

# 高铬合金明弧堆焊工艺参数对堆焊层显微组织及硬度的影响

张晓华<sup>1</sup>, 谭小波<sup>1</sup>, 左治建<sup>1</sup>, 洪敏<sup>2</sup>

(1. 中国航发航空科技股份有限公司, 四川 成都 610503; 2. 南昌航空大学 轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330100)

**摘要:**为满足单辊破碎机篦板的使用要求,对篦板进行堆焊处理。在不同参数下对高铬合金明弧堆焊进行了试验研究,分析了堆焊过程中不同工艺参数对堆焊层的影响。结果表明,焊接速度、压道比率、焊接曲率半径对堆焊层的形貌、内部组织、力学性能存在不同程度的影响。随着焊接速度的提高,显微硬度有所提高。随着压道比率的增大,堆焊层成型更加美观。随着曲率半径的增加,堆焊层表面更平整,裂纹明显减少。热输入较小时显微组织细小均匀分布,热输入加大会出现尺寸较大的板条状碳化物,但随着热输入的进一步增加,板条状碳化物数量减小。当焊接速度为475 mm/min、曲率半径为20 mm、压道比率为50%时堆焊层宏观形貌最好。

**关键词:**高铬堆焊;工艺参数;显微组织;力学性能

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.20192451

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2021)7-0052-05

## Effect of Process Parameters on Microstructure and Hardness of Surfacing Layer Cladded by High Chromium Alloy Open Arc Surfacing

ZHANG Xiaohua<sup>1</sup>, TAN Xiaobo<sup>1</sup>, ZUO Zhijian<sup>1</sup>, HONG Min<sup>2</sup>

(1. AECC Aero Science and Technology Co., Ltd., Chengdu 610503, China; 2. Laboratory of National Defense Key Subject of Light Alloy Processing Science and Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330100, China)

**Abstract:** In order to meet the use requirements of the single-roll crusher plate, the surfacing of the slat plate was carried out. Under different parameters, the experiment study of high-chromium alloy open arc surfacing was carried out, and the influence of different process parameters on the surfacing layer during surfacing process was analyzed. The results show that the welding speed, overlap ratio and welding curvature radius have different effects on the morphology, internal microstructure and mechanical properties of the surfacing layer. With the increase of surfacing speed, the microhardness increases. With the increase of the overlap ratio, the surfacing layer molding is more beautiful. With the increase of curvature radius, the surface of the welding layer is flatter, the amount of cracks reduces. When the thermal input is small, the microstructure is finely distributed, when the heat input increases, larger size slat carbide appears, but with the further increase of the heat input, the number of slat carbide decreases. When the welding speed is 475 mm/min, the curvature radius is 20 mm, the overlap amount is 50%, the macro-appearance of the welding layer is the best.

**Key words:** high chromium surfacing; process parameters; microstructure; mechanical properties

堆焊技术是表面工程技术中一种普遍使用的表面改性技术,具有成本低、操作简易和工艺简便等优点<sup>[1]</sup>。目前国内堆焊技术大多采用特种焊条堆焊,但是随着药芯焊丝技术的不断创新和完善,堆焊技术也逐渐转向采用药芯焊丝的明弧焊来堆焊<sup>[2]</sup>。明弧焊焊接速度快、效率高,且堆焊层具有良好的耐腐蚀

性和热疲劳性,因而被广泛应用于大型机器设备的强化和维修。运用新型的耐磨材料和堆焊技术对篦板易磨损区域进行堆焊<sup>[3-4]</sup>,能够使易磨损区域具有良好的耐磨、抗氧化、耐高温等性能,得以适应恶劣的工作环境,延长篦板的工作寿命<sup>[5-8]</sup>。本文采用高铬明弧焊堆焊的方法在篦板表面堆焊耐磨层,通过改变篦板明弧焊堆焊的焊接参数,分析不同的工艺参数对堆焊层显微组织的影响,为实际生产作业选择工艺时提供选择依据,对高铬明弧堆焊的基础研究和工程应用具有重要意义。

