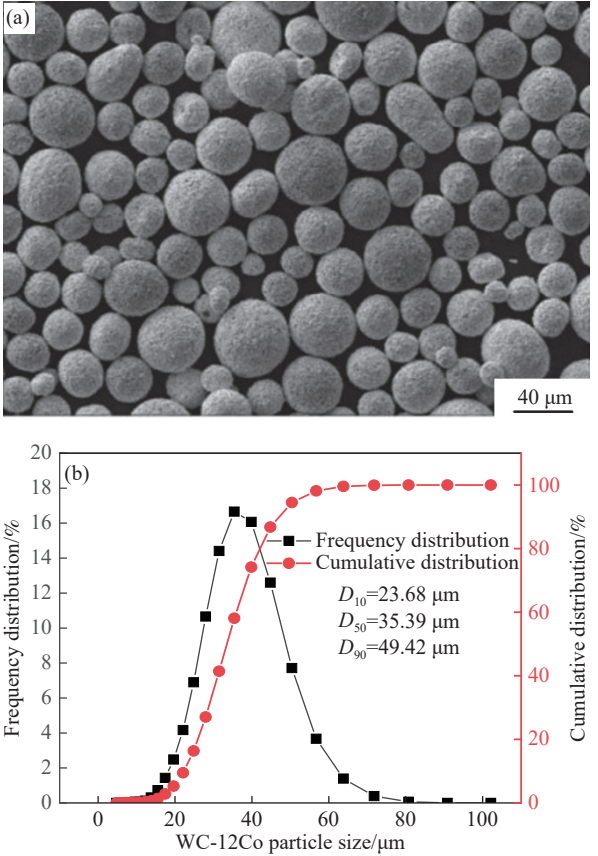


图 1 WC-12Co 粉末: (a) 原始形貌; (b) 粒度分布
Fig. 1 WC-12Co powder: (a) Original morphology; (b) Particle size distribution

(唐山任氏巨源微波仪器有限公司)中完成，最高加热温度可达 1 650℃，输出功率为 0~4 kW，微波频率为 2.45 GHz。

实验分为 SLM 成形实验与微波后处理实验两部分，在进行成形圆柱形内部结构实验之前，实验室已经探究出了部分工艺参数(激光功率在 95~105 W 之间、扫描速度在 390~430 mm/s)。激光功率高出该区间时(扫描速度低于该区间时)，试样在成形过程中瞬时的能量输入过大导致热应力过大，极易发生翘曲脱离基板；若低于该区间时(扫描速度高于该区间时)，则能量密度不足导致试样致密度较低。该区间内成形效果尚佳，但成形的试样相对密度、维氏硬度、宏观形貌与微观组织之间差距不大，同时考虑到不同的扫描策略的热累积效应有所不同，因此可以先以扫描策略为基础，调整扫描间距进一步优化成形工艺参数，再用来成形圆柱形内部结构(本文中，将轴线平行于基板的该结构称为悬垂圆孔，轴线垂直于基板则称为竖直圆孔)，WC-12Co 能够成形的工

艺参数区间较小，同时考虑到直接成形该结构还要组合孔径因素，因此首先设计了成形块状实验来探究扫描策略对 SLM 成形 WC-12Co 的影响规律。

基于实验室现有工艺参数 (激光功率 100 W、扫描速度 390 mm/s、铺粉层厚 40 μm)，分别使用 S 形、回形 (由外圈向内圈扫描) 和棋盘格扫描策略 (图 2) 对 10 mm×10 mm×6 mm 的试样块进行成形。实验参数如表 3 所示，扫描间距 30~70 μm，步进值 10 μm，激光扫描矢量层间旋转 67°，用于减少零件的各向异性。

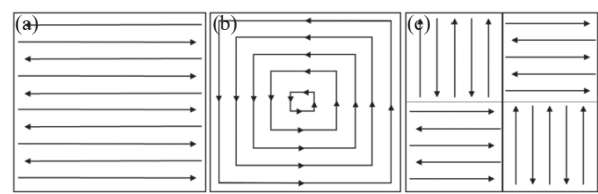


图 2 扫描策略: (a) S 形; (b) 回形; (c) 棋盘格
Fig. 2 Scanning strategies: (a) S-shape scanning; (b) Spiral scanning; (c) Checkerboard scanning

表 3 块状实验工艺参数

Table 3 Block experimental process parameters			
Laser power <i>p</i> /W	Scanning speed <i>v</i> /(mm·s ⁻¹)	Thickness <i>h</i> /mm	Scanning spacing <i>l</i> /mm
100	390	0.04	0.03-0.07

经过成形块状的实验剔除了一些成形效果不佳的参数，进而对圆柱形内部结构进行成形。由于回形扫描策略得到的试样块致密度较差，导致其相对密度与维氏硬度远低于另外两种扫描策略的试样，本研究的目的是在保证硬质合金试样具有一定相对密度与维氏硬度的前提下，探究成形圆柱形内部结构的规律，因此在成形时放弃了这一扫描策略及一些成形效果不佳的参数，其中激光功率、扫描速度、铺粉层厚与层间旋转角度仍然沿用现有最佳工艺参数。

该结构的成形实验是在 10 mm×10 mm×15 mm 的长方体块上打印孔径为 2~8 mm 的竖直与悬垂圆孔，成形工艺参数如表 4 所示。完成上述实验后，已经优化出了 SLM 最佳的工艺参数组合，进一步提高了 SLM 成形硬质合金零件的质量，并在 SLM 最佳的工艺参数组合下制备了硬质合金圆柱形内部结构。接下来将对该结构进行微波热处理，热处理方式为埋粉加热，热处理后观察圆柱形内部结构尺寸精度与形貌的变化，表 5 为热处理实验参数表。

表 4 圆柱形内部结构成形参数

Table 4 Forming parameters for cylindrical-shaped inner structures		
Scanning strategy	Scanning spacing <i>l</i> /mm	Diameter of the round hole Φ /mm
Chessboard	0.03	2, 4, 6, 8
S-shape	0.06	2, 4, 6, 8

表 5 热处理实验参数表

Table 5 Heat treatment experiment parameter table		
Heating rate/ (°C·min ⁻¹)	Heat treatment temperature/°C	Holding time/min
40	1 250	10
40	1 300	10
40	1 350	10
40	1 400	10
40	1 300	20
40	1 300	30
40	1 300	40

