

## 加热工艺对冷拔-钎焊不锈钢/碳钢复合钢筋界面性能的影响

高亚男<sup>1</sup> 鲍远通<sup>1</sup> 张全逾<sup>1</sup> 肖宏<sup>2</sup>

(1 承德石油高等专科学校汽车工程系,承德 067000;

2 燕山大学国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心,秦皇岛 066004)

**摘要**  $\Phi 22$  mm  $\times$  2 mm 304 不锈钢管-0.1 mm 铜箔- $\Phi 17.2$  mm Q195 钢筋经 10% 减径冷拔使 3 层金属紧密结合,再经 1 150 °C 加热钎焊得到不锈钢/碳钢复合钢筋。研究了 1 100 ~ 1 225 °C 保温 1 h 和 1 150 °C 的保温时间 (0.5 ~ 4 h) 对复合钢筋结合界面组织性能的影响。结果表明,1 150 °C 加热后钎焊金属界面强度最大为 296 MPa,铜箔作为钎焊层可以有效的实现不锈钢层和碳钢层的冶金结合;随 1 150 °C 保温时间增加,不锈钢和碳钢之间的元素扩散距离和浓度增加,保温 2 h,碳钢侧的 Fe 扩散到铜层约 80  $\mu\text{m}$ ,不锈钢侧的 Cr 和 Ni 扩散到碳钢内部约 60  $\mu\text{m}$ ,铜钎焊层出现含 Cr、Ni 的气泡状铁基固溶体并变大变多;界面区域的剪切强度和显微硬度随保温时间呈先增大后减小的趋势,保温 2 h 后达到最大值,分别为 301 MPa 和 HV423。

**关键词** 304 不锈钢-Q195 碳钢复合钢筋 冷拔 铜钎焊 1 150 °C 保温时间 剪切强度

## Effect of Heating Process on Interface Performance of Cold Drawing-Brazing Stainless Steel/Carbon Steel Cladding Bar

Gao Yanan<sup>1</sup>, Bao Yuantong<sup>1</sup>, Zhang Quanyu<sup>1</sup> and Xiao Hong<sup>2</sup>

(1 Department of Automotive Engineering, Chengde Petroleum College, Chengde 067000; 2 National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Rolling Strip, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

**Abstract** The  $\Phi 22$  mm  $\times$  2 mm 304 stainless steel tube-0.1 mm copper foil- $\Phi 17.2$  mm Q195 reinforce steel bar is cold-drawn by reduction 10% in diameter to make the 3 layer metal closed contact, than heated and brazed at 1 150 °C to get Stainless steel/carbon steel clad bar. The effect of heating temperature 1 100 ~ 1 225 °C for 1 h and holding time (0.5 ~ 4 h) at 1 150 °C on structure and performance of contacted interface of clad reinforce bar has been studied. Results show that the strength of brazing metal interface heated at 1 150 °C is maximum, i. e. 296 MPa, and the copper foil as a brazing layer is available to fulfill the metallurgical combination of stainless steel layer and carbon steel layer; with increasing holding time at 1 150 °C, the diffusion distance and concentration of elements between stainless steel and carbon steel increase, with holding for 2 h the Fe in carbon steel side diffuses into copper foil about 80  $\mu\text{m}$  and the Cr and Ni in stainless steel side diffuse into carbon steel about 60  $\mu\text{m}$ ; and the bubble type iron base solid solution containing Cr and Ni occurred in copper brazing layer becomes larger and increases; and with increasing holding time the shear strength and micro hardness of interface area are increase first and then decrease, and with holding for 2 h the shear strength and micro hardness are up to maximum and respectively 301 MPa and HV423.

**Material Index** 304 Stainless Steel-Q195 Carbon Steel Cladding Reinforce Bar, Cold Drawing, Copper Brazing, Holding Time at 1 150 °C, Shearing-Strength

不锈钢/碳钢复合钢筋是一种新兴的复合材料,拥有较好的耐腐蚀性、耐磨性,同时具有优良的综合机械性能,在腐蚀性高的海洋、化工等环境有很大应用前景<sup>[1-4]</sup>。目前常见的成形工艺有爆炸复合、拉拔复合、液压胀型复合、热轧复合、离心铸造复合以及新兴的反向凝固复合等工艺。爆炸复合<sup>[5]</sup>对于生产较长尺寸的复合钢筋具有一定难度且两金属间很难形成冶金结合。而拉拔以及液压胀形工艺<sup>[6-7]</sup>虽然可以实现规模化生产,但也很难实现冶金结合,这两种工艺制备的不锈钢/碳钢复合钢筋在变形过程中,金属间变形并不协调,机械性能不能充分发挥。对于热轧复合、离心铸造复合以及反向凝固复合<sup>[8-10]</sup>等方式可以使不锈钢与碳钢间形成良好的冶金结

