

自动打磨技术在轨道交通车辆铝合金车体制造中的应用

胡伟, 吴志明, 彭章祝

中车株洲电力机车有限公司 湖南株洲 412001

摘要: 针对轨道交通铝合金车体焊缝自动打磨, 从自动打磨部位、工艺要求、工艺难点出发, 对铝合金车体自动打磨方式、设备选型、焊缝自动跟踪和打磨力控系统等进行分析, 搭建自动打磨试验平台, 对焊缝自动打磨进行验证试验, 实现了自动打磨技术在轨道交通铝合金车体制造中的应用。

关键词: 自动打磨; 轨道交通; 铝合金车体; 焊缝

1 序言

高铁白车身是高铁车辆中重要的大型结构, 是高速列车的骨格, 其制造工艺性、结构可靠性直接影响着高速列车的安全。高铁白车身主要采用焊接工艺, 制造过程中基本上每条焊缝都需要经过打磨处理, 目前高铁白车身焊缝打磨还停留在初始手工打磨阶段, 采用传统的手工打磨方式, 不仅耗时耗力, 而且很难保证打磨质量的一致性, 同时打磨现场的噪声、粉尘也严重影响工人的健康。因此, 进行高铁白车身焊缝自动打磨的研究与应用, 实现铝合金车体焊缝的自动化、智能化打磨, 以自动打磨替代手工打磨方式, 对提高焊缝打磨质量和效率, 降低工人劳动强度, 改善员工作业环境意义重大。

2 自动打磨机器人应用现状

由于具备作业劳动强度低、作业环境好、产品打磨一致性好等优点, 自动打磨机器人(见图1)在

航空航天、汽车、医疗用品、家具、舰船等行业应用越来越广泛。在轨道交通行业, 尹保亮等^[1]人将机车车体司机室外表焊缝通过自动打磨得到了高质量光滑表面, 从德成等^[2]人对转向架构架梁体自动打磨进行了可行性分析, 论证了梁体自动打磨的可行性。同时中车集团旗下主机厂进行了铝合金侧墙焊缝自动打磨生产线的建造(见图2), 但是在铝合金车体整车外部焊缝的自动打磨研究与应用较少。



图1 自动打磨机器人

基金项目: 国家重点研发项目(SQ2017YFB130372): 高铁白车身型材切割/焊接拼装/打磨工艺技术研究。

reconstruction of specular surface for a gas tungsten arc weld pool[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18 (12): 3751.

[11] Chen B, Wang J, Chen S. Prediction of pulsed GTAW penetration status based on BP neural network and D-S

evidence theory information fusion[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48 (1-4): 83-94.

MW 20201105

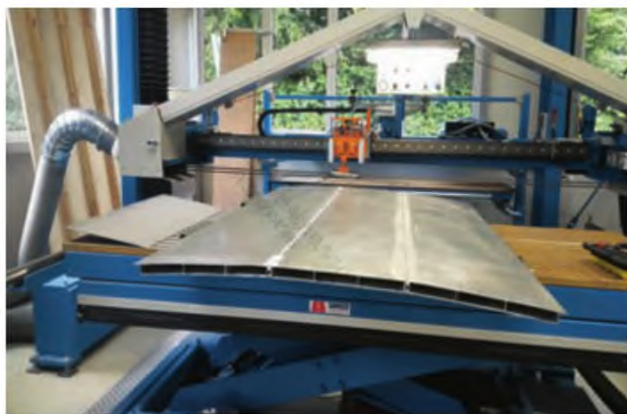


图2 自动化打磨专机

3 高铁白车身焊缝自动打磨需求分析

(1) 白车身焊缝打磨部位及类型 高铁白车身铝合金车体是通过大型铝合金型材焊接而成的，在铝合金车体外墙上留有大量长直和圆弧焊缝。焊缝的最大宽度为10mm，焊缝余高为2~5mm，焊后打磨主要包括焊缝余高打磨、焊缝接头打磨、焊接飞溅及焊接缺陷的去除等；打磨部位主要为高铁白车身外部侧墙自动焊焊缝、外侧门角焊缝、门立柱与侧墙板外侧焊缝、端墙外侧焊缝等。

