

Q235 钢板表面 TIG 法熔覆铜接头的组织和力学性能

禹业晓, 李玉龙, 徐健宁, 孙煜杰

(南昌大学 机电工程学院 机器人与焊接自动化重点实验室, 南昌 330031)

摘要:采用 TIG 堆焊方法在 Q235 钢板上堆焊铜合金。通过光学显微镜、扫描电镜观察了接头界面的组织形貌,分析了焊接工艺对铜合金层中泛铁量的影响;通过显微硬度计对堆焊接头的硬度分布以及焊接工艺对显微硬度的影响进行了分析。结果表明:铜合金层和界面的成分发生了变化,发现基体元素向铜合金层中溶解产生不同形状的泛铁相;堆焊层硬度由于微观组织的不均匀性和 Fe 元素的含量及分布具有很大的波动,平均显微硬度随焊接热输入的增加而增大。

关键词: Q235 钢;硅青铜;TIG 堆焊;组织性能

doi:10.3969/j.issn.1005-5053.2014.1.011

中图分类号: TG454

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2014)01-0062-07

近年来随着对表面高硬度、耐磨、耐腐蚀,内部保持良好塑韧性材料的研究,表面改性技术获得了很好的发展和应用。已成功用来提高工程零部件、航空零件、运动器材等的耐磨性和硬度^[1-3]。气体钨极氩弧焊(TIG),是一种较方便的表面改性方法。经多次试验表明该方法基体和熔覆层冶金结合可得到无裂纹的熔覆层^[4,5]。Jeshvaghani 等^[6]采用 TIG 方法来提高球墨铸铁的耐磨性,而且成本较低。

铜合金具有良好的耐蚀性、导热性及耐粘着磨损性,广泛应用于机械、矿山、石油化工等领域。然而,其比强度低于钢铁材料,价格也高于一般钢铁材料,并且在有些场合很难甚至无法满足工程实际的要求,往往需要材料结构兼有铜与钢的性能。在航空航天和兵器制造业领域^[7-10],便有了在钢基体表面堆敷铜合金层,在保证钢材性能的同时,兼有了铜的导电、导热性能。一般在堆焊过程中不仅要求堆焊层与基体实现冶金结合,有较高的结合强度,而且要求很低的稀释率^[11]。熔池的金属凝固过程对堆焊层的组织结构和机械性能具有至关重要的影响作用^[12]。该过程包括许多如传热、流体、化学反应等复杂现象。一些研究表明,熔覆层复杂的微观结构是提高耐磨性

和硬度的关键因素^[13]。因此有必要对熔覆层微观组织进行研究。本工作研究了堆焊工艺条件对接头微观组织形态和泛铁情况的影响,在试验确定的优化工艺条件下进行了堆焊,对堆焊层性能进行了研究。

1 试验材料及设备

试验材料为 Q235 钢板和 CuSi₃ 铜合金焊丝,两种材料的化学成分分别如表 1 和表 2 所示。钢板尺寸 400mm × 70mm × 3.8mm,焊丝直径为 0.8mm。焊接设备是由福尼斯 TT2200 型全数字直流 TIG 焊机、KD4010 送丝机、工业控制机和 XKA714B/1E 数控铣床等组装成的堆焊成型系统。

表 1 Q235 化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of Q235 steel(mass fraction/%)

C	Mn	Si	S	P	Fe
0.14 ~ 0.22	0.30 ~ 0.65	≤0.30	≤0.05	≤0.045	Bal.

表 2 CuSi₃ 化学成分(质量分数/%)

Table 2 Chemical composition of CuSi₃(mass fraction/%)

Si	Mn	Zn	Sn	Fe	Pb	Ni	Cu
2.7 ~ 3.5	1.0 ~ 1.5	<0.5	<0.25	~0.3	~0.03	<0.2	Bal.

