

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.4153

镶铸法加消失模铸造制备破碎机锤头工艺研究

范兴平^{1,2}, 范 维¹

(1. 攀枝花学院 四川 攀枝花 617000 2. 钒钛资源综合利用四川省重点实验室 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 为进一步提高破碎机使用寿命,降低生产成本,采用镶铸法+消失模铸造技术制备破碎机锤头,并对镶铸试样进行组织分析和微观形貌、硬度等检测,研究镶铸界面结合形态及结构特征,讨论了水韧处理对锤头硬度变化的影响。结果表明,经水韧处理后的复合锤头,其表面无孔洞、粘砂,ZGMn13 基体与镶柱之间出现 Mn、Ti 等元素的相互扩散,形成了良好的冶金结合。从基体到镶柱,洛氏硬度由 24.9 HRC 提高到 60.8 HRC,可以满足生产使用要求。

关键词: TiC 钢结硬质合金;消失模铸造;镶铸;复合锤头;冶金结合

中图分类号: TG249.9; TG135

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)02-0212-07

Research on the Process of Preparing Crusher Hammer Heads by Inlay Casting and Expendable Pattern Casting

FAN Xingping^{1,2}, FAN Wei¹

(1. Panzhihua University, Panzhihua 617000, China; 2. Vanadium and Titanium Resource Comprehensive Utilization Key Laboratory of Sichuan Province, Panzhihua 617000, China)

Abstract: To further improve the service life of a crusher and reduce its production cost, a crusher hammer head was prepared via the inlay casting method and lost foam casting technology, and microstructure, microstructure, hardness and other tests were carried out on inlay casting samples. The morphology and structural characteristics of the inlay casting interface were studied, and the influence of water toughening treatment on the hardness change of the hammer head was discussed. As a result, the composite hammer head after water toughening treatment has no pores or sand stuck to its surface. There is mutual diffusion of elements such as Mn and Ti between the ZGMn13 matrix and the embedded column, resulting in good metallurgical bonding. The Rockwell hardness from the substrate to the embedded column increases from 24.9 HRC to 60.8 HRC, which meets the production and usage requirements.

Key words: TiC steel-bonded cemented carbide; lost foam casting; insert casting; composite hammer head; metallurgical bonding

破碎机锤头是矿山机械行业中重要的易磨损零件,需随时更换,在我国水泥机械行业中,每年锤头的破损都要消耗数万吨的金属材料。目前,水泥行业使用的破碎机锤头主要有复合和镶铸两种类型,其中镶铸类使用高锰钢作为锤体,TiC 基高锰钢结合金作为打击面镶嵌块,以此强化耐磨性能,提高使用寿命^[1]。据调查,用于岩金矿的一个高锰钢(ZGMn13)锤头的使用寿命大约是 10~12 h,而用普通低合金铸钢生产的锤头,其使用寿命则更低,只有 6~8 h,因此需要通过增强工作面硬度来提高锤头的耐磨性^[2]。为进一步降低成本,双金属耐磨材料复合

工件成了研究热点,该复合方式综合了两种金属材料的优点,能够提升材料性能并实现完美匹配,在冶金、矿山等工业领域得到了广泛应用。制备双金属耐磨材料复合工件的常见铸造方法有铸渗法、镶铸法和双液双金属法^[3]。其中镶铸法是通过高温金属母液凝固的余热使镶柱与母液间形成良好的冶金结合^[4]。镶柱可根据复合工件的不同使用要求,选择使用不同形状、厚度和材质的镶块;镶铸件表面质量较容易控制,工艺简便,不需要增加新设备;在普通铸造条件下就能够实现生产,成本大大减少。我国在镶铸方面的研究和应用取得了一定成果^[5-7]。通过镶铸可以

收稿日期: 2024-08-15

基金项目: 攀枝花学院校级培育类科研项目(2023PY15)

作者简介: 范兴平,1979 年生,博士,教授。研究方向为金属表面改性及耐磨材料。Email: fanxingping123@163.com

引用格式: 范兴平,范维. 镶铸法加消失模铸造制备破碎机锤头工艺研究[J]. 铸造技术,2026,47(2): 212-218.

FAN X P, FAN W. Research on the process of preparing crusher hammer heads by inlay casting and expendable pattern casting[J].

Foundry Technology, 2026, 47(2): 212-218.

