DOI：10.3901/JME.2023.09.012

爬壁机器人焊缝高效修形技术研究*

陈咏华[1] 孙振国[1,2] 张 文[1] 陈 强[1,2]
(1. 清华大学先进成形制造教育部重点实验室 北京 100084；
2. 浙江清华长三角研究院 嘉兴 314006)

摘要：针对大型容器建造过程中焊缝余高打磨效率低、质量不稳定、自动化程度低等问题，首先应用力学原理探讨了加工力大小及方向对爬壁式焊缝修形机器人影响，优化了爬壁机器人焊缝修形刀具姿态等条件。在此基础上进一步通过切削反力及修形效率的建模分析，提出了一种适用于爬壁机器人的焊缝修形“锉铣”新技术，设计并研制了相应的“锉铣”刃具和焊缝修形爬壁机器人系统；实验结果表明，机器人系统能对焊缝余高进行高效切削，且加工质量优于国家和行业标准的相关规定，同时还较传统加工方法显著改善了生产环境。

关键词：爬壁机器人；焊缝修形；力学分析；切削刀具
中图分类号：TP242

Research on High Efficiency Weld Modification Technology for Wall-climbing Robot

CHEN Yonghua[1] SUN Zhenguo[1,2] ZHANG Wen[1] CHEN Qiang[1,2]
(1. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084;
2. Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006)

Abstract：In order to improve the efficiency, quality and automation of weld reinforcement grinding in the process of large vessels manufacturing, the influence of the amplitude and direction of machining force on the wall-climbing robot for weld modification is discussed by using the principle of mechanics, and the conditions such as the posture of the weld cutting tool are optimized. Then, through the modeling and analysis of cutting reaction force and modification efficiency, a novel "filing-milling" weld modification technology suitable for wall-climbing robot is proposed, and the corresponding "milling-filing" cutting tools and the wall-climbing robot system are designed and developed. The experimental results show that the robot system can cut the weld reinforcement efficiently, and the machining quality is better than the relevant provisions of national and industrial standards. Moreover, the production environment has been significantly improved compared with the traditional methods.

Key words：wall-climbing robot；weld modification；mechanical analysis；cutting tool

0 前言

为了提高疲劳寿命、延长服役年限，石化容器在设计和制造过程中要求去除焊缝余高[1-8]。目前，大型容器的焊缝修形作业大多采用人工手持角磨机或砂轮机进行打磨，近年来也有一些专用机械的使用[9-11]。

角磨机打磨力较小，但效率低，例如兰石重型装备股份有限公司筒节人工角磨机打磨实测焊缝去除(速)率约为 16 mm^3/s，而且角磨片损耗迅速，打磨过程中需频繁更换角磨片，无法满足机器人高效连续作业的要求。手持砂轮机磨削力较小、重量轻，但材料去除效率很低，与角磨机效率接近。高速砂带磨削加工效率较高，例如一重集团大连核电石化有限公司加氢反应器砂带打磨焊缝去除(速)率约为

* 苏州-清华创新引领行动专项资助项目(2016SZ0218)。20220613 收到初稿，20221024 收到修改稿

94 mm^3/s，但机器自重、体积较大，一般固定于地面，被加工件须在辅助机械帮助下旋转，无法搭载于爬壁机器人上在大型容器表面开展作业[12-13]。工程上适用于钢结构件长直焊缝修形的焊缝铣削专用机械，多采用通用平面铣刀对焊缝进行切削，效率较高，而且机身尺寸、重量较小，但切削力较大且为三向切削力，为了保证其切削稳定性，通常配合专用导轨使用[14]。

采用爬壁机器人替代人工，对大型压力容器焊缝余高进行自动高效切削修形，可以显著改善工人劳动环境、降低劳动强度，提高大型容器制造行业的装备水平、降低制造成本。

如图 1 所示，焊缝修形爬壁机器人由运动平台及搭载在平台上的修形工具以及相关的驱动控制部分组成。为实现全位置的运动和加工，机器人被吸附于工件表面以克服空间重力以及焊缝修形时的加工反作用力。显然，在有限的机器人自重和体积、吸附力及驱动功率等约束下，尽可能减小加工反作用力就成为降低吸附力(同时降低了吸附装置的自重和体积)，提高修形加工效率(降低驱动和切削功耗)的重要途径。