2 堆焊工艺试验

堆焊工艺试验采用 TIG 焊,直流正接,焊缝长度 70mm。保持焊接电弧长约 4.5mm 不变;送丝角度为 20 ~ 30°,焊丝末端距工件高度为 1mm;钨极直径 2.4mm,尖端锥角约为 35°;保护气体为 99.99%

收稿日期:2013-06-14;修订日期:2013-11-25

基金项目:江西省青年科学家资助项目(2010DQ01000);江西省教育厅科技项目(GJJ13064)

作者简介:禹业晓(1990—),男,硕士研究生,(E-mail) hnyuyexiao@126.com

通讯作者:李玉龙,男,教授,(E-mail) liyulong1112ster@gmail.com。

的普通工业纯氩,气体流量为 10 ~ 15L/min。

堆焊前将待焊表面用砂纸进行手工逐级磨光,以去除试件表面的氧化膜和吸附层,然后用丙酮擦拭待焊试件表面,用热风吹干后即可进行堆焊试验。送丝速度为 100 ~ 130cm/min,堆焊速度为 90 ~ 140mm/min,堆焊电流为 70 ~ 130A。焊后将试件切割制样,用金相砂纸逐级磨光,然后用金刚石抛光剂进行抛光,抛光质量用显微镜放大 400 倍进行观察,满足要求后用 FeCl₃ 溶液进行腐蚀。制备好的金相样品在扫描电子显微镜上对铜、钢界面及铜层的泛铁情况进行观察,分析泛铁形态及分布。

图 1 是堆焊焊缝的宏观照片。在堆焊成形过程中出现黑色的小颗粒分布在焊缝周围,如图 1a 所示。为分析其产生原因,对小颗粒做 XRD 物相分析。结果如图 2 所示,焊缝小颗粒中存在 Cu, CuFeO₂, Fe₂O₃ 和 Fe₂SiO₄,由此可确定小颗粒是由未完全熔化的铜焊丝和母材 Q235 钢表面未清理掉的氧化物等杂质形成。结合图 3 中的结合界面可知,因为杂质的存在,结合界面处出现气孔。当加大母材基体表面的清理程度和增加焊接电流,成形效果明显改善,得到了成形良好的焊缝,如图 1b 所示,其中焊接电流、焊接速度、送丝速度分别为 90A, 130mm/min, 100cm/min。图 1c 是和图 1b 中相同焊接参数下的多道焊。

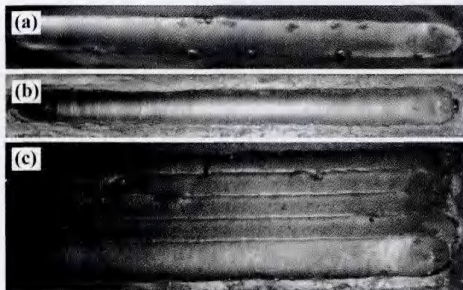


图 1 铜堆焊层焊缝

Fig. 1 The macro images of surfacing layer with copper

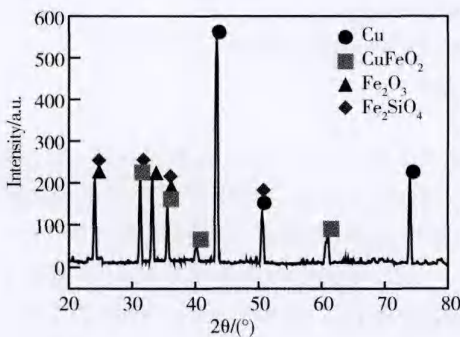


图 2 堆焊焊道表面颗粒的 XRD 结果

Fig. 2 XRD patterns of the particles on the welds

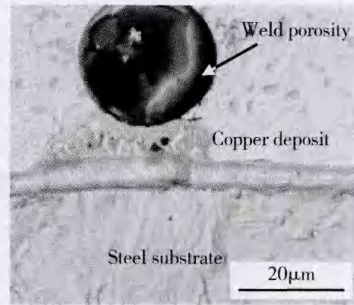


图 3 焊接缺陷

Fig. 3 The welding defects

3 试验结果及分析

观察分析焊缝成形发现铜与钢的焊接属于钎焊式接头,焊接过程钢基本没有熔化,连接界面平齐光滑,只有到电流大于 110A 时,钢基体出现部分熔化。若基体母材中的 Fe 元素过多进入熔覆层会改变熔覆层的组织、成分,从而影响熔覆层的性能,因此需要控制基体中的 Fe 元素扩散进入熔覆层的量。