制备如锤头等耐磨产品,铸钢/高铬铸铁和高锰钢/低合金钢复合锤头在实际生产中取得了良好效果,使用寿命分别比单一高锰钢锤头和低合金锤头提高 3~4 倍,然而这一技术的关键是进行抗磨体形状、尺寸及其合理布局 and 数量设计,目前这些设计原则还不明确,有待深入研究^[8]。

此外,在镶铸相关研究中,消失模铸造因能简化复杂镶铸成型,实现多材质结合,提升构件整体性而广受关注,优点有:①铸件质量良好,成本低,不限材质,大小均可;②铸件尺寸精度高,表面平整光洁,内部缺陷降低,组织均匀致密,并且可以实现大规模、大批量生产。采用自动化流水线,可以改善生产环境、降低风险,稳定生产、减少能源消耗^[9]。消失模铸造厂的工程设计也在不断优化完善,以适应国内环保、安全、绿色、节能的发展理念^[10]。为了响应国家环保政策,消失模铸造技术在铸造行业中也得到很快发展^[11-13]。

然而,镶铸工艺关键在于两种金属的界面融合优劣和结合强度的高低^[14]。在实际生产中仍然存在许多问题,如界面夹渣、气孔、未熔合、结合区强度差等。其中,母材与镶柱性能之间的匹配尤为重要,为满足破碎机锤头工作所需的韧性与硬度要求,需对母材及耐磨镶柱进行慎重筛选。高锰钢有比较高的机械强度,也有很好的韧性,在未进行任何处理时,其组织中含有大量碳化物,从而导致其脆性较大,需要进行水韧处理后才可直接使用,硬度才会得到提高。高锰钢中 Mn 元素的含量最高,既能扩展又能稳定 γ 相区,因此高锰钢材料经水韧处理后的组织为单相奥氏体,韧性较好。而 TiC 钢结硬质合金是以钢为黏结剂、TiC 为硬质相的复合材料,既有硬质合金的高硬度、耐磨性和高强度,又具有钢的可加工性、可热处理性、可锻性和可焊接性^[15],更重要的是, TiC 钢结硬质合金在耐磨领域中更具应用潜力,被广泛用于锤式破碎机锤头,是矿山、水泥、建筑行业中不可缺少的破碎工具材料之一。将钢结合金棒镶嵌在高锰钢锤头易损部位,是为了大大提高破碎锤头的使用寿命,提高工作效率。再与 YG 合金棒(钨钴硬质合金)相比,钢结硬质合金棒成本低,更耐磨,同时与高锰钢相结合发挥作用更大,故选择以 TiC 钢结硬质合金为镶柱。

本研究采用镶铸法结合消失模铸造技术,以高锰钢为母液,选择低成本高性能 TiC 钢结硬质合金作为耐磨材料制备破碎机复合锤头,探索其制备工艺,研究镶铸界面结合的形态及结构特征及热处理后锤头的硬度,为镶铸法制备破碎机锤头提供参考。

1 实验材料与方法

1.1 镶铸用硬质合金柱的选择

镶柱的选择主要是其材质与尺寸的选择,首先要求金属柱与本体材料能较好地形成冶金结合,热膨胀系数与金属母液相近;其次,材料应具有较高的硬度,以便镶铸后提高锤头的耐磨性;最后,镶铸后锤头进行热处理时基体与镶柱之间不开裂。根据上述要求,最终选择 GT35 钢结硬质合金柱来制作镶铸锤头,尺寸为 $\phi 12\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,成分见表 1。为方便镶柱在型腔中的固定,将其一端与铁钉相连,见图 1。

表1 GT35镶柱成分

Tab.1 Chemical composition of the GT35 embedded column

(mass fraction/%)					
Component	TiC	C	Cr	Mo	Fe
Content	35	0.5	2.0	2.0	Bal.



图1 GT35 钢结硬质合金柱宏观形貌

Fig.1 Macroscopic morphology of the GT35 steel-bonded cemented carbide column

1.2 镶铸锤头铸造工艺

根据木头模样用 CAD 绘制二维图,如图 2 所示。根据图纸尺寸对泡塑板材(EPS 材质)进行锤头制模,用泡沫切割机切割模样,如果外观出现珠子掉落、拉毛及波状的孔洞和凹凸表面等,通过填充、修补让锤头外观变得平整光洁,然后对其进行干燥,烘干模样中的水分。将制作好的模样运输至涂料间进行第 1 次浸刷涂料,烘干 24 h。由于高锰钢呈弱碱性,锆英粉呈弱酸性,而镁砂粉呈弱碱性,与高锰钢不发生反应,因此选用镁砂粉作为涂料进行浸刷。将模样运输至烘干室进行二次烘干,烘干时间为 24 h,烘房温度 50~55 $^{\circ}\text{C}$ 。当涂层厚度达到 1.5~2.5 mm 后则涂刷完成,对其进行最后修补,并将 TiC 钢结硬质合金放在模样工作面中,如图 3 所示。

将一种特殊的隔层砂箱置于振实设备平台上,在砂箱底部装入 100 mm 厚的底砂(底砂是干石英砂,粒径为 20 目左右),然后打开振动装置把干石英砂振实,刮平表面。将做好的锤头放在砂箱底部固定