(2) 自动打磨工艺要求 铝合金车体焊接后，为保证焊缝强度和车体侧墙外表面的平整，焊缝需要平整化处理。自动打磨任务是以铣削、磨削的加工方式对铝合金车体上的焊缝进行精整处理，去除焊缝余高。打磨后的粗糙度值应 $< 6.3\mu\text{m}$ ，打磨不损伤母材，局部损伤量最大 $\leq 0.2\text{mm}$ ，焊缝平滑过渡。

(3) 自动打磨应关注的难点 ①车体焊后变形，焊缝形貌、位置尺寸精度与理论模型之间存在偏差，机器人运行轨迹精度低，采用何种跟踪方式对车体焊缝打磨的精度进行控制。②车体作为大型焊接结构件，尺寸大、焊缝长，一次性打磨量大，需要考虑打磨工具的使用寿命。③焊缝位置形状复杂（十字/井字/T字形），且需要同时考虑采用弧焊工艺和搅拌摩擦焊工艺制造不同余高焊缝的打磨。④自动打磨过程中如何防止过切、过磨损伤焊缝及母材。⑤机器人打磨过程中产生的震动及噪声。

4 焊缝自动打磨方式

自动打磨方式主要有机器人或者专机搭载打磨工具及磨料对产品进行打磨和机器人夹持产品在打磨工具及磨料下进行打磨两种方式。针对大型结构件焊缝的自动打磨，主要是使用机器人搭载打磨工具进行打磨的方式。

4.1 铝合金焊缝打磨方式

铝合金焊缝传统的后处理方式是磨削为主，当焊缝余高较高时，采用磨削方式无法高效的完成打磨，因此在打磨前，考虑先通过铣削方式将大部分焊缝铣削掉（去除量达85%~95%），再通过磨削机构将剩余的焊缝余高打磨掉。为进一步提高打磨效率，将铣削与磨削组合成一套工具，焊缝先铣后磨同步操作。

(1) 铣削方式 自动打磨中铣削机构有卧铣和立铣两种方式。相比卧铣，立铣具有铣削装置体积小、加工噪声小的优点，但不能精准的控制铣削余高，有损伤母材风险，因此选用立铣时，在打磨组合工具上集成机械防过切机构，防止打磨时损伤到工件母材。

(2) 磨削方式 焊缝的磨削工具主要有三种：千页片打磨工具、砂轮打磨工具和带式打磨工具。千页磨片是用优质的纱布切割成小片后经过压装而成，具有产热低，打磨质量好的优点；砂轮打磨工具具有较强的韧性、高效的磨削力，能够保持持续的快速磨削，但打磨后表面质量较差；带式磨削是一种弹性磨削，磨削效率和磨削精度较高，但磨削机构体积大。

4.2 搭载机器人方式

搭载自动打磨机器人有两种方式，一种为打磨机器人安装于直线伺服滑台上（RGV），实现纵向移动，完成车体长度方向焊缝的打磨；另一种为打磨机器人安装于AGV小车上，在AGV的带动下实现纵向移动，实现对车体的打磨。AGV方式操作方便，对台位限制小，但是AGV小车定位精度低，为了保证稳定的工作状态，AGV小车自重设计的较重。

4.3 自动打磨关键系统

(1) 焊缝激光检测系统 为解决焊缝形貌、位置尺寸精度与理论模型之间存在偏差问题，自动打磨设备需要制备激光定位跟踪系统用来对焊缝进行实时的扫描和定位。激光定位跟踪系统可对焊缝进行实时扫描或分段扫描定位和跟踪，快速识别出焊缝的位置、宽度、相对于母材的角度，和机器人进行实时通信及引导机器人调整姿态。

(2) 力控系统 在铣削和打磨过程中，需要打磨刀具紧贴焊缝，形成一定的压力，同时该压力不能因过大而对产品造成损伤。气浮动恒力系统（见图3）由PLC进行控制，PLC通过分析判断压力传感

