DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2023.3017

双液双金属技术研究及应用现状

杨鹏辉[1]，王　蓉[1]，荣守范[2]，刘新成[3]，杜琳琳[1]，喇培清[1]，郭铁明[1]，李祖赫[1]

(1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院，甘肃兰州 730050；2. 佳木斯大学 材料科学与工程学院，黑龙江 佳木斯 154007；3. 嘉峪关联重机械设备有限公司，甘肃 嘉峪关 735100)

摘　要：近年来随着双液双金属技术的快速发展，在锤头、衬板、反击板、颚板等耐磨零件制造中得到了大量应用。本文简要介绍了双液双金属技术的成型方法、铸造方法和目前双液双金属工艺的技术难点、应用现状。双液双金属在锤头等方面应用较为成熟，但在批量生产的凝固温度匹配度掌握还略有缺陷。研究的深入以及材料和工艺的扩展会促使双液双金属技术不断突破，满足现代生产的需求，对零件的性能控制和使用范围更细化和完善，此外，本文还提出了双液双金属技术未来需突破的技术瓶颈和发展方向。

关键词：双液双金属复合技术；耐磨材料；铸造工艺；应用现状

中图分类号：TG24　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2023)04-0332-06

Research and Application Status of Dual-liquid Bimetal Technology

YANG Penghui[1], WANG Rong[1], RONG Shoufan[2], LIU Xincheng[3], DU Linlin[1], LA Peiqing[1], GUO Tieming[1], LI Zuhe[1]

(1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China; 3. Jiayu Heavy Machinery Equipment Co., Ltd., Jiayuguan 735100, China)

Abstract: In recent years, the dual-liquid bimetal technology has been widely used in the manufacture of wear-resistant parts, such as hammers, lining plates, impact plates and jaw plates. The forming method, casting method, technical difficulties and application status of double liquid bimetal technology are briefly introduced in this paper. The application of dual-liquid bimetal in a hammer is mature, but the matching degree of solidification temperature in mass production is still slightly defective. The deepening of research and the expansion of materials and processes will promote the continuous break through of dual-liquid bimetal technology, meet the needs of modern production, and refine and perfect the performance control and application range of parts. In addition, this paper also proposes the technical bottleneck and development direction of bimetallic technology that needs to be addressed in the future.

Key words: dual-liquid bimetal technology; wear-resistant material; casting technology; application status

随着现代科学和工业技术的迅速发展，单一金属或合金受强韧不能匹配的限制无法满足当前生产应用的需求，双金属因其独特的性能优势越来越受欢迎。双金属具有两种材料的性能特点，表现出优异的物理、化学和机械性能，使其在建筑装饰、汽车制造和航空领域具有非常广阔的应用前景[1-4]。因此，由不同性能金属结合而成的双金属复合材料近年来受到了世界各国的广泛关注。

双金属复合材料采用各种复合成型技术，由两种具有不同物理、化学和机械性能的金属制成，在界面上形成冶金结合[5-11]。两种金属具有各自的优势，既能克服单一金属不能满足强韧匹配的缺点，又能充分发挥两种金属各自优点。例如，铜–钢双金属复合材料具有良好的耐蚀性、摩擦学性能和力学性能，并且节省了大量的有色金属，降低了成本，可以替代许多传统材料[12]。

双金属复合材料的制备技术近年来有了很大的进步。双金属可以通过复合铸造、热轧或冷轧、扩散键合、热锻、挤压熔覆、焊接和喷射沉积等多种工艺制备[13-14]。双金属铸件技术被认为是比其他双金属加

收稿日期：2023-01-18

基金项目：国家自然科学基金(52161007)；兰州理工大学红柳优秀青年项目(01/062206)；甘肃省高等学校产业支撑计划(GCJ2022-38)

作者简介：杨鹏辉，1992 年生，博士，讲师. 研究方向：双液双金属技术研究. 电话：15593190528, Email: yangph@lut.edu.cn

通讯作者：喇培清，1971 年生，博士，教授. 研究方向：先进金属结构材料及成形技术研究. 电话：13893166172, Email: pqla@lut. cn

引用格式：杨鹏辉，王蓉，荣守范，等. 双液双金属技术研究及应用现状[J]. 铸造技术，2023, 44(4): 332-337.