收稿日期:2019-08-18

作者简介:张晓华(1986-),男,江西赣州人,工程师,主要研究方向:熔化焊接工艺;电话:18628169065;

E-mail: zhangshaohua141@126.com

## 1 试验材料及方法

本试验基板选用 Q345 钢板, 规格为 300 mm×200 mm×16 mm, 堆焊材料选用直径为 2.8 mm 的 LQ643 药芯焊丝, 熔敷金属化学成分(质量分数, %) 为 (3.0 ~ 5.0)C, (0.5 ~ 1.5)Mn, (0.5 ~ 1.5)Si, (20.0 ~ 25.0)Cr, 其他合金元素 ≤ 2.0, 余量为 Fe。

表 1 焊接参数  
Tab.1 Welding parameters

试板	电流 /A	电压 /V	焊接速度 /(mm·min <sup>-1</sup> )	干伸长 /mm	压道比率(%)	曲率半径 R/mm
1 <sup>#</sup>	410	37	375	28	50	20
2 <sup>#</sup>	410	37	475	28	50	20
3 <sup>#</sup>	410	37	575	28	50	20
4 <sup>#</sup>	410	37	475	28	10	20
5 <sup>#</sup>	410	37	475	28	30	20
6 <sup>#</sup>	410	37	475	28	50	10
7 <sup>#</sup>	410	37	475	28	50	30
8 <sup>#</sup>	410	37	475	28	50	0

热, 需在空气中冷却后再焊接第二层, 焊后不需要特殊热处理释放应力, 只需在自然环境下冷却即可。焊接轨迹和曲率半径示意图如图 1 所示。

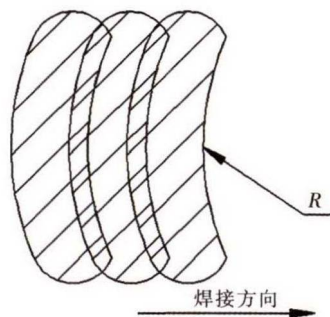


图 1 焊接轨迹和曲率半径示意图  
Fig.1 Schematic of welding trajectory and radius of curvature

垂直于焊缝截取 5 mm×10 mm×10 mm 金相试样, 进行镶嵌、抛光处理, 之后在通风的腐蚀环境下采用 3% 硝酸酒精溶液浸蚀试样表面。采用 Axis

在试验系统中, 采用自动明弧堆焊设备 ARC-UP300M 对试板进行堆焊, 堆焊前打磨试板清除表面的铁锈和油污。用氧乙炔焰吹干残留在表面的水分, 防止产生大气孔, 之后将试板放入指定的区域, 依次调整焊接参数进行堆焊, 焊接参数如表 1 所示。每块试板上堆焊两层, 焊完第一层后为防止过

Scope A1 金相显微镜对堆焊组织和基板进行显微组织观察分析, 得出相关变化规律。硬度试验利用 401MVD 型数显显微硬度计测接头硬度, 测试条件为载荷为 200 N, 加载时间为 5 s, 相邻点间隔 0.5 mm, 通过换算金刚石压头压入材料的深度而得出硬度值。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 工艺参数对宏观形貌的影响

图 2 为焊接电流 410 A、焊接电压 37 V、干伸长 28 mm、压道比率 50%、曲率半径 20 mm 时, 三种不同堆焊速度下的焊缝宏观形貌。由图 2 可知, 随着焊接速度的增加, 焊接热输入降低, 表面有明显下凹, 原因是在焊接电流与送丝速度不变的情况下, 焊接速度增加, 单位长度上熔敷的堆焊金属减少导致的。从图 2 还可以看出, 随着焊接速度的增加, 熔敷金属的量减少, 在焊接后会出现一条垂直于焊缝的裂纹。

