

激光熔覆不锈钢-碳钢层合板的材料性能

高美娜 王续跃 徐文骥 郭东明

大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024

摘要 采用激光熔覆工艺将不锈钢粉末熔覆在碳板上,制备不锈钢-碳钢层合板。通过金属材料性能检测试验,对不锈钢-碳钢层合板的金相组织、元素扩散、显微硬度及拉伸断口形貌等性能进行分析。结果表明,激光熔覆制备层合板获得了致密均匀的覆层;结合面两侧Fe、Cr、Ni等元素呈梯度扩散,扩散区域约为12 μm ,表明激光熔覆复合材料为扩散型冶金结合;覆层到基体硬度逐渐减小,这使覆层与基体之间应力平稳过渡,提升了其整体力学性能;其屈服强度为405 MPa,超过轧制层合板的326 MPa。基体和扩散区断口形貌为韧性断裂,而覆层表现为脆性断裂,进一步表明激光熔覆层合板结合面结合性能良好。

关键词 激光熔覆;层合板;金相组织;结合面;元素扩散;断口形貌

中图分类号 TN249;TG113 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.071603

Material Performance of Laser Cladding Stainless Steel-Carbon Steel Laminated Plates

Gao Meina Wang Xuyue Xu Wenji Guo Dongming

School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract Laser cladding is introduced as a process for preparing stainless steel-carbon steel metal laminated plates by cladding stainless steel powder on the carbon steel plate. The material properties, such as microstructure element diffusion, micro hardness and tensile fracture morphology, are analyzed through the metal material performance tests. The results show that laser cladding preparation of laminated plates can obtain dense and uniform layer; elements of Fe, Cr, Ni, et al. have a gradient diffusion around the combined surface and the diffusion region is about 12 μm , which indicates that combination of different materials by laser cladding belongs to metallurgical diffusion; micro hardness decreases from cladding layer to matrix, which makes a smooth stress transition between cladding layer and matrix, then enhance its overall mechanical properties; the yielded strength reaches 405 MPa and exceeds that of rolling laminated plates (326 MPa). Fracture morphology of matrix and diffusion zone belongs to ductile fracture and cladding layer is brittle fracture, further show that the interface of laser cladding laminated plates has a good combination performance.

Key words laser cladding; laminated plates; microstructure; interface; element diffusion; fracture morphology

OCIS codes 140.3430; 160.3900; 160.3380

1 引言

不锈钢-碳钢层合板是以不锈钢为复层和以碳钢为基层、通过特定的方式结合的一个整体。这种层合板能够充分发挥不锈钢的耐腐蚀、耐磨、耐热等性能,同时又能兼具碳钢的强度、加工性、焊接性等优点,是一种多功能材料。此外,由于该产品可以减少2/3以上Cr、Ni等贵金属的消耗,具有巨大的社会效益,并且在保持各自特性以及满足使用要求的前提下,降低了生产成本,因而被广泛应用于船舶舱壁件、石油化工中塔式真空罐、热交换器、制作真空制盐的主体设备——蒸发器、水利建设中制作排沙钢管管衬及埋件、

收稿日期: 2014-03-03; 收到修改稿日期: 2014-03-13; 网络出版日期: 2014-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(51375073, 50975041)

作者简介: 高美娜(1986—),女,硕士研究生,主要从事激光熔覆方面的研究。E-mail: 1842219026@qq.com

导师简介: 王续跃(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事精密与特种加工等方面的研究。

E-mail: wbzzd@dlut.edu.c(通信联系人)

