

doi: 10.7690/bgzdh.2018.10.008

大型送粉式激光增材制造成套设备设计与研究

刘仁洪, 龚运环, 王敏, 陈波

(中国兵器装备集团自动化研究所智能制造技术研发中心, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对兵器设备的大型复杂金属构件, 研发一种同轴送粉式激光增材制造成套设备。主要从送粉式激光增材制造设备技术基础上详细阐述系统组成与成形工艺流程, 对成套设备的结构方案和控制方案进行详细设计和研究, 使用 ANSYS 对成套设备关键部件进行仿真分析与优化设计, 以西门子 840D sl 系统为控制核心实现成套设备的集成与控制。结果表明: 该设备能提升自动化程度, 达到预定设计目的, 为后续的大型复杂构件的激光增材制造成形工艺研究提供设备支撑。

关键词: 激光增材制造; 激光技术; 成套设备; 控制系统

中图分类号: TJ05 **文献标志码:** A

Design and Research of the Large-sized Pulverized Laser Additive Manufacturing Equipment

Liu Renhong, Gong Yunhuan, Wang Min, Chen Bo

(Research & Development Center of Intelligent Manufacturing Technology,
Automation Research Institute of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the large and complex metal components of the equipment, a complete set of equipment for the laser additive manufacturer of coaxial pulverized material. The system composition and forming process are described in detail from the technology of pulverized laser additive manufacturing. The structure scheme and control scheme of the complete set of equipment were designed and studied in detail. The key components of the equipment are simulated and optimized by ANSYS. The integration and control of complete set of equipment is realized by Siemens 840D sl system. The results show that the equipment can enhance the degree of automation, achieve the predetermined design purpose, and provide equipment support for the subsequent research on the laser augmentation forming process of large and complex components.

Keywords: laser additive manufacturing; laser technology; complete equipment; control system

0 引言

大型金属材料激光增材制造技术是以 3 维模型“离散+堆积”的成形思想为基础, 采用激光熔化金属粉末逐点逐层沉积制造金属零部件。金属材料激光增材制造技术是 20 世纪 90 年代初期发展起来的一项先进制造技术, 能够实现高性能大型复杂结构金属零部件的无模具、快速、全致密近净成形^[1]。同轴送粉式激光增材制造技术也可以用于异形和关键零部件制造缺陷、误加工或服役损伤零部件的再制造。与传统的机械加工方式相比, 此技术具有快速加工柔性大、加工时间短、材料利用率高和综合力学性能优异等诸多优势, 并且可以利用不同材料或材料成份制造具有梯度功能的零部件。送粉式激光增材制造技术是目前解决大型复杂金属构件制造的唯一技术途径, 可以直接制造飞机、飞船、导弹

和卫星等航空航天设备所需的大型复杂钛合金及高温合金等高性能金属结构件^[2]。

目前, 国外对于激光增材制造技术的研究与应用相对成熟, 比如美国 AeroMet 公司率先实现激光直接沉积 TC4 钛合金次承力构件在 F/A-18E/F、F-22 等飞机上的装机应用, 并制定出了相应技术标准^[3-4]。国内对此项技术的研究与应用主要集中在相关高校和研究机构, 还未应用于实际生产, 特别是兵器设备、航空航天等高要求的领域^[5-6]。笔者针对兵器设备的大型复杂金属构件, 自主研发一种同轴送粉式激光增材制造成套设备, 并对其工作原理、关键技术、控制与集成等内容进行详细阐述^[7]。

1 总体方案设计

笔者研究的激光增材制造设备是以同轴送粉方式将金属粉末通过气体和喷头汇聚与激光束焦点

收稿日期: 2018-06-18; 修回日期: 2018-07-20

基金项目: 四川省重点研发计划项目(16ZC2582)

作者简介: 刘仁洪(1985—), 男, 四川人, 工程师, 工学博士, 从事金属材料激光增材制造工艺与装备研究。

处，高能激光束将金属粉末熔化，根据机床运动轨迹沉积出不同的零部件。送粉式激光增材制造设备主要包括气氛保护环境分系统、机床运动分系统、激光光源分系统、打印头分系统、送粉分系统和控制分系统 6 个部分，如图 1 所示。