3.1 焊接工艺对接头宏观形貌的影响

为了获得优质的堆焊接头,首先要确保液态铜合金在钢表面具有较好的润湿铺展性能。焊接热输入量对液态合金的铺展性能有很大影响。如图 4 所示(图片上部为铜堆焊层,下部为钢母材),在一定范围内,随焊接电流增大,熔覆层宽度显著增加。焊接过程 Q235 钢基本没有熔化,连接界面平齐光滑,只有当焊接电流大于 110A 时,钢基体出现局部熔化,在钢表面形成熔深。熔化的铜合金沿着基体表面进行铺展的同时,会有一部分填入钢基体的下凹部分,同时熔化的钢在电弧吹力、液态铜合金对流等力的作用下混入堆焊层,增加了堆焊层稀释率。图 4f 所示,焊接电流为 130A 时熔覆层中出现大量的 Fe 元素。而当焊接电流小于 80A 时,熔覆层稀释率很小,具有较好的力学性能,但熔覆层成形不好。合适的堆焊电流为 90 ~ 100A。

3.2 焊接工艺对结合界面及堆焊层的影响

图 5 是 Fe/Cu 界面和堆焊层在不同焊接电流下的组织照片。图 5a 是焊接电流为 70A 时的 Fe/Cu 结合界面,铜堆焊层和基体的结合界面平整,基体没有出现熔化,在堆焊层中没有发现泛铁相(铜与钢在高温下无限互溶,焊接过程,钢基体元素通过熔化进入液态铜合金中。当热输入过大时,钢基体大量熔化,在电弧力搅拌作用下与液态铜合金混合,冷却后残存在铜合金中以游离相形式存在,形成泛铁相)。

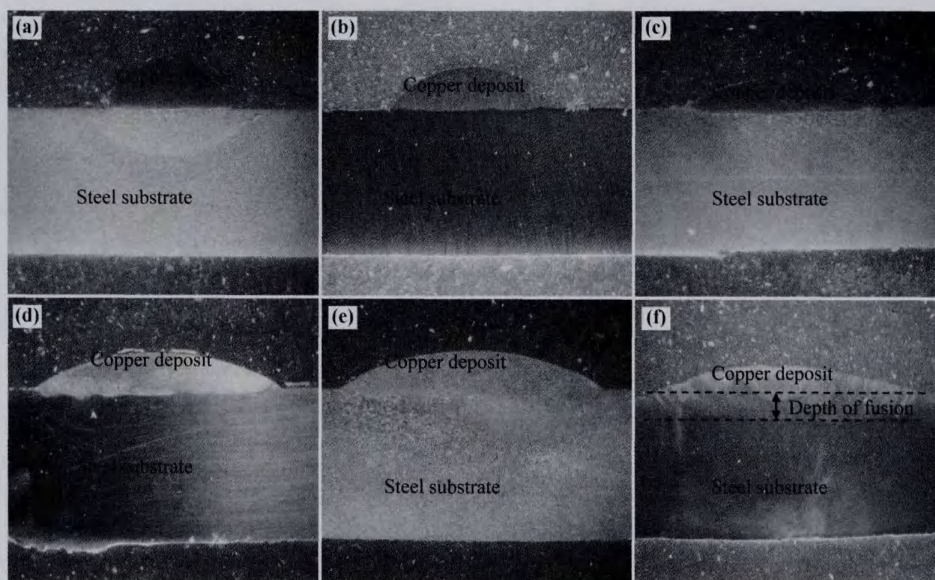


图 4 不同焊接参数下的堆焊接头截面形貌

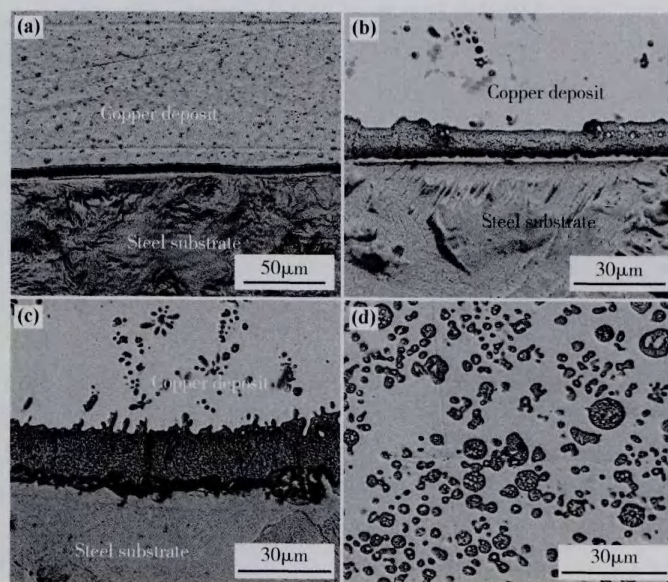
Fig. 4 Cross section of the joints welded with different parameters
(a)70A; (b)80A; (c)90A; (d)100A; (e)110A; (f)130A