合,但热轧生产的复合钢筋不锈钢壁厚不均匀,而另两种方式存在成形温度高,生产率低成本高的问题。钎焊是一种快速有效连接异种金属的方法<sup>[11]</sup>。

本文提出采用冷拔-钎焊制备不锈钢/碳钢复合钢筋的方法,实现不锈钢管与碳钢芯的快速结合,且具有较高的结合强度。

### 1 实验材料及方法

实验材料为直径 22 mm,壁厚 2 mm 的 304 不锈钢管,直径 17.2 mm 的 Q195 钢筋,纯度 99.9% 厚 0.1 mm 的铜箔(图 1),3 种材料的成分和性能见表 1。实验前对材料进行表面处理,将不锈钢管内壁以及碳钢的外表面用砂纸打磨,去除表面的锈蚀和污

物,对铜箔表面进行脱脂除油、除氧化层处理。

将铜箔卷在碳钢钢筋表面并穿入到不锈钢管中进行冷拉拔处理。未拉拔前,双金属之间约有 1 mm 的缝隙,里面存有较多的空气,当三金属坯料经过拉丝模时,空气被挤出,铜箔在巨大的挤压应力作用下变形,由于铜的塑性较好,作为钎

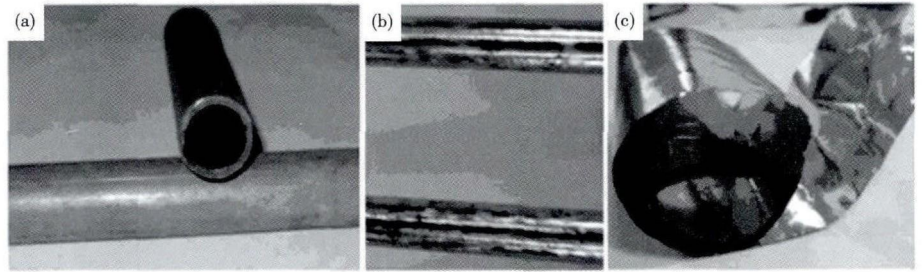


图 1 (a) Φ22 mm × 2 mm 不锈钢管;(b) Φ17.2 mm 碳钢芯和(c)0.1 mm 铜箔的形貌  
Fig. 1 Morphology of (a) Φ22 mm × 2 mm stainless steel tube; (b) Φ17.2 mm carbon steel core and (c) 0.1 mm copper foil

表 1 坯料材料成分及性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of cladding materials

实验材料	成分 / %						$\sigma_s /$ MPa	$\sigma_b /$ MPa
	Cu	C	Cr	Ni	Mn	Fe		
304	-	0.08	18 ~ 20	8 ~ 11	2	Ba.	206	520 ~ 700
Q195	-	0.06 ~ 0.12	-	-	0.25 ~ 0.50	Ba.	195	315 ~ 430
Cu	99.9	-	-	-	-	-	-	295

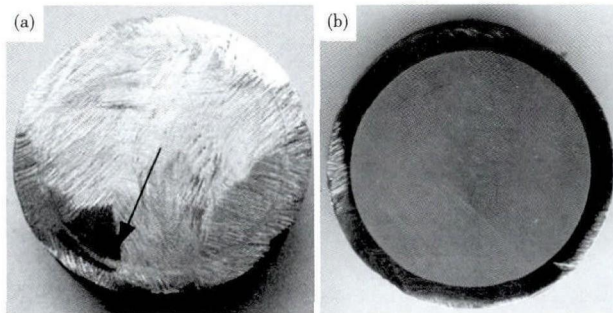


图 2 (a)冷拔后的包层钢筋不锈钢管(外层),铜层(箭头所指)和碳钢(芯)的断面;(b)1 150 °C 加热后复合钢筋的断面形貌

Fig. 2 (a) Cross section of stainless steel tube (out layer), copper layer (arrow pointing) and carbon steel (core) of cladding reinforce bar cold-drawn; (b) Morphology of cross section cladding reinforce bar heated at 1 150 °C