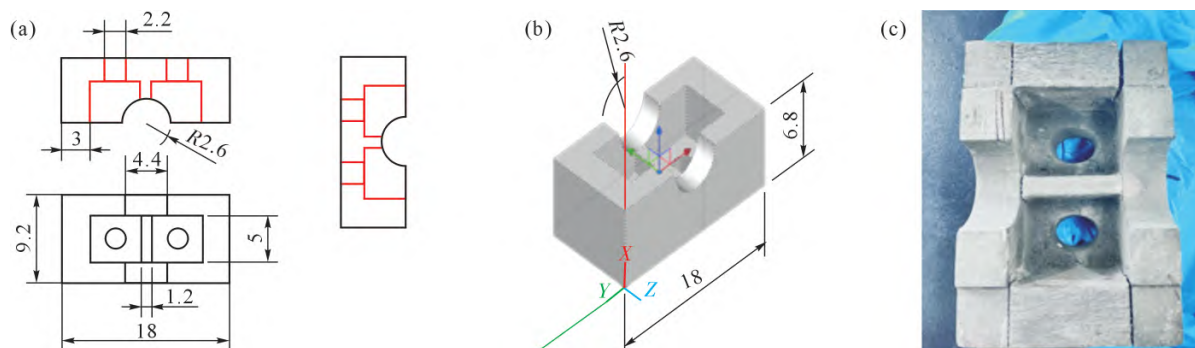


图2 锤头:(a) 模样二维图;(b) 模样三维图;(c) 模样实物

Fig.2 Hammerhead pattern: (a) 2D image of the appearance; (b) 3D image of the appearance; (c) physical appearance picture

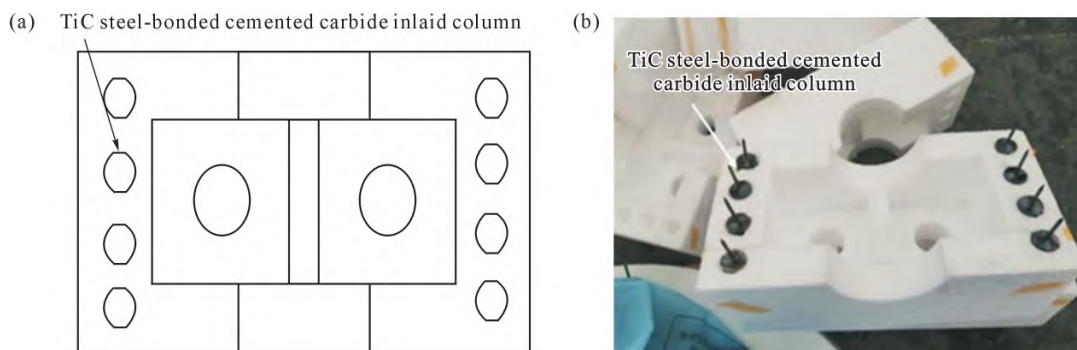


图3 镶铸工艺:(a) 镶柱安放位置示意图;(b) 镶柱在泡沫模样中的实际位置

Fig.3 Insert casting process diagram: (a) schematic diagram of the inlaid column placement position; (b) actual position of the inlay in the foam pattern

位置,把需要的模样预留浇口和浇冒口连接起来,再用干砂重新填充砂箱后把干石英砂刮平,再次振动,将箱口处的干石英砂刮平。图4为造型后的合箱图。

用塑料薄膜将箱口封好,在其浇口处放浇口杯,并用塑料薄膜将箱体的边缘压牢。箱体下面的管路连接真空系统软管,并对箱体进行吸真空操作,抽负压时间为浇注前 3~5 min,负压值为 0.06~0.08 MPa,在达到工艺规定的时间及工艺要求的干砂紧固度后,可采用中频感应电炉对高锰钢进行熔炼。

将 ZGMn13 放在中频感应电炉里进行熔炼,高锰钢熔炼出炉温度为 1 530 ℃左右。熔炼后的高锰钢液经过浇口杯浇注到锤头模样上,浇注温度为 1 430 ℃,等待模样气化消失,高锰钢液取代箱体中模样的位置,在浇注口流出后,即浇注完成,依据工件大小及

厚薄程度对其保压冷却 8~15 min,一般为 10 min,保压结束后对其进行冷却。使铸件完全冷凝后进行翻箱,从干砂中取出铸造好的铸件。浇注系统示意图 5 所示。

1.3 镶铸锤头的热处理

用热处理炉对铸件进行热处理实验及水韧处理。水韧处理是一种能提高普通铸造高锰钢性能的标准工艺方法,将高锰钢加热至奥氏体区温度并保温一段时间,使铸态组织中的碳化物基本都固溶到奥氏体中,然后淬入水中快速冷却,从而得到单一的过冷奥氏体组织^[16]。该实验水韧高温段保温温度为 1 080 ℃。保温时间为工件主要厚度除以 25,所以根据厚度计算保温时间为 2 h,水韧处理水温越低越好,入水温度 30 ℃以下,出水温度不超过 40 ℃。入