YANG P H, WANG R, RONG S F, et al. Research and application status of dual-liquid bimetal technology[J]. Foundry Technology, 2023, 44(4): 332-337.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

工技术更经济有效的方法。根据制备状态，可分为3种制备方法：固–固、固–液及液–液法。采用固–液或液–液工艺制备的双金属材料的界面结构是影响金属间键合的最重要因素。为了使双金属铸造技术实现高质量的结合，人们对其进行了大量研究，以获得更高的性能和更低的生产成本。其中，液–液复合铸造工艺是一种制备双金属的新工艺，是指两种液体原料金属在一定的浇注温度下，通过浇注铸造获得同时具有两种材料特性的优质冶金结合的双液双金属[15]。双液双金属技术是两种处于液态的金属相互接触，由于没有固体镶件，所以具有工艺简单和生产成本低廉的优点。双液双金属复合铸造技术可以实现两种材质大面积平面冶金复合，为解决横向裂纹和磨损层性能不均匀问题提供了新的方法[16-18]。目前，液–液双金属产品主要集中在锤头、衬板和背板等应用上。

1　液–液双金属复合法

液–液法是指两种金属的原料在制备过程中处于熔融状态或液态[19-28]，属于铸造技术范畴，主要包括成型转化法和双熔金属法。这种方法的优点是成本低，生产率高。然而，对于精密度较高的复合工件，需要进行后续的机械加工。

1.1　成型转化法

如图1(a)所示，成型转化法是指在制备过程中，将熔融的原料分别浇铸到转化后的模具中[29]。在这种情况下，两种金属不是铸造在同一个模腔中，而是在两次铸造过程中对不同的顶铸箱进行成型转换。该方法可以直接观察到原熔融金属的凝固状态。然后，根据前一种金属的状态铸造另一种熔融金属。因此，在铸造过程中不会出现两种金属的“混料”现象[30-31]。结果表明，该方法避免了铸造时间的盲目控制，保证了凝固过程中的冶金结合。该双金属坯料的界面层厚度均匀，可制造出特定形状的接触面。因此，双金属复合材料的界面不再局限于平面。但对技术要求较高，操作难度较大。

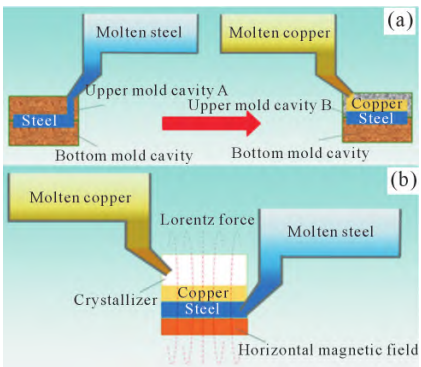

图1　液–液双金属复合法原理图：(a) 成型转化法，(b) 双熔融金属法[29]

Fig.1　Schematic diagram of the liquid-liquid bimetallic composite method: (a) molding conversion method, (b) double molten metal method[29]

1.2　双熔融金属法

双熔融金属法是将两种熔融金属从不同的入口浇注进结晶器的方法。即电磁场作用将结晶器分为上下两个熔池，解决了两种金属液的混合问题。主要工艺原理是：在结晶器底部施加一个水平磁场，阻止两种金属液的混合。两种不同成分的液态金属同时通过长型和短型的浸入式水口进入结晶器，借助位于结晶器下面的水平磁场的作用，产生与上部金属液重力相等的足够大的洛伦磁力，使结晶器内形成上下两个区域。在制备过程中，上部区域中的金属液形成外层金属，而下部区域的金属液进入芯部成为内层金属。利用电磁场将结晶器内分为上、下两部分，解决了两种金属液混溶的问题，通过精确控制磁场强度以及两种金属液浇注速度，可以得到厚度稳定的外层金属和性能均匀的组织。图1(b)给出了双熔融金属方法的示意图。在制备过程中，洛伦兹力抑制了两种熔融金属的对流混合[29]，在洛伦磁力的作用下，结晶器可分为两段，其中分界线根据水平磁场力划分，最终在冷却和凝固过程中完全制备出双金属复合材料[23-28]。

