doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2016.06.016

轴向压力对X65合金钢摩擦堆焊层组织和磨损性能的影响*

张 旭,杨新岐,崔 雷,杜 波

(天津大学 材料科学与工程学院 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072)

摘 要:为拓宽摩擦堆焊的工程化应用,以X65钢作为耗材和基板材料进行了摩擦堆焊工艺试验研究,在选定最优焊 速的基础上,主要讨论了轴向压力与堆焊层组织、显微硬度及磨损性能的影响。试验表明:在转速4000 r/min、堆焊 速度200 mm/min、轴向压力在59.7~104.4 MPa范围下可获得冶金连接与成型良好的摩擦堆焊层。随轴向压力增加,堆 焊层宽度增加、但厚度减小;过高轴向压力不能增加摩擦堆焊层的有效体积。摩擦堆焊接头主要由堆焊层、热影响 区(HAZ)和母材区域组成,与传统摩擦焊缝细小晶粒组织特征不同,摩擦堆焊层主要为粗大板条和粒状贝氏体混合组 织特征。HAZ主要由过热区和相变重结晶区组成,过热区主要为贝氏体组织特征,而重结晶区为细小铁素体晶粒组织 特征。轴向压力变化对堆焊层组织粗化倾向和HAZ尺寸有较大影响,但对HAZ的组织形态影响不大。不同轴向压力下 的堆焊层平均硬度及抗磨损性能均高于母材,与母材比较堆焊层磨损体积最大可降低33.3%。

关键词:摩擦堆焊;轴向压力;显微组织;磨损性能

中图分类号: TG455 文献标志码: A 文章编号: 100

文章编号:1007-9289(2016)06-0113-10

Axial Pressure Effects on Microstructure and Wear Resistance During Friction Surfacing of X65 Alloy Steel

ZHANG Xu, YANG Xin-qi, CUI Lei, DU Bo

(Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: To broaden the engineering application of friction surfacing, experiments using X65 steel as the substrate and consumable rod were performed. The optimal surfacing speed was selected, and the effects of axial pressure on microstructures, microhardness and wear resisting properties were discussed. Results that the coatings with better bonding and shaping qualities are obtained under the conditions of 4 000 r/min, 200 mm/min and 59.7–104.4 MPa. The width of the coating increases. However, the thickness is decreased with increasing axial pressure. The excessive pressure decreases the effective volumes of the coatings. Friction surfacing joints consist of surfacing coating, heat affect zone (HAZ) and base metal, and the surfacing coatings are composed of coarser lath and granular bainites rather than fine equiaxed grain structures as found in conventional friction welds. The HAZ consists of the overheated zone and phase change recrystallization zone. The overheated zone has bainite features and the recrystallization zone has fine ferrite features. The variation of axial pressure has greater influence on the coarser tendancy of coating microstructure and the size of HAZ, but smaller effects on the microstructure types. Both the average hardness and wear resisting properties of the surfacing coatings are better than that of the base metal for different axial pressures, and the wear volume can be reduced to 33.3% compared with the base metal.

Keywords: friction surfacing; axial pressure; microstructure; wear resistance

收稿日期: 2016-07-17; 修回日期: 2016-11-09; 基金项目: *国家自然科学基金(51475327)

通讯作者:杨新岐(1962—),男(汉),教授,博士;研究方向:搅拌摩擦焊技术、工程结构完整性评定;Tel: 138 2003 5153; E-mail: xqyang@tju.edu.cn

网络出版日期: 2016-12-14 15:48; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20161214.1548.006.html

引文格式: 张旭,杨新岐,崔雷,等. 轴向压力对X65合金钢摩擦堆焊层组织和磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(6): 113-122. ZHANG X, YANG X Q, CUI L, et al. Axial pressure effects on microstructure and wear resistance during friction surfacing of X65 alloy steel[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(6): 113-122.