图4 镶铸锤头合箱图:(a) 上砂箱图;(b) 合箱图

Fig.4 Casting box diagram of the inlaid hammer head: (a) upper sand box diagram; (b) combined box diagram

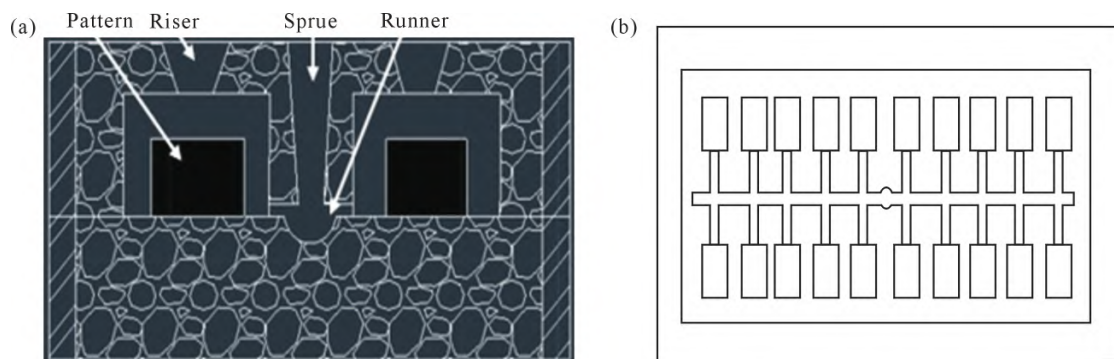


图5 锤头浇注系统示意图:(a)主视图;(b)俯视图

Fig.5 Schematic diagram of hammer pouring system: (a) main view; (b) top view

水工件温度越高越好,尽快入水,必须大于 950°C 。入水时间越快越好,一般控制在 60 s 以内,看相关设备,叉车式的能达 35 s 以内。工件在水中一般保持 1 h,工件出水温度越低越好,在 100°C 以下。对热处理后的锤头进行打磨,用角磨机将镶柱上的铁钉打磨光滑。

1.4 试样检测

用线切割机分别将铸件切割为长 29 mm,宽 16 mm,厚 6 mm 的厚片,将 TiC 硬质合金棒及镶铸部位切割为 5 mm 的厚片,分别用 180#、600#、800#、1 000# 金相砂纸对锤头和硬质合金进行打磨,并用粒度 W2.5 抛光剂进行抛光,之后用 4% 硝酸酒精($\text{HNO}_3 + \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$)溶液腐蚀试样至表面变暗,腐蚀时间为 8 s,随即用清水冲洗,并用吹风机吹干,用金相显微镜对铸态和热处理后的锤头试样进行观察。利用 EVO18 2186 型扫描电镜(SEM)、HV-1000STA 型显微维氏硬度、HR-150A 型洛氏硬度和 LEICA DM4000 M 型的金相显微镜对镶柱和复合锤头进行表征。

2 实验结果及讨论

2.1 镶铸锤头外观形貌

通过对锤头试样的打磨和抛光处理后,可以看到试样表面 TiC 钢结硬质合金及高锰钢结合处结合良好,锤头的整体形貌如图 6 所示。测得单个锤头的质量为 6 kg 左右。可以看到锤头表面平整光滑,几乎无宏观缺陷,结合处无任何缝隙。锤头使用中,主要磨损由硬质合金棒承担,因此本次实验制备的锤头使用寿命会得到极大提高。

2.2 微观形貌分析

对 TiC 钢结硬质合金及锤头结合界面进行金相分析,图 7a 和 b 分别为 TiC 钢结硬质合金微观(100×和 200×)图像,可以看到硬质合金中存在一定量的孔隙(图 7 中黑色部分),这是因为 TiC 基钢结硬质合金主要是由硬质相 TiC 和粘接相钢两部分组成,



图6 锤头整体外观形貌

Fig.6 Overall appearance of the hammer head

压坯中原料粉末之间都会存在孔隙,孔隙是钢结合金致密化过程中留下来的缺陷。

图 7c 为热处理后硬质合金的组织形貌,与热处理前相比热处理后组织均匀,未发现渣质、气孔等缺陷,可知硬质合金和高锰钢结合得很好。与图 7a 和 b 相比,硬质合金的孔隙减少。图 7d 是 TiC 钢结硬质合金镶柱与高锰钢结合处的微观组织照片(100×),可以看到两者结合痕迹不明显,说明硬质合金与高锰钢已融为一体,在高锰钢的位置可以看到分布稀疏的 TiC 颗粒。这是因为在浇注过程中,高锰钢有比较大的收缩率,可以将镶柱夹紧,并且浇注的高锰钢液使镶柱的表面开始熔化,产生合金化,使得 TiC 颗粒与母材融合在一起。TiC 钢结硬质合金棒中的部分硬质相 TiC 向高锰钢的方向移动,冷却后硬质相随机分布在高锰钢中。因为高锰钢镶铸温度不能超过 $1430\sim 1435^{\circ}\text{C}$,且钢液会很快围绕冷态镶铸块形核结晶和凝固,使扩散和飘移困难,所以图 7d 结合处未见冶金结合的犬牙状现象^[7]。

