

软铁弹带 TIG 堆焊工艺及组织性能研究

哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室(150001)

吕世雄 黄永宪 磨安祥

敬小军 徐永强

摘要 针对炮弹钢基体表面堆敷铜合金时存在泛铁问题等不足,创新性地提出用软铁代替铜合金作为堆焊金属,开展了纯铁弹带 TIG 堆焊工艺的研究。主要针对软铁弹带的力学性能和软铁堆焊的界面组织特征进行了深入研究。研究表明:与铜/钢堆焊形成的铜弹带比较,软铁弹带的硬度值大约为 170 HV,剪切强度约为 280 MPa,与铜弹带的力学性能相差不大。软铁堆焊界面上靠近熔合线的热影响区为马氏体组织,熔合线不明显,有基体合金熔化进入堆焊层,堆焊层为先共析铁素体和贝氏体类型组织,同时发现基体中的碳等合金元素也进入界面层。采用软铁作为堆焊金属可降低堆焊弹带的热裂纹倾向,避免了堆焊过程中因铜渗入钢基体而导致的晶间渗透裂纹。经过堆焊工艺优化实现了界面层组织结构的优化,最终获得了理想的纯铁弹带。

关键词: 软铁 TIG 堆焊 界面组织

中图分类号: TG44

0 序 言

弹带具有增加射程、提高打击精度、减少膛线磨损等作用,作为炮弹的重要组成部分广泛运用于各种炮弹结构。国内传统的弹带与弹体的连接方法为机械嵌合工艺,该工艺生产的弹带容易产生应力集中,发射过程中容易出现弹带脱落^[1-3]。目前,部分研究机构开展了堆焊铜弹带的研究工作,经过实际打靶验证,堆焊铜弹带技术满足了炮弹发射对弹带的结合和密封要求。然而,堆焊铜弹带存在明显的不足,铜/钢异种材料连接的焊接性较差,过量的铁进入铜合金弹带层会造成较大的应力集中,甚至形成严重的渗透裂纹缺陷,同时基体在焊接过程中极易熔化,产生泛铁使弹带硬度急剧升高,增加了弹带的磨损,缩短炮膛寿命^[4-5]。另外,铜弹带的炮弹发射后会有部分铜残留在膛线上,需定期对膛线进行去铜处理,铜合金成本相对较高也是限制应用的一方面。

针对 TIG 堆焊铜弹带过程中容易出现的各种问题,研究选用软铁(即含碳量小于 0.04% 的工业纯铁)代替铜作为堆焊弹带的堆敷材料。这种方法不仅消除了铜/钢焊接性差的影响,还将填补了国内软铁堆

焊弹带技术的空白。从经济角度而言,软铁价格仅为铜合金的 1/6 左右,使弹带生产价格大幅降低,对中国弹带制备技术的提高和国防事业的发展具有重要的意义。

1 试验方法

1.1 试验设备及材料

弹带制备通过半自动焊机实现,焊接过程中摆动焊枪,弹体随回转台的转动而匀速转动,采用背部水冷方式进行冷却以保证弹带成形和质量的均匀。焊接设备如图 1 所示。设备主要包括 TIG 焊主回路、焊丝送进系统、循环水浇注系统、工件回转系统及焊枪摆动系统等 5 大组成部分。

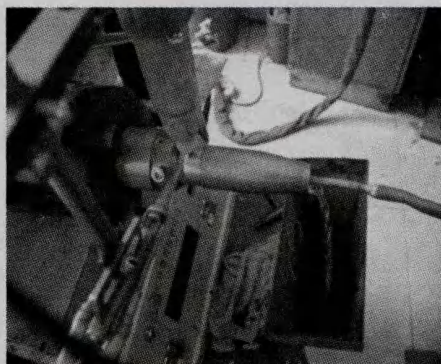


图 1 软铁弹带堆焊设备

收稿日期: 2011-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(50974046, 50904020); 哈尔滨市青年科技创新人才基金(2009RFQXG050); 中央高校基础科研业务费专项资金(HIT, NSRIF, 2012007); 国家博士后科学基金(20090460883; 201003419)。

