



朱永长 著 <<<

液/半固态双金属复合铸造 技术及应用

YE BANGUTAI
SHUANGJINSHU
FUHE ZHUZAO
JISHU YI YINGYONG



工业出版社

液/半固态双金属复合铸造 技术及应用

朱永长 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书在传统双液铸造复合技术的基础上,提出了“液/半固态”双金属铸造复合技术,针对复合板材的大平面冶金结合、较薄的使用厚度等特定工况需求,利用基底材质在冷却介质作用下形成较大的温度梯度,促使金属液在凝固过程中趋于层状凝固,当基底材质上表面处于半固态时浇注耐磨层金属,实现两种金属的冶金结合。液/半固态双金属铸造复合板不但可以实现两种材质大面积平面冶金复合,而且能有效避免因表面完全凝固后出现氧化夹杂难以去除的弊端,同时可以有效解决焊接方法出现的焊接残余应力、宏观裂纹及成分不均匀等问题,进而避免综合力学性能受到影响,提高耐磨板的使用寿命。

本书内容是作者多年研究成果,相关技术已经申请专利。本书可供矿山、冶金、建材、电力等领域从事金属复合耐磨材料的研究人员和工程技术人员参考应用,也可供从事金属耐磨材料理论研究的高校本科生和硕士生参考。

图书在版编目(CIP)数据

液/半固态双金属复合铸造技术及应用/朱永长著.
北京:化学工业出版社,2018.8
ISBN 978-7-122-32386-6

I. ①液… II. ①朱… III. ①双金属-复合铸造-研究 IV. ①TG249

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第128053号

责任编辑:刘丽宏
责任校对:宋 夏

文字编辑:孙凤英
装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京虎彩文化传播有限公司

装 订:北京虎彩文化传播有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张7 $\frac{3}{4}$ 字数153千字 2018年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:58.00元

版权所有 违者必究

复合材料是 20 世纪材料科学方面的一大进展,其中铸造铁基复合材料以其独特的制造工艺、优越性能及较低的成本,引起了人们的关注和重视。目前,金属复合材料的制备方法较多,主要应用有表面堆焊法、轧制复合法、连续铸造法、铸造复合法等。其中,铸造复合法制备的产品性能稳定,成本相对较低,一直受到耐磨材料领域的广泛关注。

20 世纪 80 年代中期,焊接工艺和铸造复合法制备的金属复合材料零件被广泛应用,以满足复杂工况和设备对产品的特殊需求。双金属复合铸件发挥了两种材质的优点,有着良好的综合性能和较高的使用寿命,适应工况能力强,成本也较为低廉。随着双金属复合工艺的发展及材料性能的提升,拓展了双金属复合零部件的应用空间,在矿山机械中的应用较为常见,主要有各式破碎机用边护板、衬板、反击板、颚板等抗磨零部件,铸造复合工艺在各类耐磨产品上的应用越加广泛。

本书在传统双液铸造复合技术的基础上,采用了“液/半固态”双金属铸造复合技术,针对复合板材的大平面冶金结合、较薄的使用厚度等特定工况需求,利用基底材质在冷却介质作用下形成较大的温度梯度,促使金属液在凝固过程中趋于层状凝固,当基底材质上表面处于半固态时浇注耐磨层金属,实现两种金属的冶金结合。液/半固态双金属铸造复合板不但可以实现两种材质大面积平面冶金复合,而且能有效避免因表面完全凝固后出现氧化夹杂难以去除的弊端,同时可以有效解决焊接方法出现的焊接残余应力、宏观裂纹及成分不均匀等问题,进而避免综合力学性能受到影响,提高耐磨板的使用寿命。

本书主要通过对液/半固态双金属铸造复合板温度场的分布、凝固厚度的定量分析,比较了不同冷却介质对基底金属凝

固过程温度梯度和凝固速度的影响,为确定耐磨层金属液浇注时间提供了依据。本书研究了液/半固态双金属铸造复合板界面层及邻近区域的组织结构与成分分布规律,揭示了复合界面和近界面精细结构及界面层组织的形成机制与演化规律,实现了复合组织的有效调控。利用基底金属重熔区熔化厚度温度场模型,确立浇注温度及浇注时间与重熔层厚度关系。根据工况条件下铸造复合材料的界面、组织与性能演化关系,实现耐磨复合薄板结构、成分及性能设计。

