



国家出版基金资助项目
“十三五”国家重点图书
材料研究与应用著作

氩弧熔覆制备金属基复合涂层

METAL MATRIX
COMPOSITE COATING
PREPARED BY ARGON
ARC CLADDING

王振廷 著

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金资助项目
“十三五”国家重点图书
材料研究与应用著作

氩弧熔覆制备金属基复合涂层

METAL MATRIX
COMPOSITE COATING
PREPARED BY ARGON
ARC CLADDING

王振廷 著

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书系统地介绍了利用氩弧熔覆技术制备金属基复合涂层的组织结构与性能。第1章综述氩弧熔覆技术国内外研究现状;第2章为氩弧熔覆制备 ZrC 增强 Fe 基复合涂层;第3~4章为氩弧熔覆制备 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})-\text{TiB}_2/\text{Ni60A}$ 复合涂层和 TiB_2-TiN 增强 Ti 基复合涂层;第5章为采用氩弧熔覆技术制备高温抗氧化复合涂层;第6章为采用氩弧熔覆-注射技术制备纳米结构 WC 复合涂层;第7章为 Q235 钢表面氩弧熔覆 Ni-Mo-Zr-WC- B_4C 复合涂层;第8章为氩弧熔覆 WC+ $\text{Ni}_3\text{Si}/\text{Ni}$ 基复合涂层;第9章为氩弧熔覆原位合成 TiN 增强 Ni 基复合涂层;第10章为氩弧熔覆 Mo-Ni-Si 复合涂层;第11章为氩弧熔覆制备 $(\text{Zr}, \text{Ti})\text{C}/\text{Ni60A}$ 复合涂层。

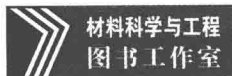
本书可作为材料熔覆制备技术、表面工程技术等领域科技及工程技术人员的参考书,也可作为高等院校材料科学与工程专业研究生、高年级本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

氩弧熔覆制备金属基复合涂层/王振廷著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社, 2016. 11
ISBN 978-7-5603-5706-5

I. ①氩… II. ①王… III. ①金属复合材料-涂层技
术 IV. ①TB331

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 267159 号



策划编辑 张秀华 杨 桦

责任编辑 刘 瑶

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 787mm×960mm 1/16 印张 17 字数 300 千字

版 次 2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-5706-5

定 价 88.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

氩弧熔覆技术是以钨极氩弧作为热源,在氩气的保护作用下,将预涂覆在基体表面的合金粉末熔化,从而获得与基体呈冶金结合的熔覆层,进而提高材料表面的综合性能。与其他熔覆技术相比,氩弧熔覆热量集中,始终受到氩气的保护,设备操作简单,灵活性高,使用方便,价格便宜,具有广泛的工程应用价值。

自 2006 年以来,笔者一直从事氩弧熔覆技术的研究工作,从氩弧熔覆原位合成单颗粒增强金属基复合涂层,到氩弧熔覆原位合成双颗粒增强金属基复合涂层,再到氩弧熔覆-注射技术制备纳米结构复合涂层等进行了一系列研究。本书的主要内容为笔者近年来的研究成果。为了给从事表面工程技术的研究人员、在校研究生和高年级本科生提供一本氩弧熔覆制备金属基复合涂层的参考资料,笔者在氩弧熔覆原位合成制备金属基复合涂层的基础上,增加了氩弧熔覆制备抗氧化涂层、氩弧熔覆注射制备纳米结构涂层以及氩弧熔覆制备金属基复合涂层的内容,经过整理、总结撰写了本书。

本书的主要内容包括:采用氩弧熔覆技术制备 ZrC 增强 Fe 基复合涂层;采用氩弧熔覆技术原位合成 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})-\text{TiB}_2$ 及 TiB_2-TiN 增强 Ti 基复合涂层;采用氩弧熔覆技术制备高温抗氧化复合涂层;采用氩弧熔覆-注射技术制备纳米结构 WC 复合涂层;氩弧熔覆 $\text{Ni}-\text{Mo}-\text{Zr}-\text{WC}-\text{B}_4\text{C}$ 复合材料涂层制备;氩弧熔覆 $\text{WC}+\text{Ni}_3\text{Si}/\text{Ni}$ 基复合涂层组织制备;氩弧熔覆原位合成 TiN 增强 Ni 基复合涂层制备;氩弧熔覆 $\text{Mo}-\text{Ni}-\text{Si}$ 复合涂层制备氩弧熔覆制备 $(\text{Zr}, \text{Ti})/\text{Ni60A}$ 复合涂层。书中对以上复合涂层的组织和性能进行了较系统的介绍。