试验所采用的炮弹基体材料有 20[#]钢、45[#]钢和 50[#]钢三种,弹体外径为 29.8 mm。三种钢基体的化学成分主要体现在含碳量上,20[#]钢含碳量为 0.17% ~ 0.24%,45[#]钢含碳量为 0.42% ~ 0.49%,50[#]钢含碳量为 0.47% ~ 0.55%,还含有少量的 Mn, Si, Cr 等合金元素。堆焊材料为 Hs201 紫铜焊丝和软铁焊丝两种。紫铜焊丝直径为 1.6 mm,软铁焊丝直径为 1.2 mm。软铁焊丝含碳量低于 0.003%。紫铜焊丝的含铜量在 98.9% 以上,另外还有少量的 Si, Mn, Sn 等合金元素。

1.2 试验过程及工艺参数

弹带堆焊前在基体上加工宽 14 mm、深 1 mm 的工艺槽,并用砂纸将槽体表面磨光,以去除基体表面的氧化膜和杂质吸附层,然后用丙酮擦拭待焊表面并用热风吹干后即可进行堆焊试验。焊接过程通过改变焊接电流、送丝速度、基体转动速度等参数进行弹带堆焊工艺优化,焊接工艺参数如表 1 所示。

表 1 软铁弹带堆焊工艺参数

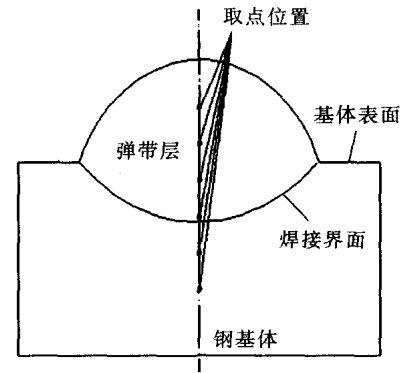
| 试件 序号 | 焊接电流 <i>I</i> /A | 送丝速度 <i>v</i> /(m·min ⁻¹) | 转动周期 <i>n</i> /s | 保护气流量 <i>Q</i> /(L·min ⁻¹) |
|----------|---------------------|------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------|
| 1 | 160 | 2.0 | 40 | 10 |
| 2 | 170 | 2.0 | 40 | 10 |
| 3 | 170 | 1.3 | 90 | 10 |
| 4 | 180 | 1.3 | 90 | 10 |
| 5 | 190 | 1.3 | 90 | 10 |
| 6 | 180 | 1.3 | 105 | 10 |
| 7 | 200 | 1.4 | 105 | 10 |
| 8 | 220 | 1.5 | 105 | 10 |

1.3 接头组织及力学性能分析

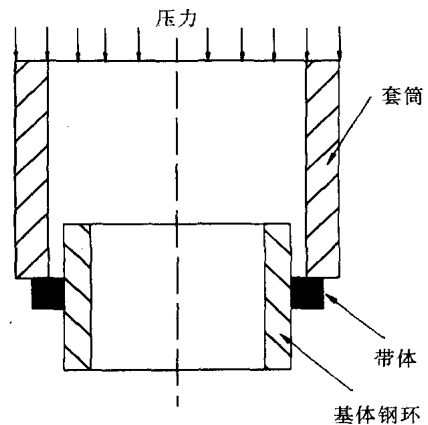
通过线切割对弹带区域取样,经磨光、抛光、腐蚀等处理后,在光学显微镜(OM)对观察堆焊区域宏观及微观组织特征,是否有气孔、夹渣等焊接缺陷。之后利用扫描电镜(SEM)分析观察堆焊区域的微观组织及成分,分析界面的元素扩散及不同工艺条件下形成的堆焊层微观组织,并确定接头界面相组成。分析堆焊层中熔入的母材合金元素特别是碳元素的比例,建立接头性能与组织、成分和形态的联系。