2　铸造方法

双液双金属铸造技术是指将两种不同的金属液在一定温度浇入铸型中，使两种金属在液态状况下复合，同时还保留各自原有的性质[26-28]。利用这种复合技术的关键主要在于通过控制两种金属的浇注温度和浇注间隔等铸造工艺参数，来获得优良的金属液界面融合质量及高强度结合界面。双液双金属复合技术常用的两种方法为定量浇注工艺和隔板立浇工艺。定量浇注工艺为先浇铸一定量的第一种金属，待第一种金属凝固至一定温度后再浇入另外一种金属，即定量浇注工艺；另一种方法是隔板法，为了防止浇注时机把握不准导致金属液发生混合，即采用在铸型中间插入燕尾形隔板，两种液态金属同时浇注时，隔板发生少量融化，但又起到隔离作用。因此，双液双金属铸造复合技术是在两种金属液不混合的前提下使两种金属熔为一体，获得尽可能大的结合面积[32-33]。

2.1　定量浇注工艺

定量浇注工艺指事先估算金属液质量，将两种金属分别熔化，第一种金属浇注完毕并冷却至固液

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

线温度附近，按一定的时间间隔，浇入第二种金属，部分已凝固的先浇金属在后浇入金属的作用下发生熔化(图 2[34])。为保证先后浇注两种金属不出现大量冲混，一般情况下，先浇入高熔点、高密度的金属液，低熔点、低密度的后浇注，浇口应开在溢流口同一水平位置。

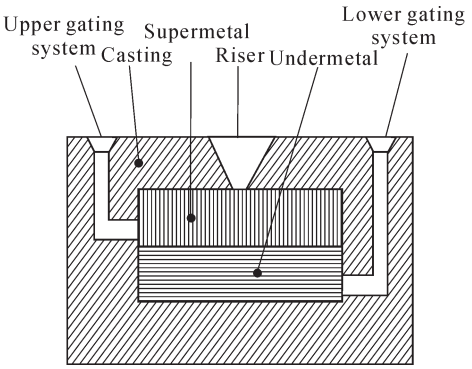

图 2 双金属定量平浇工艺[34]
Fig.2 Bimetal quantitative pouring process[34]

采用该复合工艺成品率高，造型和浇注系统相对简单，只要浇注时机控制得当，可确保两层金属间为冶金结合且结合强度高，结合区无气孔、夹渣等明显缺陷。金属液浇注温度和浇注间隔时间是生产高质量双金属耐磨铸件的两个关键，时机把握不好则会出现冲混、复合界面不牢固、冷隔或裂纹等缺陷，导致耐磨工件性能下降。对某些具有弧状表面或底部具有凹坑的零件则不能采用定量浇注的方法，会导致零件的耐磨层部分厚度不均匀，不利于衬板的均匀磨损，对材料利用也是不合理的。对于形状是平面类的零件可以采用该工艺进行生产。但在实际生产中，由于需要对定量浇注和现场水平度的要求具有较高的精度把握，二次浇注时间的间隔液难以控制，因此容易产生双金属间结合不良或两种金属冲混的现象，导致在实际生产中成品率较低。