图 5 不同焊接电流下的 Cu/Fe 界面微观组织

Fig. 5 Microstructure of the Cu/Fe interface acquired by different current
(a) 70A; (b) 90A; (c) 110A; (d) 110A

这种情况下,铁元素主要通过熔化扩散进入熔覆层,由于焊接热循环过程仅持续了几十秒钟,最后堆焊层中的 Fe 含量小于 2.0%。根据 Fe-Cu 相图,Fe 在固态铜中的溶解度没有达到饱和值,所以 Fe 溶质在铜堆焊层中主要以固溶体形式存在。当焊接电流增加到 90A 时,见图 5b,Fe/Cu 界面有所起伏,表面基体出现部分熔化,在铜堆焊层中出现少量以细小颗粒、树枝状分布的泛铁相,但树枝状 Fe 元素在整个铜

堆焊层中并不是均匀分布。这种情况下,因为基体的熔化,大量的 Fe 溶质会在堆焊过程中电弧力的搅拌作用下进入铜熔池,最终导致铜堆焊层中 Fe 含量的增加。一旦铜熔池中的铁含量达到 2%,室温下铁在铜中的临界饱和度,堆焊层凝固过程铜基体会局部析出铁素体树枝晶。这是因为在快速冷却情况下,Fe 元素来不及在整个铜熔池中均匀化造成的。当电流为 110A 时,如图 5c,基体熔化显著加深,铁溶质由基

体向熔覆层转移加剧。在堆敷合金一侧出现较多 Fe 元素,其形态发展为较大量圆球状和少量花瓣状(见图 5d),对应的铜堆焊层中的铁含量超过 10%。

图 6 是焊接电流为 110A 时 Fe/Cu 界面的元素线扫描结果,显示了从基体到堆焊层的元素分布。由图可以看出钢基体中几乎没有发现 Cu, Si 元素,而堆焊层中 Fe 元素分布发生起伏变化,出现不均匀泛铁现象,且泛铁程度较低。因热输入相对较小,液态界面结合层在高温停留时间很短,其中的 Fe, Cu 二种元素还未来得及充分混合温度便降到二者无法进行相互扩散的温度区间。界面结合层靠近铜侧,依靠溶解铜的方式与钢混合,所以含铜量相对较高,而界面靠近钢侧依靠扩散的方式获得铜,因此含铜量相对较低。值得注意的是在此条件下,铜堆焊层在 Fe 富集的球中出现了球状 Cu 富集相,这是一种二相分离现象。在这种堆焊电流情况下,基体熔化,在电弧搅拌作用下出现大量的铁熔滴进入铜熔池。Fe 在液态 Cu 中上浮,电弧压力及电弧搅拌作用较弱,铁基体在扩散过程中的表面自由能逐渐降低,结晶后易形成类球状泛铁形态。铜和铁在液态可以无限互溶,因此在铁熔滴溶解过程中,铜液体也溶解进入铁液滴中。同时因为热循环过程较短,相互溶解不能充分进行。结果,铁

熔滴随着铜熔池温度的下降而凝固,同时部分铜以超过铜在铁中溶解度的极限以不溶解原始的球状形态分散在凝固的铁熔滴中。故球状泛铁是富 Cu 相(浅色部分)和富 Fe 相(深色部分)组成的双相固溶体,其固溶体成分如图 7 所示。同时 Fe 在液态 Cu 中上浮时,随着电弧压力下降,泛铁在液态 Cu 中具有较好的流动性,球状双相固溶体便有足够的生长平台,在 Fe 元素向 Cu 扩散过程中,Fe 元素的流动性增强,在 Fe 元素上浮过程中,易于生长成花瓣状泛铁形态,成分如图 8 所示。



图 6 110A Cu/Fe 界面线扫描结果(焊接电流 110A)