液/半固态双金属铸造复合工艺制备耐磨薄板技术可显著节约资源与能源。铸造复合耐磨板相对于其他方法有着优良的冶金质量,避免了微观裂纹源的产生,直接杜绝了耐磨层宏观裂纹的产生,而且复合板可以通过热处理工艺进一步提高力学性能,并能进行热整形,对磨粒直径和流向无特殊要求。实际生产中可以根据需要一次铸造成所需形状,避免了按需要形状切割和加工导致的板材浪费。液/半固态双金属铸造复合耐磨板具有较高的使用寿命和减少装拆机更换零配件时间的特点,可大幅提高生产效率,为耐磨复合板的生产与应用提供了新途径。

本书为笔者多年的研究成果。本书得到了金属耐磨材料及表面技术教育部工程研究中心的大力支持;得到了国家自然科学基金项目“双液异种金属复合界面凝固行为及梯度复合层形成机理研究(项目编号:51371090)”和黑龙江省教育厅项目“双液铸造双金属复合层凝固行为及形成机制的研究(项目编号:2016-KYYWF-0553)”的资助。

由于时间紧迫和水平有限,书中不当之处难免,恳请读者批评指正。

朱永长

第1章 绪论 1

1.1 双金属复合耐磨板概述	1
1.2 双金属复合材料的特点与应用	2
1.3 双金属复合材料制备技术	3
1.3.1 固-固复合法	3
1.3.2 液-固复合法	3
1.3.3 液-液复合法	7
1.4 双液双金属铸造复合技术现状	13
1.4.1 材质相容性	13
1.4.2 界面结合强度	14
1.4.3 复合准则	15
1.4.4 存在的问题	15

第2章 液/半固态双金属铸造耐磨材料及研究方法 16

2.1 耐磨板常用材料及制备工艺	16
2.1.1 耐磨材料选取原则	16
2.1.2 熔炼设备及制备工艺流程	17
2.2 耐磨材料分析测试及方法	19
2.3 力学性能测试	21

第3章 液/半固态双金属铸造复合理论分析 23

3.1 液/半固态双金属铸造复合温度场计算	23
3.1.1 液/半固态双金属铸造复合思路提出及工艺 原理	23

3.1.2 低碳钢温度场的理论计算	25
3.1.3 凝固时间的理论计算	27
3.2 冷却条件对低碳钢温度场分布影响	28
3.2.1 冷却介质对温度场分布的影响	28
3.2.2 低碳钢温度场模拟分析	31
3.2.3 低碳钢半固态区宽度计算	34

第4章 液/半固态双金属铸造复合工艺

38

4.1 水冷铜板条件下低碳钢浇注工艺参数的确立	38
4.1.1 低碳钢浇注工艺	38
4.1.2 水冷铜板条件下浇注低碳钢各参数间关系	40
4.2 冷铁条件下低碳钢浇注工艺参数确立	47
4.2.1 冷铁选用计算	47
4.2.2 冷铁条件下浇注低碳钢各参数间关系	49
4.3 液/半固态双金属铸造复合工艺判据	51
4.3.1 铸造复合板表面凝固壳层	51
4.3.2 高铬铸铁浇注时间限定	53
4.3.3 低碳钢半固态区宽度	55
4.4 液/半固态双金属铸造复合工艺准则	57

第5章 液/半固态双金属复合板界面层的组织与性能

59

5.1 水冷铜板条件下铸造复合板界面层组织	59
5.1.1 低碳钢浇注温度对界面层组织的影响	59
5.1.2 低碳钢凝固时间对界面层组织的影响	66
5.2 冷铁条件下界面层组织	69
5.2.1 低碳钢浇注温度对界面层组织的影响	69
5.2.2 低碳钢凝固时间对界面层组织的影响	73
5.2.3 界面层氧化夹杂形成及去除	76
5.3 铸造复合板界面层力学性能评价	80
5.3.1 洛氏硬度	80
5.3.2 界面层显微硬度	81
5.3.3 抗拉强度	82
5.3.4 剪切强度	84

5.3.5 复合层止裂性能	85
5.3.6 断口形貌分析	87
5.4 铸造复合耐磨板装机测试	88

第6章 液/半固态双金属铸造复合界面层形成机制	93
--------------------------------	-----------

6.1 低碳钢重熔区熔化行为分析.....	93
6.2 低碳钢重熔区厚度模型的建立	95
6.3 界面层元素扩散规律.....	98
6.4 铸造复合界面层形成机制	100
6.4.1 复合层形成过程	101
6.4.2 珠光体过渡层形成过程	102
6.4.3 界面层形成机制	106

参考文献	109
-------------	------------

第1章

绪论

1.1 双金属复合耐磨板概述

耐磨板主要应用于矿山、冶金、建材、电力等大面积磨损工况，产品主要包括铸造高锰钢板、合金钢板或堆焊耐磨板等，以适应不同工况耐磨需求。单一材质的铸造高锰钢板或合金钢板耐磨性不足，导致寿命相对较低^[1~3]。堆焊耐磨板以自动焊接工艺为主，将合金焊丝堆焊在钢板基材表面，残余应力较大；堆焊过程合金收缩比不同，易引起贯穿耐磨层的裂纹出现；为了降低母材对堆焊层的稀释需要多层堆焊，就难以保证堆焊层的整体耐磨性能^[4~7]。