城市照明灯杆、体育馆的建筑管件结构以及日常生活用品中厨房用具等诸多领域^[1]。

在不锈钢复合板的生产技术及工业应用中,如何将宏观的力学分析与微观的组织结构分析结合起来已成为层合板研究的一个重要方向。结合面区域宏观形貌、微观组织对于层合板性能起到至关重要的作用。而复合材料的结合面是指两相之间化学成分有显著变化的、构成彼此结合的、能起载荷传递作用的微小区域。显微组织决定其力学性能,只有将微观与宏观紧密地联系起来,才能更深入地了解层合板的特性。爆炸焊接炸药高速喷射在金属界面的碰撞过程中,金属板内部点受到非常高的压力,造成相当大的局部塑性变形而形成界面冶金结合。但在爆炸复合过程中,晶体塑性变形及物理性能差异导致应力集中、界面有杂质和孔洞等裂纹源,力学性能以及耐蚀性能明显下降,界面性能弱化^[2-3]。冷轧复合时由于塑性变形而产生的机械嵌合,会产生微裂纹,其粘结强度很低,加上金属原子偏离平衡位置而形成残余应力^[4]。热轧层合板的热处理消除了轧制过程中所产生的加工硬化,提高了塑韧性,有效促进了金属间元素的扩散,其结合强度随热处理温度及时间的增加而提高。但过度扩散会使大量合金碳化物及脆性相生成,结合强度降低^[5]。文献[6]中碳钢基板上通过使用激光熔覆不锈钢粉末实现了复层和基底之间良好地熔接,熔覆层的显微组织主要由细密无缺陷的外延柱状枝晶构成,因晶粒细化使拉伸强度、显微硬度相比于基板有了很大的提高。文献[7]采用大功率二极管激光器和侧向送粉喷嘴熔覆多层不锈钢,分析了输入参数对材料的微观结构、尺寸和表面性能的影响。文献[8-10]研究了激光熔覆过程中,工艺参数对修复形状精度以及微观组织的影响。

国内外产业化的层合板复合工艺已比较成熟,目前对金属层状复合材料的研究偏重于其复合过程、复合机理的定性解释以及工艺对其微观组织、结合强度以及界面的影响。而显微组织决定其材料性能,因此为深入揭示层合板的材料特性,需要将微观的组织结构分析与宏观的力学分析结合起来。本文以激光熔覆制备的不锈钢-碳钢层合板为背景,其界面属于异种钢结合区,从而确保界面能够形成冶金结合以及合金元素分布均匀过渡;通过对层合板的显微硬度梯度分布以及拉伸断口形貌进行分析,保证不锈钢层合板既满足力学性能要求又满足耐磨耐腐蚀性能的重要指标;通过对显微组织特征和性能进行深入分析,揭示其组织形成机理、微观组织结构与宏观力学性质,对于激光熔覆制备层合板的广泛应用具有一定的指导意义。

2 基本原理和试验条件

采用激光熔覆同步送粉,在碳钢基板上熔覆不锈钢粉末。在激光加热辐照作用下,粉末与基体间进行融合扩散,最终获得一定厚度的不锈钢覆层,覆层厚度可通过调整激光工艺参数来实现。试验用基板为该校工程训练中心提供的Q235A碳钢,其化学成分如表1所示,尺寸为60 mm×40 mm×1.5 mm,复层材料为泰州市环宇冶金耐磨材料厂生产的304不锈钢粉末,粒度大小为45~90 μm,其化学成分如表2所示。激光熔覆前需要将基板待复合面进行预处理来获得新鲜加工表面,并将粉末干燥以提高粉末流动性。不锈钢复合钢板力学性能标准要求如表3所示。在GB/T 8165-2008《不锈钢复合钢板和钢带》标准中,层合板总公称厚度为0.8~6 mm,如表4所示。采用JK1002型连续Nd:YAG固体激光器,氩气作为保护气体,优化后工艺参数为:激光功率550 W,扫描速度400 mm/min,搭接率0.3,送粉量2 g/min,载粉气体压力和保护气体流量分别保持在稳定值0.2 MPa和5 L/min。

表1 Q235A钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Q235A steel (mass fraction, %)

Elements	C	Mn	Si	S	P	Cr、Ni、Cu
Content	0.14 ~ 0.22	0.30 ~ 0.65	≤0.30	≤0.05	≤0.045	≤0.03

表2 304不锈钢粉末的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of 304 stainless steel powder (mass fraction, %)

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Content	≤0.07	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.03	17.00 ~ 19.00	8.00 ~ 11.00

