

# 金属及表面强化层氩弧重熔工艺研究进展

马力, 张亚明

(辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:**作为一种应用十分广泛的金属材料表面后处理工艺,氩弧重熔技术具有均匀金属材料的表层组织、减缓焊接接头的残余应力、改善金属基体与强化层之间的界面结合状态等优点,在一定程度上可以提高金属及表面强化层的性能。综述了氩弧重熔工艺的原理、特点及工艺参数(重熔电流、移动速度、氩气流量和电弧长度)对重熔效果的影响,着重介绍了氩弧重熔技术在金属表面(铸铁、钢和合金)及其表面强化层(涂层、热浸镀层、渗层和堆焊层)后处理过程中的应用进展。最后探讨了金属及表面强化层氩弧重熔工艺的发展方向:1)强化内在机理研究及界面反应状态研究;2)完善快速凝固理论和界面结构研究;3)提升强化层的结构设计与氩弧重熔工艺条件的契合度;4)加强相关的数值模拟研究。

**关键词:**氩弧重熔;重熔原理;铸铁;涂层;热浸镀层;渗层;耐磨性

**中图分类号:** TG156.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3660(2016)04-0218-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.037

## Status and Development of Metal and Surface Strengthened Layers by Argon Arc Remelting Technology

MA Li, ZHANG Ya-ming

(College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**ABSTRACT:** As a kind of widely used post-treatment process applied to the metal surface, argon arc remelting technology has many advantages, such as improving the microstructure on the surface of metal material, relieving the residual stress of welded joint and modifying the integrated state of interface between the metallic substrate and the strengthening layer, which promotes the combination properties of metal and surface strengthened layers to some degree. The principle, characteristics of argon arc remelting technology and the effects of process parameters, including remelting current, movement speed, flow rate of argon gas and arc length, on the result of remelting were introduced. Meanwhile, the applications of argon arc remelting technology in follow-up treatment methods of metals (including cast iron, steel and alloy), and surface strengthened layers (including coating, hot-dipped coating, layer and welding cladding) were highlighted. Furthermore, it also pointed out the development directions of metal and surface strengthened layers by argon arc remelting in the future. Firstly, the related research of the internal mechanism and interface reaction remains to be strengthened; secondly, the rapid solidification theory and the research related to interface structure remain to be perfected; thirdly, the degree of matching between the structural design of strengthening layer and the process conditions

收稿日期: 2015-12-14; 修订日期: 2016-01-17

Received: 2015-12-14; Revised: 2016-01-17

作者简介: 马力(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向为材料表面加工。

**Biography:** MA Li (1990—), Male, Master graduated student, Research focus: surface processing of material.

通讯作者: 张亚明(1968—),男,博士,副教授,主要研究方向为煤矿地质及矿物加工。

**Corresponding author:** ZHANG Ya-ming (1968—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: coal mine geology and mineral processing.

of argon arc remelting remains to be promoted; fourthly, the relevant numerical simulation study also remains to be strengthened.

**KEY WORDS:** argon arc remelting; principle of remelting; cast iron; coating; hot-dipped coating; layer; wear resistance

传统的钢、铸铁、合金等金属及其表面强化层(包括涂层、镀层、渗层和堆焊层等)的失效大多是由当前的工况条件超出了表面负荷而引起的,因而提高金属及表面强化层的性能对延长金属零部件的寿命和提高材料的使用效率具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。近年来,激光、电子束和氩弧等技术的广泛应用,使金属及表面强化层的重熔处理有了更大的发展空间。重熔处理技术可以均匀金属表面组织、减缓焊缝的淬硬组织和残余应力、有效改善强化层与基体间的结合强度和内在质量,从而提高金属及表面强化层的硬度、耐磨性、耐蚀性等性能<sup>[4-5]</sup>。但在某些条件下,重熔处理也会恶化金属及表面强化层的性能,例如对非晶涂层进行氩弧重熔时,改性层表面会发生晶化反应,对提高其硬度和耐蚀性不利<sup>[6]</sup>。因此,金属及表面强化层在改性过程中要选择适当的强化处理方法。目前,常用的重熔处理方法主要有氩弧重熔、激光重熔、电子束重熔、火焰重熔、感应重熔和热处理炉整体加热等,而氩弧重熔由于操作简单、设备轻便灵活、易于维护和实现自动化而受到广泛关注<sup>[7]</sup>。本文综述了氩弧重熔对金属及表面强化层组织和性能的影响,以期对氩弧重熔工艺在生产实际中的应用起到推广作用。

## 1 氩弧重熔工艺

### 1.1 氩弧重熔原理及特点

氩弧重熔的实质是在焊接电流的作用下,正负电极在氩气介质中产生强烈而持久的放电现象(即电弧),电弧燃烧后弧柱中充满高温等离子体并释放大量的热量,这种热量将金属及表面强化层中最易熔化的成分熔化,使熔融液相促进扩散强化过程和成分渗透,最终获得组织均匀致密、孔隙率大幅降低的表面改性层<sup>[8]</sup>。氩弧重熔过程示意图如图1所示。

在氩弧重熔过程中,其能量来自于气体介质放电所产生的电弧热,本质是气体介质的电离。目前国内外多采用数值模拟的方法对氩弧重熔机理进行深层次探究。柴彤彤等<sup>[9]</sup>利用ANSYS有限元分析软件对氩弧的电弧分布状态进行了模拟分析。氩弧等离子体在电磁力的推动下向下、向内运动,当初始温度达到10000 K时开始电离并加速运动。在阴极表面(钨