Fig. 6 Line scanning results of Cu/Fe interface, (current 110A)

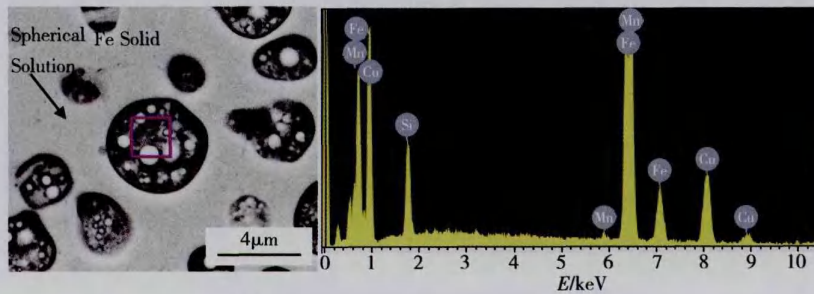


图 7 球状泛铁形态及能谱(焊接电流 110A)

Fig. 7 Morphology and EDS spectrum of the spherical Fe solid solution (current 110A)

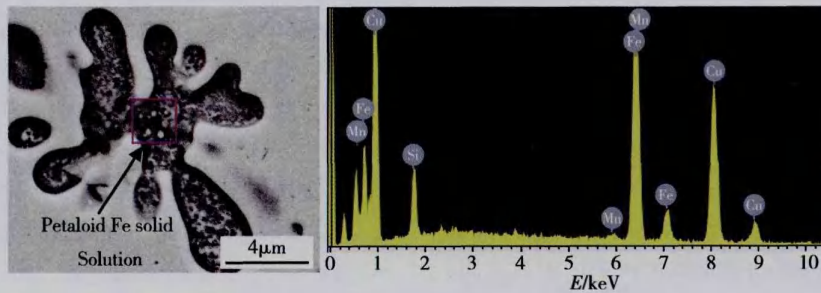


图 8 花瓣状泛铁形状及能谱(焊接电流 110A)

Fig. 8 Morphology and EDS spectrum of the petaloid Fe solid solution (current 110A)

当电流为 120A 时,泛铁程度进一步加强,此时堆焊层出现严重泛铁现象,接近 Fe/Cu 界面处堆焊层侧铜元素含量较少,反而铁元素含量较多,且在大电流大热输入下 Fe 分布较均匀。图 7 中 Fe/Cu 界面的元素线扫描结果也说明了这一点。此时堆焊层中出现了大量片状的泛铁,其能谱分析结果如图 10。同时铁铜结合界面中出现一未混合层(美国焊接学会称之为未混合层),对该混合层进行点扫描成分分析,结果如图 11 所示。

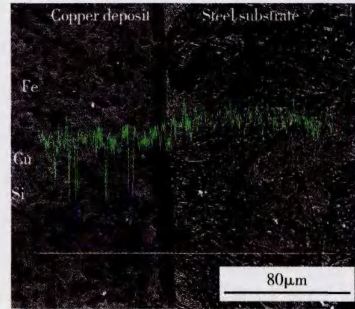


图 9 120A Cu/Fe 界面线扫描结果

Fig. 9 Line scanning results of Cu/Fe interface, welding current 120A

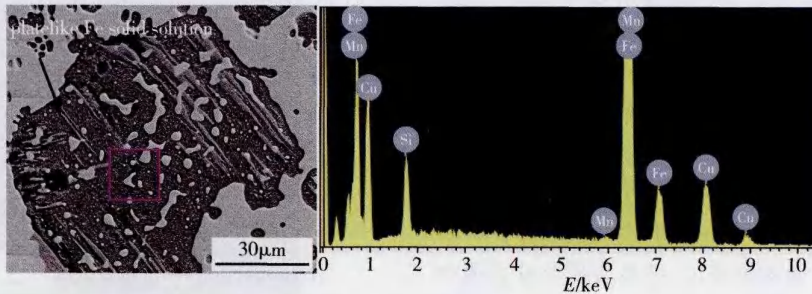


图 10 片状泛铁形状及能谱(焊接电流 120A)

Fig. 10 Morphology and EDS spectrum of the platelike Fe solid solution (current 120A)