双液铸造复合技术制备耐磨复合板为解决上述问题提供了新的思路。双液铸造复合技术是将两种或多种金属液依次浇注到铸型型腔中，在不同金属材料界面间形成冶金结合^[8]。目前双液铸造复合技术在板类上主要应用于反击板、板锤、颚板、衬板等矿山用耐磨铸件，复合产品厚度一般控制在50mm以上，主要归因于耐磨产品基底材质在完全凝固末期，后浇注的耐磨层金属液必须提供足够的热量，才能促进基底材质的表面重熔，复合工艺本质仍为“固-液”复合^[9]。该种工艺方法要求后注入的耐磨层金属液量较大，容易导致基底材质在前期凝固过程中表面形成的氧化夹杂滞留在界面层附近。对于特定工况条件下应用的铸造耐磨复合大平面薄板（厚度 $\leq 40\text{mm}$ ），国内外的研究及应用仍为空白^[10~13]。

在传统双液铸造复合技术的基础上^[8,9]，采用“液/半固态”双金属铸造复合技术，针对复合板材的大平面冶金结合、较薄的使用厚度等特定工况需求，利用基底材质在冷却介质作用下形成较大的温度梯度，促使金属液在凝固过程中趋于层状凝固，当基底材质上表面处于半固态时浇注耐磨层金属，实现两种金属的冶金结合。液/半固态双金属铸造复合板不但可以实现两种材质大面积平面冶金复合，而且能有效避免因表面完全凝固后出现氧化夹杂难于去除的弊端，同时可以有效解决焊接方法出现的焊接残余应力、宏观裂纹及成分不均匀等问题，进而避免综合力学性能受到影响，提高耐磨板的使用寿命。

通过液/半固态双金属铸造复合板温度场分布、凝固厚度的定量分析,比较不同冷却介质对基底金属凝固过程温度梯度和凝固速度的影响,为确定耐磨层金属液浇注时间提供依据。研究液/半固态双金属铸造复合板界面层及邻近区域的组织结构与成分分布规律,揭示复合界面和近界面精细结构及界面层组织的形成机制与演化规律,实现复合组织的有效调控。利用基底金属重熔区熔化厚度温度场模型,确立浇注温度及浇注时间与重熔层厚度关系。根据工况条件下铸造复合材料的界面、组织与性能演化关系,实现耐磨复合薄板结构、成分及性能设计。液/半固态双金属铸造复合工艺制备耐磨薄板技术可显著节约资源与能源,由于该技术生产的耐磨板较高的使用寿命和减少装拆机更换零配件时间的特点,可大幅提高生产效率,为耐磨复合板的生产与应用提供了新途径。

1.2 双金属复合材料的特点与应用

复合材料是20世纪材料科学方面的一大进展,其中铸造铁基复合材料以其独特的制造工艺、优越性能及较低的成本,引起人们的关注和重视^[14~17]。目前,金属复合材料的制备方法较多,主要应用有表面堆焊、轧制复合、连续铸造、铸造复合等^[18]。其中铸造复合法制备的产品性能稳定,成本相对较低,一直受到耐磨材料领域的广泛关注^[19]。

20世纪80年代中期,焊接工艺和铸造复合方法制备的金属复合材料零件被广泛应用,以满足复杂工况和设备对产品的特殊需求^[20,21]。双金属复合铸件发挥了两种材质的优点,有着良好的综合性能和较高的使用寿命,适应工况能力强,成本也较为低廉。随着双金属复合工艺的发展及材料性能的提升,拓展了双金属复合零部件的应用空间,在矿山机械中的应用较为常见,主要有各式破碎机用边护板、衬板、反击板、颚板等抗磨零部件,铸造复合工艺在各类耐磨产品上的应用越加广泛^[22]。

实际生产中工况环境复杂,对金属复合材料不断提出更高的性能需求,但传统的单一材质金属难以满足实际工况对零部件硬度和韧性的同步需求。如果零件的工作面使用硬度高的材质,而非工作面使用易加工或韧性高的材质,制成同时具有高韧性高耐磨的零件,将会是工业发展所需要的^[23]。利用金属复合工艺制备的复合材料将表层材料和基底材料结合在一起,零件可以根据应用环境提供不同性能。双金属由于其独特的物理性能和力学性能,作为一种先进的功能材料被广泛地应用到许多领域,可把相近的或不相近的材料连接在一起^[24~26]。

