

引用格式:许亿,李光,陈玉玺,等. 25MnV 钢矿用圆环链热浸镀铝及其力学性能的研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(23):119-122+127.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20181309
http://www.rjgy.net rjgy@vip.163.com

25MnV 钢矿用圆环链热浸镀铝及其力学性能的研究

许亿^{1,2}, 李光^{1,2}, 陈玉玺³, 王同会³, 李德胜⁴, 王巍智¹, 夏原^{1,2}

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国巨力集团, 河北 保定 072550; 4. 华北理工大学, 河北 唐山 063210)

摘要:采用扩散热浸镀铝对 25MnV 钢矿用圆环链进行处理,对热浸镀铝层的显微组织、显微硬度以及圆环链的拉伸性能和破断性能进行研究。结果表明:热浸镀铝后表面为铝层和 Fe-Al 合金层,合金层主要相为 Fe₂Al₃ 和 FeAl₃,合金层内高硬度区域比例较高。经 850 °C、4 h 的扩散处理后,铝层全部转变为合金层,且分为外扩散层与内扩散层,外扩散层主要相为 FeAl,内扩散层主要相为 Fe₃Al,合金层内高硬度区比例明显降低,且内扩散层的显微硬度小于基体。扩散后由于高温抗氧化性的 Fe-Al 合金层的形成,降低了淬火和回火过程中表面氧化程度,从而提高了其抗拉强度和屈服强度。由于 Fe-Al 合金层的硬度较高,使得扩散热浸镀铝拉伸件的伸长率和收缩率有所降低。与链条原件相比,热浸镀铝和扩散对破断强度变化不大,而两者的伸长率出现了下降,但两者性能均满足国标对 C 级别圆环链要求。

关键词:25Mn 钢矿用圆环链;热镀铝;热扩散;拉伸;破断

中图分类号:TG174.443

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2023)23-0119-04

Study on Hot Dip Aluminum of 25MnV Steel Round Link Chains for Mining and Its Mechanical Properties

XU Yi^{1,2}, LI Guang^{1,2}, CHEN Yuxi³, WANG Tonghui³, LI Desheng⁴, WANG Weizhi¹, XIA Yuan^{1,2}

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China Julu Group, Baoding 072550, China; 4. North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: Hot-dip aluminizing and diffusion annealing were carried out on 25MnV steel round link chains for mining. The microstructure, microhardness, stretching properties and breaking properties of the coatings were studied. The results show that the coatings consist of aluminum layer and Fe-Al alloy layer. The major phase of the alloy layer is Fe₂Al₃ and FeAl₃, and the area of high hardness of the alloy is larger. After diffusion annealing treatment at 850 °C for 4 h, the aluminum layer transforms into alloy layer completely. The alloy layer can be divided into an outer diffusion layer and inner diffusion layer. The major of the outer diffusion layer is FeAl and the inner diffusion layer is mainly composed of Fe₃Al, and the region of high hardness in the alloy layer is smaller. The microhardness of the inner diffusion layer is lower than the substrate. After diffusion, due to the Fe-Al alloy layer with high temperature oxidation resistance, the oxidation of tension piece in the process of quenching and tempering reduces and then the tensile strength and yield strength improve. The elongation and shrinkage of the diffused aluminized tensile parts reduce result from high hardness of Fe-Al alloy layer. Compared with the non-treatment chain, the breaking load of the aluminized chain and the diffused aluminized chain show little change, but the elongation both obviously decreases. In addition, their properties both meet the Chinese standard of C-level ring chain.

Key words: 25MnV steel mine ring chain; hot dip aluminum; thermal diffusion; stretching; breaking

收稿日期:2018-04-26

基金项目:河北省省级科技计划专项(16241026H)

作者简介:许亿(1989-),男,浙江人,助理研究员,博士,主要从事材料表面改性、薄膜沉积等研究;E-mail: xuyi@imech.ac.cn

通讯作者:夏原(1963-),男,浙江人,研究员,博士,主要从事材料表面工艺力学、表面科学及薄膜技术等研究;

E-mail: xia@imech.ac.cn

随着全球经济对煤炭能源的需求量不断提高,煤矿机械行业迅猛发展,而作为机械化采煤的主要设备-刮板运输机也得到了快速发展^[1-2]。圆环链是刮板运输机的传动链,其性能和可靠性在运输机安全运行过程中扮演着至关重要的角色。然而,圆环链却是一种易损部件,在使用过程中,圆环链既受拉