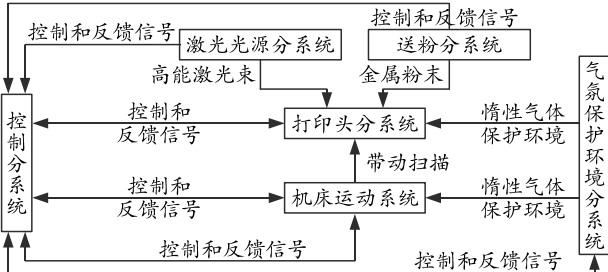


图 1 送粉式激光增材制造设备系统组成

激光光源分系统和送粉分系统分别向打印头分系统输送高能激光束和金属粉末，金属粉末在打印头分系统的光粉耦合装置作用下，喷射到激光光斑在工作面上形成的熔池内。机床运动分系统一方面带动打印头分系统做 3 维扫描运动，另一方面固定和支撑成形构件^[8]。

高性能零部件的成形过程需要在极低的氧和水含量的气氛环境中进行，以抑制金属氧化而影响制件力学性能。气氛保护分系统为成形过程提供一个充满惰性气体的密闭工作室。各分系统在控制分系统的统一调配下协调工作，实现激光 3D 打印制造，整个工艺流程如图 2 所示。

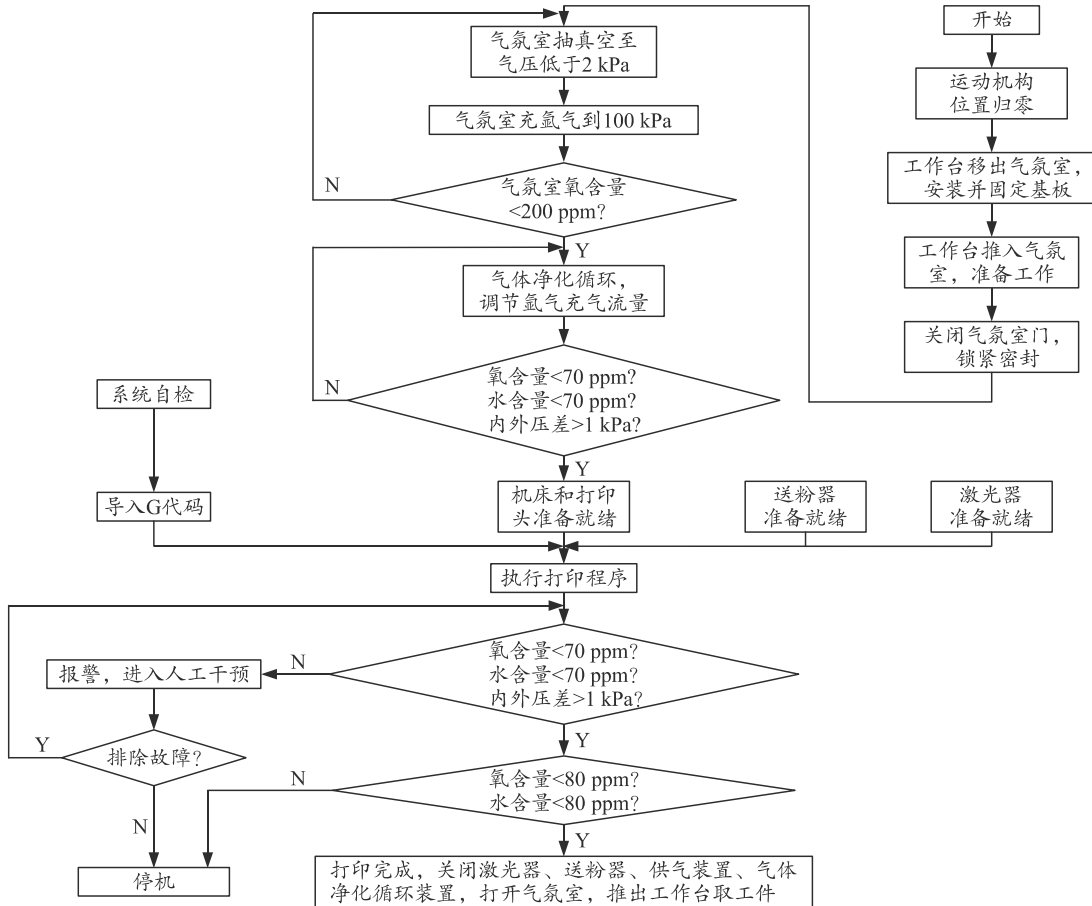
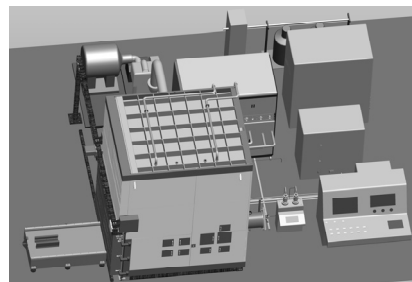