0 引 言

摩擦堆焊(Friction surfacing, FS)是一种固相连 接技术,最早出现于Klopstock和Neelands的专利 中,此后英国焊接研究所对该工艺进行了基础试 验研究^[1]。与传统熔化堆焊比较,摩擦堆焊避免了 由熔化-结晶过程带来的裂纹、气孔等缺陷,堆焊 层残余应力明显降低,可实现多种异种材料及难 熔材料的堆焊过程并具有稀释率低等诸多优点, 因而摩擦堆焊层的综合使用性能具有明显优势。

近些年来摩擦堆焊在受损部件局部修复、表 面改性及异种材料涂层制备方面的特殊优势受到 工业界普遍关注,国外研究机构一直在持续进行 摩擦堆焊应用基础研究。Gandra等人叫对目前摩擦 堆焊技术的最新研究结果(堆焊材料及工艺、连接 冶金机理、组织性能及堆焊建模等)进行了详细综 述。在国内,姚君山等人[2-3]最早进行了摩擦堆焊 工艺试验及焊接过程研究,刘雪梅等人[4-5]对 1Cr18Ni9Ti不锈钢在低碳钢上的摩擦堆焊工艺进 行了试验研究,并对其热力过程进行数值模拟分 析。但与国外研究比较,在摩擦堆焊工艺过程、 堆焊材料及堆焊层组织特征与性能方面具有较大 差异。目前摩擦堆焊技术并未引起国内研究者的 普遍关注、也没有具体的工业应用报道, 但摩擦 堆焊工艺因其在各种材料局部修复及再制造中的 突出优势值得进行深入开发与应用研究。

X65合金钢广泛应用于海洋油气运输管道的制 造,由于其服役环境恶劣,失效频繁。因此,目 前对X65的堆焊主要是采用镍基合金或一些合金粉 末以提高其表面耐磨耐蚀性。但镍基合金与X65钢 在化学物理性能上差异较大,而传统堆焊方法主 要采用等离子弧堆焊[6-7]、热丝TIG^[8-9]及MIG^[10]等熔 化堆焊方法,由此凸显出异种金属相容性差、冷 热裂纹、稀释率、氧化等问题。而摩擦堆焊作为 一种固相堆焊方式避免了上述问题,同时热力耦 合作用可自动清洁基板表面氧化层。因此将摩擦 堆焊应用于X65钢的修复及表面改性具有重要的意 义。文中采用X65合金钢作为耗材和基板进行初步 摩擦堆焊工艺试验研究,探讨摩擦轴向压力与堆 焊层成型、组织特征及磨损性能的相互影响,其 结果为应用摩擦堆焊技术进行X65管线钢局部表面 改性与缺陷修复等提供重要依据。

1 试 验

摩擦堆焊试验在天津大学自主研发的摩擦堆 焊设备上进行,过程示意图如图1(a)所示。堆焊试 验基板尺寸为150 mm×100 mm×20 mm,圆棒耗材 直径为Φ16 mm,可消耗长度为100 mm,如图1(b) 所示。设备总功率为93 kW,主轴转速范围为300~ 8 000 r/min,最大轴向压力可达60 kN。堆焊过程中, 耗材接触基板之前为送进速度控制,接触基板之 后为压力控制。基板和耗材均采用X65合金钢,其 主要化学成分及力学性能分别见表1及表2。

结合文献及试性试验,采用工艺参数如表3所



Fig.1 Schematic of friction surfacing process and the dimension of the consumable rod

表 1 X65合金钢的化学成分

Table I	Composition of the X65 alloy steel			(<i>w</i> /%)
Element	С	Mn	Р	S
Content	< 0.26	<1.40	0.04	0.05
Element	Nb	V	Ti	Fe
Content	0.005	0.005	0.016	Bal.

表 2 X65合金钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of the X65 alloy steel				
Property	Value			
Average hardness/HV	180			
Yield strength, $\sigma_{\rm b}/{ m MPa}$	448			
Ultimate tensile strength, σ_b /MPa	530			
Elongation, A/%	18			

表 3 X65钢的摩擦堆焊工艺参数

Table 5 Process parameters of inction surfacing of X65 steel						
	Rotational	Transverse	Axial	Axial		
Parameters	speed /	speed /	force /	pressure /		
	$(r \cdot min^{-1})$	$(mm \cdot min^{-1})$	kN	MPa		
Sample 1	4 000	150	12	59.7		
Sample 2	4 000	200	12	59.7		
Sample 3	4 000	250	12	59.7		
Sample 4	4 000	200	14	69.6		
Sample 5	4 000	200	16	79.6		
Sample 6	4 000	200	18	89.5		
Sample 7	4 000	200	21	104.4		