伸又受冲击载荷作用。另外,矿井下潮湿闷热,链条的腐蚀现象不可避免的出现。因此,矿用圆环链应具备高强度、高韧性、耐腐蚀等复杂的综合力学性能^[3]。

热浸镀铝具有使钢表面强化、防护和美化的综合作用,是一种集多种优点于一体的表面改性技术^[4]。热浸镀铝技术可在钢表面制备一层铝层和 Fe-Al 合金层。此外,通过适当的热扩散处理,可在材料表面形成与基体金属冶金结合、高附着力的 Fe-Al 合金层,从而进一步提高材料的耐腐蚀性能和高温抗氧化性能^[5]。

目前大多数研究集中在热浸镀铝对材料耐腐蚀性能和高温抗氧化性能的影响^[6-9]。然而,关于热浸镀铝对材料拉伸性能和破断性能的影响还未展开深入研究,而热浸镀铝层的力学性能对于热浸镀铝技术在矿用圆环链上的应用具有重要的理论意义和工程应用价值。鉴于此,本文研究了在不同热浸镀铝工艺下经扩散处理以后,25MnV 钢的组织及其表面成分的变化,并对热浸镀铝钢的拉伸和破断性能进行研究。

1 实验材料及方法

实验材料为矿用圆环链钢 25MnV,试样类型为 10 cm×5 cm×5 mm 的片状试样、 ϕ 10 mm 的标准拉伸件和 18 mm×64 mm 的圆环链。试样所对应的热浸镀铝具体工艺如表 1 所示,热浸镀铝温度为 730、750 °C,时间为 3、5 min。扩散方式采用真空扩散,保温温

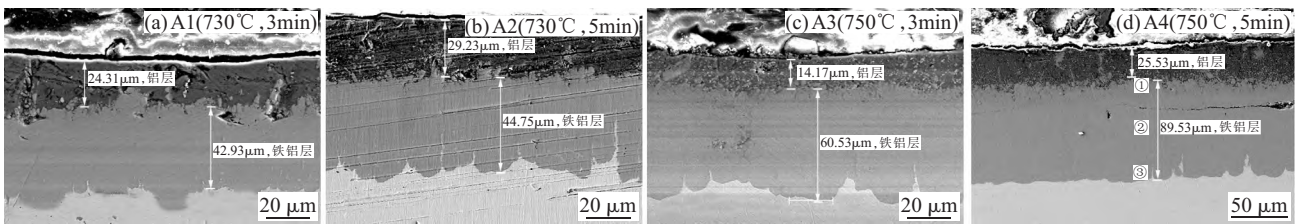


图 1 热浸镀铝试样扩散前截面形貌

Fig.1 The cross-section morphology of the hot dip aluminizing samples before diffusion

表 2 为不同工艺热浸镀铝试样铝层和 Fe-Al 合金层的厚度。通过对比不同热浸镀铝参数下 Fe-Al 合金层的厚度可发现,增加热浸镀铝时间或温度,

表 2 扩散前铝层和 Fe-Al 合金层的厚度
Tab.2 The thickness of Al layer and Fe-Al layer before diffusion

热浸镀铝工艺	铝层 / μm	Fe-Al 合金层 / μm
A1(730°C, 3min)	24.31	42.93
A2(730°C, 5min)	29.23	44.75
A3(750°C, 3min)	14.17	60.53
A4(750°C, 5min)	25.53	89.53

表 1 热浸镀铝工艺
Tab.1 The parameters of hot dip aluminizing

编号	时间 /min	试样类型	温度 / $^{\circ}\text{C}$
A1	3	片状试样,拉伸件	730
A2	5	片状试样,拉伸件	730
A3	3	片状试样,拉伸件	750
A4	5	片状试样,拉伸件	750
L1	5	链条	750

度为 850 °C,保温时间为 4h。试样后续进行与产品相同的淬火和回火处理以提高基体材料的强度。

采用 HITACHIS-4300 扫描电镜观察截面形貌,并用附带的能谱仪 EDS 对截面各层成分进行分析。采用上海泰明光学数字式显微硬度计测量截面各层的显微硬度。采用 WAW-600kN 材料拉伸试验机对拉伸件的拉伸性能进行检测。链条则在 WAW-2000A 微机控制电液伺服万能试验机上进行破断实验以获得破断性能。

2 实验结果及分析

2.1 截面形貌及硬度分布规律

图 1 为不同工艺热浸镀铝试样截面的 SEM 图。可看出,热浸镀铝层比较均匀且与基体附着良好,镀层由外往里为铝层和 Fe-Al 合金层,铝层与 Fe-Al 合金层并无明显的分界线,合金层与基体界面呈锯齿状,整个截面无明显的微裂纹以及空洞的现象。