1.3 性能表征与尺寸精度测量

成形之后，首先使用线切割将成形的 WC-12Co 试样切割下来，经过预处理后再进行相对密度与维氏硬度测试并观察微观组织。预处理包括两部分，首先要将试样任一表面逐一在目数为 80#、240#、400#、600#、800#、1 000#和 1 200# (80#约为 200 μm、240#约为 58 μm、400#约为 38 μm、600#约为 28 μm、800#约为 18 μm、1000#约为 15 μm、1200#约为 12.6 μm) 的金刚石磨盘上进行研磨，然后使用 P-1 型金相抛光机 (莱州市蔚仪实验器械制造有限公司)，采用丝绸抛光布配合 0.25 μm 的金刚石抛光剂进行抛光，使其表面粗糙度在 0.1 μm 以下，且保证试样光洁明亮，没有划痕。上述工作完成后，将试样浸没在无水乙醇中，充分干燥后使用。采用相对密度来表征 SLM 成形试样的致密情况，可用阿基米德排水法测量试样的实际密度，相对密度即为实际密度与理论密度的比值。采用 HVS-30M 型维氏硬度计 (上海研润光机科技有限公司) 测量试样的维氏硬度，加载载荷 3 kg (29.421 N)，保压时间 15 s，为了避免测试结果的偶然性，每个试样表面随机选取 8 个不同位置进行有效测试，计算平均值作为该试样的维氏硬度值。使用场发射扫描电子显微镜 (TESCAN, GAIA3, 捷克) 观察 SLM 成形 WC-12Co 硬质合金试样抛光表面的微观组织形貌。使用三坐标测量仪 (西安爱德华公司) 和影像测量仪 (东莞市嘉腾仪器仪表有限公司) 综合来测量圆柱形内部结构的尺寸精度。

2 结果与讨论

2.1 扫描策略对 SLM 成形 WC-12Co 的影响

图 3 为块状实验的成形结果，试样块顶部数字是其编号，1~5 (16~20) 号为回形扫描策略且扫描间距依次为 30、40、50、60、70 μm 的试样；6~10 (21~25) 号为 S 形扫描策略且扫描间距依次为 30、40、50、60、70 μm 的试样；11~15 (26~30) 号为棋盘格扫描策略且扫描间距依次为 30、40、50、60、70 μm 的试样。其中 1、2、6 和 7 (16、17、21 和 22) 4 块试样在实验过程中出现了翘曲变形的现象，逐渐与基板脱离，没有成功成形。如图 3(b) 所示，3、8 (18、23) 号虽然基本成形，但是试样底部已经变形翘曲，只有部分还粘连在基板之上，该参数也应该剔除。在同一种扫描策略下，棋盘格扫描策略的 5 块试样均成功成形，这是由于在相同的能量密度下，棋盘格扫描策略有更短的激光路径，减少了热累积，从而减小了热应力，拥有更好的成形效果和能力；而另外两种扫描策略的激光路径过长，热应力不断累计，最终应力过大导致试样底部与基板脱离。

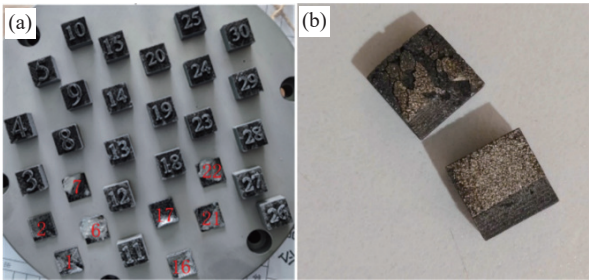


图 3 块状实验成形结果
Fig. 3 Block experimental forming results

3 种扫描策略成功成形的试样相对密度测量结果的平均值见图 4。可以看出，棋盘格扫描策略的试样平均相对密度最大，都在 87% 以上，平均值为 89%，其中扫描间距为 30 μm 时，相对密度最大达到 91.6%；使用回形扫描策略的试样相对密度值最小，且两块相对密度差距较大，导致其均值低于 85%，其中扫描间距为 70 μm 时，相对密度最低仅为 80.4%；使用 S 形扫描策略的两块试样则较为平均，都在 86%~87% 之间。

维氏硬度方面，使用棋盘格扫描策略的试样在各个位置测量的结果较平均，经过多次测量取平均值，维氏硬度均在 1 350 HV 左右；回形扫描策略的试样硬度较低，且数值差异性较大，最低测量值与最高测量值差值可以达到 700 HV，故无

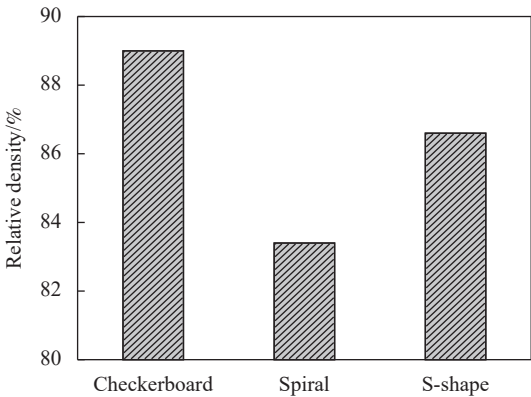


图 4 不同扫描策略 WC-12Co 硬质合金试样相对密度对比

Fig. 4 Comparison of relative density of WC-12Co cemented carbide specimens under different scanning strategies

法取平均值进行计算；S 形扫描策略的试样在扫描间距为 60 μm 时，维氏硬度可达 1 318 HV，而在扫描间距为 70 μm 时，也出现了硬度不均匀的现象。其中，回字形扫描策略试样硬度普遍较低的原因主要是由于其成形的两块试样相对密度较低，且由于能够成形的两块试样扫描间距过大，导致其未熔合的不规则孔较多，测量硬度时压头容易压到孔洞区域，因此测量结果可能产生较大的差异。

图 5 是在扫描间距为 70 μm 时，棋盘格扫描策略与 S 形扫描策略试样的微观组织与晶粒尺寸分布图。

根据测量的数据可以得到，虽然两者的相对密度差距较小，但它们在硬度方面的表现却有较大的差距。由图可以看出主要原因有两点，首先是两者扫描间距都是 70 μm 时，虽然由于致密度都还不够高而存在孔洞，但棋盘格扫描策略的孔洞尺寸与数量要明显少于 S 形扫描策略，S 形扫描策略存在着较多由于能量密度不足而造成的未熔合孔，这类大的未熔合孔对试样的相对密度与维氏硬度影响很大；其次，两者的晶粒分布存在着较大差异，棋盘格扫描策略的晶粒分布更为均匀，而后者晶粒的粗晶区与细晶区区域更为显著，当硬度计压头压到粗晶区与细晶区时，试样所表现出来的硬度也会有较大的差异。

不同扫描策略微观组织存在较大差异可以由 SLM 过程中能量的传递过程来解释。如图 6 所示，由前文可知，3 种扫描策略的激光起始点相同，在都能成形的状况下，S 形扫描策略的第一道激光路径要比棋盘格扫描策略的长，在第一道激光扫描完成之后，S 形扫描策略已经产生了比后者