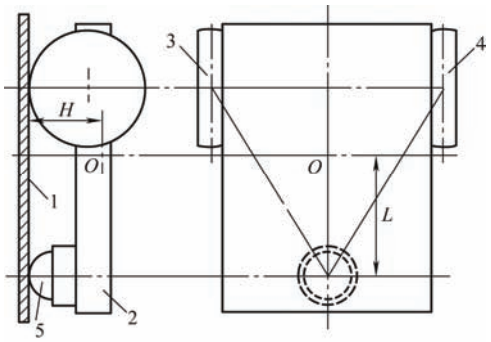


图 1　爬壁机器人结构尺寸示意图

1. 工件壁面　2. 运动平台　3. 左驱动轮

4. 右驱动轮　5. 滚动轴承随动球形轮

论文在解析爬壁机器人焊缝修形过程中加工反力与吸附力及驱动功率关系的基础上，提出了修形工具姿态与焊缝走向之间关系的优化；通过对常规金属材料切削刀刃受力分析基础上，比较总结了现行焊缝修形方法的加工特点，提出了一种适用于爬壁机器人特殊作业要求的“锉铣”技术，设计并研制了相应的“锉铣”刃具和爬壁机器人系统，经实验验证了所提方法的有效性。

1　爬壁机器人力学分析

如图 1 所示，运动平台各轮上的吸附装置将机器人吸附于工件壁面；左右两个侧轮(轮 2、轮 3)实现差速驱动，随动球形轮(轮 1)起支撑作用。三个车轮与壁面接触点形成等边三角形，机器人重心 o 在三角形的投影与三角形中心重合，与随动轮与壁面接触点距离为 L，重心到工作壁面的垂直距离为 H。

图 2 中，由世界坐标系 $o_w x_w y_w z_w$ 绕 x_w 轴逆时针转 $\beta\in[-\pi/2,\pi/2]$ 角度生成工作壁面上的参考坐标系 $o_R x_R y_R z_R$；再绕 z_R 轴逆时针转动 $\theta[-\pi,\pi]$ 角度生成运动坐标 $oxyz$ 。

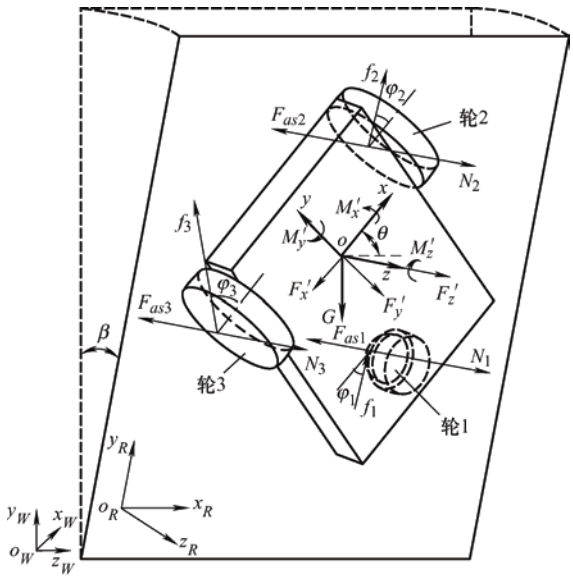


图 2　机器人全位置作业静力学分析等效模型

记 G 为作用在 o 处的机器人总重(包括自重、作业装置以及其他相关载重)；$F_{asj}\ (j=1,2,3)$ 分别为三只车轮吸附装置产生的对工件壁面的吸附力；F'_x、F'_y、F'_z 为机器人所受加工反力；M'_x、M'_y、M'_z 分别是各加工反力矩。N_j 为壁面对车轮的正压力；f_j 是车轮与工作壁面间摩擦力，其与 x 轴夹角为 $\varphi_j\in[0,2\pi]$。

由于工件壁面曲率半径相对于爬壁机器人轮间距足够大，因此可将机器人下方的局部区域近似为平面处理。

1.1　爬壁机器人静态平衡时所需吸附力 F_{asj}

以轮 j 为分析对象，约定：$j=3$ 时，$j+1=1$；$j=1$ 时，$j-1=3$。则爬壁机器人静态平衡方程为

$$\sum F_x=0:\sum_{i=j-1}^{j+1} f_i\cos\varphi_i-G\cos\beta\sin\theta-F'_x=0 \quad (1)$$

$$\sum F_y=0:\sum_{i=j-1}^{j+1} f_i\sin\varphi_i-G\cos\beta\cos\theta-F'_y=0 \quad (2)$$

$$\sum M_z=0:\sum_{i=j-1}^{j+1} f_i\cos\left[\varphi_i+\frac{2(i-1)\pi}{3}\right]-\frac{M'_z}{L}=0 \quad (3)$$

$$N_j = F_{asj} - \frac{G\sin\beta + F_z'}{3} - \frac{2H}{3L}G\cos\beta\cos\left[\theta - \frac{2(j-1)\pi}{3}\right] - \frac{2}{3L}\left[\begin{array}{l}\left(HF_x' + M_y'\right)\sin\dfrac{2(j-1)\pi}{3} \\ +\left(HF_y' - M_x'\right)\cos\dfrac{2(j-1)\pi}{3}\end{array}\right] \tag{4}$$