Fe-Al 合金层的厚度均随之增加。这是由于 Fe-Al 合金层为铁铝元素互相扩散后形成的金属间化合物,时间的增加可延长铝铁元素扩散时间,而温度的增加,则提高了铝铁元素相互扩散的速度^[10-11]。而铝层的厚度与熔融铝液粘度相关,时间增加会提高熔融铝液粘度,而在较高温度下,熔融铝液粘度则较小,因此时间的增加和温度的提高会对铝层的厚度产生不同的影响^[12]。

图 2 为热浸镀铝试样经扩散退火处理后的截面的 SEM 图。不同于热浸镀铝试样,经扩散退火处理

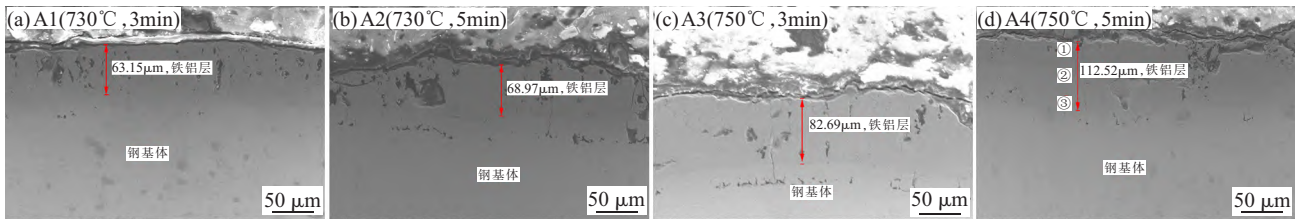


图2 热浸镀铝试样扩散处理后的截面形貌

Fig.2 The cross-section morphology of the hot dip aluminizing samples after diffusion

的试样截面已无铝层的存在,且由于Fe和Al元素在高温下存在互相扩散的作用,Fe-Al合金层的厚度则会进一步地增加。因此,扩散后合金层的厚度明显高于扩散前(如表3所示),但合金层局部区域内出现了少量的裂纹和空洞。

表3 扩散前后Fe-Al合金层的厚度
Tab.3 The thickness of Fe-Al layer before and after diffusion

热浸镀铝工艺	Fe-Al合金层厚度/μm	
	扩散前	扩散后
A1(730°C,3min)	42.93	63.15
A2(730°C,5min)	44.75	68.97
A3(750°C,3min)	60.53	82.69
A4(730°C,3min)	89.53	112.52

采用EDS对A4试样截面不同位置处的元素成分进行分析。A4试样扩散处理前后不同位置的Al和Fe元素分数在表4中列出。①、②和③均匀分布于Fe-Al合金层(如图1(d)和图2(d)所示)。从EDS结果中可以看出,扩散前整个合金层内元素分布较为均匀,Al和Fe原子分数比约为2.7:1,因此该区域内的主要相可能是 Fe_2Al_5 和 $FeAl_3$ 。而扩散后合金层内Al和Fe元素沿基体方向呈现明显的变化。

表4 A4试样扩散前后的截面成分

Tab.4 Composition of cross section of A4 samples before and after diffusion

位置	扩散前原子分数(at%)		扩散后原子分数(at%)	
	Al	Fe	Al	Fe
①	74.41	25.29	48.92	51.08
②	73.25	26.35	44.68	55.32
③	73.02	26.39	25.12	74.81

根据Al和Fe原子数分数比可将合金层分为外扩散层和内扩散层,外扩散层的Al和Fe原子数比约为1:1,该区域内的的主要相可能是 $FeAl$,而内扩散层的Al和Fe原子数比约为1:3,该区域内的的主要相可能是 Fe_3Al 。

图3为不同工艺热浸镀铝试样扩散处理前后截面显微硬度沿合金层深度的变化曲线。很显然,扩散前后试样表面的整体显微硬度相对于基体材料均有显著提高,这说明表面显微硬度的提高得益于试样经过热浸镀铝处理后所形成的具有较高硬度的铁铝金属间化合物^[13]。而对比扩散前后,合金层内显微硬度呈现出了不同的分布规律。扩散前,整个Fe-Al合金层显微硬度分布均匀,高硬度区域集中;扩散后,合金层显微硬度沿沿合金层深度呈现明显的下降趋