图 2 送粉式激光增材制造工艺流程

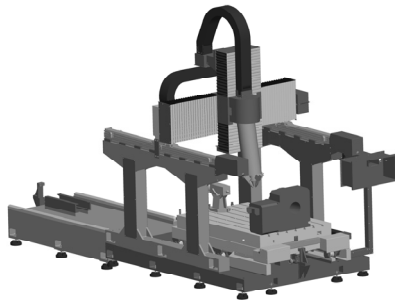
2 成套设备设计

2.1 机械结构设计

大型送粉式激光增材技术是集机、电、光、粉、气、水控制于一体的复杂系统设备，主要由气氛保护环境分系统、机床运动分系统、激光光源分系统、打印头分系统和送粉分系统组成，设备整体结构如图 3 所示。



(a) 成套设备机械结构及布局



(b) 机床分系统结构

图 3 大型送粉式激光增材制造设备结构

气氛保护环境分系统主要由气氛室、气体净化装置、除尘装置、真空机组和液氩供气装置等组成，分系统为成形加工区域提供一个稳定的惰性气体环境，尤其是为钛合金等易氧化的金属或合金提供高稳定的气氛环境，可以有效防止氧化、气孔等缺陷的出现，对于高性能或者关键力学承重件的成形制造要保证成形区域的氧、水含量 <50 ppm，才能保证在合理的工艺参数条件下，成形构件的力学性能达到锻件水平。

机床运动分系统主要由机床床身与基座、工作台、打印头运动机构和数控旋转轴组成，分系统可实现打印头沿 X 、 Y 、 Z 轴方向运动和 A 轴的旋转运动。为保证运动机构的稳定性，机床采用龙门式结构，机床传动机构采用高精度直线模组和双轴同步驱动技术^[9]，实现高精度大跨度机床运动，成形尺寸为 $1\ 500\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm} \times 500\ \text{mm}$ ，进给速度 $8\ \text{m/min}$ ，定位精度 $\pm 0.03\ \text{mm}$ 。

激光光源分系统主要由光纤激光器、激光器水冷机和激光器电控接口模块构成，通过光纤传输，为打印区提供高功率激光束，根据设计要求激光光束质量 $\text{BPP} < 24\ \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ，波长 $1\ 080\ \text{nm}$ ，功率密度 $> 120\ \text{kW/cm}^2$ ，能够有效提高金属粉末对激光能量的吸收率。

激光打印头分系统主要包括光纤接头 QBH、扩束准直模块、聚焦模块、保护镜和光粉耦合装置，以及用于集成和支撑光路、粉路和水路管道的机械结构，打印头系统光路准直焦距 $150\ \text{mm}$ 、聚焦焦距 $300\ \text{mm}$ 、冷却水电导率 $< 20\ \mu\text{S/cm}$ 。激光通过光路聚焦到工作面形成熔池，粉路管道中的粉末在气流带动下喷射到熔池中熔化。

送粉分系统主要由送粉器、送粉罐、刮粉块、伺服电机、送粉盘和送粉管道等组成，送粉系统通过 $1 \sim 15\ \text{L/min}$ 的惰性气体以体积流量方式，定量将 $20 \sim 150\ \mu\text{m}$ 金属粉末长程高效地输送到打印头