设 μ_j 为各轮摩擦因数，以 $\mu_j N_j - f_j \geqslant 0$ 为爬壁机器人在工件壁面的静态稳定性判据；通过极值运算(如拉格朗日函数法)可得各车轮的吸附装置应提供的吸附力

$$F_{asj} \geqslant G\sqrt{\left(\frac{2H}{3L}+\frac{1}{\mu_j}\right)^2+\frac{1}{9}} + \frac{F_z'}{3} + \frac{|M_z'|}{\sqrt{3}\mu_j L} + \sqrt{\left(F_x'\right)^2+\left(F_y'\right)^2}\left\{\frac{1}{\mu_j}+\frac{2H}{3L}\cos\left[\arctan\frac{F_x'}{F_y'}-\frac{2(j-1)\pi}{3}\right]\right\} + \frac{2}{3L}\left[M_y'\sin\frac{2(j-1)\pi}{3}+M_x'\cos\frac{2(j-1)\pi}{3}\right] \tag{5}$$

1.2 爬壁机器人壁面运动所需驱动功耗

考虑机器人在工件壁面的平移和转动速度较低，可近似为等速运动。轮 2、轮 3 在平行于 y 轴方向上有相对于壁面的速度 v_2 、 v_3，两轮速度差 $\Delta v = v_2 - v_3$；根据差动性质得到机器人质心加速度

$$a_x = \frac{\Delta v\left(2v_2 - \Delta v\right)}{2\sqrt{3}L} \quad a_y = \frac{\Delta_v^2}{6L} \tag{6}$$

记机器人质量为 m， g 为重力加速度，驱动轮最大线速度为 $v_{\max}$，则机器人单轮需提供的最大驱动功耗

$$\max\left\{P_D\right\} = v_{\max}\left(\frac{G}{\sqrt{3}}+\frac{F_x'}{2\sqrt{3}}+\frac{F_y'}{2}+\frac{M_z'}{\sqrt{3}L}+\frac{v^2{}_{\max}G}{3gL}\right) \tag{7}$$

1.3 相对于焊缝的刀具姿态及切削方向的择优

无论是 F_{asj} 或 P_D 都与机器人的重量、体积成正比，为此工程上需要尽可能降低上述各量，以提高机器人系统的灵活性和加工效率。

设机器人沿图 2 所示 y 轴正方向对焊缝进行修形加工，自式(5)与(7)可以看出以下几点。

(1) M_z' 的减小利于 F_{asj} 和 P_D 的降低；为此宜采用 M_z'=0 的滚式切削加工方式，而传统的角磨或盘铣都会产生较大的 M_z'。

(2) M_y' 对支撑轮的吸附力无作用，对两个驱动轮的吸附力影响相反；为此滚刀轴应与焊缝垂直可使 M_y'=0。图 2 所示方向的 M_x' 增加导致支撑轮的吸附力减小，而两个驱动轮的吸附力则加大，需统筹优化。

(3) F_x' 的增加导致 F_{asj} 变大； F_y' 的减小利于 F_{asj} 的降低，但当 F_y' 与驱动轮速度方向一致时反而有降低 P_D 的作用；因而可用顺切方式进行加工，使得 F_x'=0 且 F_y' 沿 y 轴正向。