耐磨产品工况条件恶劣,受到的剪切应力、冲击应力、挤压应力和疲劳应力交互作用,在选用制备材料时既要考虑到抗冲击能力,又要考虑到其优良的耐磨性能,实现性能与服役条件的匹配,从而提高复合材料的使用寿命。目前的金属材料复合方法较多,根据复合前金属材料的初始物理状态具体分为:固-固复合技术、

固-液复合技术和液-液复合技术^[27]。固-固复合技术是将金属 A 与 B, 采用某种方法连接为一体, 连接方式通常以机械连接为主。固-液复合技术是将金属 A 预制成型, 然后浇注液态金属 B, 从而将两种金属连接在一起, 连接处以冶金结合为主。液-液复合技术是将金属 A 与 B 同时熔炼, 同步或依次浇注, 可以实现较大面积的冶金结合, 但工艺较难控制, 界面容易出现混料及夹杂。液-液复合技术发展至今主要凭个人经验、预试验来指导生产实践, 导致了产品成品率低, 相应的技术推广和应用前景不容乐观^[8]。

1.3 双金属复合材料制备技术

1.3.1 固-固复合法

(1) 机械复合法

机械复合法不属于真正意义的双金属复合材料制备技术, 主要是根据应用需要对金属材料进行的可拆卸连接或不可拆卸连接, 如局部的焊接、铆接等, 具有着一定的复合材料的应用特点。

(2) 焊接复合法

① 熔焊法 采用焊接工艺将耐磨材料焊接在锤头易磨损部位, 从而保证零部件的使用寿命, 既可以发挥材料的耐磨性, 又可以降低材料的成本。郭长庆^[28]等研制的焊接复合锤头与高锰钢锤头相比, 其寿命可以提高 1.5 倍左右。焊接工艺的难点在于两种材料的焊接, 因材料的不同就需要摸索合理的工艺参数, 因此焊接质量难以控制, 应用中会出现硬质合金脱落现象, 应用范围受到限制。但通过焊接方法将异种金属连接在一起, 为金属耐磨复合材料的制备提供了新思路^[29], 并在某些产品中的应用取得了较大进展^[30]。

② 钎焊法 采煤机截齿柄主要采用锻造工艺制备, 用以改善齿柄的强度, 同时利用钎焊工艺, 将高硬度的硬质合金焊接在齿柄上。该种工艺的关键问题在于控制钎焊工艺参数, 保证钎焊过程焊料的均匀性, 防止硬质合金发生脱落^[31,32]。

1.3.2 液-固复合法

液-固复合法^[33~35] 预先在铸型内要求耐磨的部位放置耐磨材料或硬质合金块, 然后浇注高温金属液, 预制块表面将发生少量重熔, 合金元素在重熔区域相互扩散。当该区域降温凝固后, 在界面处可以观察到明显的结合层, 从而实现两种金属熔焊连接, 常见工艺如下。

(1) 铸渗法

铸渗法是将高温金属浇注到预制的合金粉末坯料块周围, 坯料块内的合金元素

在高温作用下,利用扩散作用渗透到后浇入的金属铸件表面,形成铸件表面合金化^[36]。通常合金层的厚度大约为 10mm,该方法简便,易操作,节约材料。铸渗技术应用范围较广,主要集中在黑色金属方面。近年来,铸渗法在有色金属方面的应用也逐渐增多,铜合金和镁合金都有着相关的研究^[37]。目前主要存在的问题是铸渗厚度还不理想,分布也不均匀,合金元素的渗透能力还有待改善。

(2) 镶铸复合法

镶铸复合法是将熔融高温金属液浇注在预制的硬质合金外表面,冷却凝固后实现两种金属复合的一种工艺方法^[38]。影响镶铸复合工艺因素较多,如基体材料的浇注温度、硬质合金镶块的几何形状和质量、基体材料和硬质合金镶块的质量比、镶铸面的位置和形状、铸型和浇注系统的散热面积及导热性能等。实际生产中往往可以根据复合需求,对特定材质的预制硬质合金块经过试验摸索总结出相应的浇注温度、浇注金属和硬质合金的质量比的定量关系,从而得出相应的工艺参数关系。因此,除钢结硬质合金的质量比外,其他因素基本视为不变,可以把基体材料和硬质合金镶块的质量比、浇注温度确定为试验研究基本工艺参数。

① 镶块复合法 利用高温金属液的热作用,将事先固定在铸型锤端部位的一定形状耐磨合金块和基体紧密结合起来。通常镶块的数量和体积受到铸件的形状影响,使用过程中容易出现耐磨合金块的脱落。镶块复合法如图 1-1 所示^[39]。