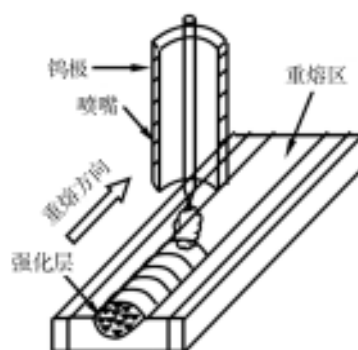


图1 氩弧重熔过程示意图

Fig. 1 Schematic of argon arc remelting

极尖端)附近,电磁力作用使此处的氩弧等离子体流速达到最大,但在后续的运动过程中,因受到阳极的冷却作用而导致流速迅速下降并逐渐向外流动,最终使氩弧的温度场分布呈钟罩形。这是由于钨极尖端的温度最高,等离子体最为集中,整个体系的总热量最高,因此由内向外温度逐渐降低<sup>[10]</sup>。Bini等<sup>[11]</sup>研究了氩弧等离子体的能量分布状态。等离子体在热力学条件下依靠温度的传输特性进行能量传递与流动,阴极喷嘴形状对电弧行为和能量分布有重要影响。孙清洁等<sup>[12]</sup>采用机械耦合方式将超声能量加载到氩弧上,研究发现电弧压力分布呈中心对称分布。拟合结果显示,超声电弧压力的径向分布与阳极斑点上的电流密度分布和等离子流的速度分布特征是一致的,属于正态分布;而普通电弧压力的径向分布服从双面指数分布。高斯分布电弧力更加集中是由于电弧空间内的超声振动导致粒子瞬时速度增加,改变了电弧空间内粒子的导热性,电弧空间内散热也大幅度增加。

氩弧重熔技术具有如下优点:1) 氩气完全覆盖电弧、金属和表面强化层,能有效隔绝周围空气,使金属表面与周围的氮、氧等不发生化学反应,减少了重熔区合金元素的烧损和氧化,从而起到良好的保护作用;2) 钨极电弧的燃烧十分稳定,热源由电流控制,热输入易于调整,适用于薄板、管材等表面及局部重熔处理和野外作业的需求;3) 氩弧重熔成本低廉、设备轻便易携、操作方便灵活,易于该技术在工业生产中的推广和普及。氩弧重熔技术的缺点是与激光重熔、电子束重熔同样存在焊接效率低的问题,这在一

定程度上限制了其在大尺寸工件修复中的应用。

## 1.2 氩弧重熔工艺参数

氩弧重熔的工艺参数主要包括重熔电流、移动速度、氩气流量和电弧长度。重熔电流直接决定能量输入和重熔层深度。随着重熔电流的增加,熔化热输入增大,重熔层深度增加,熔融态金属液不断向周围扩散和渗透,使金属及表面强化层内的气孔和裂纹数量逐渐减少甚至消除。但重熔电流过高将引起电弧温度急剧增加,导致试样内部产生严重的变形和开裂。移动速度是指热源沿重熔方向在单位时间内移动的距离。热源移动速度过慢,电弧停滞时间长,金属表面因吸收热量过多而造成元素烧损和基体组织粗大<sup>[13]</sup>;移动速度过快,金属表面因接收的电弧能量不足而导致表面无法熔透。氩气流量的选取与其他工艺参数相关。就普通情况而言,氩气流量的选取应以保证重熔层质量合格、成形美观的最小值为标准。这样既可以稳定电弧、提高重熔层质量,又可以节约成本、避免资源浪费。电弧长度是指钨极尖端到工件之间的距离。当电弧较短时,电弧与空气对流少且稳定,但钨极易擦伤试样表面甚至发生短路焊死;当电弧较长时,与空气接触面积的增大使电弧温度急剧降低甚至导致电弧漂移,产生重熔偏离和未熔透现象。

## 2 金属表面氩弧重熔

### 2.1 铸铁

我国对于铸铁表面的氩弧重熔处理研究最早起源于20世纪70年代末期。目前,国内外研究已经将氩弧重熔技术推向灰铸铁、球墨铸铁及合金铸铁等多种零部件的表面强化处理,例如汽车发动机和内燃机的缸体和缸套、凸轮轴、泵体和阀门等<sup>[14-15]</sup>。

凸轮轴是发动机中进行滚动摩擦和滑动的主要部件。随着汽车行业的快速发展,传统发动机功率和转速已经不能满足当前需要,对凸轮轴的硬度提出了更高的要求。Chernyshev等<sup>[16]</sup>提出对铸铁凸轮轴进行氩弧重熔处理以改善其性能,研究发现氩弧重熔可以使凸轮轴表面金属熔化再结晶,使其表层组织由珠光体转变为莱氏体,在运转中能承受超过1000 MPa的中心压力。刘胜新等<sup>[17]</sup>对灰铸铁表面进行氩弧重熔硬化,形成了耐磨性良好的莱氏体白口层。重熔层的熔深和硬度随铸铁碳当量的增加而降低,其在试验

条件下的耐磨性为相对于基体的8.00~10.31倍。李泉华等<sup>[18]</sup>在合金铸铁凸轮轴氩弧重熔研究中发现,重熔层组织以细枝晶状莱氏体和针状马氏体为主,具有良好的抗擦伤性和疲劳磨损性,这是因为重熔层中细小条状渗碳体和少量呈枝晶分布的珠光体混合组织与凸轮表面的点状石墨坑共同作用,使凸轮表层具有较高的强韧性和良好的润滑性。但氩弧重熔处理也会导致凸轮轴重熔层的微观组织存在缺陷,任三平等<sup>[19]</sup>分析指出氩弧重熔后强化层中有形态各异、大小不一的二次石墨析出,石墨的力学性能很差,不仅减小了凸轮轴的有效承载面积,而且造成凸轮尖端的点蚀、表层剥落和早期磨损,并提出了加快重熔后的冷却速度、调整凸轮轴转速与探针摆速的配合、降低毛坯的碳当量等措施。

柴油机阀门和稠油泵等铸铁零部件不仅要求易磨损部位具有较高的硬度和良好的耐磨性,而且必须保证非磨损部分的塑性和韧性,这对从整体上强化铸铁件的性能提出了挑战,该种零件多采用局部重熔强化处理。刘政军等<sup>[20]</sup>采用氩弧重熔方法对灰口铸铁进行局部重熔,获得了局部高硬度、耐磨的重熔层,并与基体良好的塑性和韧性相配合达到了预期效果。研究表明,激冷铸造工艺虽然也可获得高硬度组织,但由于激冷作用有限且熔化量大,导致铸件白口组织中的莱氏体组织粗大,其硬度和耐磨性均低于氩弧重熔组织;而在满足硬度和耐磨性要求的条件下,氩弧重熔比堆焊更节约成本、操作方便。合金化是显著提高氩弧重熔部件表面性能的重要方法。刘乐昕等<sup>[21]</sup>研究了涂覆合金元素种类和加入量对灰铸铁氩弧重熔层表面性能的影响,合金元素Cr、Mo、W、V可以显著提高重熔层的硬度和耐磨性,且性能随着加入量的增加有一个峰值,超过峰值后性能降低。合金元素的强化机理是Cr、Mo、W、V等可以形成大量细小的高硬度化合物,与过饱和马氏体和少量残余奥氏体共同弥散分布在重熔层内起到强化作用。