器实时反馈的模拟量信号，自动调整气动比例阀的进气量大小，确保电主轴气浮力处于一个稳定范围。

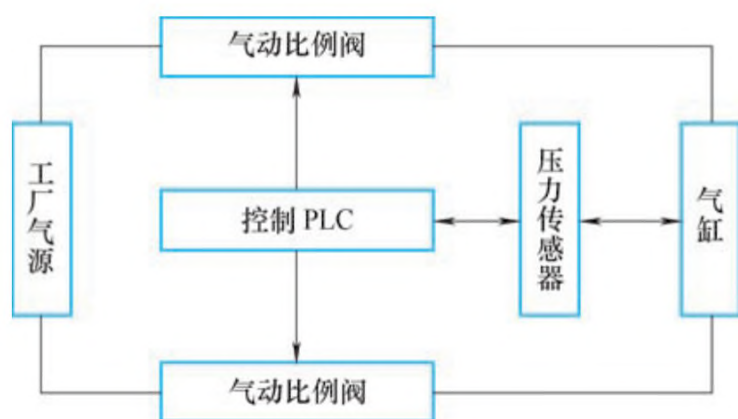


图3 恒力控制系统

5 焊缝自动打磨系统构成

自动打磨系统由打磨单元（含机械手、焊缝打磨组合工具、吸尘装置、焊缝定位跟踪系统等）、控制系统、电动运输车、行走机构、视频监控系統、在线及离线编程软件、安全防护系统等组成，如图4所示。

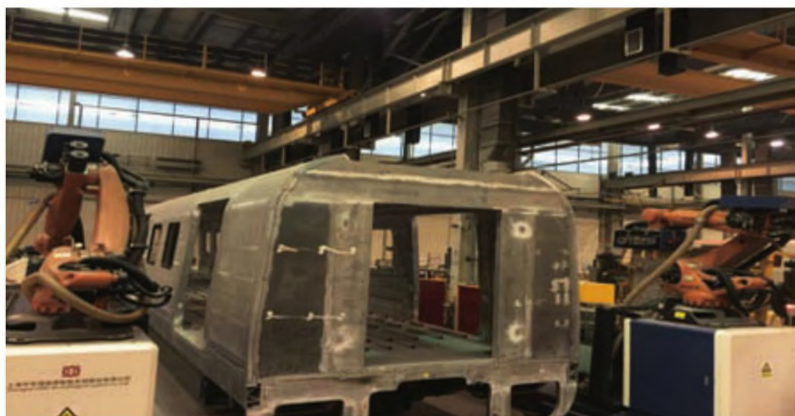
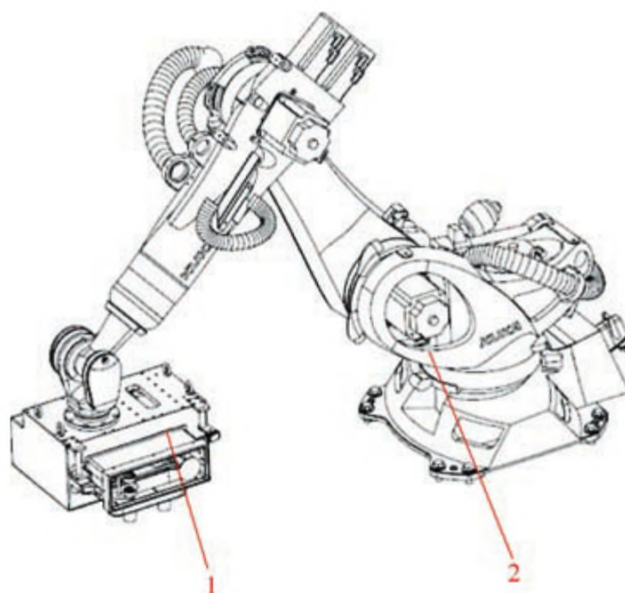