(4) 法向反力 F_z' 总是导致 F_{asj} 变大，应尽量降低。

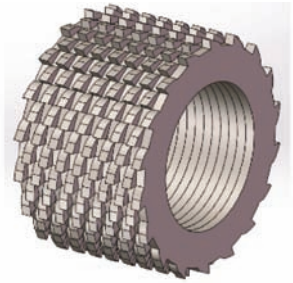
2 爬壁机器人焊缝修形“锉铣”技术

普通磨削具有单个磨粒切削量小、切削力小的优点，但又因切削厚度甚小导致加工效率低下；铣削工效虽高却伴随较大的切削反力。

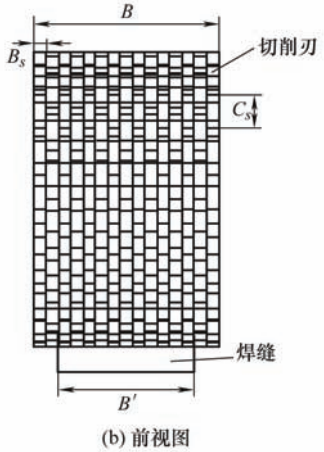
针对爬壁机器人焊缝修形的特殊要求，除了上述以切削刃具姿态和切削方向的优化来控制加工反力分布之外，本文提出一种刀具结构参数及切削工艺参数介于铣削和磨削之间的，适用于爬壁机器人焊缝修形的特殊“锉铣”技术。主要通过对刀刃几何参数及排布规则以及切削和进给速度进行优选；相对磨削能可增加切削速率，相对铣削可大幅减小切削反力，很好地提高了爬壁机器人焊缝修形效率。

2.1 滚动切削刀具受力模型

滚动切削刀具如图 3 所示，为出屑采用错刃排列；即相邻各刃在排列间均有一个刃的空位。



(a) 实体图



(b) 前视图

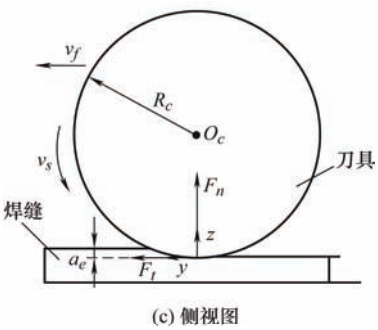


图 3　错刃滚动切削刀具示意

图 3 与图 4 中 O_c 为刀具圆心；v_f 为刀具沿焊缝的切向进给速度，v_s 为刀具周向切削线速度；a_e 为法向切削切深度；C_s 是周向两相邻刀刃间弧距，B_s 是刀刃轴向宽度；B 为刀具宽度，焊缝宽度 $B'\leqslant B$，且两者的中心线重合。F_t 为刀具所受沿壁面法向切削反力，F_n 为沿壁面法向切削反力；因图 2 中机器人的加工反力仅为切削反力，则 $F_t=F_y'$、$F_n=F_z''$，M_y' 即两力对 O_c 的合力矩。

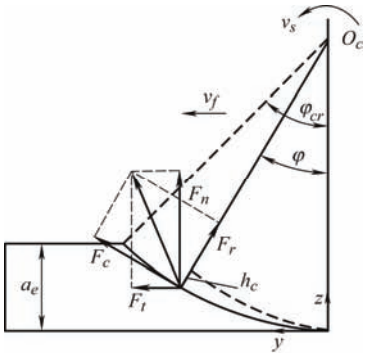


图 4　切削刃受力示意图

如图 4，刀具对焊缝的加工面弧长 $\varphi_{cr}R_c$，$\cos\varphi_{cr}=\left(R_c-a_e\right)/R_c$，宽为 B'；则与加工面接触的刀刃数共有

$$m=\frac{\varphi_{cr}R_cB'}{C_sB_s} \tag{8}$$

用 O_c 到切削刃的连线与 O_c 到工件表面法线间夹角 $0\leqslant\varphi\leqslant\varphi_{cr}$ 表示某切削刃瞬时变齿位角。

每齿进给量为

$$f_z=\frac{C_sv_f}{v_s} \tag{9}$$

该切削刃的瞬时未变形切屑厚度

$$h_c\approx f_z\sin\varphi=\frac{C_sv_f}{v_s}\sin\varphi \tag{10}$$

记 K_c 和 K_r 为刀具沿圆周切向和沿刀具径向的比切削力，K_{cf} 和 K_{rf} 分别表示切削刃周切向和径向的刃口摩擦系数[15]；于是一个切削刃瞬时所受的刀具周向削力 f_c 和径向切削力 f_r

$$\begin{pmatrix}f_c\\f_r\end{pmatrix}=B_s\begin{pmatrix}K_c&K_{cf}\\K_r&K_{rf}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}h_c\\1\end{pmatrix} \tag{11}$$

其所受沿焊缝切向力 f_t 和法向力 f_n

$$\begin{pmatrix}f_t\\f_n\end{pmatrix}=K_\varphi\begin{pmatrix}f_c\\f_r\end{pmatrix};\ K_\varphi=\begin{pmatrix}\cos\varphi&-\sin\varphi\\\sin\varphi&\cos\varphi\end{pmatrix} \tag{12}$$