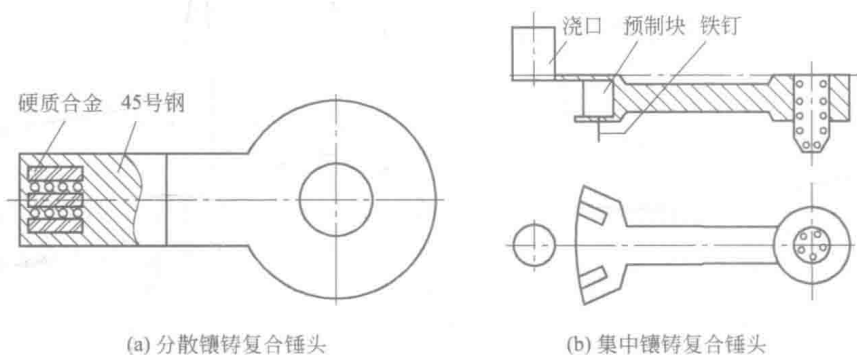
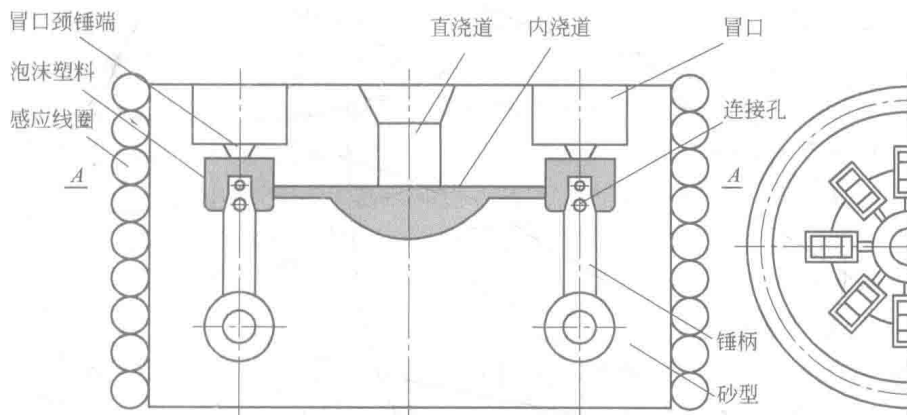


图 1-1 镶块复合法^[39]

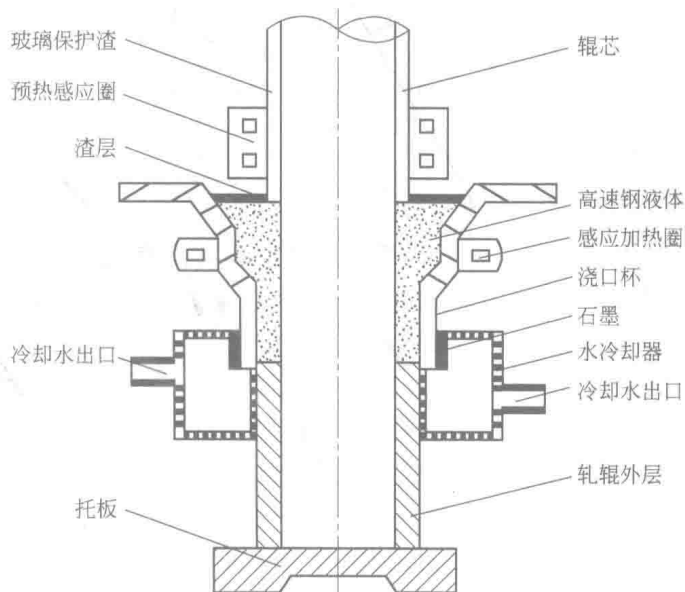
② 消失模感应加热法 图 1-2 为锤头生产的铸造工艺^[40]。浇注系统的直浇道、冒口颈和冒口使用木模直接造型,而内浇道和浇口窝则采用泡沫塑料造型。为保证锤柄表面与耐磨金属液的良好结合,锤柄表面经过打磨处理后,需要涂上保护剂。在进行复合工艺前,需将砂型置于感应线圈内,然后放置装配好的锤柄及锤端消失模,开始利用感应线圈加热,消失模汽化消失。锤柄温度达到要求后,保持感应线圈加热,开始浇入锤端金属液,金属液完成型腔内浇注后停止感应线圈加热,浇注过程持续到冒口充满为止。

③ 连续铸造法 连续铸造法是制备复层材料的主要方法,研究热点主要集中在铝合金复层材料的制备^[41~43],在熔点较高的钢铁金属上的应用还有待深入研究。根据研究方法和制备手段,通常可以分为连续浇注复合法、双流浇注法、双结