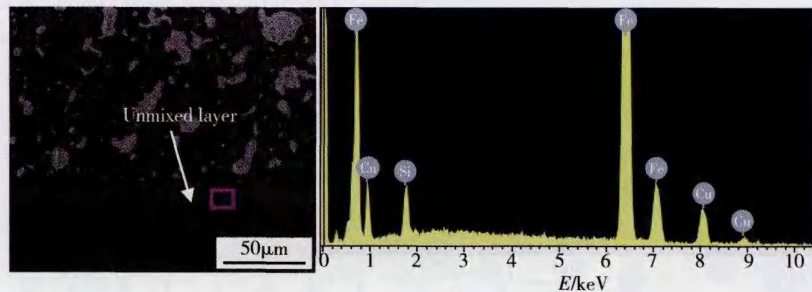


图 11 未混合层及能谱(焊接电流 120A)

Fig. 11 Morphology and EDS spectrum of the unmixed layer (current 120A)

3.3 焊接工艺对堆焊层力学性能的影响

图 12 是不同焊接热输入下的铜焊接界面各处的显微硬度分布,原点为焊缝中心位置。在相对较小热输入(324J/mm)下,最大硬度值只有 Hv 170,随着远离焊接界面,铜堆焊层的硬度降至 Hv 110,而且表现出一定的规律性。在这种情况下,基体几乎没有熔化,Fe 元素主要通过溶解、扩散至铜堆焊层,铁元素的含量和铁向铜堆焊层扩散的距离有限,也致使铜堆焊层具有相对较低的硬度;当焊接电流为 120A 时,铜堆焊层的硬度有显著增长但硬度数值分布很不均匀。在这种情况下,基体熔化,Fe 溶质扩散至铜堆焊层,并出现大量增长,使得结合界面

铜堆焊层侧硬度急剧增大。由此可见,堆焊层硬度具有很大的波动,主要取决于微观组织的均匀性和 Fe 元素的含量及分布。图 13 是铜堆焊接头的平均硬度随焊接热输入的变化曲线。平均显微硬度随焊接热输入的增加而增大,结合泛铁规律可知堆焊层的 Fe 含量越高,堆焊层的平均硬度越高,这也证实了堆焊层的硬度与泛铁程度紧密相关。

4 结论

(1) 利用 TIG 堆焊方法在 Q235 钢板表面熔覆铜。在合适的焊接工艺参数下熔覆层表面成形较好,

熔覆层与基体间实现冶金结合。随焊接热输入加大,熔覆层宽度增大,基体表面熔深增加,泛铁程度增大。

(2)对于堆焊层结合界面,热输入较小时,Fe 溶质主要以熔化扩散进入堆焊层。热输入较大时,堆焊过程中 Fe 溶质在电弧力搅拌作用下进入铜熔池,形成球状、树枝状、花瓣状富 Fe 相。当焊接电流达到 120A 时,堆焊层中出现大量的片状泛铁,并在铁铜结合界面中出现一未混合层。

(3)热输入较低时,堆焊层具有相对较低的硬度。当热输入较大时,铜堆焊层的硬度有显著增长,但因微观组织、Fe 元素的含量和分布不均匀使得硬度值分布也不均匀;堆焊层的平均硬度随焊接热输入增加而增大。

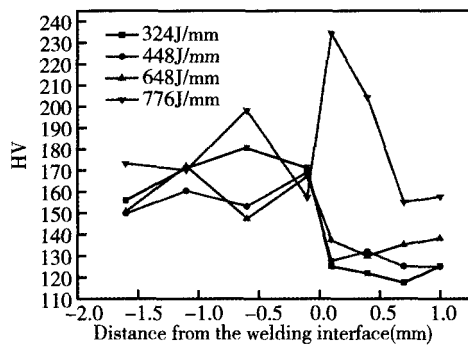


图 12 不同热输入下 Fe/Cu 沿焊缝界面硬度分布情况

Fig. 12 Distributions of the hardness across the Fe/Cu interface of the joint welded with different heat input

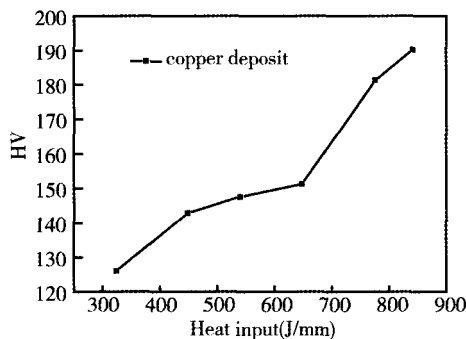


图 13 堆焊接头平均硬度随焊接热输入的变化

Fig. 13 The average hardness vs welding heat input

参考文献

[1] LIN Y C, CHEN H M, CHEN Y C. Analysis of microstructure and wear performance of SiC clad layer on SKD61 die steel after gas tungsten arc welding [J]. *Materials and Design*, 2013, 47: 828 - 835.