分别测试不同基体和堆焊层的硬度分布,比较软铁弹带与铜弹带的硬度分布特征,验证软铁弹带硬度指标是否满足弹体发射的要求。硬度测试点位于弹带

堆焊层横截面中心线上,节点距离为 0.5 mm,如图 2a 所示。通过机械加工将弹带加工至合适尺寸,在专门的剪切机上进行剪切试验以观察其破坏机制,比较软铁弹体和铜弹体与钢基体界面结合强度,剪切试验原理如图 2b 所示。



(a) 硬度测试节点图



(b) 剪切原理图

图 2 力学性能测试方案

2 试验结果及分析

2.1 工艺参数对焊接质量的影响

合适的焊接工艺参数是优质堆焊弹带的保证,首先在不同焊接电流和送丝速度下进行弹带堆焊试验。结果发现:1号件和2号件由于送丝速度过快导致焊丝不能完全熔化,与弹体形成固体物理接触。3号件焊速略有降低,其成形特征可发现液态焊丝还是不能完全铺满环形槽。4号件和5号件由于基体转速和电流配合不好,出现了咬边缺陷。1~5号件属于成形不良的试件,6号件则由于工艺参数配合较好,焊接质量得到很大改善,高度均匀、焊接波纹美观,接头成形良好。通过大量工艺摸索实现,最终确定了 29.8 mm 口径炮

弹的软铁弹带焊接的最优焊接参数区间为:焊接电流 180~220 A,送丝速度 1.3~1.5 m/min,转速 105 秒/周,气流量 10 L/min。

2.2 接头界面组织微观组织

图 3 是 20[#] 钢基体上堆焊形成的软铁弹带堆焊接头熔合线的宏观形貌。其主要分为母材区(A区)、不完全正火区(B区)、正火区(C区)、粗晶区(D区)、熔合区(E区)、焊缝区(F区)。由图 3 可知,软铁与钢的界面不平齐,出现了界面下凹的现象。这是由于软铁的熔点比钢高,焊接过程中基体发生熔化而造成的。弹体发射过程中承载部位在于基体表面以外的堆焊层,这种凹陷结构降低了承载能力对界面结合强度的依赖性。

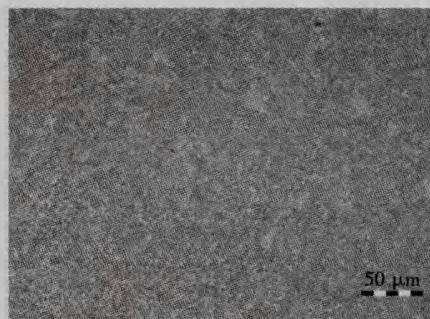


图 3 软铁弹带堆焊接头熔合线

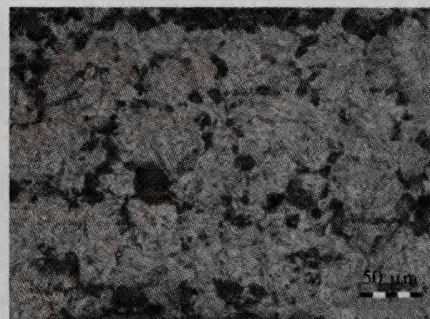
基体为普通碳素钢,母材组织形态特征均是珠光体和铁素体。不完全正火区和正火区的形成温度区间较低,空气中自然冷却使冷却速度相对较缓,因此 20[#] 钢和 45[#] 钢的组织特征表现为铁素体和珠光体,20[#] 钢的晶粒储存相对比较小。