缪燕平[35]采用消失模液–液复合铸造工艺制造高铬合金+中碳钢双液双金属复合锤头，对复合锤头的冶金结合界面及其铸态组织进行研究。结果表明，双金属的融合过渡界面呈不规整的线条状、组织致密，形成了稳定的冶金结合区。采用消失模铸造生产的双液双金属复合锤头，既需保证锤柄部分的高韧性，又需要锤端部分的硬度和耐磨性达到需求，增强复合锤头综合性能，使其得到充分的循环利用以提升经济效益。采用消失模铸造工艺生产，在浇铸时将锤头模型倒放，定量在 8~13 s 内将锤柄部分用中碳钢金属液先浇入底部，使金属液缓慢冷却。同时做好结合面防氧化保护措施，等锤柄部分冷却凝固 100 s 左右后，在 10~15 s 内从冒口部位快速浇入高铬合金液，直至冒口充满高铬合金液时停止浇注。因锤头尺寸较小，结合企业实际生产工艺条件，采用的工艺简图如图 3 所示。

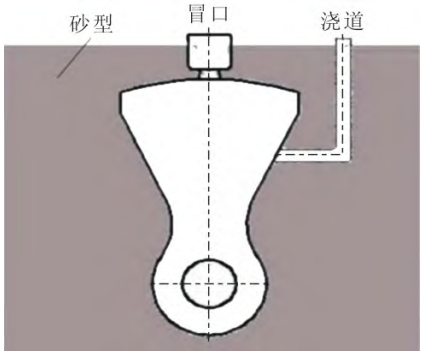

图 3 浇注工艺简图[35]
Fig.3 Schematic diagram of the casting process[35]

2.2 隔板工艺

双液隔板工艺是在铸型中设置碳钢隔板，将铸型分为两部分。浇注时，同时将两种金属分别注入各自的型腔，为了防止隔板移位或烧穿，要控制注入速度，尽量使金属液面同步上升[33,36-37]。图 4 为隔板工艺示意图，其不同之处是两股金属液被隔板隔离开来，在结晶器部形成有过渡层的双金属复合板材[38]。

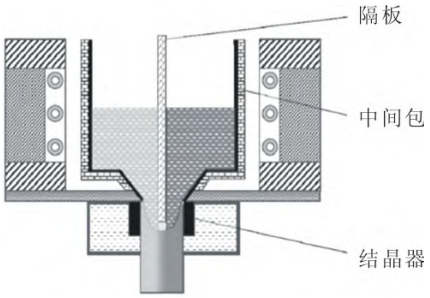

图 4 隔板工艺示意图[38]
Fig.4 Schematic diagram of the separator process[38]

浇注前隔板需要经过 90%(体积分数)的盐酸清洗干净，烘干后再放人砂箱。隔板的固定，可采用一般铸件常用的冷铁或其他固定方法，浇注时不容移动。在浇注过程中要求两种金属液面在隔板两侧等速缓慢上升，即两液面的瞬时位置高度一致，以减少隔板两侧的压力差。因为压差会引起隔板向压力小的一侧倾斜，增加耐磨层厚度的不均匀性；同时也会使液面高的金属通过隔板与型腔的空隙，向液面低的一侧渗流，影响铸件的成分与组织均匀。因此，在浇注过程中需要很好地控制两种金属的浇注速度。实际生产中，为了保证金属液不至于冲混，要求隔板不能完全熔透。因此，隔板不能太厚也不能太薄。隔板太薄，在浇注过程中很快被烧穿，影响耐磨层的性能。所以根据铸件的壁厚、浇注的速度和温度，合理

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

控制隔板的厚度，既要让两种金属将隔板部分熔化,也要起到充分隔离的作用。对弧形类零件,可以采取隔板立浇工艺,但对其造型工艺复杂,对隔板厚度和材质具有较高的标准,同时需要严格控制浇注温度,否则易产生隔板熔穿,导致两种金属冲混或隔板出现变形,影响两层金属的厚度。该工艺不适用于铸造复杂铸件,原因是在铸造过程中芯子可能无法安放,两种合金浇注速度存在差异,隔板会变形偏移,无法获得能达到要求的铸件。