### 2.2 钢

与铸铁一样,钢表面的氩弧重熔处理是为了保证钢材表面具有较高的硬度和耐磨性,而同时使心部具有足够的塑性。而目前采用氩弧重熔处理的钢件有汽轮机缸体、耐热铸钢件阀体、滚动轴承、船用螺旋桨、水轮机叶片以及多种焊接接头。

汽轮机缸体和耐热铸钢件阀体等钢件由于结构复杂、壁厚不均等原因在铸造过程中经常存在质量问



题,组织内部存在缺陷甚至裂纹。Dudek 等<sup>[22]</sup>对氩弧重熔多相 316L 和 434L 不锈钢的耐蚀性进行研究。结果表明,氩弧重熔处理后表层厚度增加、粗糙度降低、孔隙率减少,因此相对未处理的烧结相具有更优异的耐蚀性。鲍爱莲等<sup>[23]</sup>研究了工艺参数对 GCr15 轴承钢氩弧重熔处理的影响。重熔电流和重熔速度对淬硬层和过渡层深度的变化显著,其深度随电流值的增大而加深、随移动速度的增大而渐浅,而重熔层表面硬度随氩气流量的增大而降低。

管材和转向架等钢表面焊接接头的氩弧重熔处理工艺在实际生产中的应用也十分广泛。李福恒<sup>[24]</sup>对 3.5% Ni 管材进行钨极氩弧焊对接,焊接接头的韧性较差。后续处理若采用焊后热处理则耗能、耗时,而采用氩弧重熔进行再次加热则可同时改善接头的表面成形和保证心部的韧性,但因重熔作用有限该方法只适用于壁厚薄、焊缝余高低于 2.5 mm 的管材。孙周明等<sup>[25]</sup>对 16Mn 转向架对接接头和十字角接头进行氩弧重熔,在改善表面成形和降低接头应力集中的同时,两种接头焊缝焊趾可大幅度地提高焊缝的疲劳强度。唐林<sup>[26]</sup>研究了退火处理对 16MnR 钢氩弧重熔 T 型接头疲劳强度的影响,研究表明退火温度为  $(550 \pm 15)^\circ\text{C}$ 、时间 2.5 h 为宜。与焊接条件下接头相比,氩弧重熔接头在循环寿命  $5 \times 10^6$  次时的疲劳强度可提高 26%,而重熔后再退火处理的接头疲劳强度可提高 69%。郭豪等<sup>[27]</sup>运用 ABAQUS 三维有限元软件模拟了郁金香坡口焊接接头焊后重熔过程,氩弧重熔层形成的残余应力远大于多道焊,焊接变形以沿板厚方向分布的拉应力为主,该模拟结果对实际结构设计具有重要的指导意义。

## 2.3 合金

随着汽车和轨道车辆的轻量化发展,车体结构中大量应用的铝合金板氩弧重熔技术也在不断受到关注。徐开升等<sup>[28]</sup>对铸态 6061 铝合金进行表面氩弧重熔处理,重熔处理后表面硬度提高了 10% ~ 15%,磨损量相对合金试样降低了 20% ~ 40%。同时,重熔后表面成分趋于均匀化,腐蚀方式由破坏性强的晶间腐蚀转变为以点腐蚀为主,重熔层具有良好的耐盐水腐蚀能力。氩弧重熔处理有效地解决了 6061 铝合金因成分偏析、表面氧化铝膜防护作用有限等缺点,对于铸态铝合金表面处理技术的发展具有重要意义。郑伟等<sup>[29]</sup>对 A5083P-O 铝合金焊接接头进行氩弧重熔处理后发现,接头内部的  $\alpha$  相及  $\beta$  相分布更加均

匀,在熔合区和热影响区强化相的析出量降低,重熔后接头的抗拉强度平均值由未处理前的 286.89 MPa 提高到 302.68 MPa。满春水等<sup>[30]</sup>研究了氩弧重熔对 A5083 铝合金微区性能和残余应力的影响,重熔后接头的硬度和抗剪强度变化并不明显,但压入率提高、塑性较好。此外,重熔处理降低了焊缝和焊趾的残余应力并使其分布更加均匀,减少了焊缝处应力集中,实现了改善焊缝疲劳强度的最终目的。

## 3 金属表面强化层氩弧重熔

### 3.1 涂层

长期以来,涂层的氩弧重熔处理备受研究人员关注。涂层与基体之间的结合多为物理、机械结合,同时内部会不同程度地存在孔隙和裂纹,而适当的重熔处理则可以改善涂层的内在质量及其与基体间的结合强度<sup>[31-32]</sup>。