图 1-2 锤头生产的铸造工艺^[40]

晶器连铸法及电磁制动法等。

复合轧辊制备工艺示意如图 1-3 所示。首先将辊芯放置在结晶器内，然后在结晶器和辊芯之间注入包覆层金属液，确保两种金属之间发生熔合。利用牵引设备将凝固的部分持续拉动，该方法能够生产铸造复合轧辊^[44]。吴春京^[45]等研究了生产复合轧辊过程中出现的牵引不出、钢液泄漏、结合界面熔合过度情况下的工艺条件，在此基础上开发出相应的辅助设计工业系统，有利于指导复合轧辊连续铸造法的实际生产。连续浇注复合铸造法具有生产复合轧辊成本低，操作工艺简单，轧辊包覆层和芯层的材料可选择性大的优点^[46]。该工艺的缺点是内层需事先处理，如果处理效果欠佳，或处理后不立刻铸造，则不易制备出结合良好的轧辊。

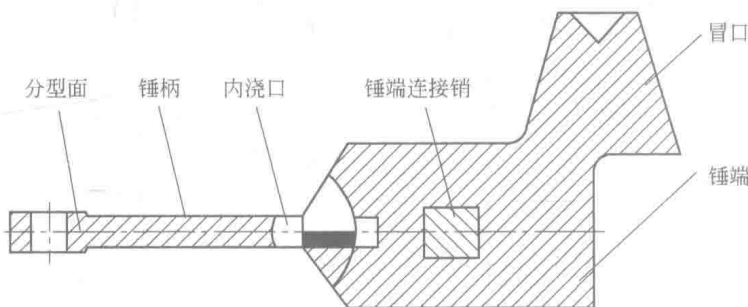
图 1-3 复合轧辊制备工艺示意^[44]

目前，液-固复合铸造工艺相对较为简单，生产过程中不受铸件形状影响，但

液-固复合铸造工艺并不完善, 容易在铸造过程中出现一些问题^[47]。例如, 液-固复合层易出现夹渣、气孔等缺陷; 由于金属液体不能带入足够的热量来熔化固体, 使得复合层不能完全实现冶金结合; 液-固包覆层内表面容易产生裂纹, 导致锤头在实际工况条件下出现断裂或锤端的脱落。液-固复合法的关键是工艺参数的设计依据没有明确给出, 没有相关的工艺设计准则参考, 生产中主要凭经验进行硬质合金形状、尺寸的设计, 虽然操作简便, 但铸件产品质量可控性差, 针对相应的复合工艺设计原则, 有待深入研究^[48]。

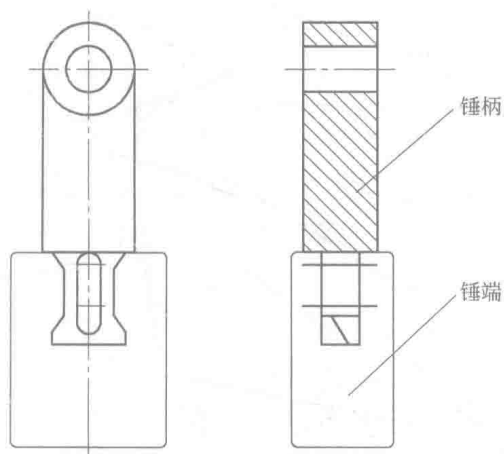
(3) 包覆铸造复合法

包覆铸造复合法是一种较为常见的固-液复合工艺, 其原理大体与镶铸法相似, 主要区别在于后浇注的金属液与先浇注的金属液质量比的大小, 因此, 两种金属间的结合状态存在着一定的差异性。首先将锤柄制备成预制件, 然后将高温的抗磨金属液浇注到型腔中, 实现抗磨金属对锤柄的包覆。通过该种工艺制备得到的锤头, 其结构主要由锤柄和锤端组成, 由于浇注过程中各部分状态不同, 属于固-液复合。采用包覆铸造复合法制备锤头时, 为了加强锤端与锤柄的结合强度, 可以预先将锤柄加工出一定的外形, 便于抗磨金属牢牢地固定在锤柄上, 提高锤头的使用寿命, 如图 1-4 所示。包覆铸造复合法操作性较强, 实际获得的锤头产品结合质量相对较好^[49]。



① 预置锤柄法 通过浇入高温的耐磨金属液将事先预置在锤头铸型型腔内的碳钢包覆起来。芯部的碳钢通常采用镂空结构, 可实现冶金和机械的双重结合。预置锤柄包覆式锤头结构如图 1-5 所示^[50]。