图 8a,c 和 d 分别为 100×,200×,300×的 SEM 像,可以清晰看到结合处结合的很好,几乎无空隙缺陷,说明液相反应充分。由图 8d 可知,深灰色区域主要为 TiC 颗粒,无明显棱角和规则的几何形状,边界清晰,并且硬质相没有很均匀的分布在钢基体中,存在 TiC 颗粒聚集区,而且部分硬质相颗

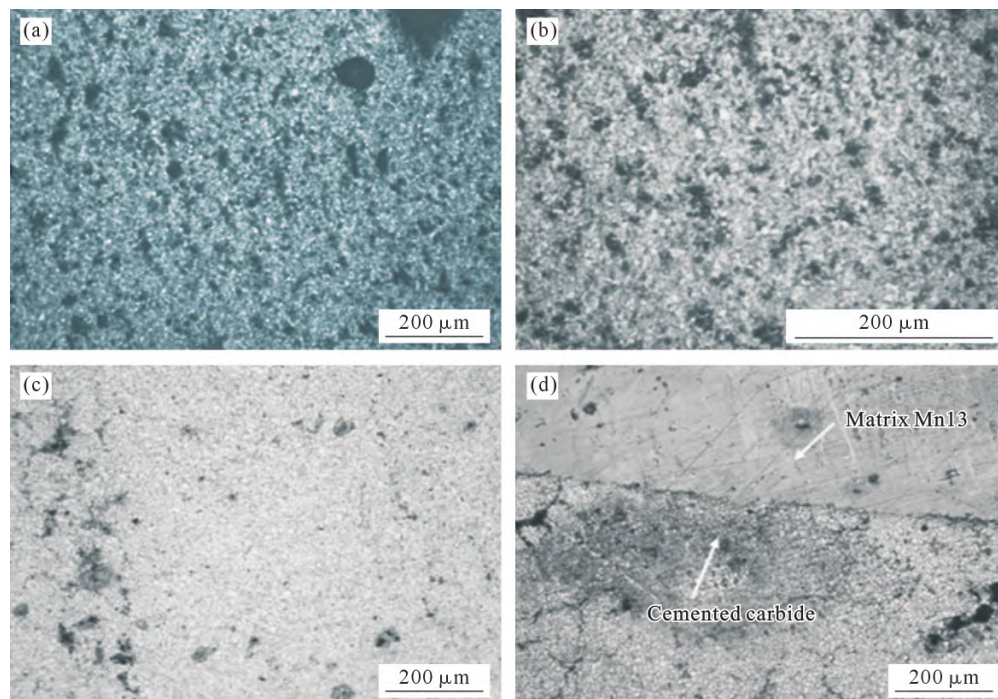


图 7 TiC 钢结硬质合金及锤头微观形貌:(a, b) 硬质合金;(c) 基体组织;(d) 结合处形貌

Fig.7 Microstructure morphology of TiC steel-bonded cemented carbide and hammer head: (a, b) cemented carbide; (c) matrix structure; (d) morphology of the bonding interface