Tian 等<sup>[33]</sup>在 AISI 1045 钢表面制备了 FeNiCrAl 热喷涂涂层并对其进行氩弧重熔处理。结果发现,重熔处理不仅可以改变涂层的层状结构,还可以均匀涂层成分、减少内部孔隙,提高喷涂层的耐磨性。Zhu 等<sup>[34]</sup>采用等离子喷涂技术制备了 Ni60+15% TiC 复合涂层,经氩弧重熔处理后涂层由  $\gamma$ -Ni 固溶体、TiC、 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  和 CrB 相组成,与基体之间呈冶金结合,同时界面元素发生扩散、黑色边界消除。该重熔层在 IS195 旋耕刀田间试验时显示出良好的耐磨性,磨痕宽度和深度减小,磨损量显著降低。时海芳等<sup>[35]</sup>在 Q235 钢表面制备了火焰喷涂铁基合金粉末复合涂层并对其进行氩弧重熔处理,重熔层与基体形成良好的冶金结合。当 WC 的质量分数为 15% 时,重熔层的表面硬度达到最大值 64.4HRC,耐磨性最好。氩弧重熔可以降低对基体的激冷作用,保证 WC 粉末与基体的良好熔合、粘结并降低硬质相的分解,颜海涛等利用氩弧重熔这一性能制备了用于提高秸秆还田刀具耐磨性的火焰喷涂 Ni 基 WC 涂层<sup>[36]</sup>。重熔开始温度和重熔电流对磨损量影响较大,移动速度对磨损量影响最小,经过试验得到优化工艺参数为重熔开始温度  $800^\circ\text{C}$ ,重熔电流 50 A,移动速度 3.0 mm/s,重熔后采用石灰保温。陈桂山等<sup>[37]</sup>在 20 G 钢管表面制备了电弧喷涂铁基合金涂层,并对其进行激光和氩弧重熔处理,两种重熔层均为冶金结合,合金粉末 Cr 元素与基体中的 Fe 元素相互渗透形成共熔体,具有良好的

力学性能和耐高温冲蚀性能。但氩弧重熔自动化程度高、成本低廉、适用于在线作业和大规模生产和维护的需求,进而弥补了激光重熔工艺的不足。

轻合金涂层较低的力学性能和耐蚀性制约了其在结构材料中的应用,而重熔处理是改善轻合金涂层耐蚀性的既有效又经济的手段<sup>[38-39]</sup>。叶宏等<sup>[40]</sup>在AZ31镁合金表面制备了热喷涂铝合金涂层,但该涂层由于合金粉末在喷涂过程中迅速冷凝收缩而交错粘结在一起,形成疏松的层状组织并存在孔隙和裂纹缺陷。为了改善这一现状带来的不足,对涂层进行氩弧重熔处理。重熔后涂层与基体之间呈锯齿状良好结合,硬度值由基体的50HV提高到200HV。重熔层中连续、均匀分布的 $\beta$ 相构成了防腐蚀网,阻碍了 $\text{Cl}^-$ 的腐蚀作用,而表层的 $\text{Mg}_2\text{Al}_3$ 相促进钝化进一步提高了点蚀破裂电位,这使得重熔层在3.5%盐溶液中腐蚀的电流密度降低了一个数量级,耐蚀性显著提高。

### 3.2 热浸镀层

热浸镀层是近年来发展起来的高效防护技术,主要包括热浸镀锌、热浸镀铝、热浸镀铅和热浸镀锡等。热浸镀层具有较高的硬度以及良好的抗高温氧化性、耐磨损和耐工业介质腐蚀性,但其组织和成分分布不均匀、与基体间存在分层现象,并且还具有一定的脆性,易发生裂纹和剥落现象<sup>[41]</sup>。

为了提高热浸镀层的质量,赵霞等<sup>[42-43]</sup>采用氩弧重熔工艺对20G钢和球墨铸铁表面热浸镀铝层进行强化处理。两种基体表面的热浸镀铝层经重熔处理后,原来的分层现象均转变为梯度过渡形式,这是由于氩弧热源在极短的时间内可将热浸镀铝层和基体表层熔化,使其相互扩散、合金元素重新呈梯度分布。钢基体过渡层组织为马氏体+残余奥氏体,而球墨铸铁过渡层中除上述组织外还含有少量球状石墨。氩弧重熔处理能显著提高热浸镀铝层的显微硬度,20G钢和球墨铸铁重熔层硬度最高值分别约为1078HV和900HV,相对未进行重熔处理的热浸镀铝层分别提高了5.74倍和4.63倍。重熔后显微硬度的提高源于组织的变化,表层组织由富铝层转变为重熔层,均匀分布着 $\text{FeAl}_3$ 和 $\text{Fe}_3\text{Al}$ 相,而过渡层组织以马氏体为主,故而重熔后镀层的显微硬度值较高并呈梯度分布。

为了解决热浸镀铝层脆性大且难以机械加工等问题,李强等<sup>[44]</sup>对Q235钢热浸镀铝层进行了氩弧重熔处理。氩弧重熔使热浸镀铝层的显微硬度呈梯

度分布,表面孔隙率降低,同时脆性也得到明显的改善。氩弧重熔后热浸镀铝层的摩擦因数和磨损量降低,同时在盐雾腐蚀试验中的耐蚀性也优于未经处理的镀铝层。这是由于氩弧重熔处理使热浸镀铝层内部的物相和组织发生变化,显微硬度大幅提高,进而具有良好的耐磨性;而重熔后镀层的孔隙相对较少,在一定程度上缓解了 $\text{Cl}^-$ 的侵蚀作用。

### 3.3 渗层

化学热处理渗层在不同程度上都存在裂纹、孔洞、组织粗大和因脆性导致的易剥落等问题,这极大地缩短了渗层的使用寿命<sup>[45-47]</sup>。而目前,重熔处理工艺无疑成为未来渗层改性技术的主要发展方向之一。

渗硼层可显著提高金属零部件的表面硬度、抗高温氧化性及耐磨性,在热作模具、钻井排污设备及矿山机械中应用十分广泛<sup>[48]</sup>。但渗硼层中FeB脆性相易导致渗层内部存在较大的残余应力,在冲击过程中产生裂纹和剥落现象。为了改善这一现状,赵霞等<sup>[49]</sup>对20G钢渗硼层进行了氩弧重熔处理。经重熔处理后,渗硼层由 $\text{Fe}_{23}(\text{C},\text{B})_6$ 和 $\text{Fe}_2\text{B}$ 相组成,FeB脆性相消除,同时表层显微硬度降低且由表及里的纵向硬度梯度趋于平缓;渗硼层在重熔前后的耐磨性相对基体分别提高了2.6倍和12.1倍,说明氩弧重熔工艺可以显著提高渗硼层的耐磨性。多元共渗在提高渗层的表面硬度、改善脆性、减少变形的同时还可以有效提高渗层表面的综合性能,在汽车制造业、轴承和机床加工业应用十分广泛。马壮等<sup>[50-51]</sup>研究了氩弧重熔处理对Q235钢B-C-N三元共渗层组织及性能的影响。氩弧重熔处理消除了B-C-N共渗层中的FeB和 $\text{Fe}_2\text{N}$ 脆性相,减少了渗层内部的孔隙和夹杂,使显微硬度呈平缓的梯度分布趋势,改善了共渗层与界面的结合状态。共渗层的磨损机理以破坏性强的磨粒磨损和断裂磨损为主,而重熔后共渗层的磨损机制则以滑动磨损和疲劳磨损为主,摩擦系数由之前的0.502降低到0.426,耐摩擦磨损性能良好。该研究还指出,重熔后共渗层的耐冲蚀磨损和海水中的耐腐蚀磨损性能较好,可提高共渗层在动态腐蚀与磨损交互作用的环境中的使用寿命。