光粉耦合装置喷头处。

2.2 控制系统设计

笔者设计的送粉式金属材料激光增材制造成套设备的控制子系统由一套具有激光增材制造特殊要求的数控系统 (NCU) 和一台数据采集与监控系统 (DCS) 组成。数控系统采用德国西门子 840D sl 系列数控系统作为控制基本平台，经二次开发满足送粉式金属材料激光增材制造成套设备需求。数据采集与监控系统实现气氛环境和加工成形过程中设备运行状态数据采集和监控，处理相关信息，并与数控系统通信，同时也为数控系统准备加工程序读取 G 代码，控制执行机构完成打印过程；并监控打印过程的工艺参数^[10-11]。控制系统构成如图 4 所示。

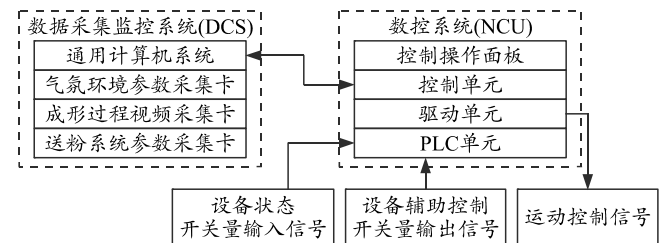
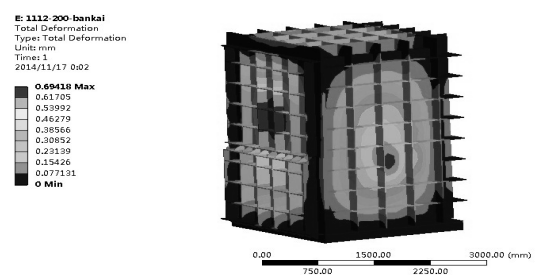


图 4 控制系统构成

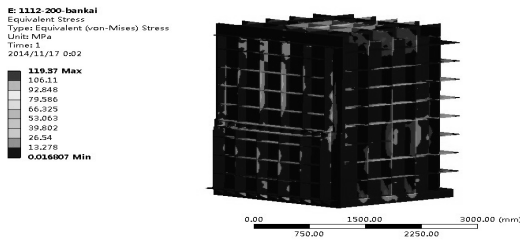
3 关键部件的设计与分析

3.1 大容积气氛保护系统设计

笔者采用抽真空 \rightarrow 充注惰性气体 \rightarrow 清洗 \rightarrow 净化循环的气氛保护环境准备工艺流程，在大容积气氛环境准备时间上较传统直接清洗置换工艺流程有效率高、耗时短、成本低的优点，并且通过反馈控制技术，使气氛环境在成形过程中实现精确保持控制。气氛室主体采用 A3 钢板焊接而成，气氛室主体和外部接口、板块之间采用静密封过渡连接。通过 ANSYS 仿真分析对气氛室在绝对真空度 $100\ \text{Pa}$ 作用下进行强度校核，得到了气氛室的最大变形为 $0.694\ \text{mm}$ 、最大应力为 $119.4\ \text{MPa}$ ，满足材料和焊缝的力学性能，且最大应力、应变分布并没有集中在主体筋板交接处，在实际工况下不会对整体的密封性能造成影响。气氛室强度分析如图 5 所示。