本书的出版得到了国家出版基金项目的资助,并得到了哈尔滨工业大学出版社的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,加之可参阅的资料有限,书中难免存在不足之处,恳请各位读者和专家批评指正。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王振' (Wang Zhen), with a stylized flourish at the end.

2015 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 氩弧熔覆技术概况	1
1.2 氩弧熔覆技术的研究现状	2
1.2.1 氩弧熔覆 Ni 基复合涂层	3
1.2.2 氩弧熔覆 Fe 基复合涂层	4
1.2.3 氩弧熔覆 Ti 基复合涂层	6
1.2.4 氩弧熔覆 Al 基复合涂层	7
1.3 针对氩弧熔覆方面的研究	8
参考文献	11
第 2 章 氩弧熔覆制备 ZrC 增强 Fe 基复合涂层	15
2.1 引言	15
2.2 试验方法	17
2.2.1 试验材料	17
2.2.2 组织结构与性能分析	21
2.3 结果与分析	22
2.3.1 复合涂层的工艺研究	22
2.3.2 复合涂层微观组织结构	28
2.3.3 熔覆层热力学分析	31
2.3.4 复合涂层的摩擦磨损性能	33
2.4 结论	38
参考文献	39
第 3 章 氩弧熔覆制备 Ti(C,N)-TiB ₂ /Ni60A 复合涂层	41
3.1 引言	41
3.2 试验方法	43
3.2.1 试验材料	43
3.2.2 氩弧熔覆层的组织结构及性能测试	48

3.3 结果与分析	49
3.3.1 Ti(C,N)-TiB ₂ /Ni60A 熔覆层的工艺参数	49
3.3.2 Ti(C,N)-TiB ₂ /Ni60A 熔覆层的组织特征	55
3.3.3 原位合成 Ti(C,N)-TiB ₂ /Ni60A 熔覆层摩擦磨损性能	64
3.4 结论	72
参考文献	73
第4章 氩弧熔覆制备 TiB₂-TiN 增强 Ti 基复合涂层	75
4.1 引言	75
4.1.1 TiN 的晶体结构及性能	76
4.1.2 TiB ₂ 的晶体结构及性能	76
4.2 试验方法	77
4.2.1 试验材料	77
4.2.2 复合涂层的组织结构和性能分析方法	80
4.3 结果与分析	81
4.3.1 复合涂层的影响因素	81
4.3.2 TiB ₂ -TiN 复合涂层组织结构	87
4.3.3 TiB ₂ -TiN 热力学分析与形成机理	91
4.3.4 TiB ₂ -TiN 复合涂层的摩擦磨损性能	98
4.4 结论	108
参考文献	108
第5章 氩弧熔覆制备高温抗氧化复合涂层	111
5.1 引言	111
5.2 试验方法	115
5.2.1 试验材料	115
5.2.2 组织与性能测试方法及设备	118
5.3 结果与分析	119
5.3.1 C-Si-Ti 复合涂层的试验工艺研究	119
5.3.2 制备 C-Si-Zr 复合涂层工艺参数	123
5.3.3 复合涂层组织结构分析	126
5.3.4 C-Si-Ti 复合涂层分析	130
5.3.5 C-Si-Zr 复合涂层分析	137