### 3.4 堆焊层

堆焊技术是材料表面改性和强化的一种既经济又快速的方法,目前已经广泛应用于诸多行业金属零部件的制造和修复中<sup>[52]</sup>。但堆焊层内部组织分布不

均匀、孔隙较多,在提高其耐磨性和耐蚀性方面需要加以改进<sup>[53]</sup>。

彭军波等<sup>[54]</sup>在45钢表面堆焊了硼铁、锰铁、铬铁、钛铁和稀土混合的合金粉末,并对堆焊层进行氩弧重熔处理,同时利用灰色系统理论探究了硬度及耐磨性对合金成分的灰色关联状况。结果表明,氩弧重熔堆焊层的硬度平均值为43.6~58.5HRC,耐磨性相对45钢基体提高了2.75~11.57倍。灰色关联显示铬铁和锰铁含量变化对耐磨性影响很大,因此研究中应充分考虑这两种成分的作用效果。徐桂芳等<sup>[55]</sup>在对304不锈钢表面Fe-Cr-Ni-Co堆焊层进行氩弧重熔过程中发现,重熔处理可以细化晶粒并使其均匀分布,这可以有效地延缓材料的开裂时间、阻止裂纹的扩展,提高重熔堆焊层的耐蚀性能,对延长水泵、螺旋桨和水轮机等过流部件的寿命具有重要作用。在此研究基础上,臧伟等<sup>[56]</sup>对比分析了氩弧重熔和固溶处理两种热处理方式对上述堆焊层性能的影响。两种方法均可细化堆焊层内部晶粒,但氩弧重熔后内部组织分布更加均匀。氩弧重熔和固溶处理堆焊合金的平均硬度分别为509.4HV和474.1HV,相对未处理堆焊层分别提高了69.6HV和34.3HV,而处理后堆焊层的耐磨性显著提高,但这两种处理方法的耐磨效果相差不多。

## 4 结语

氩弧重熔技术为改善金属及表面强化层的组织结构、提高金属及表面强化层的性能提供了一条合理可行的途径,并在众多领域取得了许多实质性的进展。但氩弧重熔技术仍处于发展阶段,很多基础理论和大规模生产应用还亟待加强。今后,氩弧重熔技术应在如下几方面继续发展:1)强化内在机理研究及界面反应状态研究,2)完善快速凝固理论和界面结构研究,3)提升强化层的结构设计与氩弧重熔工艺条件的契合度,4)加强相关的数值模拟研究,为探索重熔机理、优化重熔工艺和提高研究效率提供依据。

## 参考文献

- [1] 殷宗莲,周学梅,王俊芳.吸波涂层失效因素研究[J].表面技术,2015,44(7):76—80.  
YIN Zong-lian, ZHOU Xue-mei, WANG Jun-fang. Study on Factors Leading to Failure of Electromagnetic Wave Absorbing Coatings[J]. Surface Technology, 2015, 44(7): 76—80.
- [2] ZHANG Hong-yuan, YANG Yan-qing, LUO Xian. Finite Element Analysis of Stress Distribution and Burst Failure of SiCf/Ti-6Al-4V Composite Ring[J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2015, 25(1): 261—270.
- [3] 林丽,李国禄,王海斗,等.基体表面异质材料滚动接触疲劳性能与失效机理的研究进展[J].表面技术,2015,44(5):111—117.  
LIN Li, LI Guo-lu, WANG Hai-dou, et al. Investigation of RCF Properties and Failure Mechanism of Heterogeneous Materials Covered on the Substrate: A Review[J]. Surface Technology, 2015, 44(5): 111—117.
- [4] MATEOS J. Tribological Properties of Plasma Sprayed and Laser Remelted 75/25 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/NiCr Coatings[J]. Tribology International, 2001, 34(5): 345—351.
- [5] CHENG F T, LO K H, MAN H C. NiTi Cladding on Stainless Steel by TIG Surfacing Process[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 172(2): 308—315.
- [6] 胡卫强,刘宗德,王永田,等.快冷熔覆法原位合成大厚度铁基非晶复合涂层的研究[J].物理学报,2011,60(2):1—6.  
HU Wei-qiang, LIU Zong-de, WANG Yong-tian, et al. Preparation of Fe-based Thick Amorphous Composite Coating by Cladding with Auxiliary Cooling System[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(2): 1—6.
- [7] 马壮,陶莹,王倪,等.渗层重熔工艺研究进展[J].金属热处理,2014,39(4):7—10.  
MA Zhuang, TAO Ying, WANG Ni, et al. Status and Development of Remelting Technology of Layers[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(4): 7—10.
- [8] MCKELLIGET J, SZEKELY J. Heat Transfer and Fluid Flow in the Welding Arc[J]. Metallurgical Transactions A, 1986, 17(7): 1139—1148.
- [9] 柴彤彤,李志勇,冯立,等.氩氦等离子体电弧特性的数值模拟[J].热加工工艺,2015,44(5):175—180.  
CHAI Tong-tong, LI Zhi-yong, FENG Li, et al. Numerical Simulation of Arc Properties in Argon and Helium Plasmas[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(5): 175—180.
- [10] 安藤弘平.焊接电弧现象[M].北京:机械工业出版社,1985.  
ANDO Kohei. The Phenomenon of Welding Arc[M]. Beijing: China Machine Press, 1985.
- [11] BINI R, MONNO M, BOULOS M I. Effect of Cathode Nozzle Geometry and Process Parameters on the Energy Distribution for an Argon Transferred Arc[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2007, 27(4): 359—380.
- [12] 孙清洁,林三宝,杨春利,等.超声钨极氩弧复合焊接电弧压力特征研究[J].机械工程学报,2009,47(4):53—65.  
SUN Qing-jie, LIN San-bao, YANG Chun-li, et al. Characteristic of Arc Pressure in Ultrasonic-TIG Hybrid Welding