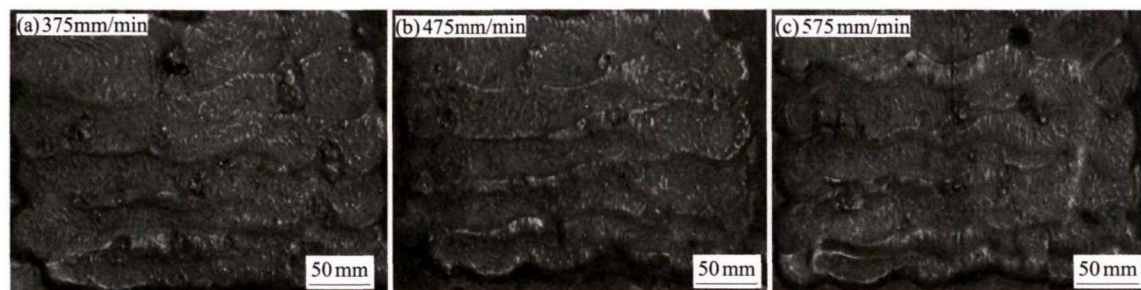


图 2 不同焊接速度下的堆焊层宏观形貌  
Fig.2 Macro-morphology of the surfacing layers under different surfacing speeds

堆焊合金要求的是良好的耐磨性,只要保证堆焊金属与母材的牢固结合,使堆焊合金不与基体金属剥离即可,且这种裂纹为应力释放裂纹,因此堆焊过程中高铬堆焊金属产生垂直于焊缝的裂纹是允许的,可以有效减少堆焊合金断裂脱落的可能性,不影响在低冲击工况条件下的正常使用。

图3为焊接电流410A、焊接电压37V、焊接速度475mm/min、干伸长28mm、曲率半径R20mm

时,不同压道比率下的堆焊层宏观形貌。从图3看出随着压道比率的增加,焊缝成型更加美观,焊缝表面更平整,图3(a)由于压道比率过小,加上焊接机器的精确度的问题,明显出现压道不充分的现象,焊缝成型不良。压道比率为50%时没有裂纹,而压道比率为10%和30%时存在焊接裂纹。这是因为压道比率降低,堆焊熔敷金属量下降,在较高的焊接应力的作用下,表面就会出现垂直于焊缝的裂纹。

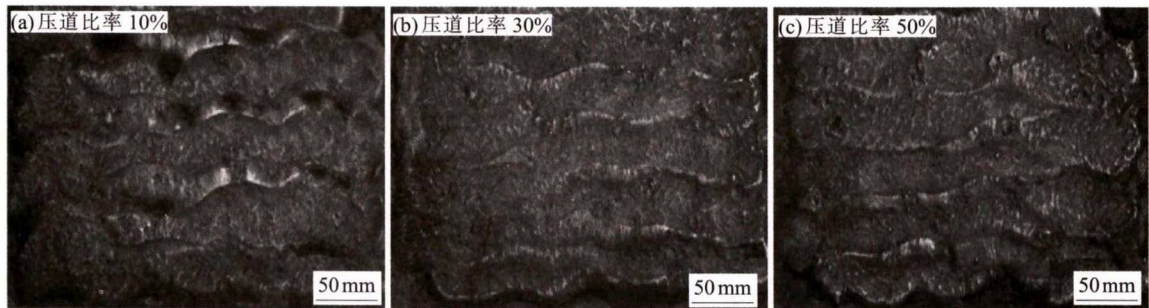


图3 不同压道比率下堆焊层宏观形貌

Fig.3 Macro-morphology of welding layer under different overlap ratios

图4为焊接电流410A、焊接电压37V、焊接速度475mm/min、干伸长28mm、压道比率50%时,不同曲率半径下的堆焊层宏观形貌。从图4可以看出随着曲率半径的增加,焊缝表面更为平整美观。造成这种现象的原因是多道堆焊,第二道焊缝会对第一道焊缝有一定的压道作用,而由于焊接设备精度,在压道时会出现一定程度的偏差,随着曲率半径的增加,这种影响逐渐得到修正,因而焊缝成型更加美观。而且曲率半径大时垂直于焊缝的裂纹较少,直线焊接时焊缝裂纹较多。综上可知,当焊接速度为475mm/min,曲率半径为20mm,压轴比率为50%时,堆焊层宏观形貌最好。