当切削条件一定时，K_r 与 K_c 之比约为一正常数，且 K_c 与材料尺寸效应相关[16-17]，并有

$$\lambda_{rc}=\frac{K_r}{K_c};\ K_c=\frac{K_t}{h_c^p} \tag{13}$$

K_t、p 在刀具和工件材料一定时为常系数和指数，对于钢铁类材料，p 的取值范围为：$0<p<0.5$。(13)代入(12)整理后得

$$\begin{pmatrix}f_t\\f_n\end{pmatrix}=B_sK_\varphi\left\{K_t\left(\frac{C_sv_f}{v_s}\sin\varphi\right)^{1-p}\begin{bmatrix}1\\\lambda_{rc}\end{bmatrix}+\begin{pmatrix}K_{cf}\\K_{rf}\end{pmatrix}\right\} \tag{14}$$

2.2　刀具加工反力及修形效率分析

因刀具上刀刃离散错位排列，同一时刻加工弧面上的各刀刃受力不同，于是刀具的受力会随时间与空间呈周期性波动；当刀刃尺寸足够小且数量足够多时，即刀具受力波动的频率足够高且振幅足够小，则其受力的瞬时值与平均值就基本相当了。以下的分析基于刀刃已经满足上述条件。

(1) 一个刀刃在加工弧面上的平均受力

$$\begin{pmatrix}f_{ta}\\f_{na}\end{pmatrix}=\frac{B_s}{\varphi_{cr}}\int_0^{\varphi_{cr}}K_\varphi\left\{K_t\left(\frac{C_sv_f}{v_s}\sin\varphi\right)^{1-p}\begin{bmatrix}1\\\lambda_{rc}\end{bmatrix}+\begin{pmatrix}K_{cf}\\K_{rf}\end{pmatrix}\right\}\mathrm{d}\varphi \tag{15}$$

整个刀具受力为弧面上所有刀刃的平均受力之和，式(8)代入式(15)就有

$$\begin{pmatrix}F_y'\\F_z'\end{pmatrix}=\frac{R_cB'}{C_s}\int_0^{\varphi_{cr}}K_\varphi\left\{K_t\left(\frac{C_sv_f}{v_s}\sin\varphi\right)^{1-p}\begin{bmatrix}1\\\lambda_{rc}\end{bmatrix}+\begin{pmatrix}K_{cf}\\K_{rf}\end{pmatrix}\right\}\mathrm{d}\varphi \tag{16}$$

由此可知，较高的切削转速 v_s，有利切向和法向切削反力的减小。另外，在一定程度上提高切削速度可以提高切削区温度，对材料起到热软化作用，从而降低切削反力；但 v_s 过高则容易导致工件烧伤并加剧刀具磨损，故须综合选择。

(2) 刀刃平均未变形切削厚度

$$h_{ca}=\frac{1}{\varphi_{cr}}\int_0^{\varphi_{cr}}h_c\mathrm{d}\varphi=\frac{C_sa_ev_f}{v_sR_c\varphi_{cr}} \tag{17}$$

当单位宽度材料去除(速)率 $S=v_f a_e$ 一定时，h_{ca} 正比于 C_s 而反比于 v_s。

根据尺寸效应知：在 h_{ca} 较大时，降低 h_{ca} 会降低 K_c，但在 h_{ca} 很小时，降低 h_{ca} 反而会增加 K_c。因此采用介于砂轮铣刀之间的切削刀刃尺度 C_s (B_s)以及切削速度 v_s，可有效削弱材料尺寸效应影响，从而降低总的切削反力。

(3) 采用合适的切削刃面刃形状，可减小切削摩擦系数 K_{cf} 和 K_{rf}，以利于降低总的切削反力。

(4) 刀刃平均切削功耗

$$p_{ca}=\frac{v_s}{\varphi_{cr}}\int_0^{\varphi_{cr}} f_c \mathrm{d}\varphi$$

则刀具平均切削功耗

$$P_{ca}=mp_{ca}=\frac{v_s R_c B'}{C_s}\int_0^{\varphi_{cr}}\left[K_C\left(\frac{C_s v_f}{v_s}\sin\varphi\right)^{1-p}+K_{cf}\right]\mathrm{d}\varphi \tag{18}$$