- [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 47(4): 53—65.
- [13] 李刚, 刘政, 张娜. 熔覆速度对氩弧熔覆铁基合金涂层组织及性能的影响[J]. 徐州工程学院学报, 2009, 24(2): 77—84.
- LI Gang, LIU Zheng, ZHANG Na. Effect of Scanning Speed on Microstructure and Property of Argon Arc Cladding Fe-based Layer Coating[J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology, 2009, 24(2): 77—84.
- [14] 李会山, 杨洗陈, 于滨. 铸铁凸轮轴激光熔凝工艺和性能研究[J]. 表面技术, 2003, 32(6): 48—50.
- LI Hui-shan, YANG Xi-chen, YU Bin. Research on Technology Parameters and Properties to Laser Melting Camshaft of Low Alloy Cast Iron[J]. Surface Technology, 2003, 32(6): 48—50.
- [15] 沈保罗, 高见, 王艳戎, 等. QPQ 处理对合金灰铸铁凸轮轴耐磨性的影响[J]. 特种铸铁, 2008(3): 74—77.
- SHEN Bao-luo, GAO Jian, WANG Yan-rong, et al. Influence of QPQ Composite Salt Bath Treating on Wear Resistance of Alloyed Gray Iron for Camshaft[J]. Special Cast Irons, 2008(3): 74—77.
- [16] CHERNYSHEV A N. Surface Hardening with Remelting of Functional Surfaces of Cast Iron Camshaft[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1996, 38(10): 440—442.
- [17] 刘胜新, 汪大经, 张环东, 等. 铸铁氩弧重熔硬化工艺研究[J]. 武汉工学院学报, 1995, 17(2): 57—63.
- LIU Sheng-xin, WANG Da-jing, ZHANG Huan-dong, et al. Research into Argon-arc Remelted Hardening Process of Cast Iron[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 1995, 17(2): 57—63.
- [18] 李泉华, 张祝君. 合金铸铁凸轮轴氩弧重熔淬火硬化层的磨损试验研究[J]. 金属热处理, 2001, 26(1): 13—16.
- LI Quan-hua, ZHANG Zhu-jun. Study on Abrasiveness of Argon Arc Remelted Quenching Area of Alloy Cast Iron Camshaft[J]. Heat Treatment of Metals, 2001, 26(1): 13—16.
- [19] 任三平, 袁野. 凸轮轴氩弧重熔工艺的主要缺陷及解决办法[J]. 汽车工艺与材料, 2002(10): 20—22.
- REN San-ping, YUAN Ye. The Main Defect in Camshaft Argon Arc Remelting and Solving Methods[J]. Automobile Technology & Material, 2002(10): 20—22.
- [20] 刘政军, 林克光, 刘斌山, 等. 铸铁钨极氩弧局部重熔强化的研究[J]. 焊接技术, 1998(4): 8—10.
- LIU Zheng-jun, LIN Ke-guang, LIU Bin-shan, et al. The Research Partial Remelting Reinforcement of Cast Iron by Tungsten Electrode Argon Arc Technology[J]. Welding Technology, 1998(4): 8—10.
- [21] 刘乐昕, 刘政军, 安希中, 等. 合金对铸铁局部重熔强化的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2001, 23(2): 110—112.
- LIU Le-xin, LIU Zheng-jun, AN Xi-zhong, et al. Effect of Alloy on Local Surface Remelting and Hardening of Grey Cast Iron[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2001, 23(2): 110—112.
- [22] DUDEK A. Surface Remelting of 316L + 434L Sintered Steel: Microstructure and Corrosion Resistance[J]. Journal Solid State Electrochem, 2014, (18): 2973—2981.
- [23] 鲍爱莲, 刘万辉, 杨莉. 氩弧重熔工艺对 GCr15 钢硬度的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(2): 142—143.
- BAO Ai-lian, LIU Wan-hui, YANG Li. Influence of Argon Arc Remelting Process on Hardness of GCr15 Steel[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(2): 142—143.
- [24] 李福恒. 3.5% Ni 管材焊接及焊缝表面 TIG 重熔的工艺控制[J]. 石油工程建设, 1996(2): 16—19.
- LI Fu-heng. The Welding of 3.5% Ni Steel Pipe Material and the Technological Control of the Surface of Weld Seams by Repeatedly Fusing Using TIG[J]. Petroleum Engineering Construction, 1996(2): 16—19.
- [25] 孙周明, 张连华, 陈善忠, 等. 提速车焊接转向架焊缝 TIG 重熔工艺的研究[J]. 机械工人(热加工), 2002(5): 26—27.
- SUN Zhou-ming, ZHANG Lian-hua, CHEN Shan-zhong, et al. The Research of TIG Remelting Process of Joints of Welding Bogie on Speeding-up Car[J]. MW Metal Forming, 2002(5): 26—27.
- [26] 唐林. 退火处理对焊趾 TIG 重熔后 T 型接头疲劳强度的影响[J]. 机车车辆工艺, 2011(4): 10—12.
- TANG Lin. Effect of Annealing Treatment on Fatigue Strength of Weld Toe's T-joint of after TIG Remelting[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2011(4): 10—12.
- [27] 郭豪, 倪宝成, 董洪达, 等. 郁金香坡口焊接接头焊后 TIG 重熔数值模拟[J]. 电焊机, 2011, 41(1): 78—81.
- GUO Hao, NI Bao-cheng, DONG Hong-da, et al. Numerical Simulation of Tulip Type Welding Joint TIG Remelting[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(1): 78—81.
- [28] 徐开升. 6061 铝合金成分均匀化及表面 TIG 重熔处理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- XU Kai-sheng. Research of Homogenization Heat Treatment and TIG Surface Remelting of 6061 Aluminum Alloy[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [29] 郑伟, 郭志成. TIG 重熔对 A5083P-O 铝合金焊接接头性能的影响[J]. 机车车辆工艺, 2013, (2): 13—15.
- ZHENG Wei, GUO Zhi-cheng. Effect of TIG Remelting on the Properties of Welded Joint of A5083P-O Aluminium Alloy[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2013, (2): 13—15.
- [30] 满春水, 马传平, 朱志民, 等. TIG 重熔对 A5083 铝合金焊接接头微区性能和残余应力的影响[J]. 焊接技术, 2013, 42(8): 19—22.
- MAN Chun-shui, MA Chuan-ping, ZHU Zhi-min, et al. Effect of TIG Remelting on the Performance and Residual Stress of Welded Joint of A5083 Aluminium Alloy[J].