(a) 气氛室应变分布

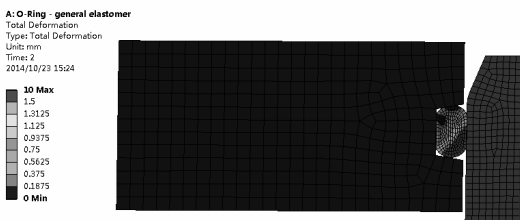


(b) 气氛室应力分布

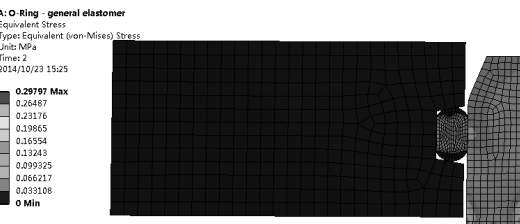
图 5 气氛室强度分析

3.2 气氛室密封设计

气氛室门的密封性能直接影响了抽取真空和氩气置换过程中氧含量的降低效果。气氛室门密封面尺寸为 2 000 mm×3 100 mm。笔者设计的密封形式为沿矩形边界的沟槽填充 O 型密封圈。密封圈采用压块压紧方式紧固连接。整个气氛室的密封特性主要取决于 O 型密封形圈的硬度、工作压力、沟槽间隙大小。通过 ANSYS 仿真优化设计了密封沟槽的宽度 13 mm、深度 8 mm 和密封条直径 12 mm，最大应力为 0.298 MPa，密封圈最大变形为 1.3 mm，满足密封圈的使用要求，有效保证大尺寸舱门的密封性能。分析图如图 6 所示。



(a) 密封圈密封应变



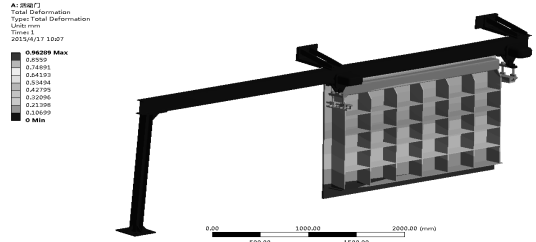
(b) 密封圈密封应力

图 6 形密封圈密封分析

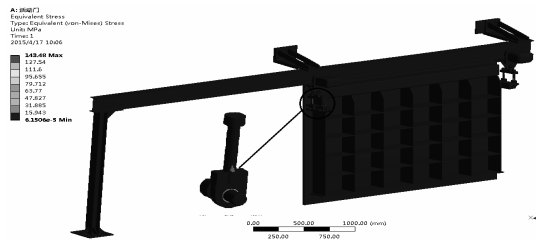
3.3 气氛室活动门设计

气氛室活动门是成形工件的主要通道。活动门由关节轴承连接吊装在工字横梁上，活动门开合采用 3 T 的电动车驱动。为了减少气氛室门的密封尺寸，设计采用上下两半门密封，上半门固定在气氛室本体上，需要维修机床时打开。采用两半门设计方式导致活动门会出现偏心情况，需要对活动门的偏心尺寸进行校核。通过 ANSYS 仿真分析得到活动门的最大应变为 0.963 mm，发生在门的底部，活

动门与门框间隙为 8 mm，最大应变不影响活动门的移动与闭合，最大应力为 143.48 MPa，主要集中在关节轴承处，其值满足关节轴承的使用要求。气氛室活动门吊装强度分析如图 7 所示。



(a) 气氛室活动门吊装应变



(b) 气氛室活动门吊装应力

图 7 气氛室活动门吊装强度分析

3.4 高精度长程送粉技术

笔者采用同轴送粉系统，利用多路粉罐并联方式同步控制送粉。根据气固两相流理论，采用惰性气体气力长程输送金属粉末，通过质量计传感器精确采集各路送粉量，采用线性回归方法得到送粉量与载气流量、刮粉速度的定量关系如图 8 所示，通过控制系统动态调节送粉量，实现长程多路粉体高精度高效率同步输送。

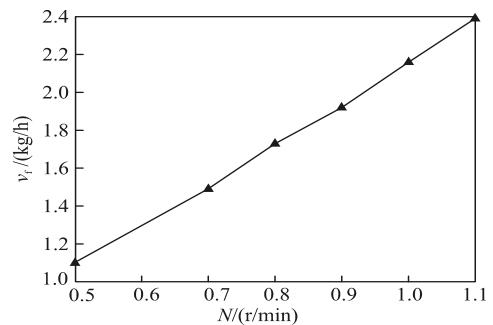


图 8 送粉速率 v_f —转速 N 关系

4 成套设备集成与调试

大型送粉式激光增材制造成套设备的系统组成较多，需要控制部分外部设备工作、监控其工作状态，并配合专用数控系统有序、安全的工作。笔者以西门子 840D sl 系统为控制核心，具有响应速度快、存储空间大等特点，通过 RS485/232、Profinet 总线实现 PLC 主站与激光器、送粉器等从站以及