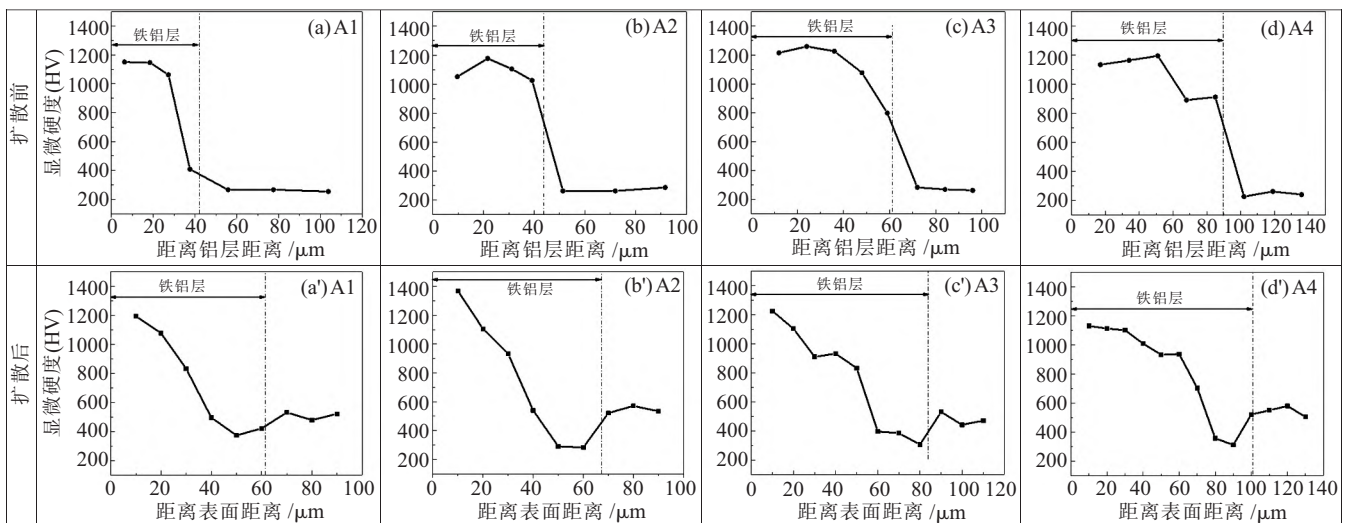


图3 扩散处理前后试样截面的显微硬度分布

Fig.3 Microhardness distribution of cross-section of the samples before and after diffusion

势,高硬度区域比例下降。进一步观察可发现,经扩散处理,显微硬度在合金层与基体的交界处由下降趋势转变为上升趋势。根据 EDS 结果,扩散后合金层中的内扩散层主要相是 Fe₃Al,其显微硬度为 320HV^[4],这可能使得内扩散层的显微硬度低于了基体的。

2.2 拉伸性能

表 5 显示了不同工艺热浸镀铝拉伸试样经扩散处理后的抗拉强度、屈服强度、伸长率和收缩率。拉伸件经本实验的 4 种热浸镀铝工艺处理后,其抗拉强度和屈服强度相比较于原件均有所提高,但其伸长率和收缩率则均呈现下降的趋势。这是由于在淬火和回火过程中,原件表面会产生较厚的氧化层,降低其抗拉强度和屈服强度,而扩散热浸镀铝试样表面具有了良好的高温抗氧化性 Fe-Al 合金层^[5],降低了在淬火和回火过程中表面产生的氧化层对强度的影响。另外,由于 Fe-Al 合金层具有较高的硬度,则降低了扩散热浸镀铝拉伸件的伸长率和收缩率。此外,进一步观察可发现,对比 A1 和 A2,A3 和 A4 以及 A1 和 A3,A2 和 A4 可知,单一地提高热浸镀铝温度和热浸镀铝时间,其抗拉强度和屈服强度进一步上升,而伸长率和收缩率的影响则进一步下降,这可能是由于热浸镀铝时间和温度的增加使得 FeAl 合金层厚度增加所导致的。

表 5 热浸镀铝试样扩散后的拉伸性能
Tab.5 Stretching properties of the hot dip aluminizing samples after diffusion

热浸镀铝工艺	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率(%)	收缩率(%)
原件	1195	1126	14	69
A1(730℃,3min)	1276	1234	13	65
A2(730℃,5min)	1296	1237	12	58
A3(750℃,3min)	1216	1166	13	63
A4(750℃,5min)	1298	1246	8	58