粗晶区又叫过热区,与熔合区相邻,形成温度大约在 1 100~1 490 ℃ 之间,在此区间里 Fe 金属晶粒会急剧长大。对于含碳量不高的 20[#] 钢,奥氏体晶粒发生粗化,冷却后得到较正火区更为粗大的铁素体和珠光体。但由于炮弹焊接过程中焊枪在来回摆动,产生了重复加热的效果。因此该区的铁素体和珠光体也不会特别粗大,如图 4a 所示。对于 45[#] 钢基体,由于其含碳量较高,在焊接冷却过程中产生了淬火组织,主要是马氏体和贝氏体组织,如图 4b 所示。马氏体和贝氏体的存在会造成该区硬度急剧增大。

熔合区温度发生在液相温度线附近,一般在 1 490 ℃ 以上。这时母材基体发生熔化,与液态软铁相互熔合。由图 5 可知,由于软铁熔点比基体高,故熔合区往



(a) 20[#] 钢



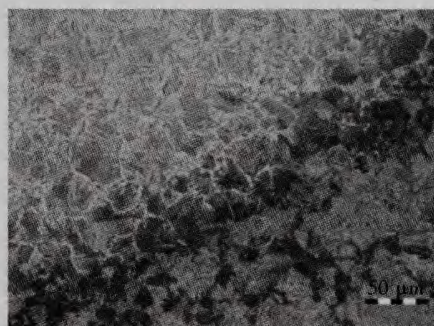
(b) 45[#] 钢

图 4 堆焊接头粗晶区

基体里凹陷,形成锯齿状的结合界面,软铁弹带焊接界面结合良好,避免了铜弹带堆焊过程中因铜渗入钢基体而导致的晶间渗透裂纹。



(a) 20[#] 钢



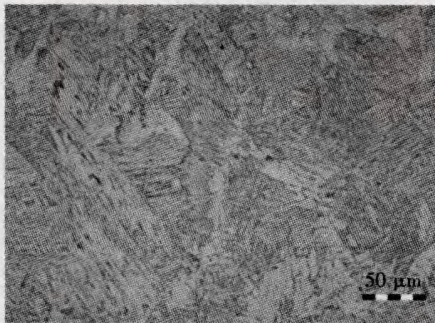
(b) 45[#] 钢

图 5 堆焊接头熔合区

焊缝是由熔化的软铁焊丝和部分熔化的基体混合形成的熔池在冷却过程中凝固而成。弹带的性能好坏直接由焊缝性能决定。20#钢基体含碳量较少,故焊接过程中基体熔化进入熔池的碳也很少,因此熔池杂质很少,在冷却过程中几乎全部变为了铁素体和少量的珠光体,如图6a所示。而对于45#钢,其含碳量较高,焊接过程基体熔化进入熔池的碳较多,且焊接过程采用背部水冷方式,冷却速度很快,故在焊缝凝固过程除了生成低碳马氏体,还有贝氏体类型组织产生,如图6b所示。



(a) 基体为20#钢的焊缝区



(b) 基体为45#钢的焊缝区

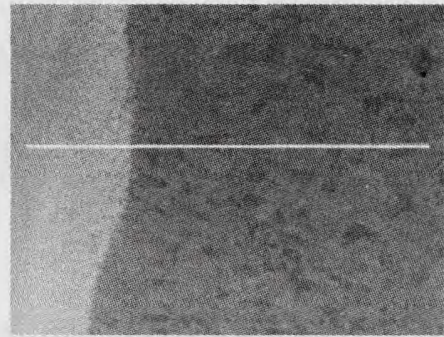
图6 堆焊接头焊缝区

为了分析化学元素特别是碳元素在界面处的分布情况,对界面做了扫描测试,线扫描结果如图7所示。碳元素在焊缝中的含量都比基体中要少,这说明合适的TIG堆焊工艺能够较好控制基体中的碳越过界面进入弹带层,从而避免弹带层硬度过高。而碳含量在焊缝区里均匀分布,说明焊接过程中在电弧搅拌力等作用下,合金元素在整个焊缝分布比较均匀。