HMI 间的实时高速通信。该成套设备在 840D sl 系统平台上实现专用数控机床、真空机组，集中供气装置，气体净化装置、图像采集设备、激光器、送

粉器、激光打印头、激光器水冷机、辅助水冷机等分系统部件的集成与控制。控制系统集成关系如图 9 所示。

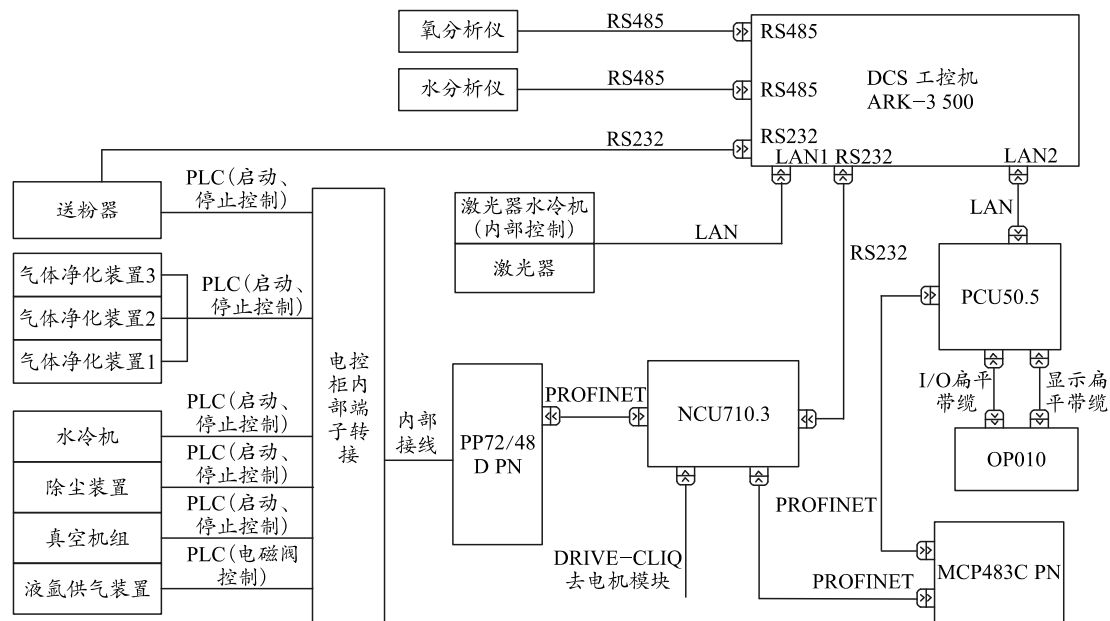


图 9 控制系统集成关系

通过控制系统实现成套设备的粉、光、机、电、气、水联调控制，主要包括气氛环境快速形成与精确保持、光粉耦合、机械运动机构与粉路、光路、水路、打印头的联动，数据采集与监控等。

如图 10 所示，笔者通过工艺参数与控制流程的匹配实现了成套设备的出光与试打印工作。验证了激光增材制造的技术原理，成套设备达到设计指标。



图 10 成套设备集成与调试

5 结束语

高性能激光增材制造技术已成为先进制造的一个重要发展方向，具有广阔的市场与应用前景。笔者设计的大型同轴送粉式激光增材制造成套设备充分考虑了制造前处理-气氛环境准备-打印工艺过程的系统可靠性和技术难点，详细设计了设备的机械结构和控制系统方案。利用 ANSYS 软件对设备的核心部件进行了稳定性、可靠性模拟计算分析。成套设备以西门子 840D sl 系统为控制核心，实现了各个分系统的统一协调工作，提升了设备的自动化

程度，通过工艺参数调整，完成 A-100 高强度钢材的试打印工作，达到预定的设计目的，为后续的大型复杂构件的激光增材制造成形工艺研究提供设备支撑。

参考文献：

- [1] 林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学(信息科学), 2015, 45(9): 1111-1126.
- [2] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造: 若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2690-2698.
- [3] ARCELLA F G, FROES F H. Producing titanium aerospace components from powder using forming[J].