3 双液双金属的应用现状

双液双金属工艺在破碎机锤头、衬板、反击板、颚板等耐磨零件的制造上应用广泛,特别是在双金属复合锤头的生产方面。经过多次工艺试验,胡祖尧等[39]选取高铬铸铁作为抗磨层,低碳钢材料作为颚板衬垫层，采用双液双金属铸造工艺生产颚板,较好地解决了双金属间如何实现有效冶金结合的难题,到目前为止,已有万吨以上产品投入市场。这种双金属颚板能极大地提高耐磨性,且能有效地承受冲击而不至于断裂。其相对耐磨系数是传统高锰钢的 4~6 倍,使用寿命是传统高锰钢的 3~5 倍以上,经过多年的实际应用,受到了用户的好评,取得了一定的经济效益与社会效益。高铬白口铸铁锤硬度高、脆性大、成本高,在冲击载荷强度下使用会受到限制,而锰钢生产制造的锤体耐磨性好,但硬度偏低,耐磨性不足。复合锤则满足了锤柄和锤头所需要的高韧性,提高了零件的使用寿命,其耐磨性相对于单一材料制备的锤头提高了 3 倍以上。双液双金属工艺降低了使用成本,是一种既安全又经济的方案[40-42]。该工艺适合很多型号的锤头应用生产,经过近些年的研究,已经取得了良好的成果,锤头使用寿命显著提高,应用这种工艺制造的高铬铸铁/高锰钢和高铬铸铁 /ZG35 双金属破碎机锤头已取得成功[33-34,42]。

双金属锤的设计可以延长锤头的使用寿命,从而降低了整体成本。将两种不同的液态金属浇注到两种浇注设计的模具中,对于同时承受高动应力和高磨料磨损的零件,可以显著提高其寿命。目前,特殊类型的轧辊通常采用双金属液–液法(浇注和铸造两种合金获得),具有非常硬的表面、高耐磨性和高抗弯应变能力。这样获得的轧辊相对使用一种合金制造的轧辊会具有更高的工作表面硬度以及更好的耐磨性。由不同质量的铸铁制成的双金属铸轧辊在制造用于各种轧机架的轧辊时非常重要。这些特殊性给每个辊留下了特定的宏观和微观结构。选用低合金钢(或低碳钢)作锤柄,高铬铸铁作耐磨部分的卧式破碎机复合锤头,高锰钢锤头相对寿命为 1,高铬铸铁–低碳钢复合锤头则为 6.8[32]。

双液双金属复合铸造技术逐渐应用在各类零件中,对于简单零件,可通过控制界面形状、厚度等实现两种金属复合,如铲齿曲形界面、盾构机滚刀刀圈弧形界面。对于复杂零件，可通过先双液双金属复合,再在铸钢处焊接的方法实现,目前双液双金属复合铸造技术已逐渐应用于更广泛的零件中，如大型湿磨机衬板、旋回破护板等。其中,佳木斯大学荣守范教授团队已经突破超大平面薄板复合技术，为各类护板的寿命提高提供了方向。

4 双液双金属工艺的技术难点

液–液复合铸造是在适当的工艺条件下,把熔炼好的两种液态金属分别浇注到同一铸型内，待其冷却凝固成型,得到兼具此两种金属性能的耐磨铸件[36]。使用双金属复合铸造有一些好处，因为由于金属熔化和界面处加速扩散而在金属之间形成了黏结化合物,从而产生了相对较高的结合强度。此外,还可以直接从熔融的基础上制造复合带。金属的结合主要取决于两种金属的润湿性、反应性、熔化温度、导热系数和热膨胀等因素。虽然液–液双金属复合铸造技术可以实现不同金属之间的冶金结合，为解决横向裂纹和磨损层性能不均匀问题提供了新的方法。但两种金属的界面熔融态结合程度及结合强度的好坏是决定这种复合方式是否成功的关键，因此必须严格控制两种金属在不混合的情况下熔为一体，且保证具有一定的结合面积[37]。在试验与实际生产中发现,这种工艺主要存在以下问题:

(1)随着消失模技术的发展,双液金属消失模铸造开始兴起,消失模铸造适合小界面铸造,但当界面较大时,消失模铸造在负压下存在大量缺陷。

(2)针对大型双金属复合铸件,界面控制仍然是一大难题,如何做到界面均一平稳复合,实现不同金属之间的冶金结合仍需解决。

(3)一种金属先浇注后,砂箱型腔在高温金属液烘烤下易产生疏松、落砂、甚至塌箱,导致浇注失败,影响铸件质量,因此,开发低成本防脱落涂料也是需要解决的重要难题。

5 双液双金属技术展望

通过双液双金属复合铸造工艺可以将两种不同性质的合金结合在一起，但对于复合过程中不同合金的凝固时间不易掌握，在批量生产中难以有效应

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

用。因此，确定合理的浇注温度和浇注时间，可防止结合界面性能差、组织不均和孔洞等问题的出现，也可防止两种合金出现混料现象。虽然双液双金属技术具有节约金属材料、成本低廉的优点，但需要更深入的研究，并积累完整的技术数据来弥补潜在的风险。双液双金属技术作为铸造技术中的重点发展技术之一，加快对双液双金属技术的科学研究，充分发挥双金属技术的独特优势，将成为提高国家技术发展的重要推力。

参考文献：

[1] JIANG W M, JIANG Z L, LI G Y, et al. Microstructure of Al/Al bimetallic composites by lost foam casting with Zn interlayer[J]. Materials Science and Technology, 2018, 34(4): 487-492.

[2] OROZCO K M, DESSI J G, AFONSO C R M, et al. Experimental study and thermodynamic computational simulation of phase transformations in centrifugal casting bimetallic pipe of API 5L X65Q steel and Inconel 625 alloy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 318-326.

[3] 刘洋. 汽车发动机缸体铝/铁双金属复合工艺及性能研究[D]. 山东：山东大学，2015.
LIU Y. Study on composite technology and properties of Al/Fe bimetal composite in automobile engine cylinder[D]. Shandong: Shandong University, 2015.

[4] BIAN W L, RONG S F, ZHU Y C, et al. Research and application of dual liquid bimetal composite casting hammer[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 271-272: 268-271.

[5] ADAMS D P, VILL M, TAO J, et al. Controlling strength and toughness of multilayer films: A new multiscalar approach[J]. Journal of Applied Physics, 1993, 74(2): 1015-1021.

[6] 马志新，胡捷，李德富，等. 层状金属复合板的研究和生产现状[J]. 稀有金属，2003(6): 799-803.
MA Z X, HU J, LI F D, et al. Overview of research and manufacture of layer-metal composite plate[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2003(6): 799-803.

[7] DURST G. A new development in metal cladding [J]. JOM, 1956, 8: 328-333.

[8] 李宝棉，李兴刚，许光明，等. 铜/钢复合材料的研究及应用[J]. 材料导报，2002(2): 22-24, 30.
LI B M , LI X G, XU G M, et al. Study and application of Cu/steel clad metal[J]. Materials Reports, 2002(2): 22-24, 30.

[9] IBRAHIM M M, EL-HADAD S, MOUEAD M. Effect of liquid-solid volume ratios on the interfacial microstructure and mechanical properties of high chromium cast iron and low carbon steel bimetal[J]. Materials Research Express, 2020, 6(12): 1265c2.

[10] XU J Z, GAO X J, JIANG Z Y, et al. Microstructure and hot deformation behavior of high-carbon steel/low-carbon steel bimetal prepared by centrifugal composite casting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86: 817-827.

[11] 于九明，孝云祯，王群骄，等. 金属层状复合技术及其新进展[J]. 材料研究学报，2000, 14(1): 12-16.
YU J M, XIAO Y Z, WANG J Q, et al. New development of the technology of clad metal[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2000, 14(1): 12-16.