5.3.6 C-Si-Ti 复合涂层高温氧化性能分析	143
5.3.7 C-Si-Zr 复合涂层高温氧化性能分析	148
5.4 结论	154
参考文献	155
第 6 章 氩弧熔覆-注射技术制备纳米结构 WC 复合涂层	158
6.1 引言	158
6.1.1 氩弧熔覆-注射技术制备复合涂层现状	158
6.1.2 WC 的制备方法和性能	160
6.1.3 纳米 WC 的组织结构与性能	160
6.2 试验方法	162
6.2.1 试验材料	162
6.2.2 涂层组织与性能分析方法	168
6.3 结果与分析	169
6.3.1 复合涂层的影响因素	169
6.3.2 微米结构 WC 涂层组织结构分析	175
6.3.3 微纳米结构 WC 涂层的组织结构分析	179
6.3.4 纳米结构 WC 涂层的组织结构	182
6.3.5 纳米结构 WC 涂层的硬度和摩擦磨损特性	185
6.4 结论	192
参考文献	193
第 7 章 Q235 钢表面氩弧熔覆 Ni-Mo-Zr-WC-B₄C 复合涂层	195
7.1 引言	195
7.2 试验方法	195
7.3 结果与分析	196
7.3.1 复合涂层组织及相组成	196
7.3.2 复合涂层的显微硬度	199
7.3.3 复合涂层的摩擦磨损特性	199
7.4 结论	201
参考文献	201

第 8 章 氩弧熔覆 WC+Ni ₃ Si/Ni 基复合涂层	202
8.1 引言	202
8.2 试验方法	202
8.3 结果与分析	203
8.3.1 氩弧熔覆复合涂层组织构成	203
8.3.2 氩弧熔覆复合涂层凝固过程分析	205
8.3.3 氩弧熔覆复合涂层耐磨性及机理研究	206
8.4 结论	206
参考文献	207
第 9 章 氩弧熔覆原位合成 TiN 增强 Ni 基复合涂层	208
9.1 引言	208
9.2 试验方法	208
9.3 结果与分析	209
9.3.1 复合涂层组织及相组成	209
9.3.2 复合涂层的显微硬度	212
9.3.3 复合涂层的摩擦磨损特性	212
9.4 结论	214
参考文献	215
第 10 章 氩弧熔覆 Mo-Ni-Si 复合涂层	216
10.1 引言	216
10.2 试验方法	216
10.3 结果与分析	217
10.3.1 复合涂层组织特征	217
10.3.2 复合涂层中的组织生长过程分析	220
10.3.3 熔覆涂层的显微硬度	220
10.4 结论	221
参考文献	221
第 11 章 氩弧熔覆制备 (Zr, Ti) C/Ni60A 复合涂层	222
11.1 引言	222
11.2 试验方法	223
11.2.1 试验材料	223
11.2.2 熔覆层组织及性能的测试方法	227

11.3 结果与分析	229
11.3.1 原位合成(Zr,Ti)C/Ni60A 熔覆层的质量控制	229
11.3.2 (Zr,Ti)C/Ni60A 熔覆层的组织结构特征	235
11.3.3 (Zr,Ti)C/Ni60A 熔覆层摩擦磨损性能	246
11.4 结论	254
参考文献	255
名词索引	257

第1章 绪 论

1.1 氩弧熔覆技术概况

工程材料的磨损和腐蚀等现象大多从表面开始,因此材料表面保护具有重要的工程应用价值。耐磨材料的研究在向提高材料整体耐磨性方向发展的同时,各种表面改性技术及工艺在耐磨材料中的应用也日益受到重视^[1]。表面熔覆作为一种新型的表面处理技术,将硬度较高的增强相熔覆到基体表面,在保证表面具有高的硬度和耐磨性的同时,也保留了基体材料的韧性,使材料的整体性能得到大幅度提高。

熔覆就是将经过高温熔炼、球化处理、机械研磨混合等特殊处理的合金粉末用如水玻璃、胶水、松香油、酚醛树脂等某种黏结剂进行黏合处理;然后将处理后的合金粉末均匀地涂在基体表面并进行加热烘干,但烘干的温度必须严格控制;最后用某种高温热源进行处理,使合金粉末熔化,最终使熔覆材料与基体形成一种冶金结合层^[2]。目前熔覆的方法很多,如激光熔覆、等离子熔覆、氧-乙炔焰熔覆、感应熔覆和氩弧熔覆等,其中,激光熔覆热变形小,覆层成分及稀释率可控,但因其设备昂贵,对工件和工艺要求高,不易在施工现场操作等原因,使激光熔覆多用于试验研究。等离子熔覆技术是以联合型或转移型等离子弧为热源,以熔化焊丝或者合金粉末作为填充金属来制备熔覆层^[3,4]。与其他方法相比,等离子弧弧柱稳定,温度高,热量集中,规范参数可调性好,熔覆效率高,可通过参数调节获得熔深浅而熔宽宽的熔覆层,以满足表面工程的基本要求。但其缺点是设备成本高,噪声大,紫外线强,产生臭氧污染,不符合可持续发展的先进加工技术要求。但是相比较而言,氩弧熔覆有着自己独有的特点。