修形效率

$$\frac{Q_C}{P_{ca}}=\frac{B'S}{P_{ca}}=\frac{C_s v_f a_e}{v_s R_c\int_0^{\varphi_{cr}}\left[K_t\left(\frac{C_s v_f}{v_s}\sin\varphi\right)^{1-p}+K_{cf}\right]\mathrm{d}\varphi} \tag{19}$$

当 $S=v_f a_e$ 不变时，适当加大 v_f，同时减小 a_e 有利于修形效率的提高。

3 “锉铣”技术实验效果

图 5 所示的装配了刀芯的硬质合金“锉铣刀”为依据以上分析结果(介于砂轮铣刀之间的切削刀刃尺度)所设计并制作，采用了表 1 所列的三面刃结构参数，并用表 1 的工艺参数对锉铣方法的加工效果进行实验验证。



图 5 锉铣刀具

实验对 Q345R 钢的焊缝进行无冷却的连续修形；在焊缝余高去除率为 140 mm^3/s 时，切削功耗约为 500 W；平均法向切削力约为 48 N、平均切向切削力约为 45 N；平均修形效率达到了 28 mm^3 / 100W·s。相较于课题组前期研究所使用的由单片刀体叠加制作的焊缝加工刀具[18]，本文所研制的“锉铣刀”采用了硬质合金整体制造，能够承受更大切削力作用，切削刃尺度更小，切削线速度更高，更易实现小切削力的高效加工，刀具直径大幅降低，也更便于爬壁机器人搭载使用。

表 1 锉铣刀具结构参数及工艺参数

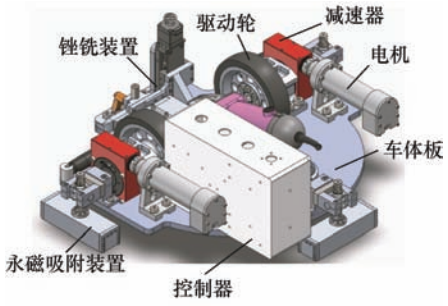
锉铣刀结构参数	R_c=40 mm，B=25 mm，B_s=2.5 mm，C_s= 8.37 mm，Z_c=30，Z_a=10，k_r=90 °，γ_0=7 °，λ_s=0 °，α_0=16 °	
工艺参数	线速度 v_s/(m/s)	8.4
	进给速度 v_f/(mm/s)	2.5～35
	切削深度 a_e/mm	0.2
	切削宽度 B'/mm	20

注：Z_c 为周向刃数；Z_a 为轴向刃数；k_r 为主偏角；γ_0 为前角；λ_s 为刃倾角；α_0 为主后角。

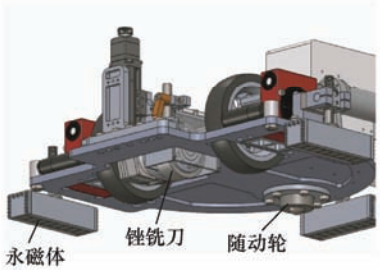
4 焊缝修形爬壁机器人研制

4.1 爬壁机器人结构

如图 6 所示，爬壁机器人主要由运动平台、间隙可调式永磁吸附装置、焊缝锉铣装置和控制器等组成。



(a) 爬壁机器人模型(上部)



(b) 爬壁机器人模型(底部)

图 6 爬壁机器人样机模型

永磁吸附装置产生的磁场通过空气间隙及工件提供吸附力保证爬壁机器人可靠吸附于工件壁面。

电机经过蜗轮蜗杆减速器减速并放大扭矩后驱

动左右两轮；蜗轮蜗杆减速器的自锁功能有效防止爬壁机器人掉电滑落；在工件壁面摩擦力作用下，两驱动轮的差速实现爬壁机器人运动轨迹和速度的控制。

与此同时，搭载于爬壁机器人之上的锉铣装置对容器壁面焊接后形成的焊缝余高进行铣削修形。

机器外形尺寸为 460 mm×420 mm×230 mm；总重 G=160 N；支撑轮吸附力 F_{as1}=560 N，驱动轮吸附力 F_{as2}=F_{as3}=820 N；单轮驱动电机额定功率为 26 W；切削电机额定功率为 900 W。

4.2　爬壁机器人焊缝修形实验

爬壁机器人修形实验在直径 2 300 mm 的筒形工件壁面上进行，如图 7 所示。焊接试样母材为 Q345R 钢，采用 CO_2 气保焊焊接而成的焊缝宽度 20 mm，余高 4 mm，芯部硬度 HB 105。