2.3 破断实验

表 6 为不同链条破断实验结果,链条经过热浸镀铝后,其破断负载从 435.25 kN 下降至 432.05 kN,

表 6 不同链条的破断实验结果
Tab.6 The results of the breaking experiments of different chain

试样	破断负载 /kN	伸长率(%)
链条原件	435.25	24.82
热浸镀铝链条	432.05	20.20
扩散热浸镀铝链条	438.10	19.98

伸长率则下降至 20.20%。当热浸镀铝链条经过扩散处理后,破断负载随之增加并超过链条原件的负载,而其伸长率则进一步下降至 19.98%。相比较于链条原件,热浸镀铝链条和扩散热浸镀铝链条的破断负载并未出现明显的变化。此外,根据 GB/T 12718—2001《矿用高强度圆环链》对 C 级别圆环链要求:破断负载 410 kN,破断时最小总伸长率 12%,因此虽然经热浸镀铝和扩散热浸镀铝工艺后,链条的破断负载和伸长率均有所影响,但无论是热浸镀铝链条还是扩散热浸镀铝链条,其破断负载和伸长率均满足国标要求。

3 结论

(1) 热浸镀铝温度和时间均可提高镀层中 Fe-Al 合金层的厚度。经扩散处理后,铝层转变为 Fe-Al 合金层,Fe-Al 合金层的厚度则进一步增加。

(2) 扩散前后试样表面整体显微硬度相对于基体材料均有显著的提高。扩散前合金层主要相为 Fe₂Al₅ 和 FeAl₃,且整个合金层显微硬度分布均匀,高硬度区域集中。而扩散后,合金层分为内扩散层和外扩散层,外扩散层的主要相为 FeAl,内扩散层的主要相为 Fe₃Al,这使得合金层显微硬度沿合金层深度呈现明显的下降趋势,高硬度区域比例下降,并且显微硬度在合金层与基体的交界处出现了上升趋势。

(3) 相比较于原件,扩散热浸镀铝拉伸件的抗拉强度和屈服强度有所提高,但同时具有较高的硬度 Fe-Al 合金层使得拉伸件的伸长率和收缩率有所下降。

(4) 与链条原件相比,热浸镀铝链条和扩散热浸镀铝链条的破断强度变化不大,但两者的伸长率则出现明显的下降。此外,热浸镀铝链条和扩散热浸镀铝链条的破断负载和伸长率均满足国标对 C 级别圆环链要求。

参考文献:

- [1] 杨雪春. 热处理对矿用圆环链钢 25MnV 的组织和性能的影响[J]. 通化师范学院学报,2012,33(12):19-20.
- [2] 马瑞勇,王维喜,张兵军,等. 25MnV 钢矿用高强度圆环链的中频感应加热淬火[J]. 金属热处理,2004,29(11):65-67.
- [3] 武兴旺,郭卫,马瑞勇,等. 矿用高强度圆环链的磨损特性及延长其使用寿命的方法[J]. 煤矿机械,2011(12):220-221.
- [4] 孙克宁,王福平,曹莹. 热浸镀铝层的性能研究[J]. 材料科学与工艺,2002,10(2):192-195.

(下转第 127 页)

(3) 除在固相线下的高温压缩变形除变形速率 0.01 s^{-1} 温度 300、350、400 $^{\circ}\text{C}$ 、和变形速率 0.1 s^{-1} 温度 300 $^{\circ}\text{C}$ 4 个条件外,其他情况下 AZ91 半固态坯料峰值应力均低于铸态 AZ91 镁合金的。

参考文献:

- [1] Xu Hong,Zhang Xin,Wang Changshun,et al. Semi-solid moulding of AZ91D magnesium alloy [C]// Materials Science Forum.2016:790-801.
- [2] Chen Gang,Zhang Shun,Zhang Hongming,et al. Controlling liquid segregation of semi-solid AZ80 magnesium alloy by back pressure thixoextruding [J]. Journal of Materials Processing Technology,2018,259:88-95.
- [3] 李有新,金晨,郭占森. 镁合金半固态压铸成形及其控制技术的探究[J]. 世界有色金属,2017(14):270-271.
- [4] 卢春辉. 可形成长周期结构的稀土镁合金半固态坯料制备研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2016.
- [5] Wang Kai,Liu Changming,Han Zhaotang,et al. Research on semi-solid thixoforming process of AZ91D magnesium alloy brackets for generators in JH70-type motorbikes [J]. Chinese Journal of Rare Metals,2005,24(4):381-391.
- [6] Murakami Y,Miwa K,Omura N,et al. Development of new type semi-solid injection process for magnesium alloy[J]. Solid State Phenomena,2015,217-218:361-365.
- [7] Wang L X,Fang G,Leeflang M A,et al. Constitutive behavior and microstructure evolution of the as-extruded AE21 magnesium alloy during hot compression testing [J]. Journal of Alloys & Compounds,2015,622:121-129.
- [8] Barati F,Shamekhi L. Mathematical modeling of the stress-strain curves of AZ91 magnesium alloy during hot compression [C]// Proceedings of Fourteenth The IIER International Conference,Paris,France;2015,62-66.
- [9] Seong B H,Kim H K,Van G H,et al. The microstructure evolution of semi solid AM80 alloy added Zr and its compression behavior at elevated temperature [C]// Aeromat 23 Conference and Exposition American Society for Metals.2012.
- [10] Rakhshkhorshid M,Maldar A R. A comparative study on constitutive modeling of hot deformation flow curves in AZ91 magnesium alloy [J]. Iranian Journal of Materials Forming, 2016,3(1):27-37.
- [11] 龚文源,张贵杰,郑小平,等. 冷轧 SIMA 法制备 AZ91D 镁合金半固态坯料的组织研究[J]. 热加工工艺,2016,45(3):1-4.
- [12] Yang X,Miura H,Sakai T. Dynamic evolution of new grains in magnesium alloy AZ31 during hot deformation [J]. Materials Transactions,2003,44:197-203.
- [13] Sivakesavam O,Prasad yvrk. Hot deformation behavior of as-cast Mg-2Zn-1Mn alloy in compression a study with processing map [J]. Materials Science and Engineering A, 2003,362:118-124.
- [14] Mcqueen H J,Fry E,Belling J. Comparative constitutive constants for hot working of Al-4.4Mg-0.7Mn (AA5083) [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2001,10(2):164-172.
- [15] Wu Wenxiang,Sun Deqing,Cao Chunyan,et al. Flow stress behavior of 5083 aluminium alloy under hot compression deformation [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007,17(10):1667-1671.
- [16] Zhang Hui,Li Luoxing,Yuan Deng,et al. Hot deformation behavior of new Al-Mg- Si-Cu aluminum alloy during compression at elevated temperatures [J]. Materials Characterization,2007,58(2):168-173.
- [17] 游国强,左旭东,谭霞,等. 压铸态 AZ91D 镁合金热压缩变形流变应力研究 [J]. 稀有金属材料与工程,2013,42(9):1844-1848.
- [18] 龚文源,张贵杰,郑小平,等. 半固态 AZ91D 镁合金坯料热压缩后的显微组织[J]. 金属热处理,2017,42(8):36-39. 

(上接第 122 页)

- [5] 于升学,夏原,姚枚. 扩散处理热浸镀铝钢高温抗氧化行为的研究[J]. 稀有金属材料与工程,2006,35(2):74-78.
- [6] 周德琴,陈伟,张秋阳,等. 不同基体热浸镀铝镀层组织和高温磨损行为[J]. 材料工程,2018,46(2):93-98.
- [7] 贾涓,朱微微,熊玮,等. 扩散方式对不锈钢热浸镀铝镀层形貌的影响[J]. 材料热处理学报,2014,35(S1):205-209.
- [8] 王在东,姚振玲,严清冉,等. 国产热浸镀锌链条在海洋环境中的腐蚀初步探讨[J]. 全面腐蚀控制,2013(1):32-36.
- [9] 严川伟,何钢,夏原. 热浸镀铝层耐人造海水腐蚀性的电化学研究[J]. 材料保护,2001(1):20-21.
- [10] 刘洪福,牛宗伟,赵东山. 热浸镀铝时间对镀层生长的影响 [J]. 材料导报,2013,16(27):97-99.
- [11] 黄元林,孙晓峰. 20 钢热浸镀铝工艺及力学性能研究[J]. 装甲兵工程学院学报,2016,30(6):117-120.
- [12] 郭丽娟,张潇华,谭哲,等. 浸镀时间对热浸铝 35+CrMo 钢镀层组织影响 [J]. 中国石油大学学报胜利学院学报,2017,31(3):25-27.
- [13] 廖远禄,张秋阳,周银,等. 碳钢热浸镀铝涂层的磨损性能 [J]. 材料研究学报,2014,28(10):737-744.
- [14] 王院生,熊计,王均,等. 17_4PH 不锈钢热浸镀铝及其高温抗氧化性能[J]. 电镀与涂饰,2011,30(3):35-39. 