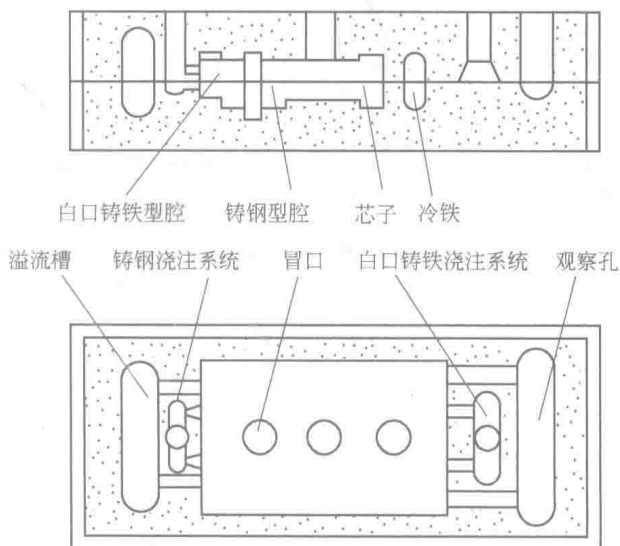
② 预置锤端法 通过浇注高温液态锤柄金属, 可以将事先放置在锤头铸型型腔内的起破碎作用的锤端耐磨合金连接, 这种工艺可实现机械和冶金的双重结合。为了增加结合的锤端和锤柄的可靠程度, 连接部位通常被设计成燕尾结构。预置锤端法复合工艺, 通常被包覆部分体积大, 包覆金属液的体积相对较小, 导致包覆金属液提供的热量难以熔合被包覆金属表面。当锤头在工件服役过程中, 容易在未熔合区域产生裂纹, 最终导致锤头端耐磨金属完全断裂、崩落。因此, 为了提高锤端与锤柄的结合强度, 除了预先将锤柄加工出一定形状外, 应该主要以提高金属间的熔合能力为主。通过增大熔合面积, 可以有效提高锤柄与锤端的界面结合力, 确保

图 1-5 预置锤柄包覆式锤头结构^[50]

锤头应用过程的稳定性。在实际工艺操作中,可以采用过流冲刷的方法增大熔合面积,从而提高锤头的服役寿命。

1.3.3 液-液复合法

液-液复合法是将化学成分和力学性能不同的液态金属,先后浇注到同一个铸型中,界面上实现冶金结合的一种复合材料制备工艺,其工艺设计示意如图 1-6 所示^[51]。对铸钢-白口铸铁进行大量复合实验表明,首先浇注的铸钢浇注一定时间后逐渐凝固,铸钢凝固完毕时开始浇注白口铸铁。处于高温的铸钢表面在高铬铸铁液的冲刷作用下,其上侧重新熔化—薄层金属,从而使得铸钢与白口铸铁之间实现结合。复合过程中白口铸铁保持着液相,在一定程度上可以避免低碳钢与高铬铸铁的

图 1-6 液-液复合法工艺设计示意^[51]

氧化。孙家仲等^[52]在液-液复合法的基礎上，成功制备了双金属斗齿，根据复合过程中出现的相关问题，进行了详细的工艺分析。通过对出现的问题进行分析，为液-液双金属工艺的应用与推广提供了依据。液-液复合法主要有以下几种方法。

(1) 定量浇注法

铸造复合过程中很难控制浇注的金属液质量，在型腔内开设溢流槽，可以将多余的金属液引入溢流槽内，然后开始浇注第二种金属液。第二种金属液浇注开始时间应根据先浇入型腔内的金属降温至固相线附近为准。横浇道选择开在与溢流口同一水平位置的原因在于不仅保证了第二种金属液的平稳充型，而且避免了与第一层金属液的混合。定量浇注的工艺简图如图 1-7^[53]所示。采用定量浇注法制备的锤头结合牢固，锤头在服役期间不易出现崩碎和脱落现象，但该工艺在操作过程中需要配合相关的测温设备，用来指导批量生产时的第二种金属液的开始时间，复合工艺的操作性还有待改进。