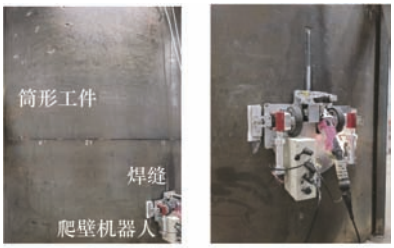


图 7　爬壁机器人焊缝修形实验

爬壁机器人在工件壁面进行焊缝修形的工作区域状态如图 8 所示，修形加工后的焊缝表面如图 9 所示。

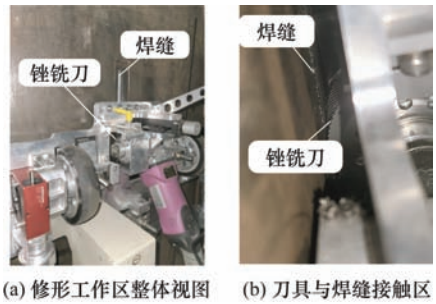


图 8　爬壁机器人焊缝修形工作区域

机器人修形实验结果：在实验工件的所有空间位置都能顺利实现表 1 中的工艺参数，机器人焊缝修形效率约为人工打磨效率的 8 倍，为大功率砂带打磨机打磨效率的1.5 倍。修形后的焊缝表面粗糙度 Ra=3.2，优于国/行标准中粗糙度 Ra=12.5[19]；表面不平度±0.1/300 mm，优于国/行标准中寸精度±0.2 mm/(120～300 mm)(精密 f 级)的规定[20-21]。焊缝修形过程中所产生的切屑为层片状，无粉尘产生，与传统的人工打磨或机器砂带打磨相比，极大地改善了生产环境。



图 9　焊缝修形后表面状态

5　结论

(1) 采用滚动切削的刀具姿态和顺切工艺，可使机器人受到的切削反力呈二维平面状态($F_x'=M_y'=M_z'=0$)有利于降低机器人所需吸附力及驱动功率，从而减小机器人重力和体积，提高系统的灵活性和加工效率。

(2) 介于磨削工艺和铣削工艺之间的“锉铣”方法可有效削弱材料尺寸效应影响，从而降低总的切削反力(F_y'、F_z'、M_x')，增加材料去除率 Q_c。

(3) 优化的进给速度 v_f 和切削深度 a_e 能够获得较佳的修形效率 $B'Q_c/P_{ca}$。

(4) 据上所研制的爬壁式焊缝修形机器人在模拟实际工况条件下的实验表明：其加工效率远高于通行的人工打磨和机器砂带打磨；加工后的工件表面质量优于国家和行业标准的相关规定。

参　考　文　献

[1] 陈学东，范志超，崔军，等. 极端条件重大承压设备的设计、制造与维护[J]. 机械工程学报，2013，49(22)：66-75.
CHEN Xuedong，FAN Zhichao，CUI Jun，et al. Risk based design，manufacture and maintenance of extreme pressure equipmentl[J]. Journal of Mechanical Engineering，2013，49(22)：66-75.

[2] 秦叔经. 压力容器中焊接接头的疲劳分析方法[J]. 化工设备与管道，2019，56(6)：1-10.
QIN Shujing. Fatigue analysis methods for welds in pressure vessel[J]. Process Equipment & Piping，2019，56(6)：1-10.

[3] 高少平，韩超，秦国民. 焊缝余高对压力容器的影响及对策[J]. 炼油与化工，2020，31(3)：50-51.
GAO Shaoping，HAN Chao，QIN Guomin. Impact of

weld reinforcement on pressure vessel and countermeasures[J]. Refining and Chemical Industry，2020，31(3)：50-51.

[4] 李涛. 基于失效模式的超高压容器设计关键技术研究[D]. 杭州：浙江大学，2017.
LI Tao. Research on some key issues in the design of ultra-high pressure vessels based on failure modes[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2017.

[5] TANEGASHIMA R，OHARA I，AKEBONO H，et al. Cumulative fatigue damage evaluations on spot-welded joints using 590 MPa-class automobile steel[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures，2015，38(7)：870-879.

[6] MEI J，DONG P. An equivalent stress parameter for mufti-axial fatigue evaluation of welded components including non-proportional loading effects[J]. International Journal of Fatigue，2017(1)：297-311.

[7] 中华人民共和国国家发展和改革委员会，全国锅炉压力容器标准化技术委员会. JB/T 4732-2005 钢制压力容器-分析设计标准[S]. 北京：机械工业出版社，2005.
National Development and Reform Commission of the People’s Republic of China，China Standardization Committee on Boilers and Pressure Vessels. JB/T 4732-2005 Steel pressure vessels—design by analysis[S]. Beijing：China Machine Press，2005.