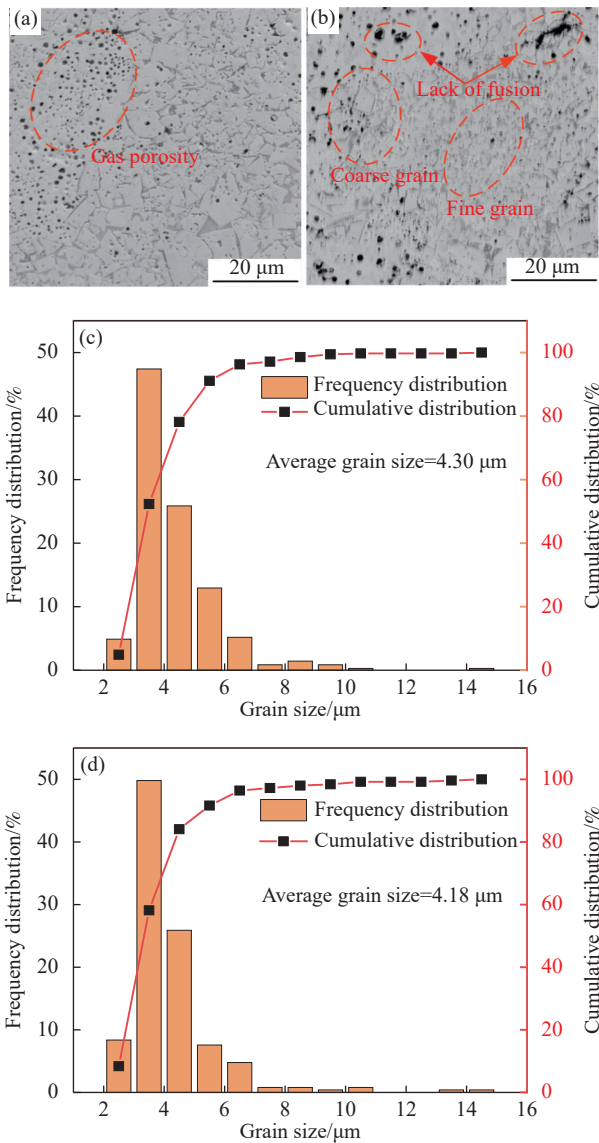


图5 不同扫描策略下 WC-12Co 硬质合金试样表面微观组织和 WC 晶粒尺寸分布图: (a) 棋盘格; (b) S 形; (c) 棋盘格晶粒尺寸分布图; (d) S 形晶粒尺寸分布图

Fig. 5 Microstructure and WC grain size distribution of the surface of the WC-12Co cemented carbide specimens under different scanning strategies: (a) Checkerboard scanning; (b) S-shape scanning; (c) Grain size distribution of checkerboard; (d) Grain size distribution of S-shape

更大的温度梯度, 产生了较大的热应力, 同样第二道激光路径也会对温度梯度产生较大的影响。图中 A、B 是在激光起始点附近的两点, S 形扫描策略花费了更长的时间来完成第一道激光路径, 同时第二道激光也将花费更长的时间折回 A、B 两点附近, 因此相比较而言, S 形扫描策略中的 A、B 两点经历了更长时间的冷却, 温度已经冷却至较低; 第二道激光经过其相邻区域时, 经过热传导又会重新对 A、B 两点附近进行二次加热,

这种温度降到较低又重新被加热的方式更容易刺激晶粒的生长, 造成其晶粒的不均匀, 同时不利于能量的再分布及内应力的消除。而棋盘格扫描策略中, 激光路径较短, A、B 两点冷却的时间也较短, 第二道激光在温度尚未降低到较低时就通过加热其相邻区域就对其进行了二次加热, 第三道激光也会通过相同的机制影响 A、B 两点, 逐步减小温度梯度, 提高温度分布的均匀性。

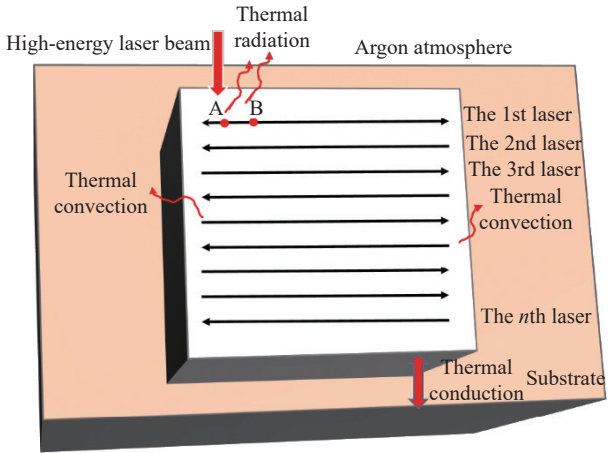


图6 选区激光熔化 (SLM) 成形过程中能量传递示意图

Fig. 6 Schematic diagram of energy transfer in selective laser melting (SLM) molding process

此外, 在 A、B 两点尚未冷却至较低温度前对其进行了二次加热, 温度还将保持在较高水平, 这有利于 Co 相获得充分的时间进行迁移, 填充孔隙, 从而提高致密度。回字形扫描策略是在完成一周的扫描之后, 再进行第二道激光能量的输入, 相比较前两种扫描策略冷却时间更长, 这导致了其成形质量最差。

图 7 对 5 块使用棋盘格扫描策略但不同扫描间距的试样的维氏硬度与相对密度进行了比较, 分析其扫描间距与维氏硬度和相对密度之间的联系, 可以看出, 随着扫描间距减小, 试样致密度总体呈现出变大的趋势。这是由于扫描间距越小, 相邻熔道之间的搭接率越高, 起到了重熔的作用, 这让原本因扫描间距过大未熔化的一些颗粒得以熔化, 从而减少了未熔合孔缺陷的数量。这也可以从能量密度的角度解释, 能量密度的计算公式如下:

$$E = \frac{P}{v \cdot l \cdot h} \quad (1)$$

式中: P 为激光功率; v 为扫描速度; l 为扫描间距; h 为铺粉层厚。

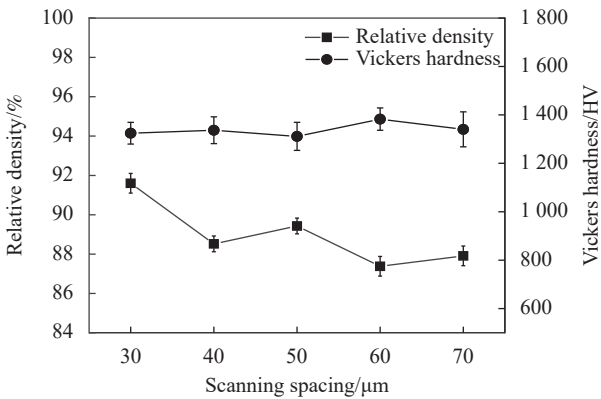


图7 不同扫描间距下 WC-12Co 硬质合金试样相对密度与维氏硬度

Fig. 7 Relative density and Vickers hardness of WC-12Co cemented carbide specimens at different scanning spacings