Journal of Metals, 2000, 52(5): 28-30.

[4] HOFMEISTER W, GRIFFITH M. Solidification in direct metal deposition by LENS processing[J]. Journal of Metals, 2001, 53(9): 30-34.

[5] 田宗军, 顾冬冬, 沈理达, 等. 激光增材制造技术在航空航天领域的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2015, 58(11): 36-42.

[6] ARCELLA F G, ABBOTT D, HOUSE M. Titanium alloy structures for airframe application by the laser forming process[C]. Boston, American: Structures, Structure Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, 2013: 71-73.

[7] 邵丹, 胡兵, 郑启光. 激光熔覆技术及应用技术与[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 50-67.

[8] 朱强, 尹二伟, 史慧芳, 等. 金属粉末在线称量及旋压成型工艺装备技术[J]. 兵工自动化, 2017, 36(7): 29-32.

[9] 林胜. 5轴数控机床发展与应用[J]. 航空精密制造技术, 2005, 41(4): 1-5.

[10] DING Y, WARYON J, KOVACEVIC R. Development of sensing and control system for robotized laser-based direct metal addition system[J]. Additive Manufacturing, 2016, 10(6): 24-35.

[11] 刘立峰, 杨洗陈, 王菲, 等. 基于机器人的柔性激光再制造系统[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 65-70.

(上接第 34 页)

- 1) 每年更换一次气动系统干燥器, 防止因空气潮湿而造成气路部组件的腐蚀老化。
- 2) 检查气动系统安全阀在 1.3 MPa 时是否正常开启, 预防因安全阀失效而造成气动系统超压。
- 3) 每次装备使用后应及时操作排气阀给储气罐排水, 预防储气罐内水和杂物的堆积腐蚀。
- 4) 每月定期检查储气罐周围是否有液压油等腐蚀性液体, 罐身是否有生锈、裂纹等并做相应油漆防锈等。
- 5) 人员在对气动系统安全阀、排气阀进行操作前应在装备停机后并观察一段时间。

5 结论

通过把装备储气罐排气阀出现超压崩裂转化为压力容器爆炸冲击等效计算分析可知:

- 1) 储气罐在安全阀设定压力 1.2 MPa 下, 其超压所产生空气冲击波的初始峰值约为 1.36×10^5 Pa, 可等效为半径 2 mm 的 TNT 球体的爆炸效应。
- 2) 装备储气罐排气阀锈蚀堵塞崩裂冲击所产生的破片初速度达到 120.1 m/s, 该破片的动能和比动能分别为 721.2 J 和 0.4×10^6 J/m²。
- 3) 对比分析破片毁伤动能准则、比动能准则,

装备储气罐超压情况下, 排气阀崩裂冲击将对人体及装备内非金属类部件产生杀伤破坏。

4) 定时清理排气阀内积水、金属屑末堆积及锈蚀等维护保养, 科学规范操作流程是排除装备储气罐安全隐患的关键。

参考文献:

[1] 史长根, 尤峻, 周祥, 等. 高压容器试验仓安全评估计算方法研究[J]. 爆破器材, 2011, 40(4): 32-37.

[2] 杨相礼, 何勇, 何源. 圆柱形预制破片爆炸驱动仿真研究[J]. 兵工自动化, 2016, 35(8): 9-12.

[3] 成肇毅. 压力容器爆炸物质的数量估算[J]. 锅炉压力容器安全技术, 2004, 16(1): 19-21.

[4] 金丽, 赵捍东, 曹红松, 等. 预制破片对地面人员目标的杀伤威力分析计算[J]. 导弹与制导学报, 2006, 26(4): 157-159.

[5] TMS-1300. Structure to resist the effect of accidental explosions[S]. US: US Department of the Army, 1990.

[6] 曹凤霞. 爆炸综合毁伤效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 导弹与制导学报, 2008.

[7] 刘佳, 崔传安, 徐畅. 爆炸波在硬质聚氨酯泡沫中的衰减特性模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2017(9): 164-167.

[8] 李爱辉, 赵宸立, 王龙. 基于粒子系统的弹药爆炸可视化[J]. 兵工自动化, 2017, 36(10): 53-56.