[2] SAHOO P, DAS S K. Tribology of electroless nickel coatings-a review [J]. *Materials and Design*, 2011, 32: 1760 - 1775.

[3] CUI C X, HU B M, ZHAO L C, *et al.* Titanium alloy production technology, market prospects and industry development [J]. *Materials and Design*, 2011, 32: 1684 - 1691.

[4] ABBOUD J H. Microstructure and erosion characteristic of nodular cast iron surface modified by tungsten inert gas [J]. *Materials and Design*, 2012, 35: 677 - 684.

[5] LIN Y C, CHO Y H. Elucidating the microstructural and tribological characteristics of NiCrAlCoCu and NiCrAlCoMo multicomponent alloy clad layers synthesized in situ [J]. *Surface & Coating Technology*, 2009, 203: 1694 - 1701.

[6] JESHVAGHANI R A, HARATI E, SHAMANIAN M. Effects of surface alloying on microstructure and wear behavior of ductile iron surface-modified with a nickel-based alloy using shielded metal arc welding [J]. *Materials and Design*, 2011, 32: 1531 - 1536.

[7] LV S X, XU Z W, WANG H T, *et al.* Investigation on TIG cladding of copper alloy on steel plate [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13(1): 10 - 16.

[8] GUPTA D, SHARMA A K. Development and microstructural characterization of microwave cladding on austenitic stainless steel [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 205: 5147 - 5155.

[9] 吕世雄,杨涛,黄永宪,等. 软铁弹带 TIG 堆焊工艺对比研究[J]. *兵工学报*, 2013, 34(1): 25 - 29.
(LV S X, YANG T, HUANG Y X, *et al.* Study of TIG cladding process for bullet's pure iron-rotating band [J]. *Acta Armamentaria*, 2013, 34(1): 25 - 29.)

[10] 吕世雄,杨士勤,王海涛,等. 堆焊铜合金/35CrMnSiA 接头的界面结构特征[J]. *焊接学报*, 2007, 28(2): 63 - 66.
(LV S X, YANG S Q, WANG H T, *et al.* Characteristic of interface microstructure in joint between copper alloy and 35CrMnSiA steel [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(2): 63 - 66.)

[11] 陈基明. 铜/钢热丝 TIG 堆焊工艺及接头组织分析 [D]. 哈尔滨工业大学, 2009.

[12] KHODAVERDIZADEH H, NIROUMAND B. Effects of applied pressure on microstructure and mechanical properties of squeeze cast ductile iron [J]. *Materials and Design*, 2011, 32: 4747 - 4755.

[13] GU D D, MEINERS W, WISSENBACH K, *et al.* Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms [J]. *International Materials Reviews*, 2012, 57: 133 - 164.

Microstructure and Mechanical Properties of Welding Joint of Cladding CuSi₃ on Q235 Steel substrate using TIG Method

YU Ye-xiao, LI Yu-long, XU Jian-ning, SUN Yu-jie

(Key Lab for Robot & Welding Automation, Mechanical & Electrical Engineering school of Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Surface cladding of copper on Q235 steel substrate was conducted by using a TIG deposition method. Microstructure characteristic of the cladding layer and the distribution regularity of the Fe in the deposited layer were investigated by using an optical microscopy and a scanning electron microscopy (SEM) installed with an energy dispersive spectrometer (EDS). The results show the dissolution of the steel substrate induces the formation of the Fe-rich phase according to the EDS analysis across the interface. The uniformity of microstructure and the distribution of Fe element have great influence on the hardness. The average microhardness of the deposited layer increases with the enhancing of the welding heat input.

Key words: Q235 steel; copper; TIG deposition; microstructure and property