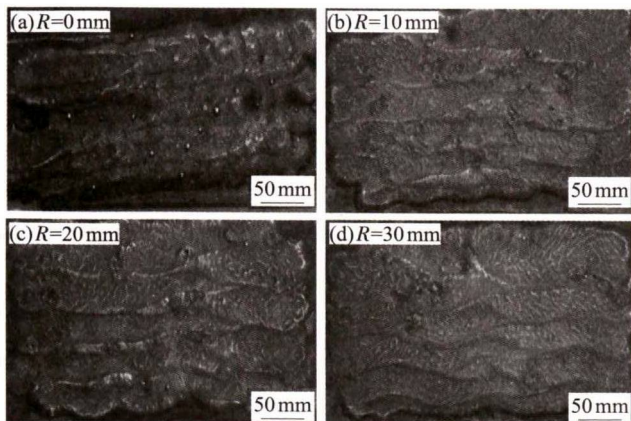


图4 不同曲率半径下的堆焊层宏观形貌

Fig.4 Macro-morphology of the surfacing layer under different curvature radius

## 2.2 双层堆焊显微组织分析

图5为焊接电流410A、焊接电压37V、焊接速度375mm/min、干伸长28mm、压道比率为50%、曲率半径R20mm的显微组织。图5(a)中黑色部分一侧为基板母材,另一侧为堆焊合金层。从图5(a)可以看出堆焊金属与基板结合良好,未见气孔、夹渣和裂纹。堆焊金属含碳量高于基板母材含碳量,因此母材金属对堆焊第一层的稀释作用造成熔合区的碳迁移。由于堆焊焊缝的冷却速度快,加上铬原子半径(0.127nm)比碳原子(0.086nm)大,导致其扩散速度

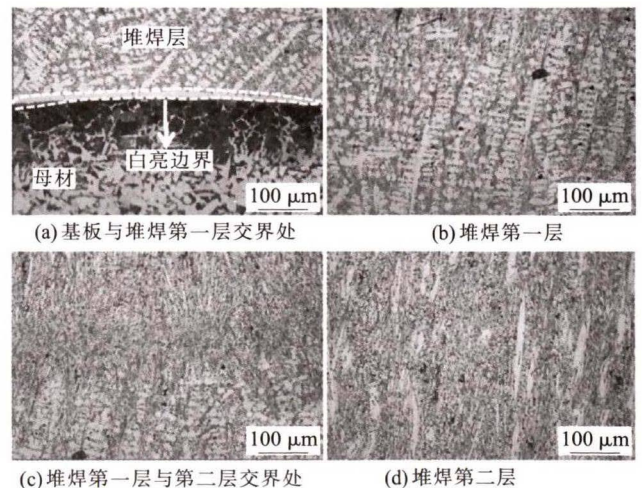


图5 V=375mm/min,压道比率50%、R20mm堆焊显微组织

Fig.5 Surfacing microstructure when V is 375 mm/min, overlap amount is 50% and curvature radius is 20 mm

比碳原子小得多,大量的铬固溶于 $\alpha$ -Fe中,铬元素耐腐蚀性强,在显微镜下呈白色,造成熔合区偏堆焊金属侧存在白亮脱碳层,偏基板金属侧存在黑色增碳层,两者中间为一条白色亮带。