激光的能量密度过小时，单位体积内粉末吸收的能量过少，不足以熔化，未熔化的粉末会一起沉积，形成夹杂物，从而导致层之间、熔池之间结合不够紧密，继而产生孔隙；而当能量密度过大时，会导致熔池温度过高，Co 蒸发导致的蒸汽反冲力将导致气孔的产生；此外，过高的能量密度也会使成形过程中的温度梯度增大，从而产生较大的残余应力，诱发裂纹，导致相对密度的降低。

维氏硬度呈现的则是先小幅增大而后基本持平的趋势。从能量密度的角度，扫描间距越大时，能量密度越小，当激光能量密度过小时，熔池温度低，粉末未能完全熔化，会在试样内部产生孔隙、气孔等微观缺陷，导致材料的致密度低，此时试样的维氏硬度主要受相对密度的影响，因此材料的维氏硬度显著下降；随着激光能量密度的增大，当达到合适范围时，试样内部微观缺陷尺寸和数量减少，致密度提升，材料的维氏硬度随之增大。当能量密度继续增大时，试样的维氏硬度小幅下降而后基本持平，这是由能量密度过高导致晶粒长大的负效应造成的，但相对密度的升高而带来的正效应一定程度上弥补了这一负效应。

结果显示扫描间距为 30 μm 最小时，相对密度相对于 40、50 μm 仍然有小幅的提升，达到最高 91.6%，此时维氏硬度为 1 324 HV。而使用回形扫描与 S 形扫描策略时，会由于扫描矢量较长而引起较棋盘格扫描策略更大的温度梯度，导致试样无法成形，这进一步说明棋盘格扫描策略的成形能力更强，并且能够提升试样的相对密度。

综上，使用棋盘格扫描策略、扫描间距为 30 μm 的试样相对密度与维氏硬度最佳，但考虑

到使用不同扫描策略对圆柱形内部结构成形质量可能存在较大影响，且使用 S 形扫描策略、扫描间距为 60 μm 的试样的相对密度与维氏硬度尚佳，因此选择该组参数进行对照，其他参数予以剔除，使用两组参数进行圆柱形内部结构的成形。

2.2 热处理前圆柱形内部结构成形质量的评价

对棋盘格扫描策略、扫描间距为 30 μm 和 S 形扫描策略、扫描间距为 60 μm 两种参数下成形的 $\Phi 2$ 、 $\Phi 4$ 、 $\Phi 6$ 、 $\Phi 8$ 的悬垂圆孔及竖直圆孔进行了圆度、最大塌陷量等方面的评价。图 8 是圆柱形内部结构的成形结果，从宏观上，成形的结构表面平整，悬垂圆孔顶部有一定程度的塌陷，圆孔都为通孔，没有被粉末堵塞，整体成形效果良好。使用 S 形扫描策略的 $\Phi 8$ 圆孔成形失败，在与基板分开进行线切割时，其发生了破碎，发生该现象的原因是其内部的残余应力较大，其本质原因还是激光路径过长，从而累计了过多的热应力，且当孔径为 8 mm 时，试样四周的壁厚过薄导致试样过于脆弱；竖直圆孔均成功成形，因为其不存在悬垂区域，所以其成形质量要好于悬垂圆孔。

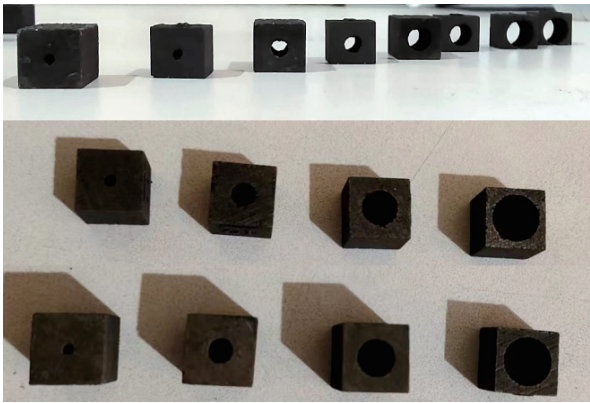


图8 圆柱形内部结构成形结果

Fig. 8 Cylindrical-shaped inner structure molding results

首先比较了两种扫描策略成形的竖直圆孔的圆度。如图 9 所示，可以看出，竖直圆孔的圆度与孔径的关系较小，基本维持在比较稳定的状态，这是由于竖直圆孔的轴线垂直于基板，其精度主要取决于 SLM 设备在 X 和 Y 方向上的打印精度和粉末粒度，棋盘格扫描策略的试样比 S 形扫描策略的试样精度略高是由于其扫描间距较小，对形状精度起到了一定的补偿作用。

图 10 则是悬垂圆孔与竖直圆孔截面形貌的对比，可以看出悬垂圆孔的形貌与竖直圆孔有着较大不同，其悬垂区域发生了一定程度的塌陷和变

形。实际成形过程中，悬垂圆孔的上半圆部分为悬垂面，下半圆部分不是悬垂面。形成塌陷的原因是 SLM 成形具有悬垂特征的试样时会产生阶梯效应。

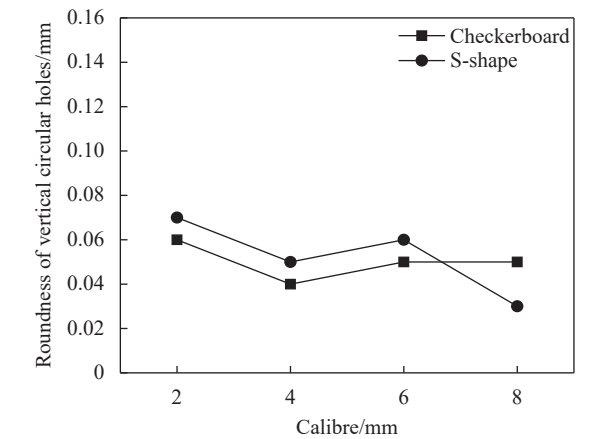


图 9 竖直圆孔圆度测量结果

Fig. 9 Vertical hole roundness measurement results

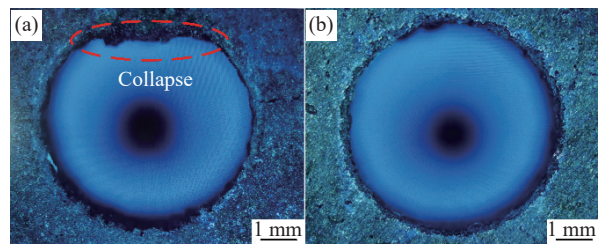


图 10 悬垂圆孔 (a) 与竖直圆孔 (b) 形貌对比

Fig. 10 Comparison of morphology of overhanging circular holes (a) and vertical circular holes (b)