- Welding Technology, 2013, 42(8): 19—22.
- [31] 张宏杰, 温茂远, 侯振, 等. 结晶器铜板涂层界面结合强度的测定[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 169—174.  
ZHANG Hong-jie, WEN Mao-yuan, HOU Zhen, et al. Determination of Interface Bonding Strength of Casting Mold Coating[J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 169—174.
- [32] GAO Xue-song, TIAN Zong-jun, LIU Zhi-dong, et al. Interface Characteristics of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13%  $\text{TiO}_2$  Ceramic Coatings Prepared by Laser Cladding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(10): 2498—2503.
- [33] TIAN H L, WEI S C, CHEN Y X, et al. Microstructure and Wear Resistance of An Arc-sprayed Fe-based Coating After Surface Remelting Treatment[J]. Strength of Materials, 2014, 46(2): 229—234.
- [34] ZHU L X. Application of TiAl(CN) Metal Ceramic Coating by Reactive Nitrogen-arc Cladding on Stubble-cleaning Cutter[J]. Energy Research and Power Engineering, 2013(341/342): 838—842.
- [35] 时海芳, 王忠奇, 白榆, 等. 氩弧重熔铁基合金粉末喷涂层的组织与性能[J]. 金属热处理, 2014, 39(6): 29—31.  
SHI Hai-fang, WANG Zhong-qi, BAI Yu, et al. Microstructure and Properties of Spray Coating of Argon Arc Remelting Iron Based Alloy Powder[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(6): 29—31.
- [36] 颜海涛, 赵建国, 赵晓顺, 等. 钨极氩弧重熔对秸秆还田刀具耐磨性的影响[J]. 热加工工艺, 2005(3): 52—53.  
YAN Hai-tao, ZHAO Jian-guo, ZHAO Xiao-shun. Effect of Tungsten Inert Gas Arc Remelting on Wear Ability of Straw Returning Cutters[J]. Hot Working Technology, 2005(3): 52—53.
- [37] 陈桂山, 刘宗德, 胡卫强. 激光与氩弧重熔热喷涂涂层的表面性能[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(4): 320—323.  
CHEN Gui-shan, LIU Zong-de, HU Wei-qiang, et al. Performance of Coatings Prepared by Laser and Argon Arc Technology[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(4): 320—323.
- [38] HE Mei-feng, HU Wen-bin, ZHAO Su, et al. Novel Multilayer Mg-Al Intermetallic Coating for Corrosion Protection of Magnesium Alloy by Molten Salts Treatment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(S1): 74—78.
- [39] MALDONADO C. Evaluation of the Effects of Powder Coating Cure Temperatures on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy Substrates[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18(1): 70—78.
- [40] 叶宏, 王宾, 龙刚, 等. AZ31 镁合金表面 Al 合金化层的制备与性能研究[J]. 表面技术, 2010, 39(1): 20—22.  
YE Hong, WANG Bin, LONG Gang, et al. Preparation and Properties of Al Alloying on AZ31 Magnesium Alloy[J]. Surface Technology, 2010, 39(1): 20—22.
- [41] 倪志坚, 邹友忠, 曹关中, 等. 几种热浸镀层抗高温氧化性能的比较[J]. 金属热处理, 2001, 26(10): 24—27.  
NI Zhi-jian, ZOU You-zhong, CAO Guan-zhong, et al. Comparison of Oxidation Resistance of Hot-dip Coatings at High Temperature[J]. Heat Treatment of Metals, 2001, 26(10): 24—27.
- [42] 赵霞, 刘兴, 高丽敏. 20G 钢表面氩弧重熔强化热浸镀铝层的性能[J]. 黑龙江科技学院院报, 2010, 20(5): 333—336.  
ZHAO Xia, LIU Xing, GAO Li-min. Performance of Hot Dipping Aluminizing Layer on 20G Steel Surface by Argon Arc Remelting[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology, 2010, 20(5): 333—336.
- [43] 赵霞, 徐家文, 刘爱莲. 氩弧重熔对球墨铸铁热浸镀铝层组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(2): 133—136.  
ZHAO Xia, XU Jia-wen, LIU Ai-lian. Influence of Argon Arc Remelting on Microstructure and Properties of Hot Dip Aluminized Coating on Ductile Iron[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(2): 133—136.
- [44] 李强. 电弧重熔热浸镀铝钢组织与性能研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.  
LI Qiang. Study on the Microstructure and Properties of Arc Remelting Hot-dip Aluminum Steel[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.
- [45] JURCI P. Diffusion Boronizing of H11 Hot Work Tool Steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20(7): 1180—1187.
- [46] 徐永礼, 覃海泉, 庞祖高, 等. RE-N-C-S-V-Nb 多元共渗 H13 钢的高温耐磨性[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 60—65.  
XU Yong-li, QIN Hai-quan, PANG Zu-gao, et al. Wear Resistance at High Temperature of H13 Steel after RE-N-C-S-V-Nb Multi-element Penetrating[J]. Surface Technology, 2015, 44(4): 60—65.
- [47] LIU Xiao-ping, GE Pei-lin, YOU Kai, et al. Plasma Alloying of TiAl with Niobium and Its Wear Resistance[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(11): 1891—1896.
- [48] KAYALI Y. Investigation of Corrosion Behaviors at Different Solutions of Boronized AISI 316L Stainless Steel[J]. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2013, 49(3): 348—358.
- [49] 赵霞, 朱艳, 徐家文. 氩弧重熔对 20G 钢渗硼层组织结构和耐磨性能的影响[J]. 材料保护, 2011, 44(8): 75—77.  
ZHAO Xia, ZHU Yan, XU Jia-wen. Influence of Argon Arc Remelting on Microstructure and Wear Resistance of Boronizing Coating on the Surface of 20G Steel[J]. Materials Protection, 2011, 44(8): 75—77.