料通过拉拔工艺便填充到两金属之间并嵌入到不锈钢和碳钢的微观粗糙表面中,有利于两金属下一步的钎焊效果。图 2(a)为不锈钢/碳钢复合钢筋拉拔后坯料的横向断面,其外圆直径为 20mm,拉拔减径率 10%。可以清楚的看到不锈钢和碳钢中间存在一条薄薄的铜层(图示箭头所指处),分布均匀,3 层金属结合致密,宏观上未出现明显的孔洞与缝隙,说明拉拔的作用较好。

将拉拔后复合钢筋坯料两端焊封,加热钎焊。因纯铜的熔点为 1 080 °C,将复合钢筋坯料放入到马

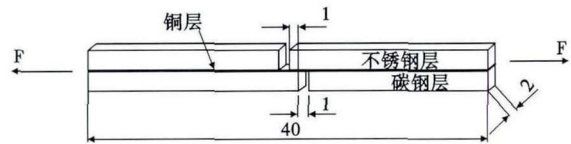


图 3 剪切试件制作示意图

Fig. 3 Schematics of manufacture of shearing test piece

弗炉中加热到 1 100 °C 以上保温复合。

钎焊后,采用测试不锈钢和碳钢间剪切应力来衡量复合钢筋的结合强度。沿复合钢筋轴向切割下如图 3 的试件,使用电子万能试验机进行拉伸测试。通过已知搭接区的面积 2 mm<sup>2</sup> 以及测量试件拉伸时的最大载荷,计算出钎焊界面处的剪切强度来评价两种金属钎焊复合的效果。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 钎焊后的状态

图 2(b)为钎焊后不锈钢/碳钢复合钢筋横向断面的照片。铜中间层仍清晰可见,分布均匀,未出现因铜加热熔化而向某一区域集中流动现象。

### 2.2 加热温度的影响

由图 4 可以看出,在相同的 1 h 保温时间下,金属间的剪切强度呈先增大后减小的规律,且在 1 150 °C 下剪切强度达到最大值 296 MPa,与文献[11]结论相近。可知加热温度对钎焊效果影响很大,加热温度升高一方面提高了液态铜的浸润效果,使铜与两金属充分接触,另一方面加热温度影响着金属间元素的扩散。在扩散过程中,扩散元素的浓度随时间和扩散系数而变化,在一维非稳态扩散时,FICK 第二定律的表达式为:
$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中:c- 扩散物质的体积浓度;t- 扩散时间;x- 扩散距离;D- 元素的扩散系数。

当扩散时间 t 一定时,元素沿扩散方向上的浓

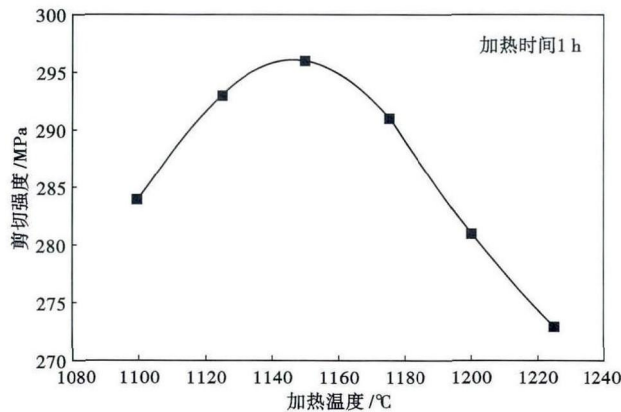


图4 加热温度对钎焊后不锈钢/碳钢复合钢筋界面剪切强度的影响

Fig. 4 Effect of heating temperature on interfacial shear strength of brazed stainless steel/carbon steel cladding bar

度与元素的扩散系数  $D$  成正比。其中:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中:  $D_0$ - 频率因子;  $Q$ - 扩散活化能。可知, 扩散系数与温度  $T$  呈指数变化关系。

当温度过高, 母材奥氏体晶粒变得粗大、脆化, 严重降低结合区的复合强度。从图4可以看出加热温度高于1 150 °C后, 金属间的剪切强度迅速下降, 1 225 °C时剪切强度降到273 MPa。此外, 当加热温度高于1 200 °C后, 304 不锈钢表面会出现严重的氧化层, 既损失材料又影响表面质量。因此不锈钢/碳钢纯铜钎焊的最佳温度应在1 150 °C左右。