阶梯效应的示意图见图 11，根据 SLM 工艺的原理，图中 S 与 H 之间的关系可以表示为

$$S = H \tan \theta \tag{2}$$

式中： H 为铺粉层厚； S 为每一层没有实体支撑的距离； θ 为该层轮廓与水平方向的夹角，即悬垂角度。由两者的几何关系可知， θ 角度增大， S 随之增大，即随着成形的高度的升高，对于悬垂圆孔，其没有实体支撑的粉末长度增加。当悬垂长度 S 过大时，激光的大部分能量直接照射在粉床之上，而粉末的热传导能力相对于实体很差，这将导致熔池的热量难以散发出去，熔池有更长的时间浸入粉层，粘上留在孔道中的粉末，从而产生更多的悬垂物，这意味着悬垂圆孔越靠近顶部发生塌陷的程度会更严重。同时，实体对悬垂部分的约束越小，由于 WC-12Co 在固液转变过程中体积会发生膨胀与收缩，自由度高的悬垂部分

更容易出现翘曲变形。

对不同扫描策略成形的圆柱形内部结构进行了比较，如图 12(a) 与图 12(b) 所示，无论是哪一种扫描策略，悬垂圆孔的上表面都存在着塌陷，但除了塌陷以外，使用 S 形扫描策略打印的圆孔形变更为严重，其下半区域实际上不是悬垂部分，但也产生了较大的变形，使用棋盘格扫描策略的试样仅在顶部产生了塌陷的现象，其他部分的成形效果较好，这与前文中提到的由于 S 形扫描策略的激光路径过长，从而累计了过多的热应力导致较大的变形有关。因为悬垂圆孔的轴线平行于基板，所以其截面实际上是成形试样的侧面，

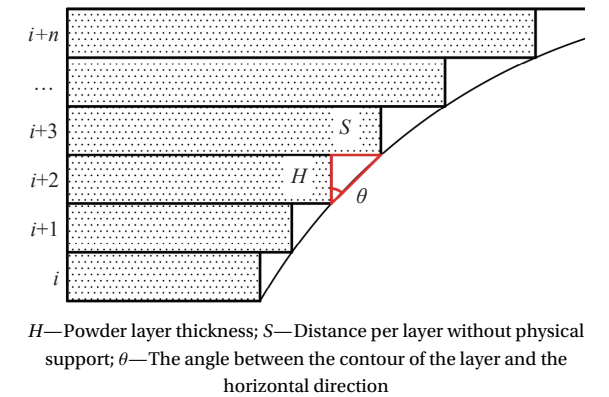


图 11 阶梯效应示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the ladder effect

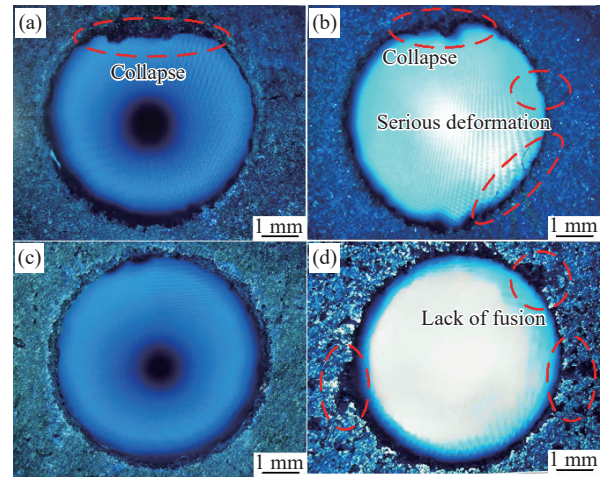


图 12 不同扫描策略成形圆柱形内部结构对比：(a) 棋盘格扫描策略成形的 $\Phi 6$ 悬垂圆孔；(b) S 形扫描策略成形的 $\Phi 6$ 悬垂圆孔；(c) 棋盘格扫描策略成形的 $\Phi 6$ 竖直圆孔；(d) S 形扫描策略成形的 $\Phi 6$ 竖直圆孔

Fig. 12 Comparison of the structure of holes formed by different scanning strategies: (a) $\Phi 6$ overhanging circular hole shaped by checkerboard scanning strategy; (b) $\Phi 6$ overhanging circular hole shaped by S-shape scanning strategy; (c) $\Phi 6$ vertical hole shaped by checkerboard scanning strategy; (d) $\Phi 6$ vertical hole shaped by S-shape scanning strategy

图 12(c) 与图 12(d) 是竖直圆孔的截面，为成形试样的顶面，可以观察到，S 形扫描策略成形的试样出现了较大的未熔合孔洞，而棋盘格扫描策略的试样孔洞明显较少。造成该现象的原因主要是由于棋盘格扫描策略能够适应更小的扫描间距，提高了能量密度，减少了未熔合现象的发生。

图 13 是对两种扫描策略成形的悬垂圆孔圆度和最大悬垂量的评估，可以看出，随着圆孔直径的变大，两者的最大塌陷量都在逐渐增大，这符合阶梯效应的规律，棋盘格扫描策略的圆孔圆度整体要好于 S 形，随着圆孔直径的增大，悬垂圆孔的圆度在逐渐变差，这一规律在棋盘格扫描策略时表现的更为明显，虽然 S 形扫描策略成形 $\Phi 8$ 的圆孔失败，但是其整体仍然呈现了圆度逐渐变差的趋势，这与圆孔直径越大，其最大悬垂量就越大有很大的相关性。

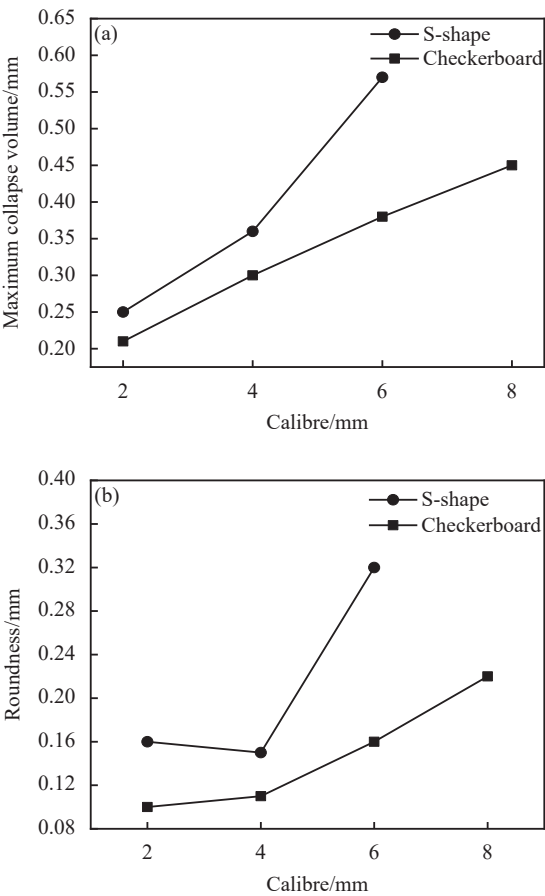


图 13 不同扫描策略成形悬垂圆孔最大塌陷量 (a) 与圆度 (b) 测量结果
Fig. 13 Maximum collapse volume (a) and roundness (b) measurements of overhanging circular holes formed by different scanning strategies