[12] PLESCHIUTSCHNIGG F P, VON HAGEN I, EL GAMMAL T, et al. Inversion casting of steel strip[J]. Steel Times, 1995: 223(6), 228-229.

[13] PAN D, GAO K, YU J. Cold roll bonding of bimetallic sheets and strips[J]. Materials Science and Technology, 1989, 5(9): 934-939.

[14] JIANG Z L, FAN Z T, JIANG W M, et al. Interfacial microstructures and mechanical properties of Mg/Al bimetal produced by a novel liquid-liquid compound casting process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 261: 149-158.

[15] ZHU Y C, RONG S F, YANG H S, et al. Microstructure and formation mechanism of two-liquid bimetal composite interface[J]. Advanced Materials Research, 2013, 690-693: 390-393.

[16] XIAO X F, YE S P, YIN W X, et al. High Cr white cast iron/carbon steel bimetal liner by lost foam casting with liquid-liquid composite process[J]. China Foundry, 2012, 9(2): 136-142.

[17] RONG S F, GUO J W, ZHU Y C, et al. Influence of casting technique on the mechanical properties of bimetal composites[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011, 18(S1): 546-549.

[18] RONG S F, ZHOU H T, ZHU Y C, et al. Study on liquid-liquid bimetal composite casting hammers[J]. China Foundry, 2014, 11(5): 412-417.

[19] DU Y H, ZHANG P, ZHANG J, et al. Radial distribution of SiC particles in mechanical stirring of A356-SiC_p liquid[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2012, 28(10): 951-955.

[20] 曹志强，刘彬，孙建波，等. AlSi/AlMn 双金属复合材料制备试验研究[J]. 武汉科技大学学报，2013, 35(1): 19-24.
CAO Z Q, LIU B, SUN J B, et al. Preparation of bimetal composite of AlSi/AlMin alloy by continuous casting[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2013, 35(1): 19-24.

[21] 吴彩虹，李廷举，金俊泽. 双金属复层材料制备现状及研究进展[J]. 铸造，2005(2): 103-107.
WU C H, LI T J, JIN J Z. Development of clad metal processing[J]. Foundry, 2005(2): 103-107.

[22] 管平，马青圃，胡祖尧，等. 双金属耐磨件复合铸造工艺试验[J]. 农业机械学报，2006(7): 174-177.
GUAN P, MA Q P, HU Z Y, et al. Research and application of bimetal casting process used for abrasion resistance parts[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006(7): 174-177.

[23] 张平，张元好，常庆明. 高强铜/钢双金属复合导板的界面结合机制[J]. 特种铸造及有色合金，2012, 32(8): 768-770.
ZHANG P, ZHANG Y H, CHANG Q M. Bonding mechanism of the high strength copper/steel bimetal interface of composite guide plate[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2012, 32(8): 768-770.

[24] TAKEUCHI E, ZEZE M, TANAKA H, et al. Novel continuous casting process for clad steel with level dc magnetic field[J]. Ironmaking & Steelmaking 1997, 24(3): 257-263.

[25] ZEZE M, TANAKA H, TAKEUCHI E, et al. Continuous casting of clad steel slab with level magnetic field brake[J]. Steelmaking Conference Proceedings, 1996, 79: 225-230.

[26] DHARMA T J. Edge-bonding of different metals: US3146099A

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[P]. 1964-08-25.

[27] 张平，张元好，常庆明. 双金属复合导板的研究与发展现状[J]. 铸造设备与工艺，2012(1): 53-55.
ZHANG P, ZHANG Y H, CHANG Q M. Current development and research of bimetal clad plate[J]. Foundry Equipment & Technology, 2012(1): 53-55.