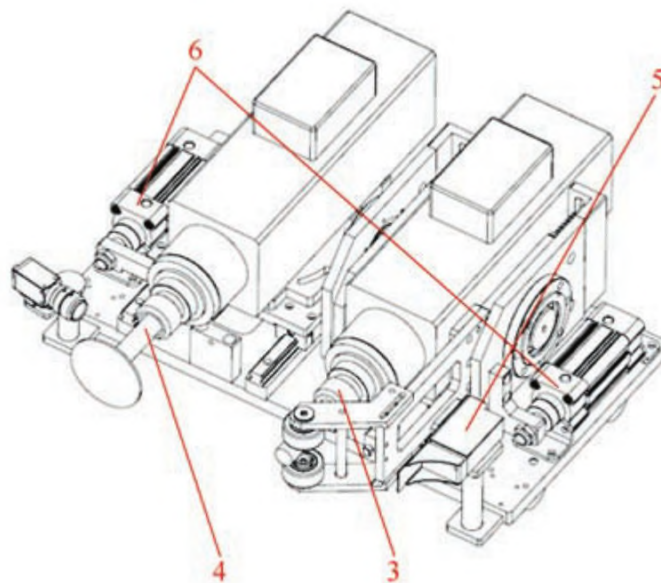
图4 自动打磨系统

(1) 自动打磨系统工作流程设计 首先，激光跟踪系统扫描车体焊缝，用扫描的焊缝坐标引导机器人调整姿态。其次，机器人移动打磨组合工具切入车体焊缝，开始焊缝打磨，打磨组合工具切入焊缝时，在铣削电主轴的气浮动机构与自适应弹性机构作用下，防过切滚轮贴合在焊缝两边的车体上，保证铣刀始终垂直焊缝进行铣削；最后，相邻的磨削电主轴在气浮动机构作用下，对铣削后的焊缝余高进行磨削。焊缝铣削和焊缝磨削同步进行，铣削在前，磨削在后。

(2) 自动打磨组合工具设计 打磨组合工具（见图5）是机器人打磨系统的核心部分，打磨组合工具1安装在机器人2上进行打磨作业，是机器人应用空间的拓展。打磨组合工具由铣削机构3、磨削机



a) 机器人打磨系统



b) 打磨组合工具

图5 打磨系统工具

1.打磨组合工具 2.机器人本体 3.铣削机构
4.磨削机构 5.定位激光跟踪系统 6.气浮动恒力系统

构4、激光定位跟踪系统5和气浮动恒力系统6组成。

6 焊缝自动打磨工艺参数试验

中车株洲电力机车有限公司在对高铁白车身焊缝打磨技术进行研究和分析，对高铁白车身焊缝打磨进行了多次探讨和验证后，搭建了焊缝自动打磨试验平台，进行打磨试验，并建立了铝合金车体自动化打磨生产线。

(1) 自动打磨工艺参数 制备焊缝打磨样件，分别研究自动打磨铣削与磨削工艺参数，采用正交试验法分析研究转速、恒力设置和磨削速度与去除量之间、磨削表面质量的关系规律，形成正交试验表，绘制数据三维曲面图，如图6、图7所示。由工艺参数三维曲面图可知：

1) 铣削参数中主轴转速对铣削去除量影响较

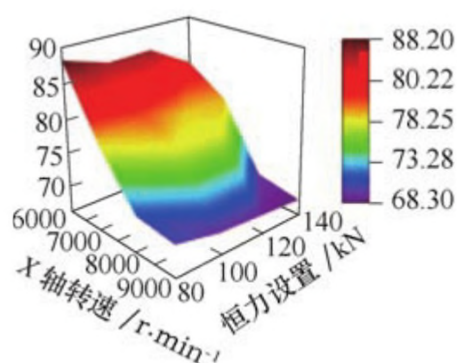
大,随着转速的增加铣削去除量明显降低,参数恒力设置对去除量的影响较小,随着恒力的增加铣削去除量缓慢降低。