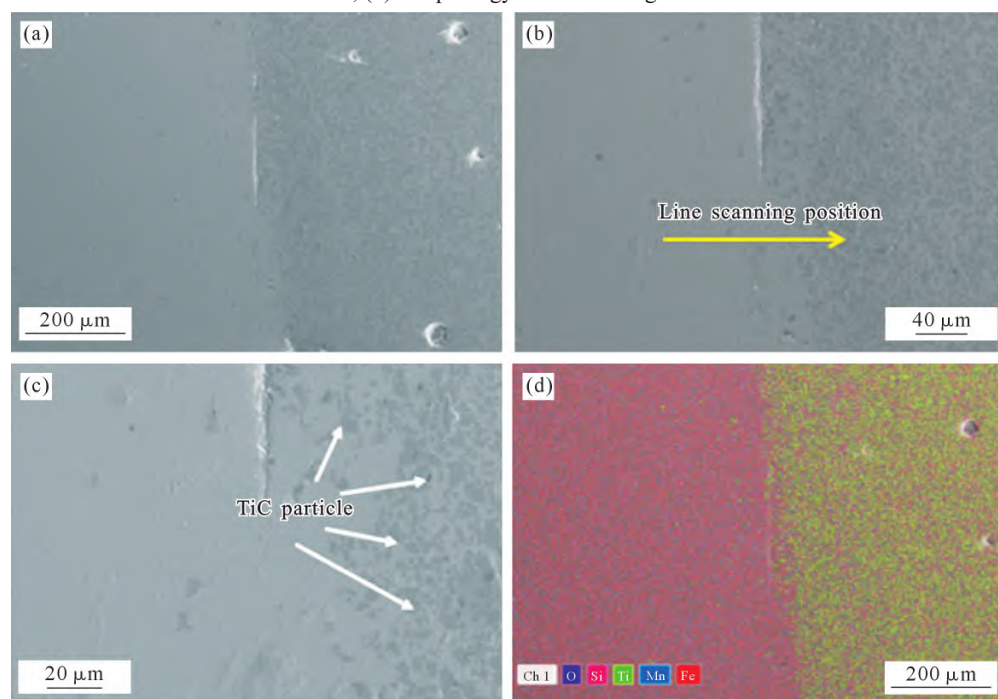


图 8 镶铸界面 SEM 图像:(a) 100×;(b) 200×;(c) 500×;(d) 元素分布图

Fig.8 SEM images of the inlaid interface: (a) 100×; (b) 200×; (c) 500×; (d) element distribution map

粒较为粗大,当合金受到外加压力时有效地避免了合金沿脆性相开裂,增加消耗能量^[17]。并且高锰钢一侧靠近结合处区域也分布着均匀稀疏的 TiC 颗粒,这是因为在金属液凝固过程中,Ti 元素发生了一定的扩散,与基体中 C 元素相结合,形成 TiC 颗粒,因此,高锰钢区域分布着星星点点的 TiC 颗粒,说明 TiC 颗粒与高锰钢结合的非常牢固。

图 9 是锤头的元素线分布图,具体扫描位置见

图 8b。从图中可以看到,硬质合金中 Ti 元素的浓度远远大于基体浓度,所以得知硬质合金与基体冶金结合时,Ti 是从硬质合金向基体扩散的,而且其扩散作用随远离结合处而逐渐减弱;Fe 和 Mn 的波形高度从基体处到结合处逐渐降低,说明 Fe 和 Mn 的扩散也是随着远离结合处逐渐减弱。在图中除了 Ti 和 Fe 元素存在突变外,其他几种元素变化趋势都是缓和的。将紧挨硬质相边缘的基体相比于远离硬质

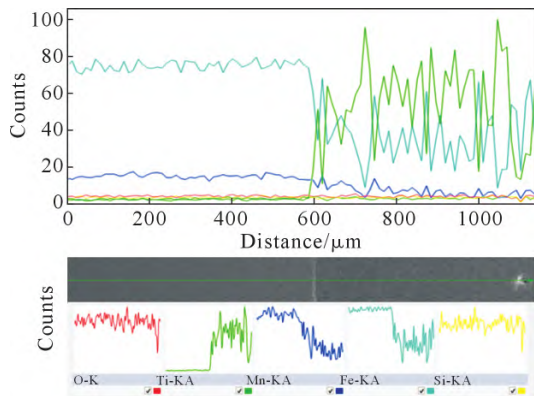


图9 镶铸界面线扫描图

Fig.9 EDS line scanning image of the inlaid interface

相的基体中心,可以看到所有元素的含量相似。这表明在对锤头进行水韧处理过程中,进行了长期的高温保温,使锤头基体成分达到了较为全面、均匀的状态。在水韧处理过程中,高温保温并不能起到更好的增强效果,也不能起到两种元素之间互溶、扩散的效果,但却能使其中的元素分布较为均匀,从而改善TiC 钢结硬质合金-高锰钢结合处的冶金结合。

2.3 硬度分析

图 10 为热处理后的锤头试样洛氏硬度测试结果,热处理前硬质合金的硬度保持在 59~60 HRC,硬质合金与高锰钢镶铸铸造的锤头经水韧处理后,硬质合金中心区域的硬度为 60 HRC 左右,与热处理前相差无几。但靠近高锰钢的区域即硬质合金边缘,硬度降到 30~50 HRC,高锰钢基体的硬度在 22~24 HRC,结合处的硬度远高于高锰钢基体硬度。并且高锰钢与硬质合金的硬度差异很大,高锰钢与硬质合金结合处的硬度处于两者之间,这是由于水韧处理时高锰钢液与硬质合金相互渗透,使得硬质合金与高锰钢结合得较好^[18]。在液固结合条件下,界面结合状态主要分为冶金结合和机械结合,但大多数情况下界面都是冶金结合与机械结合共存的。其中是否形成冶金结合是复合锤头复合成功的关键^[19]。冶金结合是指双金属在结合界面发生冶金(化学)反