表3 不锈钢层合板力学性能标准

Table 3 Mechanical properties standard of stainless steel laminated plates

	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation %	Coating thickness/mm
standard values	235	370	20	>0.16

表4 不锈钢层合板的厚度规格

Table 4 Thickness specification for stainless steel laminated plates

Total nominal thickness of laminates/mm	Layer thickness of not less than /mm
0.8	0.09
1.0	0.12
1.2	0.14
1.5	0.16
2.0	0.18
2.5	0.22
3.0	0.25
3.5~6	0.30

激光熔覆处理后的样品经抛光、腐蚀后在20~1000倍的共聚焦MEF4型光学显微镜下观察微观组织形貌;由于基复材料属于不同钢种,需分别采用硝酸乙醇和王水腐蚀液来腐蚀碳钢和不锈钢;利用EMPA-1600电子探针对不锈钢层合板的界面微小区域成分进行定量分析;利用努氏硬度测试仪测量沿截面深度方向的显微硬度;在DNS100电子万能试验机上对层合板进行拉伸实验,以及利用扫描电子显微镜(SEM)观察分析其拉伸后断口形貌的显微组织。

3 试验结果与分析

3.1 不锈钢-碳钢层合板金相组织分析

3.1.1 基体碳钢金相组织

层合板宏观形貌如图1(a)所示,可以看出熔覆层与碳钢基体在激光能量模式作用下的组织形态。通过作用得到熔覆层与基体的紧密结合层,其厚度为0.24 mm。结合面呈波形,其受拉时波状区域通过产生挤压力来抑制拉伸方向的作用力,从而使分离困难,并提高层合板的界面强度^[11]。而基体上层部分由于激光热作用形成一定深度热的影响区域,随着与熔覆层距离的增加,加热温度逐渐降低,进而形成相变区和原始基体组织共存的具有梯度变化的微观组织。相变区组织形态如图1(b)所示。基体热影响区均为淬火组织,表明在激光加热过程中热影响区的温度超过了基体材料的相变点,由于冷却速度极快,形成马氏体组织,即靠近熔池的基体被加热到基体碳钢发生相变的温度临界点(Ac1)以上奥氏体化后,再经快速冷却转变为马氏体。同时发现搭接处的组织较细小,因为激光熔覆的二次作用,搭接处的组织重新形核,所以较其他区域组织均匀且更加细小,由此多道搭接熔覆的组织呈现出一种周期性的变化。基体在激光熔覆过程中,因快速加热和快速冷却,发生了相变硬化,细化了晶粒和显微组织结构,产生的马氏体组织较均匀,位错密度高,提高了基体的力学性能,有利于硬度增加以及耐磨性增强。由于基体Q235碳钢的导热系数很大,且原始基体远离溶池而无激光加热作用,故无相变产生,其典型轧制组织形态如图1(c)所示,主要由大量铁素体与极少量珠光体组成。

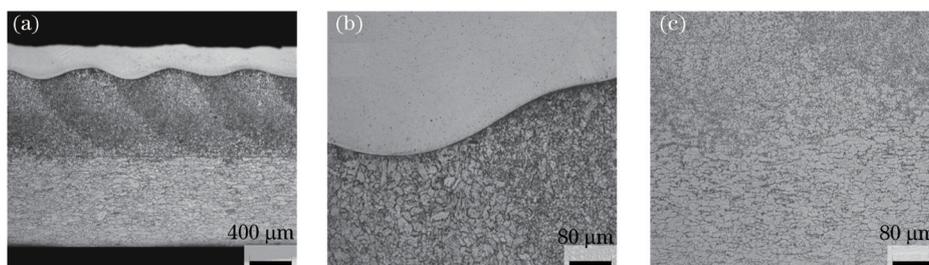


图1 层合板金相组织。(a) 宏观形貌; (b) 结合面近碳钢侧马氏体组织; (c) 基层碳钢铁素体与珠光体组织

Fig.1 Microstructure of laminated plate. (a) Macro morphology; (b) martensite structure; (c) ferrite and pearlite structure