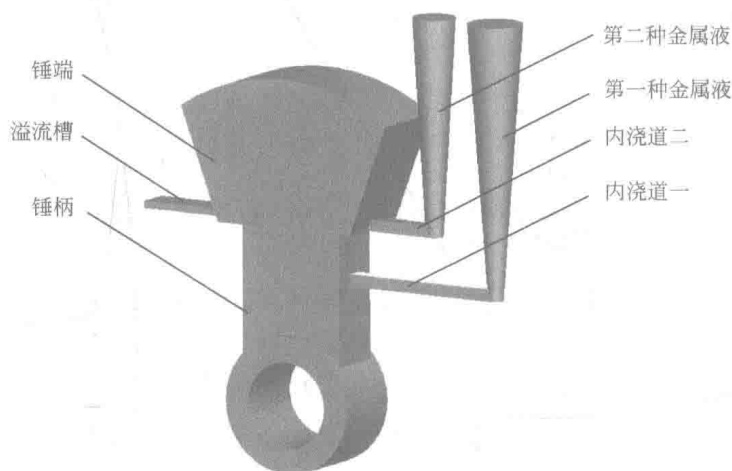
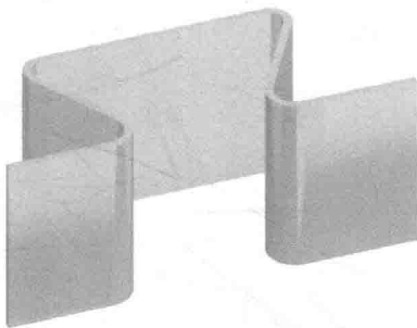


图 1-7 定量浇注的工艺简图^[53]

(2) 隔板法

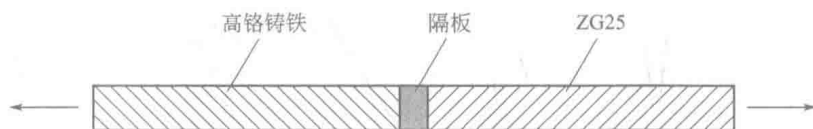
为了避免液-液成型过程中不同的金属液间混料，便于控制金属液的浇注速度与浇注时间，可以在不同的金属液间预先采用隔板隔离。因此，铸造复合过程中，采用隔板作为辅助手段，提高复合工艺成品率。

① 成型隔板法 为避免液-液成型过程中发生混料而采用的燕尾形隔板，如图 1-8^[54]所示。成型隔板厚度是重要的工艺参数，控制好隔板厚度才能防止被熔穿，避免隔板失去两种金属液间的隔离作用。将隔板设计成一定形状，主要是考虑到隔板两侧金属液提供的热量不足，难以使金属液与隔板表面熔合，金属凝固后将与隔板产生未结合区域，从而影响结合强度，但由于隔板设计成一定形状，两种金属液凝固后形成机械嵌入结构，也可维持两种金属的连接关系，而且能够保持一定的连接强度。该种工艺的控制相对较难，很难把握金属液浇注温度与隔板对温度适应的工艺参数关系，而工艺因素都会直接影响到金属液对隔板的热作用，从而影响结合

图 1-8 成型隔板^[54]

效果。

② 直隔板法 直隔板法是在两种金属液浇注之前，在型腔内放置中间隔板，然后同步将制备复合球磨机衬板所需的高铬铸铁和低碳钢浇注到型腔中，中间隔板在两种金属液间起到隔离作用，并且在金属液的热作用下表面发生重熔，冷却后与两种金属完全地结合在一起，最终得到高耐磨性的高铬铸铁/碳素钢复合板衬板，如图 1-9 所示^[55]。采用直隔板法制备双金属复合材料，应严格控制高铬铸铁液和碳素钢液面上升高度，保持液面同步上升，最终确保高铬铸铁、隔板、碳素钢彼此熔合，形成良好的冶金结合层。

图 1-9 直隔板法制备示意^[55]

③ 平做立浇法 液-液复合法浇注的金属液依靠自身重力液面呈现水平状态，对于一些表面具有一定形状且铸件本身具有一定弧度的耐磨零部件，液-液复合法的应用受到了制约。为了解决耐磨铸件自身形状带来的复合工艺问题，对于形状较为简单的曲面衬板，可以采用平做立浇法解决，具体浇注方式如图 1-10 所示^[56]。预先将具有一定形状的隔板置于铸型内，通过隔板隔离浇注的高铬铸铁液和碳钢液。隔板放入型腔前需要进行表面处理，放置的准确位置和厚度需要根据衬板的质量确定。采用平做立浇法的浇注过程与隔板法类似，要严格控制隔板两侧的金属液浇注速度，保持液面同步平稳上升，防止隔板受力失衡而发生变形，引起双金属复合衬板厚度不均，甚至混料的现象发生。

双金属复合层立浇的优越性在于浇注时的自动浮渣过程。其优点是，铸造复合工艺设计合理，可以有效地避免高铬铸铁和低碳钢冷隔现象的出现，复合铸件冶金结合质量好，铸件内部不会出现缩孔及缩松，碳钢和高铬铸铁与隔板之间不会产生气孔及氧化夹杂；缺点是：复合过程中碳钢液和高铬铸铁液不断对隔板冲刷。因此，需要准确控制金属液浇注速度，同时由于需要采用双浇注系统，对砂型制备工