### 2.3 界面分析

图5为冷拔钎焊后不同保温时间, 两金属与铜层结合面附近的金相照片, 未被腐蚀的一侧为不锈钢层, 被腐蚀的一侧为碳钢, 中间为铜层。由图5(a)可以看到(箭头所指), 拉拔后, 铜与两金属的结合已经很紧密, 但仔细观察界面上仍存在结合缝隙和微小孔洞。

加热后, 铜被熔化, 液态铜钎料表面张力很小, 有利于改善母材的润湿性, 铜液很容易填充到不锈钢/碳钢

的界面缝隙, 并与两基材进行液固相扩散, 使不锈钢与碳钢结合在一起。由图5(b)所示的A、B处可以发现加热保温0.5 h后, 不锈钢/铜、碳钢/铜的结合界面呈现出连续、完整、致密的状态, 未见孔洞和微小缝隙。

保温0.5 h后, 不锈钢与铜的接触面[图5(b)箭头A处]变得尤为清晰明显, 已经没有最初的接触缝隙、孔洞, 铜与碳钢的原始接触痕迹已经分辨不清, 并且碳钢侧出现一定宽度的未被腐蚀的区域, 同时铜基体中出现了气泡状组织(箭头C、D所指之处), 看起来像由碳钢侧向不锈钢侧扩散。

随着钎焊保温时间的延长, 碳钢侧未腐蚀区域的宽度增加, 气泡状组织分布量增多, 并向不锈钢侧扩展, 如图5(c)。当保温时间为2 h时, 气泡组织已经基本上均分布于整个铜层之中, 如图5(d)所示。由图5(e)、(f)可见, 随着时间进一步增加, 这些气泡状组织的体积逐渐增加, 长大相连, 并贯穿整个铜层内。

### 2.4 元素扩散分析

由图6可以清晰看到, Ni、Fe、Cr等金属元素都发生了扩散转移, 说明3种金属间已经形成冶金扩散结合。Fe、Cr、Ni元素的扩散距离随保温时间的延长而增加, 并且较为明显, 保温0.5 h, 碳钢侧存在15 μm范围内的Fe元素扩散到铜层的中间位置约50 μm, 使Fe元素浓度下降, 而不锈钢侧的Cr、Ni已

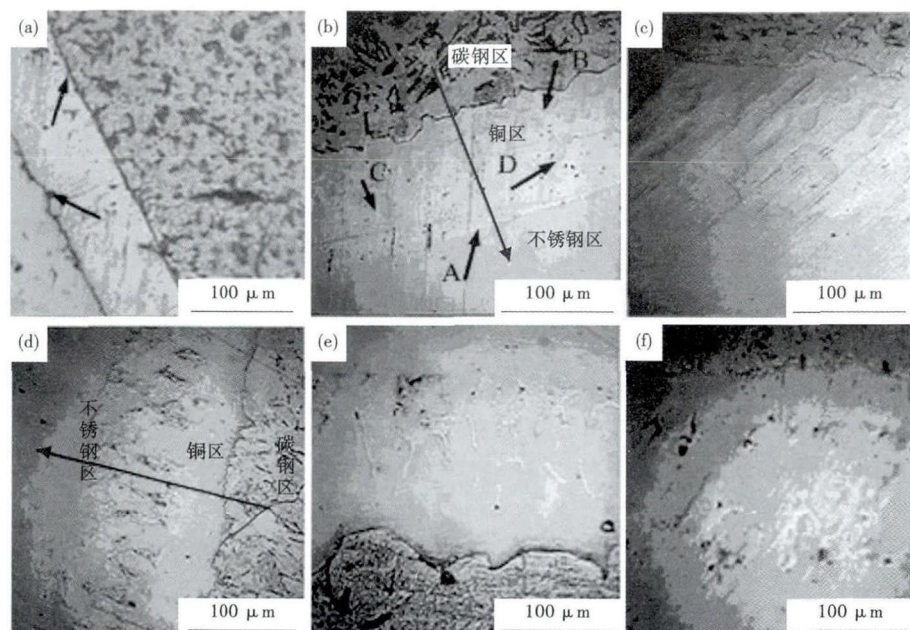


图5 1 050 °C加热(a)0 h;(b)0.5 h;(c)1 h;(d)2 h;(e)3 h;(f)4 h的不锈钢/碳钢复合钢筋界面的组织形貌

Fig. 5 Morphology of interface structure of stainless steel/carbon steel cladding reinforce bar heated at 1 150 °C for 0 h (a), 0.5 h(b), 1 h(c), 2 h(d), 3 h(e) and 4 h(f)