3.1.2 覆层不锈钢金相组织

熔覆层金相组织如图2所示,激光熔覆层与基材之间存在一条白亮的结合带,其宽度在4~6 μm之间。结合带是熔融的基材表层与覆层合金液相互扩散而成的,即为熔合带。而结合带宽度越小,说明结合面的

熔化量越小,结合质量越好。结合带内部存在着很大的成分梯度,一方面是由于高能密度快速熔化与凝固致使扩散时间极短,因此限定在靠近基体的很小范围内。另一方面,这种浓度梯度在结晶过程中会进一步增大。熔覆层的显微组织形态取决于熔覆合金的成分和凝固时的冷却条件^[12]。根据快速凝固理论,快速凝固形成的组织形态主要取决于温度梯度 G 和凝固速率 R ,尤其是取决于二者的比值,即参数 G/R 。凝固刚开始时,由于熔液与基体保持紧密接触,基体本身是冷却源,基体与界面处熔液的凝固速率几乎为零,此时 G/R 值非常高,在液固界面处生长速度最小,难以造成成分过冷,这些是促使结合带平面生长的原因。但随着液固界面向熔液内部的推进和传热传质,凝固速率快速增加,温度梯度降低,此时 G/R 值降低,生长速度亦随之加快,其前沿富集的溶质元素逐渐增多,最终因成分过冷而导致结晶形态向柱状晶和树枝晶转变。

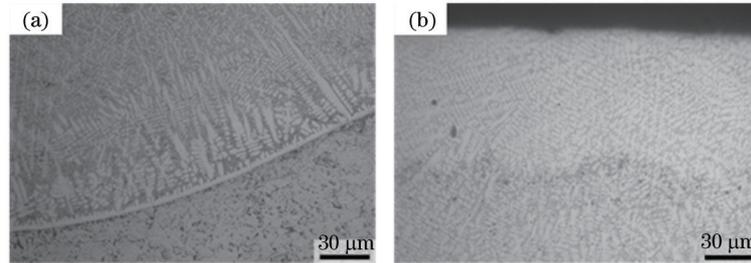


图2 熔覆层金相组织。(a) 覆层底部和中部;(b) 覆层顶部

Fig.2 Microstructure of cladding layer. (a) Bottom and middle; (b) top

由于激光熔覆快速加热和快速凝固的特点,熔覆层由大量的树枝晶和少量胞状晶组成,内部组织整体比较致密均匀、无夹杂物、气孔、裂纹等缺陷。胞状晶与树枝晶的生长均倾向于垂直于结合面,这与热量的散失主要通过基体以及垂直于结合界面方向的温度梯度和热流密度最大有关。凝固过程自底部开始向熔池顶部进行,凝固过程中液态金属始终与固态基体保持接触,并且由于基体冷却作用,热量沿着垂直于基体的方向散失最快,因此温度梯度在垂直于基体方向最大,而在平行于基体方向,温度梯度则很小,可以忽略,所以激光熔覆时液态金属在冷却凝固过程中具有方向性,即不锈钢熔覆层形成方向性明显的枝晶组织。

通过实验还观察到,接近熔覆层顶部出现组织稍细且取向改变的枝晶层,如图2(b)所示。因为在激光熔池的顶面,热流方向将会由熔池底部的垂直方向改变为趋于与扫描方向平行,而此处熔覆层热量的散失主要通过周围环境即表层的大气进行,沿固液界面的温度梯度减小,同时保护气体的高速流动引起的对流散热作用明显,熔覆层在对流散热和已凝固合金热传导的双重作用下,产生了取向改变的细小晶粒,激光熔覆层晶粒细化能提高耐磨性。这是因为细化晶粒,亚晶界增多,强度和硬度升高。强度和硬度的提高对提高耐磨性是有利的。另外,细化晶粒还可以提高滑移形变抗力,抑制循环滑移带的形成和开裂,增加裂纹扩展的晶界阻力,这也是激光熔覆层具有较高硬度和耐磨性的原因。