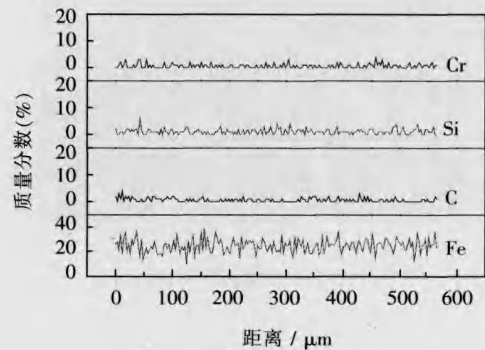
2.3 硬度分布

硬度作为弹带的影响重要力学性能指标,影响着炮弹的发射过程稳定性和炮膛的使用寿命,弹带层太

硬容易划伤炮膛。铜弹带以其优良的力学性能得到广泛应用,因此试验中在20#,45#和50#三种钢基体上堆焊软铁焊丝,测量弹带横截面的硬度分布规律,并与铜合金弹带的硬度分布规律作比较。测量结果如图8所示。由图8中可以看到,铜弹带层的硬度在150HV



(a) 20#钢基体的堆焊界面



(b) 扫描线上的元素分布规律

图7 软铁堆焊界面元素分布

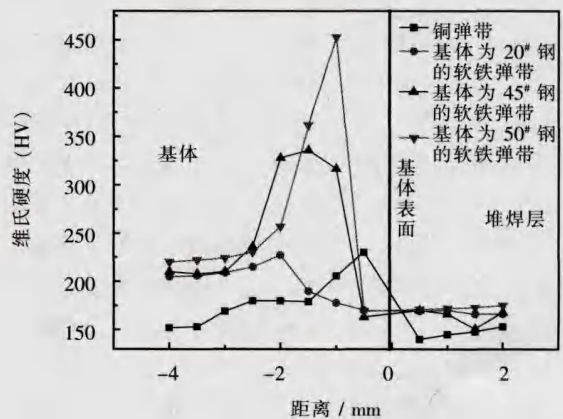


图8 弹带层硬度分布

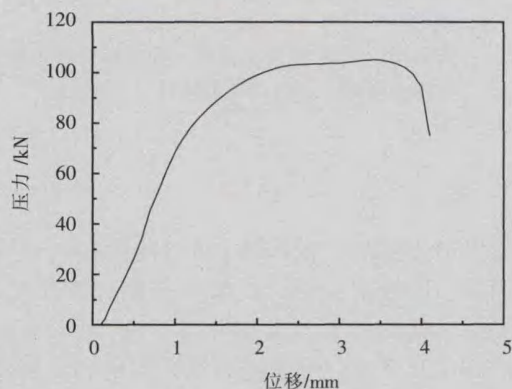
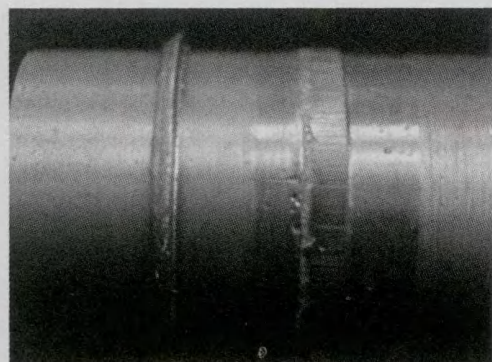
左右,而无论是 20[#],45[#]还是 50[#]钢作为基体,软铁弹带层的硬度均在 170 HV 左右,与铜弹带的硬度相差不大,由此可见软铁可以作为铜合金的理想替代材料。由于铜的熔点比基体低,故焊接过程中基体几乎未发生熔化,堆焊接头界面与基体表面基本重合,故图中铜弹带硬度曲线在基体表面附近发生突变。而软铁的熔点比基体高,焊接过程中基体部分发生了熔化,堆焊接头界面会相对于基体表面往下偏移,因此在软铁硬度曲线中基体表面过渡平缓,而在基体内部的堆焊接头界面处表现出硬度突变。分析认为,硬度突变是由于基体的部分热影响区在焊接热循环过程中发生了组织变化,生成了淬硬性组织。45[#]和 50[#]钢的含碳量较高,