氩弧熔覆即在氩气的保护作用下,以电弧作为热源将涂敷在基体表面的合金粉末涂层熔化,最终获得与基体呈冶金结合并改善机体性能的合金涂层方法。与其他熔覆方法相比,氩弧熔覆的特点主要有:

(1)熔覆过程中氩弧的热量集中,最高可达5 000 K左右,能量密度介于自由电弧和压缩电弧之间,即使氩弧的热量没有激光束高,但仍能熔化大部分材料,可满足一般使用要求。

(2)在氩弧熔覆过程中,熔化的涂层粉末均处在氩气氛围中,始终受到氩气的保护,因此避免了高温加热下氧化和烧损现象的发生,进而会形成性能良好的熔覆层,且熔覆层与基体间呈冶金结合。

(3)氩弧焊机设备轻便,灵活性高,使用方便,可实现手工操作,可在复杂的表面及体积较大的基体表面进行熔覆,还可在野外进行作业。

(4)氩弧熔覆设备与激光熔覆设备相比较,不但使用方便,而且价格便宜,因此具有更广泛的工程使用价值。

图 1.1 为氩弧熔覆原理示意图。

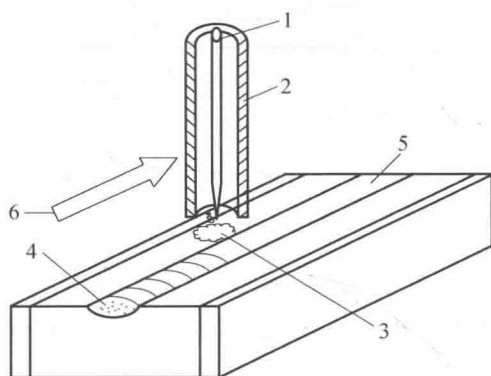


图 1.1 氩弧熔覆原理示意图

1—电极;2—喷嘴;3—保护气体(氩气);4—熔化带;5—预熔覆涂层;6—熔覆方向

1.2 氩弧熔覆技术的研究现状

目前国内外关于氩弧熔覆技术的研究比较少。国外有关此方面的研究多数是用于钛合金或不锈钢表面制备耐腐蚀涂层。如 Soner Buytoz 等人^[5]利用氩弧熔覆技术在 AISI4340 不锈钢表面获得了 WC 增强的熔覆层,其维化硬度为 950 ~ 1 200HV,磨损失重最小,同时还发现熔覆层的微观组织与熔覆参数有关。Mridha^[6]用氩弧熔覆方法在钛合金表面制备了 Ti-Al 金属间化合物 Ti_3Al , $TiAl$ 增强的表面涂层,并对其微观组织、力学性能及磨损性能进行了研究,熔覆层硬度超过了 500HV;F. T. Cheng 等人^[7]为了提高抗腐蚀性能,在 AISI316 不锈钢表面用 TIG 焊方法熔覆了 Ni-Ti 合金涂层,涂层显微硬度约为 750HV,其腐蚀率仅为母材的 1/9,比激光熔覆 Ni-Cr-Si-B 涂层还要低。

国内关于氩弧熔覆的研究多局限在铸铁表面重熔强化和低碳钢表面熔覆自溶性合金粉末方面^[8],有的研究用钨极氩弧重熔焊接件的缺陷区域以获得“熔修”效果,也有用氩弧熔覆技术制备了耐磨复合涂层,并取得了良好的效果。由于Ni基合金粉末自溶性好,熔点低,润湿性好,且耐蚀、耐磨和抗氧化,因此,氩弧熔覆Ni基复合涂层是氩弧熔覆技术中研究和应用最早最多的。随着研究的深入,陆续有人使用氩弧熔覆技术制备了Fe基、Ti基和Al基等复合涂层。