3.2 不锈钢-碳钢层合板的元素分布分析

元素的宏观分布是影响层合板结合性能的重要指标,其决定了激光熔覆合金各组成元素的冶金过程。为了深入理解激光熔覆过程宏观元素的分布特征,采用电子探针 EMPA-1600 对未腐蚀的层合板在深度方向的宏观元素分布进行检测,绘制 Fe、Cr 和 Ni 元素分布曲线,结果如图 3 所示。从分析结果可以看出,金属元素宏观分布在深度方向上发生了偏析现象,即不锈钢与碳钢中合金元素发生了互扩散,不锈钢中 Cr、Ni 元素越过原始界面向碳钢基体扩散,碳钢中 Fe 元素越过原始界面向不锈钢覆层扩散,在界面附近形成一个互扩散区。同时根据成分曲线的变化,可以看出其扩散过程是连续变化的,表明不锈钢-碳钢层合板在界面区域形成了冶金结合过渡区,即 304/Q235 层合板的复材/基材呈扩散型冶金结合。

激光熔覆时,由于结合面两侧合金元素存在浓度梯度,必将发生扩散。Fe 元素相对计数强度由碳钢 2200 通过结合界面过渡到不锈钢 1300, Cr 从 0 过渡到 500, Ni 从 0 过渡到 200。Fe、Cr、Ni 原子半径相接近,其扩散方式均为置换扩散,因此推测它们在结合界面附近的扩散范围应该相近。从图 3 中可知,结合面附近 Fe、Cr、Ni 等合金元素的扩散范围差别不大,扩散区域约为 12 μm 。20 世纪 70 年代, H.O. 卡扎柯夫提出了金属结合的扩散理论,该理论从金属学角度对异种金属界面结合进行了解释,认为在实现金属结合的变形过程中,由于变形热作用使金属接触区温度升高,从而金属原子受到激活,在结合面附近形成一个很薄的互扩

散区而实现了金属之间的结合。扩散使两金属原子相互作用的机会增加,促进两种金属之间结合,即有利于结合面的冶金结合,对提高层合板的结合强度具有很大作用,从而使金属间结合面性能提高。

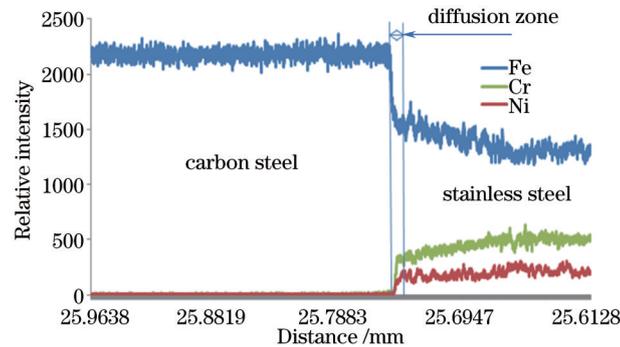


图3 层和板元素电子探针显微分析线扫描

Fig.3 EPMA line scanning of laminated plate element

3.3 不锈钢-碳钢层合板的显微硬度分析

深度方向的显微硬度分布曲线如图4(a)所示;层合板的硬度分布分为明显的四个区域:熔覆层、扩散区、热影响区和基体,如图4(b)所示。覆层到基体的显微硬度逐渐减小,没有发生突变,这就使金属覆层与基体之间的应力平稳过渡,降低了覆层失效的趋势;并且硬度在很大程度上与耐磨性有一定正比关系,所以这样的硬度分布特征为熔覆层具有较高的耐磨性提供了保证。熔覆层硬度值在729~839 HK范围内变化,热影响区硬度范围为260~720 Hk,基体硬度约为220 Hk。熔覆层的显微硬度远高于基体,为基体的3.3~3.8倍。这是因为不锈钢粉末中含有大量的合金元素,激光熔覆过程属于快速凝固,铁基固溶体中由于固溶了大量的Cr、Ni、Mn、Si等元素而处于一种过饱和状态,因此固溶强化显著,凝固结晶速度快,组织得到细化,细小的枝晶结构使得显微硬度和耐磨性远高于基体^[7]。靠近基体的部分由于受到激光热作用而形成一定深度的热影响区域,其显微硬度约为原始基体的2倍。这是因为该部分区域由于受到热传导作用相当于进行了热处理而发生了相变,导致其组织细化,即热影响区被加热到临界温度以上再经快速冷却得到马氏体组织,从而提高了热影响区硬度。