示。首先观察不同堆焊速度下的堆焊层成型及连接情况,选出最优焊速,在此基础上变化轴向压力并研究其对组织性能的影响。堆焊前将基板表面铣平,并用酒精擦洗耗材表面。堆焊层金相试样截面经预磨、抛光后用4%硝酸酒精溶液腐蚀处理,采用OLYMPUS GX51 光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)对堆焊层显微组织进行观察。采用Wilson 432SVD硬度计测量堆焊层截面的硬度分布,载荷为9.8 N,加载时间为15 s。

为评定堆焊层耐磨损性能,采用M-200型摩擦 磨损试验机进行了堆焊层磨损试验。所有磨损试 验均按照GB/T 12444—2006进行,试环采用 GCr15钢,直径为43.2 mm。每个轴向压力水平准 备5个磨损试样。磨损表面上取中间和两侧共3处 进行磨损宽度的测量,取平均值计算磨损体积。

2 结果及分析

2.1 堆焊速度对连接质量的影响

图2表示不同堆焊速度下摩擦堆焊层与基板的 连接界面。由于堆焊速度较慢,150 mm/min焊速 下得到的堆焊层与基板连接界面处形成了如图2(a) 所示的过热组织,这种不均匀组织将对界面连接 强度造成不利影响。此外,与200 mm/min相比, 其组织明显粗大。如图2(c)所示,焊速为250 mm/min 时连接界面形成了大量未连接缺陷,这可能是由 于过快的焊速使得元素扩散时间不足导致,降低了 堆焊层的连接质量。200 mm/min焊速下形成的堆焊 层与基板结合良好,2.4节将对其进行详细讨论。



(a) 150 mm / min

(b) 200 mm / min

(c) 250 mm / min

图 2 不同堆焊速度下摩擦堆焊层与基板的连接界面 Fig.2 Faying interface between friction surfacing coating and the substrate under different surfacing speed

2.2 摩擦堆焊层宏观形貌

基于2.1节对堆焊速度影响的讨论,取定堆焊 速度为200 mm/min,变换轴向压力研究其对堆焊 层组织及性能的影响。图3表示不同轴向压力下摩 擦堆焊层外观形貌。可以看出,各参数下均获得成 型良好的连续堆焊层。不同轴向压力下的堆焊层 宽度和厚度的计算结果(5个测试点的平均值)表明, 随轴向压力的增大,堆焊层宽度由16.2 mm增至 18.7 mm,大于耗材圆棒直径,但厚度由1.67 mm减 至0.99 mm。此外,随轴向压力的增大,堆焊层表 面成型变差,压力增大至104.4 MPa时摩擦堆焊层 表面轻微凹陷,对堆焊层成型造成一定不良影响。 图4为摩擦堆焊接头的宏观金相组织。明显可见,摩擦堆焊接头主要分3个区域:堆焊层完全由圆柱耗材金属过渡到基板上形成的焊缝区域组成;热影响区(HAZ)为基板上摩擦热源及轴向压力作用的区域,随着摩擦热作用强度不同在堆焊层下形成的不同尺寸圆弧区域,由于所经历的热循环不同其组织结构与母材有明显差异;母材(BM)区其组织结构基本没有受到摩擦热源的影响。在59.7 MPa到104.4 MPa的轴向压力范围内,除堆焊层两边缘存在的未连接缺陷外,摩擦界面的中心大部分区域未观察到各种宏观缺陷,摩擦堆焊层与基板接触面具有良好的冶金连接。



(d) 79.6 MPa

(e) 89.5 MPa

(f) 104.4 MPa

图 4 不同轴向压力下的摩擦堆焊接头宏观截面组织

Fig.4 Transverse section macrographs of friction surfacing welded joints under various axial pressure

随轴向压力的增大,HAZ宽度和深度增大, 宽度14.7 mm增至17.4 mm,深度2.0 mm增至 2.7 mm;而HAZ与堆焊层宽度差越来越小,由1.3 mm 减至0.9 mm。摩擦堆焊中的热输入E表示为:

$$E = \frac{Q}{v_s} = K \frac{\pi^2 R^2 \mu n \sigma_F}{160 v_s} \tag{1}$$

其中,K为修正系数; v_s 为堆焊速度,mm/min; μ 为摩擦因数;n为转速,r/min; σ_F 为轴向压力, N。由于 $n\pi v_s$ 保持不变,随轴向压力 σ_F 增大,热 输入E增大,HAZ范围也将不断扩大。