可以认为，棋盘格扫描策略有着能够适应更小扫描间距的优势，这一优势可以帮助其提高成

形质量，减少孔洞的数量，它的另一优势是缩短了成形过程中激光行走的路径长度从而减小了热应力，在成形具有悬垂特征结构时，可以提高其形状精度。在相对密度与维氏硬度的基础上，棋盘格扫描策略在成形试样的形状精度上也有优势，因此将对棋盘格扫描策略成形的试样进行微波后处理的研究。

2.3 热处理后圆柱形内部结构成形质量的评价

图 14(a) 是相同保温时间 (10 min) 不同热处理温度下，试样的相对密度与维氏硬度。相对密度方面，试样呈现先增大后基本持平的趋势，在 1 250℃ 热处理温度下，提高试样致密度的效果有限，这是由于热处理温度较低，合金无法产生液相 Co 填充微观缺陷；维氏硬度方面，在 1 300℃ 时，试样达到了最高硬度，但随着温度继续升高，试样的硬度开始降低，图 15 是试样在 1 300℃ 和 1 400℃ 热处理后表面微观组织和 WC 晶粒尺寸分布图。可以观察到，热处理温度达到 1 400℃ 时，

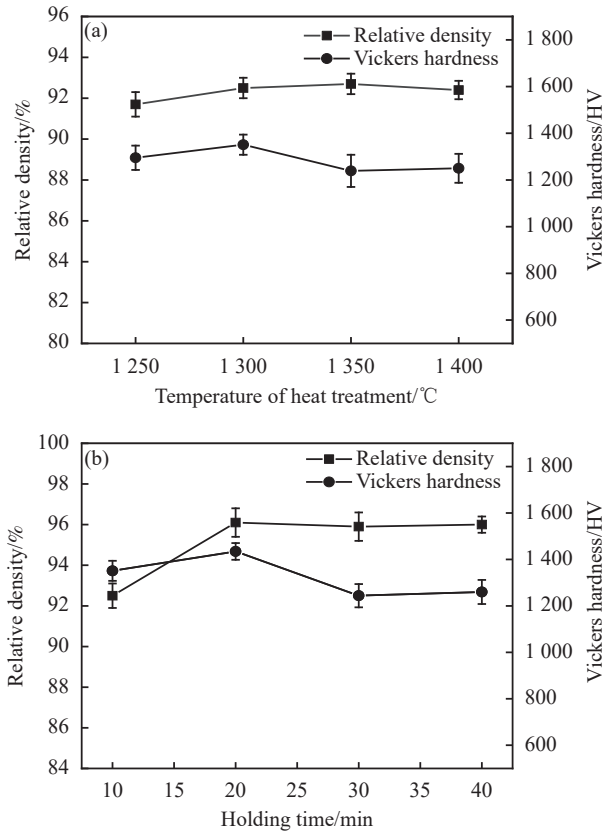


图 14 热处理后 WC-12Co 硬质合金试样的相对密度与维氏硬度：
(a) 不同温度；(b) 不同保温时间
Fig. 14 Relative density and Vickers hardness of WC-12Co cemented carbide specimens after heat treatment: (a) Different temperatures; (b) Different holding time

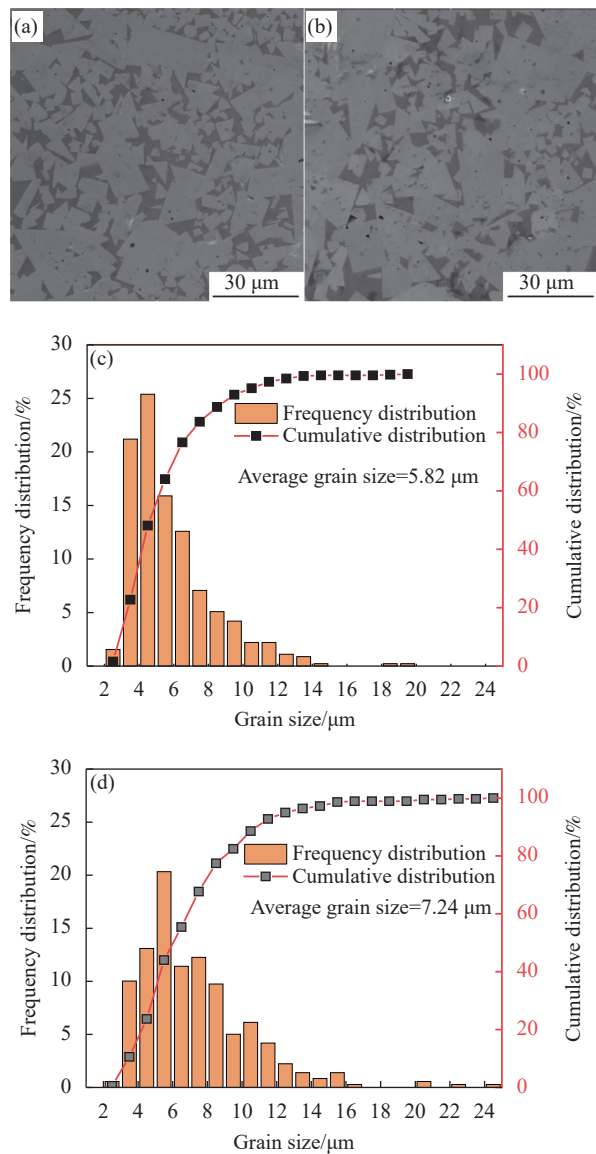


图 15 不同温度热处理后 WC-12Co 硬质合金试样表面微观组织和 WC 晶粒尺寸分布图: (a) 1 300℃ 热处理后微观组织; (b) 1 400℃ 热处理后微观组织; (c) 1 300℃ 热处理后晶粒分布; (d) 1 400℃ 热处理后晶粒分布

Fig. 15 Microstructure and WC grain size distribution on the surface of the WC-12Co cemented carbide specimens after heat treatment at different temperatures: (a) Microstructure after heat treatment at 1 300℃; (b) Microstructure after heat treatment at 1 400℃; (c) Grain size distribution after heat treatment at 1 300℃; (d) Grain size distribution after heat treatment at 1 400℃

由于温度过高而产生了过热现象, 导致了晶粒粗大, 晶粒尺寸分布在 2~5 μm 范围内的相比 1 300℃ 大幅减少, 部分晶粒已经达到 20 μm 以上, 降低了试样的硬度, 因此认为 1 300℃ 是热处理的最佳温度。

图 14(b) 是在热处理温度为 1 300℃ 下不同保温时间, 试样的相对密度与维氏硬度。可以观察

到, 随着保温时间的增加, 试样的相对密度开始变大, 当保温时间为 10 min 时, 相比较热处理前也有小幅的提升, 但由于保温时间过短, Co 相没有充分的时间迁移从而填充孔隙; 当保温时间达到 20 min 时, 这一情况得到了改善, 试样的相对密度达到了 96.1%, 维氏硬度也提升到 1 435 HV, 这说明试样中的大部分未熔合孔隙均被 Co 相填充, 试样相对密度与维氏硬度得到了较大的改善。但随着保温时间的进一步延长, 试样的相对密度没有进一步升高, 维氏硬度开始下降, 其平均值甚至开始低于热处理前的水平, 这是由于热处理时间过长, 使晶粒持续增大导致的。