2) 磨削参数中打磨质量随主轴转速与恒力的增加而增加,随打磨速度的增加而降低。

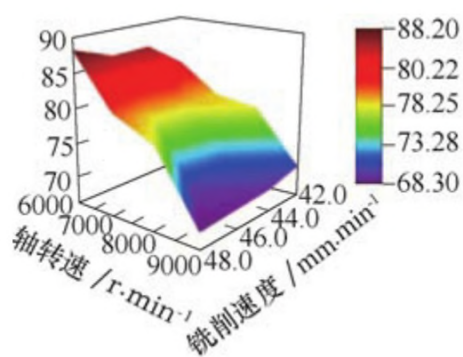
(2) 手工打磨与自动打磨对比 两种打磨方式的对比结果见表1。

表1 手工打磨与自动打磨对比

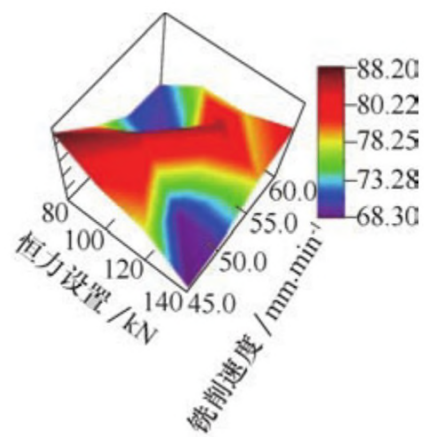
项点	自动打磨	手工打磨
打磨速度/mm·min ⁻¹	1800	300
打磨噪声/dB	80~85	95~100
打磨环境	打磨铝屑、粉尘回收	粉尘、铝屑排放
打磨质量	打磨一致性好	一致性差
每节车打磨工时/h	2~3	11~12



a) X轴-转速/Y轴-恒力

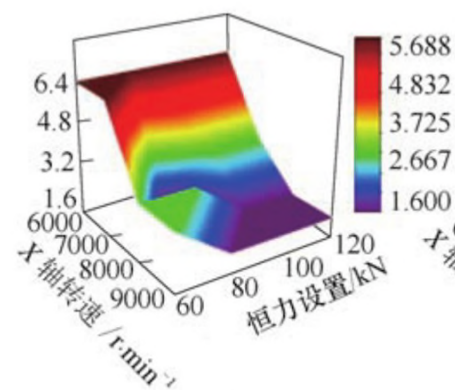


b) X轴-转速/Y轴-铣削速度

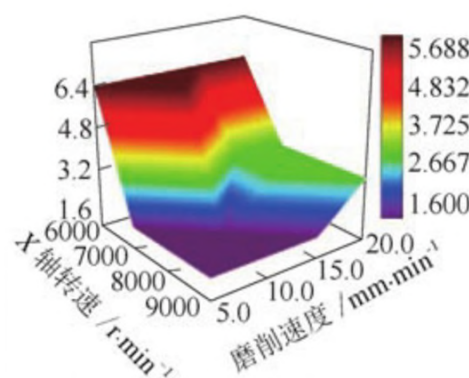


c) X轴-恒力/Y轴-铣削速度

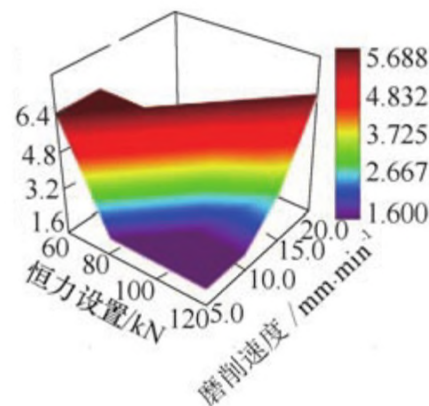
图6 铣削正交试验铣削参数—去除量三维曲面图



a) X轴-转速/Y轴-恒力



b) X轴-转速/Y轴-磨削速度



c) X轴-恒力/Y轴-磨削速度

图7 打磨参数—粗糙度值三维曲面图

7 结束语

自动打磨技术在高铁白车身整车上的应用虽然刚起步,但市场前景广阔,市场对自动打磨设备的需求旺盛,自动打磨技术以其先进、高效、绿色、智能的特点必将在轨道交通制造中取得广泛的应用。本文优化设计用于整车自动打磨的设备及工具,研究了制定整车自动打磨工艺并应用,填补了轨道交通整车打磨自动化技术应用领域的空白,并将进一步提升轨道交通装备业的自动化制造水平。

参考文献:

- [1] 尹保亮,任科生.机器人自动打磨系统在机车大型构件的应用[J].工业设计,2017(5):155,17.
- [2] 丛德成,雷淑贵.城轨车辆构架梁体焊缝自动打磨技术的可行性分析[J].技术与市场,2016(7):5-8.