[8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. TSG 21-2016 固定式压力容器安全技术监察规程[S]. 北京：新华出版社，2016.
General Administration of Quality Supervision，Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China. TSG 21-2016 supervision regulation on safety technology for stationary pressure vessels[S]. Beijing：Xinhua Publishing House，2016.

[9] 郑博涛. 基于 Robotics Toolbox 的打磨轨迹拟合与仿真研究[J]. 机械工程师，2021(8)：132-134.
ZHENG Botao. Research on grinding trajectory fitting and simulation based on robotics toolbox[J]. Mechanical Engineer，2021(8)：132-134.

[10] 刘帅. 焊缝缺陷自动打磨控制系统设计与轨迹规划策略研究[D]. 天津：天津理工大学，2021.
LIU Shuai. Research on the design of automatic polishing control system for weld defects and trajectory planning strategy[D]. Tianjin：Tianjin University of Technology，2021.

[11] GAO Shang，HUANG Han，ZHU Xianglong，et al. Surface integrity and removal mechanism of silicon wafers in chemo-mechanical grinding using a newly developed soft abrasive grinding wheel[J]. Materials Science in Semiconductor Processing，2017，63：97-106.

[12] 黄云. 砂带磨削技术的研究现状和发展方向简介[J]. 金刚石与磨料磨具工程，2020，40(3)：1-4.
HUANG Yun. Brief introduction of research status and development direction of belt grinding technology[J]. Diamond & Abrasives Engineering，2020，40(3)：1-4.

[13] 王光祖，崔仲鸣，冯常财. 金刚石砂带的工程应用[J]. 超硬材料工程，2021，33(2)：35-38.
WANG Guangzu，CUI Zhongming，FENG Changcai. Engineering application of diamond abrasive belts[J]. Superhard Material Engineering，2021，33(2)：35-38.

[14] 于跃. 长直焊缝铣削机器人设计与研究[D]. 长春：吉林大学，2016.
YU Yue. Design and research of a robot for milling long and straight weld seam[D]. Changchun：Jilin University，2016.

[15] 何宁. 高速切削技术[M]. 第 1 版. 上海：上海科学技术出版社，2012.
HE Ning. High speed cutting technology[M]. 1st ed. Shanghai：Shanghai Science & Technical Publishers，2012

[16] TOSENSHOFF H K，DENKENA B. Basics of cutting and abrasive processes[M]. Berlin：Springer，2013.

[17] 杨毅青，张斌，刘强. 铣削建模中多种切削力模型的分析比较[J]. 振动工程学报，2015，28(1)：82-90.
YANG Yiqing，ZHANG Bin，LIU Qiang. Analysis and comparison of various cutting force models in the milling process simulation[J]. Journal of Vibration Engineering，2015，28(1)：82-90.

[18] 崔宗伟，孙振国，张文增，等. 爬壁机器人高效焊缝修形方法[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2014，54(9)：1127-1130.
CUI Zongwei，SUN Zhenguo，ZHANG Wenzeng，et al. Efficient weld bead shaping method for a wall-climbing robot[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology)，2014，54(9)：1127-1130.

[19] 国家能源局. NB/T 47013-2015 承压设备无损检测[S]. 北京：新华出版社，2015.
National Energy Administration of the People’s Republic of China. NB/T 47013-2015 Nondestructive testing of pressure equipment[S]. Beijing：Xinhua Publishing House，2015.

[20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. GB 150-2011 压力容器[S]. 北京：中国标准出版社，2012.

General Administration of Quality Supervision，Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China， Standardization Administration of the People’s Republic of China. GB150-2011 pressure vessels[S]. Beijing：Standards Press of China，2012.

[21] 中华人民共和国国家质量技术监督局. GB/T 1804-2000 一般公差 未注公差的线性和角度尺寸的公差[S]. 北京：中国标准出版社，2000.
General Administration of Quality Supervision，Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China. GB/T 1804-2000 General tolerances Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications[S]. Beijing： Standards Press of China，2000.

作者简介：陈咏华，男，1977 年出生，博士研究生。主要从事焊接特种机器人研究。
E-mail：chen-yh15@mails.tsinghua.edu.cn
陈强(通信作者)，男，1956 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为机器人技术及工程应用，焊接自动化及智能化等。
E-mail：chenq@tsinghua.edu.cn