图 16 是热处理温度为 1 300℃、保温时间为 20 min 时, 试样的微观组织前后对比, 可以看出, 热处理消除了大部分的气孔和微裂纹, 微观缺陷数量与热处理前相比明显减少。在微波热处理的高温环境下, SLM 成形过程中由于温度的快速变化而造成的热应力被消除, 同时 Co 相在表面张力的作用下, 会产生流动从而填充 SLM 成形过程中产生的孔隙及微裂纹, 因此微波热处理后试样的相对密度与维氏硬度得到了显著的提高。但较长时间的高温环境同时充分促进了 WC 团聚, 因

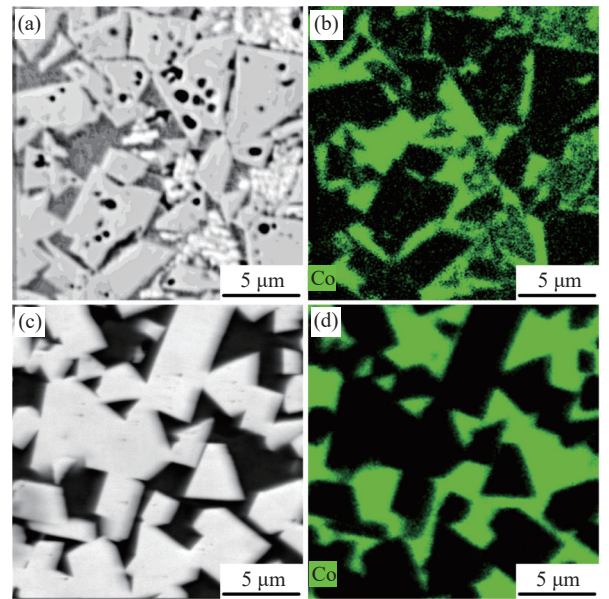


图 16 热处理前后 WC-12Co 硬质合金试样表面微观组织和 Co 元素分布: (a) 热处理前微观组织; (b) 热处理前 Co 元素分布; (c) 热处理后微观组织; (d) 热处理后 Co 元素分布

Fig. 16 Microstructure and Co element distribution on the WC-12Co cemented carbide specimens surface before and after heat treatment: (a) Microstructure before heat treatment; (b) Co element distribution before heat treatment; (c) Microstructure after heat treatment; (d) Co element distribution after heat treatment

此经过微波热处理后 WC 部分晶粒出现了长大现象,即使如此,由于试样相对密度的提高而带来的正效应也提高了试样的维氏硬度。图 16(b)、图 16(d) 分别为热处理前后 Co 元素分布图,可以观察到热处理后试样表面 WC 晶粒边界更清晰,Co 元素产生了富集现象,表明在微波热处理过程中粘结相 Co 发生了迁移团聚现象,佐证了热处理过程会促进 Co 相的迁移,从而填充试样的缺陷。

图 17 是圆柱形内部结构在热处理前后的宏观形貌,可以观察到,热处理后圆柱形内部结构试样并未发生较大程度的收缩,仍然保持着热处理前的形状精度。经过检测,其尺寸上的收缩都是在微米级别的,考虑到测量误差,基本可以忽略不计。但热处理前后试样外表面的缺陷仍然难以被消除,这是由于 Co 相难以流动到试样表面起到填充其表面缺陷的作用,前文中提到的悬垂圆孔由于阶梯效应导致内壁粘上的粉末,在热处理过程中被二次烧结,这在一定程度上增大了悬垂圆孔内表面的粗糙度。

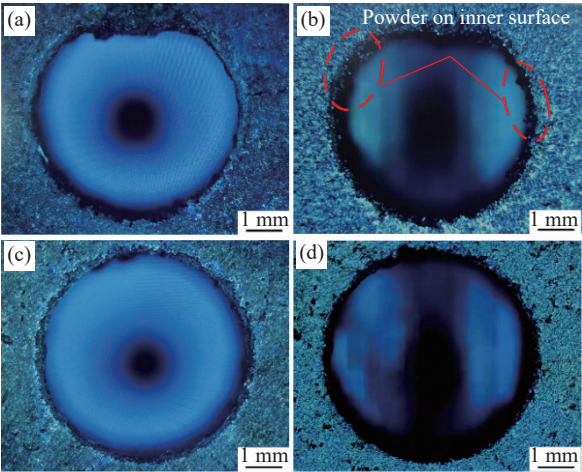


图 17 热处理前后圆柱形内部结构对比: (a) 热处理前 $\Phi 6$ 悬垂圆孔; (b) 热处理后 $\Phi 6$ 悬垂圆孔; (c) 热处理前 $\Phi 6$ 竖直圆孔; (d) 热处理后 $\Phi 6$ 竖直圆孔

Fig. 17 Comparison of the structure of round holes before and after heat treatment: (a) $\Phi 6$ overhanging round hole before heat treatment; (b) $\Phi 6$ overhanging round hole after heat treatment; (c) $\Phi 6$ vertical round hole before heat treatment; (d) $\Phi 6$ vertical round hole after heat treatment

总体来看,微波后处理对 SLM 成形 WC-12Co 试样相对密度与维氏硬度有着较大的提高,试样微观缺陷数量与热处理前相比大幅减少,且基本没有改变 SLM 原有的成形精度,考虑到微波热处理相比热等静压等热处理方式具有省时高效的特性,应当对其展开更深入的研究。

3 结论

(1) 棋盘格扫描策略能够逐步减小温度梯度,提高温度分布的均匀性,减小了成形过程中的热应力,适用于更小的扫描间距,拥有更好的成形能力,成形的试样在致密度与组织均匀性更佳。优化后选区激光熔化 (SLM) 成形 WC-12Co 硬质合金的最佳工艺参数: 棋盘格扫描策略、激光功率 100 W、扫描速度 390 mm/s、铺粉层厚 40 μm 、扫描间距 30 μm 。该参数下试样维氏硬度达到 1 324 HV; 相对密度达到 91.6%。

(2) 减小扫描间距可以提高熔道之间的搭接率,起到了重熔的作用,减少了未熔合孔缺陷的数量,提高了试样的相对密度,从而提高了试样的维氏硬度,但并不是扫描间距越小越好,其减小到一定程度时,会导致能量密度过大,此时试样的相对密度提升已经不明显,维氏硬度反而会由于过高的能量输入导致晶粒异常长大而产生小幅下降。

(3) 微波热处理前, 竖直圆孔形状精度受到孔径的影响不大,其主要误差来源于 SLM 工艺自身成形精度的误差; 悬垂圆孔的形状精度则与孔径呈负相关。由于棋盘格扫描策略能适用于更小的扫描间距及其能够减小成形过程中应力的特性,其成形圆柱形内部结构形状精度明显要好于 S 形扫描策略。