摩擦堆焊层外观宽度、厚度、有效连接宽度 及连接截面积的随轴向压力的变化规律如图5所 示。由于轴向压力与屈服强度的比值是一个无量 纲量,选用σ_F/σ_s作为横坐标以实现不同材料的应 用。与X65钢屈服应力比较,轴向压力59.7 MPa和 104.4 MPa仅为其屈服应力的13.3 %和23.3 %,这 表明虽然摩擦堆焊过程需要施加较大轴向压力, 但该载荷可能在弹性变形范围内就可以实现摩擦 堆焊过程的有效连接。考虑到摩擦堆焊过程中材 料升温现象,屈服强度可能会降低,后续需对摩 擦堆焊过程中的温度场进行测量研究,以准确判



图 5 轴向压力/屈服应力比对摩擦堆焊层宽度、厚度、有效连 接宽度及有效连接截面积的影响

Fig.5 Influence of axial pressure/yield stress on the width, thickness, effective bonding width and effective bonding cross section area of friction surfacing coating

断摩擦堆焊过程机理。 当 σ_F/σ_s 由13.3%增大至 23.3%时,摩擦堆焊层与基板的有效连接宽度由 13 mm增至14.3 mm,这表明增加 σ_F/σ_s 将促进摩擦 堆焊层与基板的有效连接,与前述HAZ宽度的变 化趋势相一致。但随 σ_F/σ_s 的增大,摩擦堆焊层厚 度减小,堆焊层有效连接截面积将由18.5 mm² 减小至13.5 mm²。当耗材转速和焊接速度固定时, 单位时间内发生塑性变形的材料随σ_F/σ_s的增大而 增多,但并未增加摩擦堆焊层有效连接截面积, 而是较大轴向挤压将形成更多飞边造成材料利用 率的降低。由此可见过高轴向压力并不能增加摩 擦堆焊层有效体积、提高圆棒耗材的利用率。

2.3 堆焊层组织特征

图6为X65母材与摩擦堆焊层显微组织,可以 看出,原始母材主要由均匀细小的铁素体和少量 分布于其晶界的珠光体组成,晶粒尺寸约为2~10μm; 而堆焊层主要由板条贝氏体和粒状贝氏体组成, 组织形态具有明显粗化倾向。虽然摩擦堆焊过程 中X65钢堆焊材料没有发生熔化,但摩擦挤压加热 作用足够使堆焊材料发生完全奥氏体化,使得摩 擦堆焊层处于过热晶粒长大状态,在随后的快速 冷却作用下形成粗大的组织特征,这势必对摩擦 堆焊层力学性能产生明显影响。

图7为选取试验最低压力59.7 MPa和最高压力 104.4 MPa压力下的堆焊层不同位置的组织进行详 细观察,可以看出,轴向压力59.7 MPa下形成的 焊层的组织基本类似;堆焊层中部(Center)及前进





(b) Coating

图 6 X65钢母材及摩擦堆焊层显微组织

Fig.6 Microstructure of X65 steel base metal and friction surfacing coating



图 7 不同压力下堆焊层不同位置的显微组织

Fig.7 Microstructure of different positions of coating under different axial pressure

边(AS)主要为板条贝氏体及粒状贝氏体(图7(c)(d) 所示);而后退边(RS)主要为块状铁素体及少量贝 氏体(图7(b)所示),与前者有差异;整个堆焊层 中组织均匀性较差,中部组织粗化明显。当轴向 压力增加到104.4 MPa时,其组织形态类似但由于 过热晶粒长大严重,中部区域形成了大量粗大板 条贝氏体组织特征,组织不均匀性更为显著(图7(f) 所示)。增加轴向压力将增大堆焊过程热输入, 堆焊层奥氏体过热严重,因而晶粒长大在后续快 冷过程中形成粗大板条贝氏体等非平衡组织。这 表明X65钢在摩擦堆焊过程中堆焊层很难形成细小 晶粒的组织特征。

118

一般而言在传统摩擦焊过程中,由于摩擦热 明显低于熔焊过程,并伴随强烈挤压形变热处理 作用,摩擦焊缝将形成细小等轴晶粒的组织特 征。但X65钢的摩擦堆焊过程表明,由于X65钢存 在多种可能的固态相变过程^[11],最终形成的摩擦 堆焊层并不是细小等轴晶粒特征,而是较为粗大 的板条贝氏体和粒状贝氏体混合特征。这种组织 形态首先取决于X65钢的组织转变特征,其次与摩 擦堆焊工艺热循环过程直接相关。