经贯穿铜层扩散到了碳钢基体内 15 μm 的范围[线扫描路径见图 5(b)]。保温 2 h 后,Fe 元素扩散约 80 μm,Cr、Ni 元素从不锈钢侧扩散进碳钢 60 μm[线扫描路径见图 5(d)]。

Cu 元素向两侧的扩散不明显,由于钎焊温度下铜基本处于液态,两侧碳钢、不锈钢处于固态,液态金属中的扩散系数比固态中大几个数量级<sup>[12]</sup>,固态金属向液态金属中扩散容易,所以看到 Cu 向两侧不锈钢、碳钢中的扩散不如两侧金属在液态铜中明显。由元素分布规律可知,碳钢侧未腐蚀区域的主要元素为 Fe、Cr、Ni,因此判定该区域形貌是由于这几种合金元素从不锈钢侧扩散过来导致,该区域铁基体已具有不锈钢的性质。

同时,几种元素在铜钎焊层中的分布波动非常大,判定与气泡状组织的存在有关。通过元素沿界面横向分布的趋势可以发现,Cu 元素与 Fe、Ni、Cr 这 3 种元素不同时出现,主要含铜元素的区域,Fe、Cr、Ni 基本不存在,而这 3 种元素存在的区域 Cu 元素又极少。

复合钢筋在钎焊加热后,铜钎料熔化,根据 FICK 第二定律,碳钢与不锈钢基材上的 Fe、Cr、Ni 向液态铜层扩散,并向两侧固态基材中渗透。随着元素的扩散,铜液中这些元素的浓度增加,当达到一定的程度后,即发生等温凝固。图 6 发现,含 Fe、Cr、Ni 元素的位置基本不存在 Cu 元素,因此可断定气泡状组织为铁基固溶体,且未被硝酸酒精腐蚀。

这些气泡状铁基固溶体的量与 Fe、Cr、Ni 等合金元素向铜液中扩散的多少有关,这与扩散时间密切相关。铁基固溶体的主要元素为 Fe,在碳钢侧附近的 Fe 元素含量最多,因此,扩散过去的 Cr、Ni 首先在碳钢侧形成带状固溶体,从而看起来气泡状组织是从碳钢侧飘出。

### 2.5 显微硬度分析

利用显微硬度计对保温 0.5、2、3 h 下的不锈钢/碳钢钎焊复合钢筋的界面进行了显微硬度测定。由图 7 可以看到,随着保温时间增加,1 号位置不锈钢基体和 5 号位置的碳钢基体的显微硬度变化不大,为两金属自身显微硬度值,分别维持在 240 HV 和 150 HV 左右。最高值出现在碳钢侧未被腐蚀的区域,随保温时间增加而增加,2 h 达到最大值 423 HV,

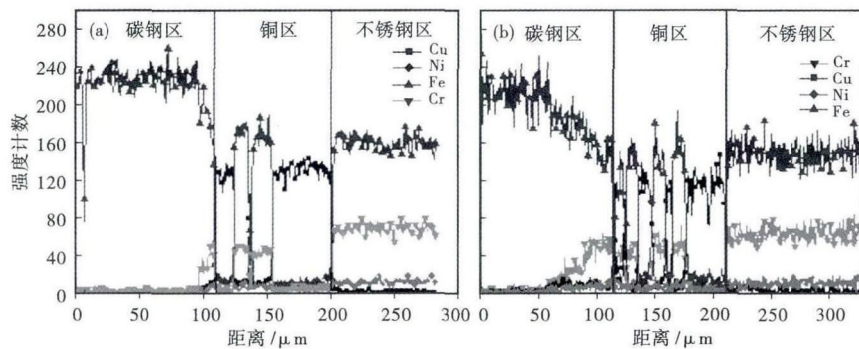


图 6 1 050 °C 加热 0.5 h(a) 和 2 h(b) 的不锈钢/碳钢复合钢筋界面金属元素线扫描谱线

Fig. 6 Scan spectrum line of metal elements in interface of stainless steel/carbon steel cladding reinforce bar heated at 1 050 °C for 0.5 h (a) and 2 h (b)