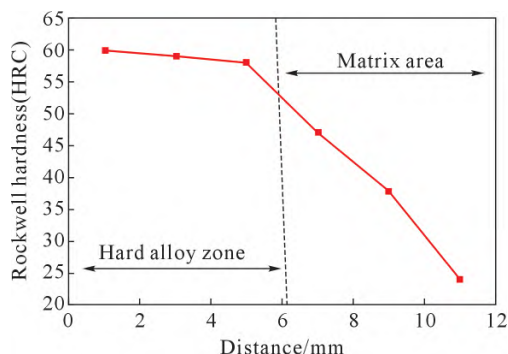


图 10 从镶柱到母材的硬度值(HRC)分析

Fig.10 Analysis of hardness values (HRC) from the inlaid column to the base metal

应所形成的金属间化合物由高熔点金属向低熔点金属生长,从而结合凝固后的低熔点金属^[20]。TiC 钢结硬质合金-高锰钢结合处形成了良好的冶金结合,即复合锤头复合成功。对复合锤头的端部使用高铬铸铁对其预制成形,将其放至锤头型腔内浇入锤柄金属液(普通碳钢),接触时因导热性差,使得局部温度快速升高,结合处极易产生裂纹,会导致锤头在使用过程中脱落^[21]。采用高锰钢作为复合锤头的锤柄,高耐磨的高铬铸铁作为锤头的打击部位,但因为破碎机的锤头小,高锰钢和高铬铸铁可以结合的面积也就较小,使得锤头的复合强度低,容易出现掉头现象^[22]。本次实验采用的 TiC 钢结硬质合金-高锰钢复合锤头能解决上述锤头出现的问题,提高复合锤头的性能,减少成本。

3 结论

(1)通过镶铸工艺能制备出高锰钢-TiC 钢结硬质合金复合锤头,且经过水韧处理后,锤头的洛氏硬度能保持较高水平,该生产工艺简单、成本低、技术工艺先进。

(2)基体与镶块的冶金结合是高温下高锰钢液强烈的热作用,使得高锰钢液与镶柱结合处元素进行相互扩散并且形成良好的冶金反应,且结合良好,杂质及夹杂物少,具有良好的结合性能。

(3)基体与镶块及结合处的硬度存在差异,呈下降的趋势,基体和镶柱在性能上存在一个稳定的过渡区,进一步改善其元素分布均匀性,对结合面起到了优化作用,有利于改善锤头在使用的过程中受力状态,避免工作时在结合区发生断裂。

参考文献:

- [1] 李晨坤. 粗晶 TiC 基高锰钢结硬质合金的制备与性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2015.
LI C K. Study on the preparation and properties of coarse grained TiC-high manganese steel bonded carbides[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [2] 赵海军. 镶铸式复合锤头的研制及应用[J]. 矿山机械, 2003, 31(7): 17-19.
ZHAO H J. Development and application of new composite hammer[J]. Mining & Processing Equipment, 2003, 31(7): 17-19.
- [3] 刘湘,李铸刚,许巧玉,沈蜀西,刘炳. 我国镶铸技术的研究现状与展望[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2002(4): 500-504.
LIU X, LI Z G, XU Q Y, SHEN S X, LIU B. The status and outlook of cast-in technology in our country[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2002(4): 500-504.
- [4] 钟正彬,魏晓伟. 钢结硬质合金-铸钢镶铸的研究[J]. 热加工工艺, 2005(10): 15-17.
ZHONG Z B, WEI X W. Research of cast-in process for steel