图5(b)为堆焊第一层的显微组织,由于LQ643药芯焊丝中铬元素含量较高,铬作为碳化物形成元素,在合适的铬碳比下,铬可以取代一部分铁形成复合碳化物 $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$ 、 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ 、 $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ ,这些碳化物的硬度非常高,极大地增加了堆焊层的硬度。这些碳化物主要为初生碳化物 $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ ,存在明显的生长取向,由于含铬量较多,耐腐蚀性强,在显微镜下呈白色,灰色部分则是层片状铁素体和少量的富铬 $\alpha$ -Fe,在初生碳化物晶界旁还分布着一些细小的共晶碳化物 $\text{Fe}_3(\text{C,Cr})$ 颗粒,初生碳化物垂直于耐磨表面生长,而共晶碳化物生长方向不一,不能最大限度抵抗磨损,初生碳化物的硬度显著高于共晶碳化物<sup>[9]</sup>。

图5(c)、(d)分别为堆焊第一层与第二层交界处、堆焊第二层的显微组织,堆焊母材对第一层的稀释率大,而堆焊第二层时第一堆焊层变成了第二堆焊层的基材,所以第二层的稀释率小。这造成每一

层的铬元素含量有很大的差异,由基板往堆焊层表面方向铬元素含量逐渐升高,从图可以看出随着铬元素含量的增多,堆焊层晶粒逐渐细化,从胞状逐渐变为针状,到堆焊层第二层时显微组织晶粒尺寸已经很小而且紧密,但相比于堆焊层第一层显微组织出现了较大尺寸的板条状碳化物。

### 2.3 工艺参数对显微组织的影响

当改变焊接参数时,堆焊层的第一层和堆焊层交界处的显微组织没有明显的变化,与图5(b)和图5(c)类似,而筒板的堆焊层第二层的显微组织变化较大,所以可以着重观察筒板堆焊第二层显微组织的变化情况。

图6为焊接电流410A、焊接电压37V、干伸长28mm、压道比率50%、曲率半径20mm时,不同堆焊速度下的第二层堆焊层显微组织。图6(a)中的碳化物形状大小不一,分布较均匀,存在较大的板条状碳化物,图6(b)中的碳化物尺寸梯度较大且分布不均匀,图6(c)中的碳化物组织细小且紧凑。

图7为焊接电流410A、焊接电压37V、焊接速度475mm/min、干伸长28mm、压道比率50%时,不同曲率半径下的第二层堆焊层显微组织。图7(a)中

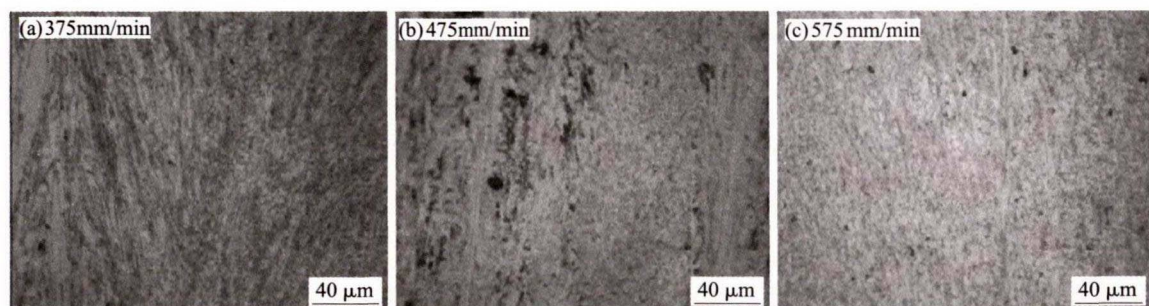


图6 不同堆焊速度下的第二层堆焊层显微组织

Fig.6 Microstructure of the second surfacing layers under different surfacing speeds