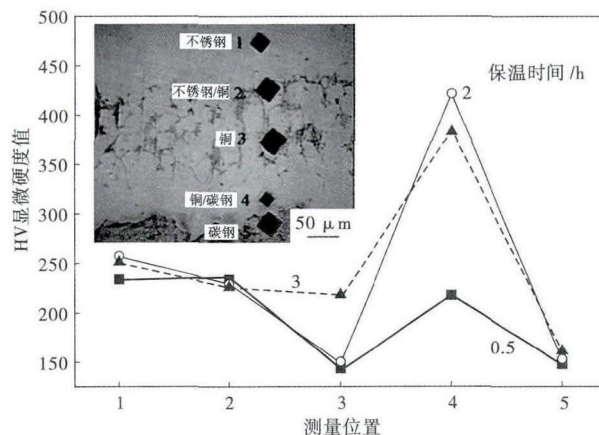


图 7 不锈钢/碳钢复合钢筋界面附近显微硬度分布

Fig. 7 Distribution of microhardness in near interface area of stainless steel/carbon steel cladding reinforce bar

而保温 3 h 后其值略有降低。中间铜层 3 号位置的显微硬度最低,但随保温时间延长增加。而不锈钢与铜接触面的附近,由于合金元素的流失,显微硬度呈下降趋势。

中间铜层显微硬度的提高,与铁基固溶体的出现及分布量有着密切关系。气泡状铁基固溶体具有较高的硬度,随钎焊保温时间的增加,元素扩散越多,固溶强化越强,并且扩散距离越远,气泡状组织在铜中所占体积分数越多,中间层的硬度就会越高,保温 3 h 显微硬度为 219 HV。

### 2.6 复合强度分析

图 8 为两金属剪切强度的分布规律。可以看到不同保温时间,结合面处的剪切强度都高于 250 MPa,保温 0.5 h,剪切强度为 273 MPa,之后,随保温时间的增加剪切强度增加,在 2 h 达到最大值为 301 MPa,但之后随保温时间增加剪切强度迅速降低,保温 3 h,剪切强度降到 258 MPa。

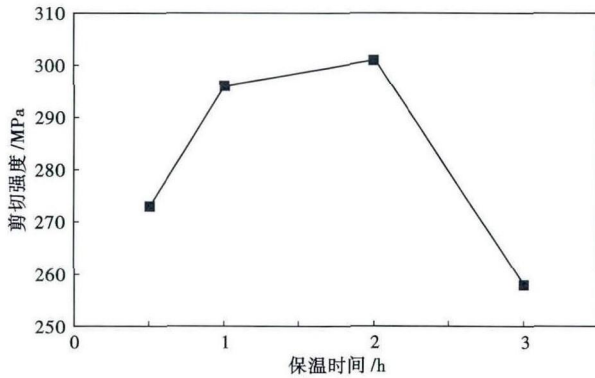


图 8 1 050 °C 保温时间对不锈钢/碳钢复合钢筋界面剪切强度的影响

Fig. 8 Effect of holding time at 1 150 °C on shear strength of interface of stainless steel/carbon steel cladding reinforce bar

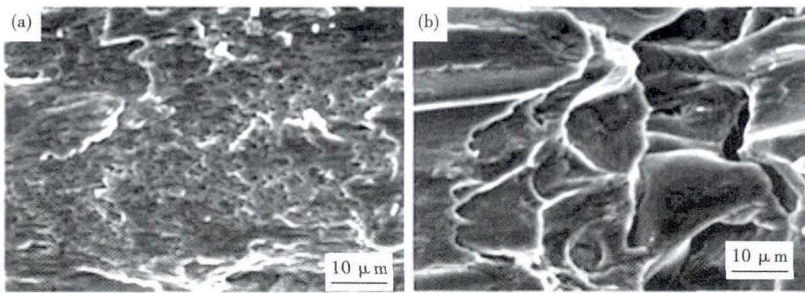


图 9 1 150 °C 加热 0.5 h(a) 和 2 h(b) 不锈钢/碳钢复合钢筋剪切断裂面的形貌, SEM

Fig. 9 Morphology of shear fracture of stainless steel/carbon steel cladding reinforce bar heated at 1 150 °C for 0.5 h (a) and 2 h (b), SEM