[28] 田雅琴，秦建平，李小红. 金属复合板的工艺研究现状与发展[J]. 材料开发与应用，2006, 21(1): 40-43.
TIAN Y Q, QIN J P, LI X H. Current state and trend of metal clad sheet manufacture technology[J]. Development and Application of Materials, 2006, 21(1): 40-43.

[29] WANG Y R, GAO Y M, LI Y F, et al. Review of preparation and application of copper-steel bimetal composites[J]. Emerging Materials Research, 2019, 8(4): 538-551.

[30] 何冰，武晓峰，杨建新. 电渣熔铸模具钢/低合金钢双金属平板件的制备与性能[J]. 中国铸造装备与技术，2005(6): 10-12.
HE B, WU X F, YANG J X. Investigation of the preparation and properties of the bimetal composite by the electrocasting[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2005(6): 10-12.

[31] DU Y H, ZHANG P, WANG Y J, et al. The uniform distribution of SiC particles in an A356-SiC_p composite produced by the tilt-blade mechanical stirring[J]. Acta Metallurgica Sinica(English Letters), 2013, 26: 69-74.

[32] 杜西灵，杜磊. 钢铁耐磨铸件铸造技术[M]. 广州：广东科技出版社，2006.
DU X L, DU L. Steel wear-resistant casting casting technology[M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 2006.

[33] 管平，马青圃，胡祖尧，等. 双液双金属复合铸造颚板新工艺研究与应用[J]. 铸造，2005, 54(8): 779-782.
GUAN P, MA Q P, HU Z Y, et al. The research and application of bimetal casting process for jaw-crusher plate[J]. Foundry, 2005, 54 (8): 779-782.

[34] 蔡冬根. 高性能双液双金属复合锤头铸造工艺及组织性能研究[D]. 南昌：南昌大学，2020.
CAI D G. Research on microstructure and properties of high performance two-liquid bimetal composite hammerheads by precision casting[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.

[35] 缪燕平，蔡冬根，章庆. 双液双金属复合锤头的界面组织及磨损性能研究[J]. 热加工工艺，2022, 51(24): 45-48.
MIU Y P, CAU D G, ZHANG Q. Study on interface microstructure and wear performance of double-liquid bimetallic composite hammer head[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(24): 45-48.

[36] 张跃. 型内感应加热钢/铝双金属复合成型工艺[D]. 郑州：郑州大学，2007.
ZHANG Y. Study on steel/aluminum bimetal composite casting produced with in-mold induction heating[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2007.

[37] 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.

[38] 陈玉娥，仲红刚，张申，等. 双金属复合材料铸造成形工艺综述[J]. 铸造，2021, 70(6): 646-650.
CHEN Y E, ZHONG H G, ZHANG S, et al. Review on casting technologies of bimetallic composites[J]. Foundry, 2021, 70(6): 646-650.

[39] 胡祖尧，杜月春，管平，等. 双液、双金属复合颚板的研制[J]. 现代铸铁，2007(2): 32-35.
HU Z Y, DU Y C, GUAN P, et al. Development of Bi-metal liquid cast jaw plate for stone breaker[J]. Modern Cast Iron, 2007(2): 32-35.

[40] 涂小慧. 钢与高铬铸铁的复合铸造[J]. 铸造，1996, 45(9): 40-41.
TU X H. Composite casting of steel with high-chrome cast iron[J]. Foundry, 1996, 45(9): 40-41.

[41] 王超，程红晓，王祥东，等. 高铬铸铁—铸钢锤头的镶铸工艺[J]. 铸造设备研究，2004(2): 18-19, 27.
WANG C, CHENG H X, WANG X D, et al. Insert casting of the high chromium cast iron-cast steel hammer[J]. Foundry Equipment & Technology, 2004(2): 18-19, 27.

[42] 刘耀辉，刘海峰，于思荣. 液固结合双金属复合材料界面研究[J]. 机械工程学报，2000, 36(7): 81-85.
LIU Y H, LIU H F, YU S R. Study on bimetal composite material interface by liquid-solid bonding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(7): 81-85.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net