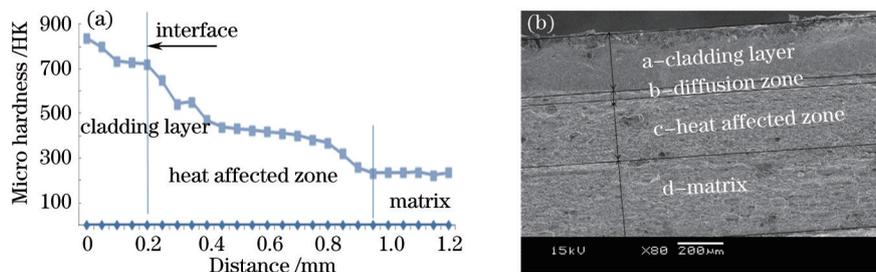


图4 深度方向显微硬度分布。(a) 硬度分布曲线;(b) 硬度分布区域

Fig.4 Micro hardness distribution of depth. (a) Hardness distribution curve; (b) hardness distribution zone

熔覆层顶部的硬度稍高,这与熔覆层顶部熔化较快及凝固速度有关,与上述熔覆层顶部较细的树枝晶组织相呼应。熔覆层中晶体的形态、固溶体的分布区域均影响硬度分布的均匀性。而这种硬度连续的分布状态对于熔覆层的性能是有利的。首先,较高的硬度区域保证了熔覆层的耐磨性能;其次,熔覆层稍高的硬度区域以及热影响区硬度稍高于基体的区域形成了硬度分布过渡区,使得熔覆层与基体实现了均匀过渡,这对整体性能的提升是有利的。最后,由于熔覆层内部有较高的内应力,但通过这个硬度分布过渡区可以减少熔覆层的内应力,为高硬度区域提供了有力的支撑,同时有利于增强熔覆层与基体的结合,这都为层合板界面具有良好性能提供了保证。

3.4 不锈钢-碳钢层合板的断口形貌分析

根据 GB/T 228-2008 标准对复合钢板进行拉伸试验。激光熔覆法制备的单层和双层不锈钢-碳钢层合板的拉伸力学性能试验结果如表5所示。可以看到,其屈服强度高于层合板中两种基复材料的值,抗拉强度介于两种材料之间,在理想复合条件范围之内,即不同金属组合的复合界面的拉伸强度要比两组复合材料

中较弱的高。从表中可知试验结果均大于标准规定值(标准值:屈服强度大于 235 MPa,抗拉强度大于 370 MPa,延伸率大于 20%),说明该层合板具有较高的屈服强度和抗拉强度,延伸率略低与熔覆道之间的搭接效应有关,机械性能的提高主要是由于晶粒细化的结果^[13]。这表明采用激光熔覆的方法实现了碳钢和不锈钢的高强度复合。

表5 层合板拉伸试验结果

Table 5 Tensile test results of laminated plates

	Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation %	Coating thickness /mm
Q235 plates	235	235	20	—
Single cladding laminate	410	405	21.5	0.24
Double cladding laminate	395	375	20	0.40