2.4 连接界面组织特征

摩擦堆焊层必须与基板形成冶金连接才具有 工程应用价值,前述宏观金相表明结合界面处未 观察到宏观缺陷,堆焊层与基板形成有效冶金连 接。为进一步说明上述连接机制,选取59.7 MPa 和104.4 MPa下不同位置的界面区域组织进行详细 观察,如图8所示。可以看出在轴向压力59.7 MPa 下,除在AS边局部有原始界面痕迹外,在堆焊层 RS及中部的大部分区域原始连接界面已不存在, 形成了组织形态一致的过渡区域,没有观察到明 显微裂纹或孔洞等缺陷;当轴向压力增加到104.4 MPa时,在堆焊层RS、中部区域及AS区域均形成 组织形态一致的过渡区域,已观察不到原始界面 的任何痕迹。这表明摩擦堆焊层与基板形成有效 冶金扩散连接。

图9为59.7 MPa和104.4 MPa轴向压力下局部 连接界面的放大SEM形貌。可以看出在低轴向压 力下,在AS局部连接界面处可能出现未焊透的微 小孔洞缺陷;而在高轴向压力下,在局部连接界 面处形成不连续带状细小铁素体晶粒组织过渡区 域,仔细观察连接界面处仍发现极微小针孔状缺



图 8 不同压力下不同位置的界面区域组织

Fig.8 Interfacial microstructure of different positions under different axial pressure





(b) AS under 59.7 MPa



(c) Local interface under 104.4 MPa

(c) Local interface under 104.4 MPa



陷。但与低轴向压力相比,连接区域原始界面消 失并形成新晶粒,微小缺陷区域明显减少且原始 连接界面已完全形成组织特征一致的过渡区域。

由此可见,X65钢摩擦堆焊层与基板的界面结 合属于扩散冶金组织特征,明显不同于熔化堆焊 的结晶连接组织特征。增加轴向压力有利于促进 界面的扩散冶金组织特征,但局部仍可能产生微 小孔洞缺陷。这种缺陷应与圆棒耗材摩擦界面的 压力分布不均匀性有关,由摩擦堆焊工艺本身特 点决定,即圆棒耗材既要承受摩擦热作用形成堆 焊层、又要具有刚度以便施加轴向压力载荷。

2.5 HAZ组织特征

摩擦堆焊过程中摩擦热源与变形分布很不均 匀,加热主要集中在圆棒耗材端部并形成大量的 飞边;但基板上并未产生明显变形也没有挤出飞 边的形成。因此基板上HAZ虽然受到轴向压力的 作用,但摩擦堆焊层热循环作用应是影响HAZ组 织特征的主要因素。

图10为轴向压力59.7 MPa和104.4 MPa下 HAZ的金相组织形貌。可以看出, HAZ主要由过 热区(Overheated zone, OZ)和相变重结晶区(Phase change recrystallization zone, PCRZ)所组成,在轴向力59.7 MPa下靠近堆焊层过热区具有粒状贝氏



图 10 不同轴向压力下的HAZ组织 Fig.10 Microstructure of HAZ under different pressure 体和板条贝氏体混合组织特征,原奥氏体晶界可 见,如图10(b)所示。当轴向压力增加到104.4 MPa 时,热输入增加过热晶粒长大严重,快速冷却转 变过程中形成了粗大的板条贝氏体组织特征, 如图10(d)所示。HAZ相变重结晶区如图10(c)(e)示, 主要由细小铁素体和少量珠光体组成,比原始 X65组织更加细小。该区域主要受到热作用后发生 重结晶,但并未形成过热状态,在母材内部热传 导冷却作用下形成细小等轴铁素体和珠光体晶 粒,不同压力对该区域组织形态基本无影响。

2.6 硬度分布

选取3个不同压力下的堆焊层进行显微硬度测试,结果如图11所示。由图11(b)可以看出,堆焊 层中硬度分布具有较大不均匀性。在AS区域硬度 超过240 HV、在RS区域硬度超过200 HV,堆焊层