(4) 微波热处理后, 试样水平表面微观缺陷数量明显减少, 相对密度、维氏硬度与热处理前相比显著提升。当升温速率为 40 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、温度为 1 300 $^{\circ}\text{C}$ 、保温时间为 20 min 时, 试样相对密度达到 96.1%, 维氏硬度达到 1 435 HV。且在经过了热处理之后, 圆柱形内部结构本身的精度没有被破坏。

(5) 研究结果验证了 SLM 成形硬质合金圆柱形内部结构以及对其进行微波后处理的可行性, 应当考虑从粉末质量、设计自支撑结构以及后处理等角度进一步提高其成形质量; 该结构为设计成形硬质合金内冷刀具以及具有随形冷却内流道的模具提供了指导, 有助于进一步拓展 SLM 在成形陶瓷/金属复合材料方面的应用。

参考文献:

[1] KATIYAR K P, MAURYA R, SINGH K P. Failure behavior of cemented tungsten carbide materials: A case study of mining drill bits[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(8): 1-17.
[2] 刘云, 郭子傲, 王行, 等. 3D 打印硬质合金研究进展 [J]. 稀有金属, 2021, 45(4): 484-492.

LIU Yun, GUO Zi'ao, WANG Xing, et al. Research progress of 3D printed cemented carbide[J]. *Rare Metals*, 2021, 45(4): 484-492(in Chinese).

[3] 罗来马, 汤俊宇, 吴玉程. WC-Co 硬质合金的成型工艺研究进展 [J]. *机械工程学报*, 2023, 59(8): 60-73.

LUO Laima, TANG Junyu, WU Yucheng. Progress of molding process of WC-Co cemented carbide[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(8): 60-73(in Chinese).

[4] 魏青松. 金属粉末激光增材制造技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2019: 1-20.

WEI Qingsong. Metal powder bed laser additive manufacturing technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019: 1-20(in Chinese).

[5] KUMAR S, CZEKANSKI A. Optimization of parameters for SLS of WC-Co[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, 23(6): 1202-1211.

[6] KU N, PITTARI J J, KILCZEWSKI S, et al. Additive manufacturing of cemented tungsten carbide with a cobalt-free alloy binder by selective laser melting for high-hardness applications[J]. *JOM*, 2019, 71(4): 1535-1542.

[7] KONYASHIN I, HINNERS H, RIES B, et al. Additive manufacturing of WC-13%Co by selective electron beam melting: Achievements and challenges[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, 84: 105028.

[8] CRAMER C L, NANDWANA P, LOWDEN R A, et al. Infiltration studies of additive manufacture of WC with Co using binder jetting and pressureless melt method[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 28: 333-343.

[9] 季文彬, 邓日清, 戴士杰, 等. 铣削对 SLM 增材 TC4 钛合金表面完整性和疲劳性能的影响 [J]. *中国机械工程*, 2023, 34(2): 208-217, 225.

Ji Wenbin, DENG Riqing, DAI Shijie, et al. Effect of milling on surface integrity and fatigue properties of SLM-augmented TC4 titanium alloy[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(2): 208-217, 225(in Chinese).

[10] 崔浩, 闫群, 王向明, 等. 激光选区熔化成形铝合金板与 CFRP 复合材料层合板螺栓连接结构失效分析方法评估 [J]. *复合材料学报*, 2017, 34(12): 2762-2769.

CUI Hao, YAN Qun, WANG Xiangming, et al. Evaluation of structural failure analysis method for bolted joint structure of laser-selective melt-forming aluminum alloy plate and CFRP composite laminate[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(12): 2762-2769(in Chinese).

[11] 周玥丞, 赵阳. 选择性激光熔融增材制造不锈钢力学性能研究进展及统计分析 [J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(6): 15-25.

ZHOU Yuecheng, ZHAO Yang. Progress and statistical analysis of mechanical properties of selective laser melting additively fabricated stainless steel[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(6): 15-25(in Chinese).

[12] CHEN C, HUANG B, LIU Z, et al. Additive manufacturing of WC-Co cemented carbides: Process, microstructure, and mechanical properties[J]. *Additive Manufacturing*, 2023, 63: 103410.

[13] PAPY K, JEAN-MARC S, ALEXEY S, et al. Additive manufacturing feasibility of WC-17Co cermet parts by laser powder bed fusion[J]. *Procedia CIRP*, 2022, 111: 153-157.

[14] UHLMANN E, BERGMANN A, BOLZ R. Manufacturing of carbide tools by selective laser melting[J]. *Procedia Manufacturing*, 2018, 21: 765-773.

[15] FRIES S, VOGELPOTH A, KALETSCH A, et al. Influence of post heat treatment on microstructure and fracture strength of cemented carbides manufactured using laser-based additive manufacturing[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2023, 111: 106085.

[16] BRICIN D, ACKERMANN M, JANSÁ Z, et al. Development of the structure of cemented carbides during their processing by SLM and HIP[J]. *Metals*, 2020, 10(11): 1477-1493.

[17] JIA H, SUN H, WANG H, et al. Scanning strategy in selective laser melting (SLM): A review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113(9-10): 1-23.

[18] OGHBAEI M, MIRZAEI O. Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals advantages and applications[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 494(1-2): 175-189.

[19] SINGH R, SHARMA V, PANDEY P M. Microstructural characteristics and mechanical behaviour of microwave-assisted sintered novel WC-Co ceramic based internally cooled turning tool[J]. *Materials Characterization*, 2023, 200: 112855.

[20] LIU C, CAI Z, DAI Y, et al. Experimental comparison of the flow rate and cooling performance of internal cooling channels fabricated via selective laser melting and conventional drilling process[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96: 2757-2767.

[21] LIM B, PROVOSTY R, DONG G. Investigation of the cooling performance of chemically etched millimeter-scale channels made by selective laser melting[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 133: 2333-2343.

[22] KEMPEN K, WELKENHUYZEN F, QIAN J, et al. Dimensional accuracy of internal channels in SLM produced parts[C]//2014 ASPE Spring Topical Meeting: Dimensional Accuracy and Surface Finish in Additive Manufacturing. San Francisco: ASPE, 2014: 13-16.

[23] 辛艳喜. 铝合金悬垂圆孔结构选区激光熔化成形质量研究及工艺优化 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.

XIN Yanxi. Quality study and process optimization of selected zone laser melting and forming of aluminum alloy overhanging circular hole structure[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2023(in Chinese).

[24] PAKKANEN J, CALIGNANO F, TREVISAN F, et al. Study of internal channel surface roughnesses manufactured by selective laser melting in aluminum and titanium alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, 47: 3837-3844.

[25] MAO Y, LYU X, SHEN X. A study on the surface quality of selective laser melted cylindrical- and parallelepiped-shaped inner structure[J]. *Materials*, 2023, 16(13): 4649.