层合板拉断后试样整体宏观形貌如图 4(b)所示,其各个区域断口形貌如图 5 所示,熔覆层中部区试样拉伸断裂后形貌示于图 5(a)。从图中可以看出,熔覆层的断裂形貌呈现出明显的脆性断裂特征,覆层断口比较平坦且断口处存在着清晰可见的晶粒界面,可以确定覆层的断裂主要沿着晶界进行。不锈钢激光熔覆层虽然已经达到很高的致密度并具有一定的力学强度,但是由于沿垂直于界面方向形成大量树枝晶,枝晶在外拉伸力的作用下晶粒受到严重变形拉长,裂纹易于在覆层的空隙处形核,随着拉伸力的增大裂纹将沿着这些薄弱的晶粒界面进行扩展,最后导致覆层断裂并显示为脆性材料特征;图 5(b)为层合板扩散区域断口形貌,由于激光熔覆快速加热使得凝固过程产生了元素扩散现象,破坏了基材原有的固溶效果,最终在断面处存在少量尺寸大小不一的韧窝,表明所获得的扩散区域具有较好的塑性;图 5(c)为基层侧受热影响区域的断口形貌,激光即热作用导致晶粒的细化使得单位面积上晶粒数量增多,最终在断面处表现为较大密度且不规则分布的显微空孔,从而可推断试样在断裂前经历了大量的塑性形变,故其在拉伸过程中表现出较大的屈服强度,这与拉伸试验结果相吻合;图 5(d)为基层侧断口形貌,可以看出,断口表面含有较多的等轴状韧窝,韧窝的尺寸较小且分布均匀,表明基材断裂过程表现为塑性断裂,而且断裂过程中材料受力较为均匀。

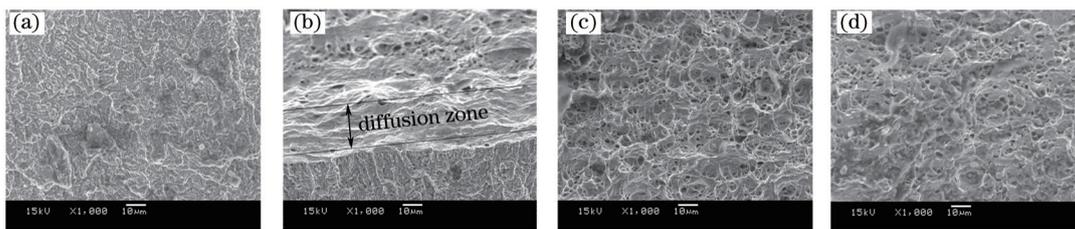


图5 层合板拉伸断口形貌。(a) 熔覆层;(b) 扩散区;(c) 热影响区;(d) 基体

Fig.5 Fracture morphology. (a) Cladding layer; (b) diffusion zone; (c) heat affected zone; (d) matrix

文献[4]报道,在冷喷涂制备 304 不锈钢复合板的研究中,不锈钢涂层组织由大量的扁平状粒子搭接构成,断裂发生在粒子间的界面位置且为脆性断裂特征,通过采用后续热处理方法对涂层组织与性能进行优化,使涂层在拉伸断裂过程中的断裂形式由脆性断裂转变为塑性断裂;文献[14]对热轧不锈钢板拉伸试样的脆性解理断口的观察分析表明,钢板的轧向显微组织分布不均匀,中间部分为占很大比例的粗大且较长晶粒,而在浅表层分布着占很小的一部分的细晶粒。由于大晶粒的塑性较差,从而导致钢板的整体性能下降。从以上分析中可以发现,若要提高 304 不锈钢覆层自身的力学性能就必须使覆层中的弱结合晶界面变强。而使覆层达到较高的强度与塑性等性能可以通过覆层后续热处理方法来实现。通过热处理时金属粉末原子间的扩散、物质迁移流动等综合作用,使覆层组织转变为细小且均匀分布的等轴晶,促使粒子间结合力进一步增强,同时也促使覆层与基体间结合力进一步提高。

4 结 论

通过本文研究工作得到,激光熔覆制备不锈钢-碳钢层合板的材料性能优于轧制同类层合板,主要研究结果如下:

1) 采用激光熔覆工艺制备出了结合性能良好的不锈钢-碳钢层合板。因垂直于结合界面方向温度梯度最大,故冷却凝固后覆层胞状晶与树枝晶生长均倾向于垂直结合面。覆层顶部晶粒比覆层中部更加细化,亚

晶界增多,提高滑移形变抗力,抑制循环滑移带形成和开裂,增加裂纹扩展晶界阻力,有助于提升覆层硬度。

2) 不锈钢中Cr、Ni元素越过界面向碳钢基体扩散,碳钢中Fe元素越过界面向不锈钢覆层扩散,扩散区域约为12 μm 且扩散过程是连续变化,表明层合板基复材之间存在均匀过渡区且为扩散型冶金结合。