通过复合钢筋实验分析,两金属铜钎焊的强度与铜中出现的铁基固溶体的量有关。保温时间较短时,铜基体中出现的气泡状固溶组织很少,剪切强度主要由铜起作用。当保温时间延长后,气泡组织增多,这时界面的剪切强度得到气泡状组织强化的作

用而提高。由图 9 可以看出保温 0.5 h 和 2 h,试件剪切撕裂面的 SEM 微观形貌具有很大差别。保温 0.5 h,撕裂面较为平滑,无韧窝出现,而加热 2 h 后,撕裂面粗糙,成类似韧窝状。图 9(b) 所示,韧窝的宽度大约 20 μm,与图 5(d) 气泡状组织尺寸相近,在剪切过程中,铜中较硬的气泡状固溶体阻碍金属变形而从铜的剪切面上划犁产生。

### 3 结论

(1) 采用冷拔-钎焊的工艺制备不锈钢/碳钢复合钢筋,不锈钢、铜、碳钢 3 层金属分布均匀,无缝隙、孔洞出现,不锈钢/铜、碳钢/铜之间发生了冶金扩散结合。

(2) 随加热温度升高,金属间的结合强度呈先增大后减小趋势,且在 1 150 °C 达到最大值。

(3) 在 1 150 °C 下随保温时间延长,元素的扩散距离增加,保温 2 h 后,Fe 元素在 Cu 层扩散约 80 μm, Cr、Ni 元素从不锈钢侧扩散进碳钢约 60 μm,而随扩散元素浓度提高,铜钎焊层中出现了气泡状的铁基固溶体。

(4) 两金属间冶金结合的剪切强度及钎焊层的显微硬度随保温时间延长而变化。钎焊保温 2h 后,两金属的结合强度和显微硬度值达到最大,分别为 301 MPa 和 423 HV。

国家自然科学基金项目(51075353);承德市科技计划项目(201601A088)资助

### 参考文献

- [1] 陶杰,赵玉涛,潘蕾,等.金属基复合材料制备新技术导论[M].北京:化工工业出版社,2007:51-56.
- [2] Szota P, Dyja H. Numerical Modelling of the Bimetallic Reinforcement Bar Rolling Process[J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007, 25(1): 55-58.
- [3] 高亚男,张艳菊,郝瑞朝,等.推/张力轧制不锈钢/碳钢复合钢筋的有限元模拟与实验研究[J].特殊钢,2013, 34(04): 5-9.
- [4] 高亚男,谢红斌,肖宏,等.不锈钢/碳钢包层钢筋轧制模拟分析与试验研究[J].钢铁,2011,46(11): 56-60.
- [5] Dyja H, Mroz S, Stradomski Z. Properties of Joint in the Bimetallic Rods Cu-Al and Cu-Steel after Explosive Cladding and the Process of Rolling[J]. METALURGIJA, 2003, 42(3): 185-191.
- [6] Wu C W, Hsu R Q. Extrusion Analysis and Workability Prediction of Three-Layer Composite Hexagonal Clad Rods[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174(1/3): 312-317.
- [7] 刘晓斌,冷枝,姜金彪.液压胀型法双金属复合海管生产质量控制[J].中国造船,2014, 55(2): 477-482.
- [8] 谢红斌,高亚男,王涛,等.多道次热轧对包层钢筋性能及结合面的影响[J].金属学报,2011, 47(12): 1513-1519.
- [9] 吴轩,胡建华,高歌.离心铸造双金属管复合界面的研究[J].热加工工艺,2015, 44(23): 95-97, 100.
- [10] Zhu Z, Xiao J, He W, et al. A Phase-Inversion Casting Process for Preparation of Tubular Porous Alumina Ceramic Membranes[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35(11): 3187-3194.
- [11] 常德功,吕明利,于宁宁.紫铜钎料钎焊 08 钢工艺参数的选择[J].焊接,2009(1): 57-60, 72.
- [12] 李东刚.利用慢中子散射测量液态金属扩散系数[C]//第三届散裂中子源多学科应用研讨会论文集.北京:中国科学院物理研究所,2006.

高亚男(1982-),男,博士,工程师,2005年河北理工大学(本科)毕业,金属变形过程的计算机模拟/层状复合材料成形的研究。E-mail: llover@163.com

张全逾(1980-),男,副教授,河北工业大学机械工程专业硕士研究生毕业。

收稿日期:2016-08-30