- based carbide-cast steel [J]. Hot Working Technology, 2005(10): 15-17.
- [5] 汪金飞, 张军. 镶铸式复合锤头的锤柄设计[J]. 铸造技术, 2015, 36(3): 798-799.
- WANG J F, ZHANG J. Design of hammer handle in insert casting [J]. Foundry Technology, 2015, 36(3): 798-799.
- [6] 黄科伟, 海丰龙, 邓晗, 章文显. 球墨铸铁镶铸硬质合金的显微组织与力学性能研究[J]. 铸造, 2022, 71(7): 853-856.
- HUANG K W, HAI F L, DENG H, ZHANG W X. Study on microstructure and mechanical properties of ductile iron insert casting cemented carbide[J]. Foundry, 2022, 71(7): 853-856.
- [7] 彭谦, 张震宇, 张春友. 锤头镶铸冷态 TM52 合金的技术设计与研究[J]. 金属材料与冶金工程, 2023, 51(3): 22-26.
- PENG Q, ZHANG Z Y, ZHANG C Y. Technical design and research of hammer head imbedded with cold TM52 alloy[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2023, 51(3): 22-26.
- [8] 李鹏志, 邢书明. 双金属复合锤头的研究与进展[J]. 矿山机械, 2008, 36(9): 62-65.
- LI P Z, XING S M. Research and progress of the bimetal composite hammer [J]. Mining & Processing Equipment, 2008, 36(9): 62-65.
- [9] 王忠祥. 消失模技术的应用及其展望[J]. 科技信息, 2007(7): 39, 91.
- WANG Z X. Application and prospect of expendable pattern casting [J]. Science Information, 2007(7): 39, 91.
- [10] 吴云祥, 杨玉祥, 杨涛林. 消失模铸造工艺及其工程设计要点[J]. 铸造设备与工艺, 2023(5): 4-7.
- WU Y X, YANG Y X, YANG T L. Lost foam casting process and its engineering design point [J]. Foundry Equipment and Technology, 2023(5): 4-7.
- [11] 张凤华. 消失模铸造球铁轮毂的工艺设计[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(4): 574-576.
- ZHANG F H. Process design of ductile iron hubby lost foam casting [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(4): 574-576.
- [12] 张杰琼, 何帅伟, 李宗亮, 李露, 吕乐华, 轩世成. 大型薄壁壳体零件的消失模铸造工艺开发[J]. 铸造, 2024, 1(73): 101-106.
- ZHANG J Q, HE S W, LI Z L, LI L, LYU L H, XUAN S C. Process development of lost foam casting technology for large-sized and thin-walled shell parts [J]. Foundry, 2024, 1(73): 101-106.
- [13] 轩世成, 何帅伟, 都永杰, 宋明昊, 于继峰. 394A 湿式四缸体消失模工艺研究[J]. 铸造工程, 2024, 1(73): 101-106.
- XUAN S C, HE S W, DU Y J, SONG M H, YU J F. Research on the process of disappearing mold of 394A wet four-cylinder block [J]. Foundry Engineering, 2024, 1(73): 101-106.
- [14] 冯朝跃. 双金属锤头的生产及应用[J]. 铸造, 2000, 49(9): 561-562.
- FENG C Y. Researching and manufacturing of double-metal-hammer head [J]. Foundry, 2000, 49(9): 561-562.
- [15] 范安平, 肖平安, 李晨坤, 轩翠华, 曲选辉. TiC 基钢结硬质合金的研究现状[J]. 粉末冶金技术, 2013, 31(4): 298-303.
- FAN A P, XIAO P A, LI C K, XUAN C H, QU X H. Research situation of TiC-based steel bonded carbide [J]. Powder Metallurgy Technology, 2013, 31(4): 298-303.
- [16] 肖平安, 李晨坤, 轩翠华, 张霞, 宋建勇. 水韧处理对 TiC 基高锰钢结合金组织与性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(12): 31-36.
- XIAO P A, LI C K, XUAN C H, ZHANG X, SONG J Y. Effect of water toughening treatment on microstructure and properties of high manganese steel bonded TiC [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(12): 31-36.
- [17] 轩翠华. 烧结方法及后续热处理对 TiC 基钢结合金组织与性能影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- XUAN C H. Influence of methods of sintering and the heat treatment on the microstructure and properties of steel bonded titanium carbide [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [18] 陈和兴, 赵四勇, 常明, 张凤华. 高锰钢镶铸硬质合金锤头的研制[J]. 铸造技术, 2000, 21(4): 13-14.
- CHEN H X, ZHAO S Y, CHANG M, ZHANG F H. A study of high manganese steel hammers with inserted hard alloy [J]. Foundry Technology, 2000, 21(4): 13-14.
- [19] 李鹏志, 邢书明. 破碎机锤头双金属复合铸造工艺的研究进展[J]. 金属矿山, 2008(5): 96-99.
- LI P Z, XING S M. Progress in research on bimetal compound casting technology for crusher head [J]. Metal Mine, 2008(5): 96-99.
- [20] 韩青有, 隋大山, 刘兴涛, 孙东科. 双金属复合铸造界面结合技术与机理研究[J]. 铸造, 2024, 73(1): 1-8.
- HAN Q Y, SUI D S, LIU X T, SUN D K. Study on technologies and mechanisms of obtaining a high-quality metallurgical bond between dissimilar metals during a cast-on process [J]. Foundry, 2024, 73(1): 1-8.
- [21] 王超, 程红晓, 王祥东, 沈卫东, 宋润泽. 高铬铸铁-铸钢锤头的镶铸工艺[J]. 铸造设备研究, 2004, 26(2): 18-19.
- WANG C, CHENG H X, WANG X X, SHEN W D, SONG R Z. Insert casting of the high chromium cast iron-cast steel hammer [J]. Research Studies on Foundry Equipment, 2004, 26(2): 18-19.
- [22] 郭长庆, 程军. 高锰钢焊接复合锤头的研制[J]. 铸造技术, 2007, 28(3): 341-343.
- GUO C Q, CHENG J. Making welded high manganese steel crusher hammers [J]. Foundry Technology, 2007, 28(3): 341-343.

(责任编辑: 李亚敏)