图 11 不同压力下摩擦堆焊层的水平硬度分布和垂直界面的垂 直硬度分布

Fig.11 Horizontal and vertical hardness distributions of friction surfacing coatings under different axial pressure 平均硬度在250 HV左右。3种不同轴向压力下硬度 波动范围分别是211~279 HV、218~270 HV和 208~309 HV。硬度的不均匀性反映前述堆焊层组 织形态的不均匀性,堆焊层中形成了大量板条贝 氏体组织,有利于提高堆焊层的强度,但会使其 塑韧性下降^[12]。当轴向压力增加到104.4 MPa时, 虽然最高硬度有所增加,但硬度分布具有明显波 动性,这表明高轴向压力下由于组织结构粗大及 不均匀性产生的硬度值差异更显著。

图11(c)是垂直于堆焊层界面的硬度分布。可 以看出,摩擦堆焊层、连接界面及HAZ平均硬度 值均高于X65母材原始硬度,因而堆焊层具有较高 耐磨损性。在HAZ的过热区最高硬度值可达240 HV, 随着远离界面其值不断下降;在HAZ的相变重结 晶区,硬度有所回升而后再降低过渡到BM硬度 值。这种硬度分布特征与HAZ的组织直接相关, 过热区的贝氏体混合组织具有较高硬度,而重结 晶区的细小铁素体混合组织虽然硬度降低,但由 于晶粒细化起到一定的强化作用。

2.7 堆焊层磨损性能

由于X65合金钢在运输管道领域的广泛应用, 研究其摩擦堆焊层的磨损性能具有重要意义。 图12(a)为3个不同轴向压力下堆焊层磨损体积随磨 损时间的变化曲线。随磨损时间增加,磨损体积 呈增大趋势,在60 min后BM磨损体积为14.4 mm³, 而3种轴向压力下摩擦堆焊层的磨损体积分别为 9.6、10.5和12 mm³,与BM比较分别降低33.3%、 27.1%、16.7%。

给定时间下磨损体积随轴向压力的变化曲线 如图12(b)所示,初始磨损时期,不同压力下堆焊 层磨损体积和BM差别较小,随磨损时间的增 长,差别越来越大。由如12(a)(b)可看出,所有参 数下的堆焊层磨损体积均低于BM,最低轴向压力 59.7 MPa下堆焊层的耐磨损性能最好。随轴向压 力的增大,堆焊层磨损体积逐渐增大,这是由于 更高压力下形成的粗大组织所导致。

最低和最高轴向压力下摩擦堆焊层的磨损表 面形貌如图13(a)(b)所示,图中可观察到由摩擦面 犁皱形成的沟槽,及反复碾压引起的部分剥落, 因此不同压力下摩擦机制均为典型的磨粒磨损。





Fig.12 Variation relationship between worn time and axial pressure with the wear volume of the surfacing layer



(a) 59.7 MPa

(b) 104.4 MPa



3 结 论

研究了轴向压力对X65钢摩擦堆焊层宏观形貌、 显微组织及力学性能的影响,主要结论如下:

(1) 在5种轴向压力下成功实现X65钢摩擦堆焊 过程,获得界面连接、成型良好的摩擦堆焊层。 随着轴向压力增加,堆焊层宽度增加、但厚度减 小。过高轴向压力不能增加摩擦堆焊层有效体 积、提高圆棒耗材的利用率。

(2) X65钢摩擦堆焊接头主要由堆焊层、热影 响区(HAZ)和母材区域组成。堆焊层完全由圆棒耗 材过渡形成,主要为粗大板条和粒状贝氏体混合 组织特征; HAZ主要由过热区和相变重结晶区组 成,过热区主要为贝氏体组织特征,而重结晶区 为细小铁素体晶粒组织特征。轴向压力变化对堆 焊层组织粗化倾向和HAZ尺寸有较大影响、但对 HAZ的组织形态影响不大。 (3) 与传统摩擦焊缝具有细小等轴晶粒组织不同, X65钢最终形成的摩擦堆焊层并不是细小等轴晶粒特征, 而是较为粗大的板条贝氏体和粒状贝氏体混合特征。这种粗大组织结构主要是由X65钢多种可能固态相变特征所决定的。

(4) X65钢摩擦堆焊层与母材之间组织为扩散 冶金连接,在界面处可形成细小带状铁素体晶粒 过渡区域;当增大轴向压力时,有利于促进界面 扩散冶金连接过程,但连接界面局部仍可能产生 微小针孔缺陷。