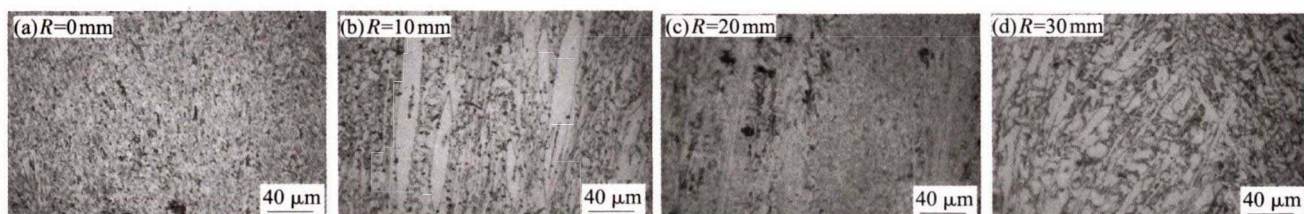


图7 不同曲率半径下的第二层堆焊层显微组织

Fig.7 Microstructure of the second surfacing layers under different curvature radii

的碳化物平均尺寸较大,且存在个别较大的板条状碳化物,组织分布不均匀。图7(b)中的碳化物大小不一,分布不均,且能看见碳化物的纵截面。图7(c)中的碳化物平均尺寸最大、分布较均匀,图7(d)的碳化物组织细小且分布均匀。

图8为焊接电流410A、焊接电压37V、焊接速度475mm/min、干伸长28mm、曲率半径20mm时,不同压道比率下第二层堆焊层的显微组织,图8(a)~(c)压道比率分别为10%、30%、50%。图8(a)中存在少量的板条状碳化物,形状粗大且分布不均,图8

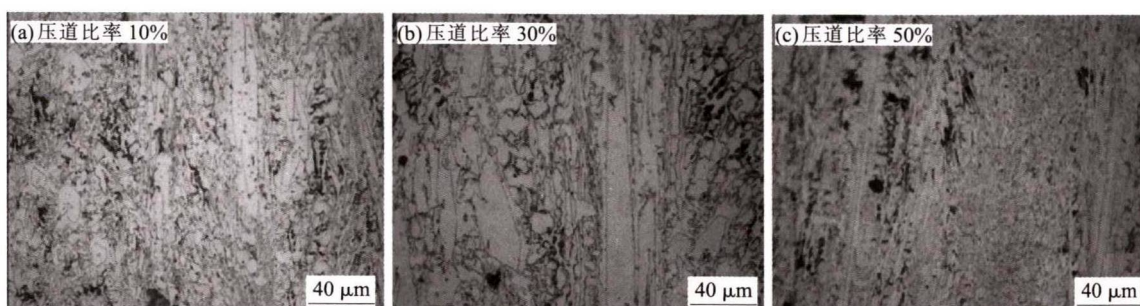


图8 不同压道比率下的第二层堆焊层显微组织

Fig.8 Microstructure of the second surfacing layers under different overlap ratios

(b)中碳化物平均尺寸较大,且呈现板条状和块状,数量较多,图8(c)中碳化物组织尺寸较小,且碳化物纵截面呈纤维杆状,未出现大尺寸的板条状碳化物。

图6中随着焊接速度的提高,碳化物的尺寸减小,且越来越紧密,其主要原因是焊接速度的提高导致焊接热输入逐渐减少,冷却速度较快,试样在高温停留的时间短暂,造成过冷度比较大,晶粒形核后来不及长大凝固便已结束,因此得到均匀且致密的组织。图7中随着曲率半径由10mm向30mm增加,压道更为均匀,碳化物分布也更加均匀。当曲率半径为0时第二道熔覆金属的量最少,散热最快过冷度最大,因而碳化物的尺寸最小且分布最为均匀。图8中随着压道比率的增加,焊接热输入不断增多,造成碳化物形状尺寸逐渐增大,且在某一个方向上生长速度很快,最后形成板条状形态,但随着热输入的持续增加,碳化物在各个方向上的生长速度都很快,因此板条状碳化物数量减少。

#### 2.4 工艺参数对硬度的影响

篦板的磨损机理主要是以磨粒的显微切削造成的磨粒磨损。磨粒只有在外部压力的作用下压入堆焊层表面后才能在堆焊层表面进行犁削运动。而堆焊合金的表面显微硬度值可以反映出堆焊层显微组