堆焊接头热影响区中有马氏体生成,因此在硬度曲线上有较大的突变。而 20[#]钢含碳量不大,焊接冷却过程中没有马氏体生成,故其硬度曲线较为平缓。

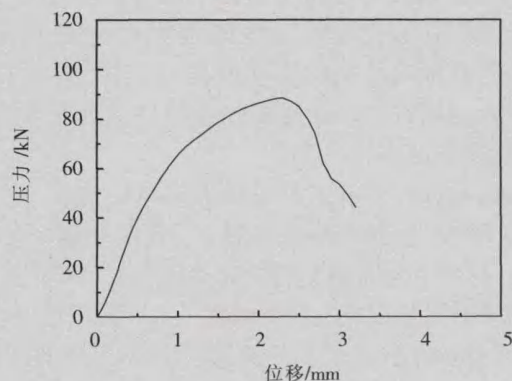
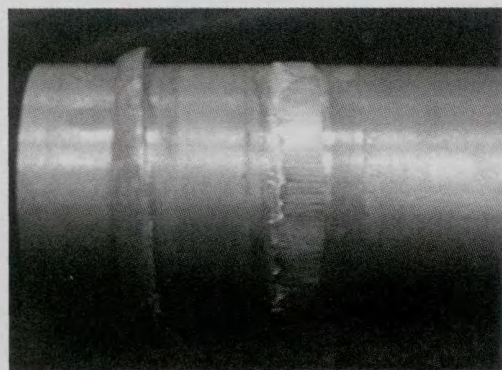
2.4 剪切强度测试结果

炮弹发射时,弹体在炮膛身管中向前运动,弹带受到巨大的剪切力。剪切强度过低,弹带容易脱落,使火炮射程与精度均大大降低,因此需要对实弹弹带的剪切性能进行测试。试验结果如图 9 所示。

由图 9 可以发现,软铁弹带的最大剪切力为 105.1 kN,剪切强度为 280 MPa;铜弹带最大剪切力为 88.6 kN,剪切强度为 238 MPa,两者比较接近。另外二者受力曲线走势相近,断口撕裂机制较一致,剪切断裂



(a) 剪切后的软铁弹带

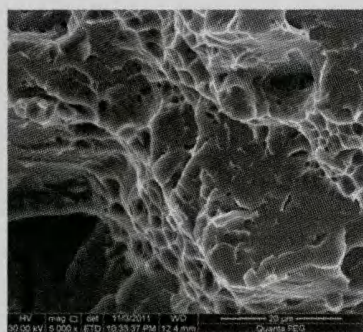


(b) 剪切后的铜弹带

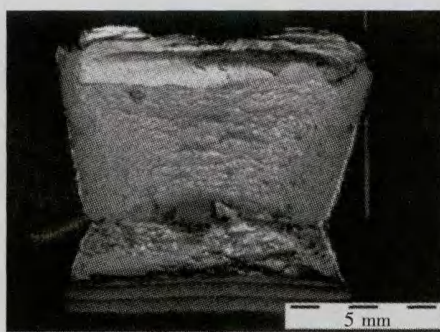
图9 剪切实验结果

位置均位于弹带层上,说明了堆焊界面处的强度值要高于堆焊本身的强度。分析认为,钢基体发生微量熔化,界面处的合金元素对堆焊层起到了一定的固溶强

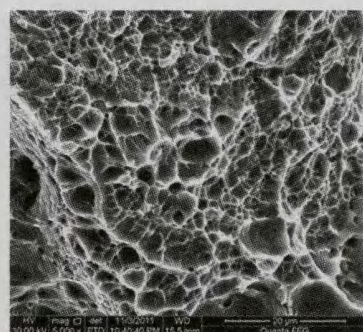
化作用。而软铁弹带的剪切强度比铜弹带高,是由于软铁和钢的熔合性能比铜和钢的熔合性能好,结合强度也更高。 [下转第 55 页]