3) 熔覆层硬度值在729~839 HK范围内变化,热影响区硬度为260~720 HK,基体硬度约为220 HK。熔覆层显微硬度值为基体的3.3~3.8倍,覆层到基体硬度逐渐减小,这使覆层与基体之间应力平稳过渡。熔覆层内部较高内应力通过硬度分布过渡区逐渐减少,有利于增强覆层与基体结合,增强了层合板结合面性能。

4) 层合板屈服强度为405 MPa,远超过标准规定的值(235 MPa),同时也超过轧制法制备的层合板屈服强度(326 MPa)。基体和扩散区域断口形貌为韧性断裂,而覆层表现为脆性断裂,进一步表明激光熔覆层合板结合面结合性能良好。

参考文献

- 1 Wang Lixin, Li Guoping. Interface structure, performance analysis and application of exploded stainless and carbon steel clad plates[J]. *Iron and Steel*, 2005, 40(11): 71-74.
王立新, 李国平. 爆破不锈钢复合板界面组织和性能分析及应用[J]. *钢铁*, 2005, 40(11): 71-74.
- 2 Findik F. Recent developments in explosive welding[J]. *Materials and Design*, 2011, 32(3): 1081-1093.
- 3 Kacar R, Acarer M. Microstructure-property relationship in explosively welded duplex stainless steel-steel[J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, 363(1-2): 290-296.
- 4 Meng Xianming, Zhang Junbao, Wei Han, *et al.* Fracture behavior of cold sprayed 304 stainless steel coating during cold rolling[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2012, 19(11): 57-63.
- 5 Kurt B, Calik A. Interface structure of diffusion bonded duplex stainless steel and medium carbon steel couple[J]. *Materials Characterization*, 2009, 60(9): 1035-1040.
- 6 Jianli Song, Qilin Deng, Changyuan Chen, *et al.* Rebuilding of metal components with laser cladding forming[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(22): 7934-7940.
- 7 Pinkerton A J, Li L. Multiple-layer cladding of stainless steel using a high-powered diode laser: an experimental investigation of the process characteristics and material properties[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 453-454(4): 471-476.
- 8 Peng Xu, Cheng Xin Lin, De Ping Sun. The effort scanning velocity on AISI 304 stainless steel laser cladding coatings [J]. *Advanced Materials Research Vols*, 2012, 591-593: 1098-1101.
- 9 Jagdheesh R, Kamachi Mudali U, Sastikumar D, *et al.* Laser cladding of Si on austenitic stainless steel[J]. *Surface Engineering*, 2005, 21(2): 113-118.
- 10 Edoardo Capello, Barbara Previtali. The influence of operator skills, process parameters and materials on clad shape in repair using laser cladding by wire[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 174(1-3): 223-232.
- 11 Gao Meina, Wang Xuyue, Xu Wenji, *et al.* Experimental study on the stainless-carbon steel laminated plates prepared by laser cladding[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 021403.
高美娜, 王续跃, 徐文骥, 等. 不锈钢-碳钢层合板激光熔覆制备方法试验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 021403.
- 12 Feng Liping, Huang Weidong, Li Yanmin, *et al.* Influences of crystal orientation of substrate on microstructure of multi-layer laser cladding[J]. *Chinese J Lasers*, 2001, A28(10): 949-952.
冯莉萍, 黄卫东, 李延民, 等. 基材晶体取向对激光多层涂覆微观组织的影响[J]. *中国激光*, 2001, A28(10): 949-952.
- 13 G K Lewis, E Schlienger. Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition[J]. *Materials and Design*, 2000, 21: 417-423.
- 14 Wu Yiwen, Hua Yi, Chu Min. Analysis on abnormality of tensile strength of imported hot rolled stainless steel[J]. *Physics Examination and Testing*, 2007, 25(1): 52-53.
吴益文, 华沂, 初敏. 进口热轧不锈钢板性能异常原因分析[J]. *物理测试*, 2007, 25(1): 52-53.