- [14] 杜纪富,孙彩霞. 预沉积 Cu 膜对不锈钢基体上沉积 C-90% SiC 涂层的影响[J]. 表面技术, 2012, 41(6): 4—6.  
DU Ji-fu, SUN Cai-xia. Effect of Cu Pre-deposition on C-90% SiC Coating Deposited on Stainless Steel[J]. Surface Technology, 2012, 41(6): 4—6.
- [15] 杨剑冰, 杨阳, 李伟洲等. 施镀条件和热处理对铝合金 Ni-P-SiO<sub>2</sub> 复合镀层微观结构及显微硬度的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(2): 6—12.  
YANG Jian-bing, YANG Yang, LI Wei-zhou, et al. Effects of Plating Conditions and Heat Treatment on Microstructures and Microhardness of Electroless Plating Ni-P-SiO<sub>2</sub> Coating on Aluminum Alloy[J]. Surface Technology, 2014, 43(2): 6—12.
- [16] 向新华, 穆晓冬, 刘正义. Ni 基自熔合金涂层与钢基材的界面形态及其作用[J]. 焊接, 2002, 23(6): 45—47.  
XIANG Xin-hua, MU Xiao-dong, LIU Zheng-yi. Transactions of the China Welding Institution [J]. Welding, 2002, 23(6): 45—47.

(上接第 217 页)

- [13] 李瑞云. 氧化石墨烯对聚合物分离膜的亲水改性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.  
LI Rui-yun. Hydrophilically Modification of Polymer Membrane with Graphene Oxide[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [14] 史真真. 氧化石墨烯对 PET 聚酯膜亲水性改性的研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2014.  
SHI Zhen-zhen. The Study on Hydrophilic Modification of Graphene Oxide to PET Polyester Film[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2014.
- [15] HSIEH Y L, PUGH C, ELLISON M S. The Effects of Selected Organic Solvents on the Polymerization of Acrylic Acid to Poly(Ethylene, Phthalate) by Glow Discharge[J]. J Appl Polym Sci, 1984, 29(11): 3547—3560.
- [16] BLANCHEMAIN N, HAULONS, MARTEL B, et al. Vascular Pet Prostheses Surface Modification with Cyclodextrin Coating: Development of a New Drug Delivery System[J]. Eur J Vasc Endovasc Surg, 2005, 29(6): 628—32.
- [17] 郭双桢. 氧化石墨烯和纳米二氧化硅对 PET 聚酯膜亲水性改性的研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2015.  
GUO Shuang-zhen. The Study on Hydrophilic Modification of Graphene Oxide and Nano-silica to PET Polyester Membrane[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2015.

(上接第 225 页)

- [50] 马壮, 张焱鑫, 韦宝权, 等. 氩弧重熔 Q235 钢 B-C-N 共渗层的组织结构及耐磨性[J]. 金属热处理, 2015, 40(8): 92—95.  
MA Zhuang, ZHANG Yan-xin, WEI Bao-quan, et al. Microstructure and Wear Resistance of Boron-carbonitrided Layer on Q235 Steel by Argon Arc Remelting[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(8): 92—95.
- [51] 马壮, 张焱鑫, 李玲, 等. 氩弧重熔对 Q235 钢 B-C-N 渗层冲蚀磨损性能的影响[J]. 材料导报, 2015, 29(7): 116—119.  
MA Zhuang, ZHANG Yan-xin, LI Ling, et al. Effect of Argon Arc Remelting on Erosive Wear of B-C-N Boride on Q235 Iron[J]. Materials Review, 2015, 29(7): 116—119.
- [52] MADADI F, ASHRAFIZADEH F, SHAMANIAN M. Optimization of Pulsed TIG Cladding Process of Stellite Alloy on Carbon Steel Using RSM[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 510(1): 71—77.
- [53] 杨庆祥, 赵斌, 员霄, 等. 纳米 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对过共晶 Fe-Cr-C 堆焊合金表面微观组织与耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(4): 42—53.  
YANG Qing-xiang, ZHAO Bin, YUAN Xiao, et al. Influence of Nano-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on Microstructure and Wear Resistance of Fe-Cr-C Hardfacing Alloy Surface [J]. Surface Technology, 2015, 44(4): 42—53.
- [54] 彭军波, 陈冰泉, 邓旅成. 45# 钢氩弧表面强化及其灰关联分析[J]. 武汉交通科技大学学报, 2000, 24(1): 86—88.  
PENG Jun-bo, CHEN Bing-quan, DENG Lyu-cheng. Ar-arc Surface Hardening and Its Grey Relational Interval Analysis of 45 Steel[J]. Journal of Wuhan Transportation University, 2000, 24(1): 86—88.
- [55] 徐桂芳, 秦敏明, 雷玉成, 等. Fe-Cr-Ni-Co 合金堆焊和重熔层的空蚀性能[J]. 材料研究学报, 2011, 25(1): 61—66.  
XU Gui-fang, QIN Min-ming, LEI Yu-cheng, et al. Cavitation Erosion Resistance of Fe-Cr-Ni-Co Overlaying and Remelting Layer [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2011, 25(1): 61—66.
- [56] 臧伟, 徐桂芳, 吴浩, 等. 热处理对新型 Fe-Cr-Mn-Co 合金堆焊层磨粒磨损性能的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(20): 164—169.  
ZANG Wei, XU Gui-fang, WU Hao, et al. Effects of Heat Treatment on Abrasive Wear Performance of New Type of Fe-Cr-Mn-Co Alloy Welding Layer [J]. Hot Working Technology, 2014, 43(20): 164—169.