织对外界压力的抵抗能力,在一定程度上能够反映出堆焊合金的耐磨性,因此需对堆焊层进行硬度测试。从图9(a)~(c)可以看出显微硬度的总体变化趋势为从基板区域到第一堆焊层区域到第二堆焊层区域,其显微硬度分布呈现出由低到高并达峰值后再在一定范围内波动的变化趋势,基板的硬度只有130HV左右,在堆焊后硬度快速提升至810HV左右。这主要是由于在熔合线附近成分含量变化较大,母材对堆焊第一层稀释作用较强,而堆焊第二层时第一堆焊层已转化为第二堆焊层的基材,而第二堆焊层的成分与基材合金成分差异性较小,在施焊过程中合金成分变化程度较低。

随着焊接速度的提高,焊缝中的初生碳化物组织的尺寸逐渐减小,而晶粒越小,显微组织的硬度也就越高,如图9(a)所示,随着焊接速度的提高,堆焊层的显微硬度有稍微的提高。图9(b)和图9(c)中因为曲率半径和压道比率的不同,有些显微组织的尺寸虽然较大,但是碳化物的种类及含量并不与曲率半径或压道比率的改变成线性关系,且不同的碳化物的硬度也会有所差别,就会造成如图9(b)和图9(c)的硬度随曲率半径和压道比率的不同变化不大的情况。

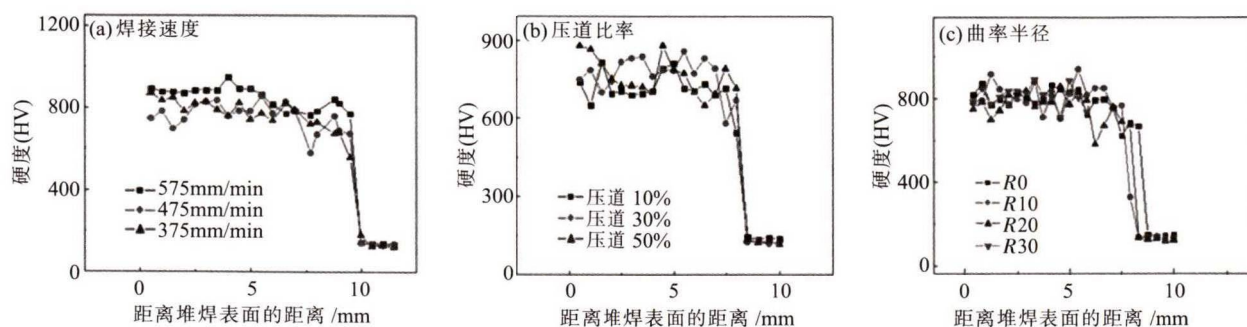


图9 不同堆焊参数对堆焊层硬度的影响

Fig.9 Effect of different surfacing parameters on hardness of surfacing layer

(下转第60页)

面形成鳞片状形貌,接头呈脆性断裂。


### 3 结论

(1) 随着转速升高,铝/镁异种合金 U-SSFSW 接头成形质量先上升后下降。焊核中存在大量铝/镁合金混合后形成的夹层状组织,随着转速的升高,夹层状组织先细化后又出现变厚趋势。

(2) 转速由 800 r/min 提升至 1000 r/min 时,材料的充分流动和界面互锁程度的增加使接头拉伸强度提高;转速进一步提升至 1200 r/min 时,焊核中的孔洞缺陷和粗大的夹层组织导致接头拉伸强度显著下降。接头强度在 1000 r/min 时达到最大值 131MPa。

#### 参考文献:

- [1] 薛鹏,张星星,吴利辉,等. 搅拌摩擦焊接与加工研究进展[J]. 金属学报, 2016, 52(10):1222-1238.
- [2] Mofid M A, Abdollah-Zadeh A, Ghaini F M. The effect of water cooling during dissimilar friction stir welding of Al alloy to Mg alloy[J]. Materials & Design, 2012, 36:161-167.