(d) 焊缝冲击断口纤维区微观形貌



(e) 热影响区冲击断口宏观形貌



(f) 热影响区冲击断口纤维区微观形貌

图9 接头断口的宏观及微观形貌

3 结 论

(1) 采用双丝窄间隙 GMAW 方法对 32 mm 船用 921A 高强钢进行焊接。其焊缝表面和背面成形良好,无夹渣侧壁未熔合等宏观缺陷,成功的将这一方法应用于高强钢的焊接。

(2) 焊接接头组织金相分析表明,母材由回火索氏体组成,热影响区宽度大概为 1~2 mm,过热区由板条马氏体和粒状贝氏体组成,正火区由细小马氏体和粒状贝氏体组成,不完全正火区为马氏体和铁素体,多层焊时,过热区晶粒明显细化,这显然有利于提高焊接接头的力学性能。

(3) 双丝窄间隙 GMAW 接头热影响区窄,无强度弱化区,过热区的软化和脆化倾向低,热影响区低温

(-50℃)冲击韧性只比母材下降了 7.1%。

参 考 文 献

- [1] 撒世勇. 10CrNi5MoV 钢厚板窄间隙熔化极气保焊研究[J]. 材料开发与应用, 2010(1): 13-15.
- [2] 胡存银, 张富巨. 窄间隙焊接的技术与经济特性分析[J]. 焊接技术, 2001(2): 47-48.
- [3] 苑志波, 严洪丽. 120 mm 厚板焊接[J]. 钢结构, 2003(6): 31-32.
- [4] 赵 博, 范成磊, 杨春利, 等. 窄间隙 GMAW 的研究进展[J]. 焊接, 2008(2): 11-15.

作者简介: 徐望辉, 1986 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为窄间隙 GMAW。

[上接第 45 页]

3 结 论

(1) 口径 29.8 mm 弹体的软铁弹带堆焊工艺参数为: 焊接电流 180~220 A, 送丝速度 1.3~1.5 m/min, 转速 105 秒/周, 气流量 10 L/min。

(2) 软铁弹带接头成形良好, 软铁堆焊接头靠近熔合线的热影响区形成马氏体组织, 熔合线不明显, 有基体合金熔入堆焊层, 堆焊层为先共析铁素体和贝氏体类型组织, 焊缝中的含碳量相对于基体有所减少。

(3) 软铁弹带层的硬度均在 170 HV 左右, 剪切强度在 280 MPa 左右, 与铜弹带的性能相差不大。

参 考 文 献

- [1] 王克鸿, 徐越兰. 无熔深堆焊铜技术研究[J]. 机械设计

与制造工程, 2002, 31(1): 58-59.

- [2] 王克鸿, 徐越兰. 无熔深熔覆铜工艺[J]. 焊接学报, 2001, 22(6): 69-72.
- [3] Malin V. Development of mold solidification welding for deposition nonferrous alloys onto steel[J]. Welding Journal, 1992, 71(5): 35-36.
- [4] Xu Xiaolong, Wu Wei, Xu Yangze. The research of radial friction welding[J]. Welding in the World, 2005(1/2): 115-122.
- [5] Tim Stotler. Procedure development and practice consideration for inertia and direct-drive friction welding[J]. Welding, Brazing, and Soldering, 2000(6): 1-5.

作者简介: 吕世雄, 1957 年出生, 教授级高级工程师, 主要从事有金属和异种材料连接, 已发表 20 余篇论文。