(5) X65钢摩擦堆焊层硬度分布具有较大不均 匀性,但平均硬度明显高于其母材硬度值。不同 轴向压力下的堆焊层抗磨损性能均优于其母材, 与母材比较堆焊层磨损体积最大可降低33.3%。堆 焊层的磨损机制不受轴向压力影响,所有参数下 均为典型的磨粒磨损类型。

参考文献

- [1] GANDRA J, KROHN H, MIRANDA R M, et al. Friction surfacing-a review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(5): 1062-1093.
- [2] 姚君山, 杜岩峰, 薛忠明, 等. 耗材摩擦焊敷工艺原理及试验研究[J]. 中国表面工程, 2000, 13(4): 8-11.
 YAO J S, DU Y F, XUE Z M, et al. Process principle and experimental study of friction welding deposition[J]. China Surface Engineering, 2000, 13(4): 8-11(in Chinese).
- [3] 姚君山, 杜岩峰, 张彦华. 耗材摩擦焊敷试验研究[J]. 热加 工工艺, 2001(6): 9-11.
 YAO J S, DU Y F, ZHANG Y H. Experimental study of friction welding deposition[J]. Hot Working Technology, 2001, (6): 9-11(in Chinese).
- [4] 刘雪梅,张彦华. 摩擦堆焊过程中耗材热力过程数值模拟
 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(1): 83-87.
 LIU X M, ZHANG Y H. Numerical simulation of consumable-rod's thermal-mechanical behavior in friction surfacing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(1): 83-87 (in Chinese).
- [5] 刘雪梅,张彦华.摩擦堆焊过程接触熔化物理模型与分析[J].焊接学报,2005,26(6):45-49.

LIU X M, ZHANG Y H. Contact melting physical model and analysis of friction surfacing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(6): 45-49 (in Chinese).

- [6] 高伟, 刘志豪. 镍基合金等离子堆焊层的组织和性能[J]. 石 油机械, 2012, 40(3): 30-34.
 GAO W, LIU Z H. The structure and property of the nickel base alloy plasma surfacing welding layer[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(3): 30-34 (in Chinese).
- [7] 董丽红, 杜则裕, 陶勇寅, 等. X65钢管内表面等离子弧粉 末堆焊工艺[J]. 油气储运, 2003, 22(5): 47-48.
 DONG L H, DU Z Y, TAO Y Y et al. Study on the techno-

logy of wear and corrosion resistance on the inner surface for X65 pipe with plasma arc powder surfacing[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 40(3): 30-34 (in Chinese).

[8] 张念涛,储乐平,胡明胜,等. X65钢表面横焊堆敷Inconel
 625合金焊缝成形及稀释率研究[J].焊接技术, 2016, 45(5):
 41-44.

ZHANG N T, CHU L P, HU M S et al. Study of formation and dilution rate of horizontal surfacing of inconel 625 alloy steel on X65 steel[J]. Welding Technology, 2016, 45(5): 41-44(in Chinese).

- [9] 许小波, 李华山, 佟彤, 等. X65钢管内壁堆焊镍基合金的 工艺探索[J]. 焊管, 2015, 38(10): 32-35.
 XU X B, LI H S, TONG T, et al. Technology exploration of nickel-based alloy surfacing in X65 grade steel pipe inner wall[J]. Welding Pipe and Tube, 2015, 38(10): 32-35 (in Chinese).
- [10] 王小艳, 潘建新, 周华, 等. 复合管管端堆焊Inconel625合金 工艺及性能研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(21): 154-156.
 WANG X Y, PAN J X, ZHOU H, et al. Research on performance and process of overlaying inconel alloy 625 on lined pipe ends[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(21): 154-156 (in Chinese).
- [11] 李鹤林, 郭生武, 冯耀荣. 高强度微合金管线钢显微组织分析与鉴别图谱[M]. 北京:石油工业出版社, 2001: 7-10. LI H L, GUO S W, FENG YR. Microstructure analysis and identification spectrum of high strength microalloyed pipeline steel[M]. Petroleum Industry Press, 2001: 7-10 (in Chinese).
- [12] DIAZ-FUENTES M, IZA-MENDIA A, GUTIERREZ I. Analysis of different acicular ferrite microstructures in lowcarbon steels by electron backscattered diffraction. Study of their toughness behavior[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2003, 34(11): 2505-2516.

(责任编辑:陈茜)