- [3] Padhy G K, Wu C S, Gao S. Friction stir based welding and processing technologies-processes, parameters, microstructures and applications: A review [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(1):1-38.
- [4] Liu Z, Meng X, Ji S, et al. Improving tensile properties of Al/Mg joint by smashing intermetallic compounds via ultrasonic-assisted stationary shoulder friction stir welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31:552-559.
- [5] Meng X, Jin Y, Ji S, et al. Improving friction stir weldability of Al/Mg alloys via ultrasonically diminishing pin adhesion [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34:1817-1822.
- [6] Ji S, Meng X, Liu Z, et al. Dissimilar friction stir welding of 6061 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy assisted with ultrasonic[J]. Materials Letters, 2017, 201:173-176.
- [7] Liu Z, Ji S, Meng X. Joining of magnesium and aluminum alloys via ultrasonic assisted friction stir welding at low temperature [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97:4127-4136.
- [8] Lv X Q, Wu C S, Padhy G K. Diminishing intermetallic compound layer in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding of aluminum alloy to magnesium alloy [J]. Materials Letters, 2017, 203:81-84. 

(上接第 56 页)

### 3 结论

(1) 采用明弧堆焊后由于焊接应力释放,焊缝表面会出现垂直于焊缝的裂纹,这种裂纹可降低堆焊层脱落的可能性,不影响在低冲击工矿条件下的正常使用;焊接参数对堆焊层形貌存在较大的影响,随着压道比率的增大,堆焊层成型更加美观,随着曲率半径的增加,堆焊层表面更平整,裂纹明显减少,当焊接速度为 475 mm/min、曲率半径为 20 mm、压道比率为 50%堆焊层宏观形貌最好。

(2) 随着焊接参数的改变,焊接的热输入大小不一,导致焊缝的显微组织也发生着变化。在小的热输入情况下显微组织细小,分布均匀,随着热输入的提高会出现尺寸较大的板条状碳化物,但随着热输入的进一步增加,尺寸较大的板条状碳化物数量减少。

(3) 采用高铬合金明弧堆焊后硬度有很大的提高。随着焊接参数的变化,堆焊层的显微硬度也有所变化,焊接速度对堆焊层显微硬度影响较大,随着焊接速度的提高,显微硬度提高,而改变曲率半径和压道比率对显微硬度没有太大的影响。

#### 参考文献:

- [1] Bararpour S M, Aval H J, Jamaati R. Mechanical alloying by friction surfacing process[J]. Materials Letters, 2019, 254.
- [2] 唐天顺,龚建勋,肖逸锋,等. SiC 对自保护明弧高铬堆焊合金性能的影响[J]. 材料工程, 2011(10):61-65.
- [3] 时晓明. 明弧焊在连铸辊堆焊修复中的应用[D]. 上海:上海交通大学, 2011.
- [4] Cheng F T, Lo K H, Man H C. NiTi cladding on stainless steel by TIG surfacing process; Part I. Cavitation erosion behavior [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 172(2):308-315.
- [5] 王淑峰,谷明霞,白咸峰,等. 高铬铁基药芯焊丝不同堆焊工艺下的显微组织与性能研究 [J]. 材料导报, 2015, 29(12):110-113.
- [6] 龚建勋,肖逸锋. 高铬明弧堆焊合金的显微组织及耐磨性[J]. 焊接学报, 2012, 33(11):43-46.
- [7] 孟令东,谭俊,臧艳,等. 镍基合金断弧脉冲氩弧焊堆焊层组织及腐蚀磨损性能[J]. 中国表面工程, 2017, 30(2):143-150.
- [8] Frei J, Boian T Alexandrov, Rethmeier M. Low heat input gas metal arc welding for dissimilar metal weld overlays part III: hydrogen-assisted cracking susceptibility [J]. Welding in the World, 2019, 63(3):591-598.
- [9] 杨威. 超高碳高铬耐磨堆焊合金微观组织研究[D]. 北京:机械科学研究总院, 2007. 