1.2.1 氩弧熔覆Ni基复合涂层

李炳等人^[9]在4Cr13钢上熔覆WC+Ni60合金粉末,通过改变WC的质量分数来改变熔覆层性能。研究发现随着WC质量分数的不断增加,熔覆层硬度不断提高。当WC的质量分数超过30%后,其增强效果缓慢。当WC的质量分数达到30%时,其耐磨性为Ni60的17倍。

王旭等人^[10]在Q235钢上涂覆不同配比的Ni35B和SiC粉末,通过氩弧熔覆后发现,相比较于基体,熔覆层硬度大大提高,含70%SiC^①为最佳比例,熔覆层硬度最高可达55HRC, SiC的质量分数超过70%,熔覆层组织逐渐粗化,硬度下降。熔覆层中无SiC颗粒,强化机制为C, Si的固溶强化,第二相粒子强化, GP区强化, γ -Ni相富集及细晶强化。

郝建军等人^[11]采用预置法,将Ni60A和铸造WC涂覆在Q235钢上,通过氩弧熔覆在Q235钢上制备WC增强Ni基涂层。通过着色渗透剂和超声波探伤检验熔覆层表面和内部,未发现气孔、裂纹等缺陷。熔覆层与基体之间呈冶金结合,无夹杂、气孔等缺陷。熔覆层硬度最高可达700HV_{0.1},远高于基体,耐磨性优于65Mn钢。

王永东等人^[12]以Ti粉、C粉、WC和Ni60A粉末作为原料,利用氩弧熔覆技术在Q235钢基材表面成功制备出Ni基增强相复合涂层。通过显微硬度和耐磨性测试结果表明,涂层的显微硬度较基体Q235钢提高4倍以上;在常温干滑动磨损条件下,复合涂层具有优异的耐磨性。

史晓萍等人^[13]以WC、SiC和Ni60A粉末为原料,采用氩弧熔覆技术在Q345钢基体表面制备出WC+ γ -Ni₃Si₂增强Ni基复合涂层。结果表明,熔覆层与基体呈冶金结合,无裂纹、气孔等缺陷;涂层最高硬度可达1200HV_{0.2},是基体金属的4倍以上;在室温干滑动磨损试验条件下具有优

① “70% SiC”的形式在本书中均指物质的质量分数。

异的耐磨损性能,耐磨性比基体提高了11倍。

王永东等人^[14]以C粉、Nb粉和Ni60A粉末为原料,利用氩弧熔覆技术在Q345钢基材表面原位合成了NbC增强Ni基复合涂层。结果表明,复合涂层与基体界面呈冶金结合,并且没有气孔和裂纹;涂层的显微硬度达到1 000HV_{0.2},比基体提高了3倍左右;耐磨性比基体Q345钢提高近11倍。

孟君晟等人^[15]利用氩弧熔覆技术在16Mn钢表面原位合成TiC增强Ni基复合耐磨涂层,采用XRD和SEM等手段分析涂层的组织,测试涂层的室温干滑动磨损性能。结果表明,其室温干滑动磨损机制为显微切削磨损,熔覆层与基体呈冶金结合,TiC颗粒均弥散分布于熔覆层中,涂层有较高的硬度,在室温干滑动磨损试验条件下具有优异的耐磨性。

王永东等人^[16]以Ni60A粉末、SiC粉末为原料,利用氩弧熔覆技术在Q235钢基材表面制备出复合涂层,应用SEM和XRD方法分析了涂层的显微组织。结果表明,复合涂层与基材实现了良好的冶金结合,复合涂层无单独的SiC,而是由Ni₃Si枝晶、M₇C₃和 γ -Ni固溶体组成,Ni₃Si枝晶均匀地分布在 γ -Ni固溶体基体上,涂层的显微硬度达到1 100HV_{0.2},涂层的耐磨性较基体提高近13倍。

孟君晟等人^[17]采用MW3000型氩弧焊机在16Mn钢表面进行熔覆,在原位生成TiC颗粒增强Ni基复合涂层,他们研究了氩弧焊接工艺参数(焊接电流、焊接速度及氩气流量)对熔覆层性能和质量的影响,利用SEM和XRD等手段对熔覆层显微组织和物相进行了研究。结果表明,氩弧焊接电流、焊接速度等工艺参数的合理匹配是原位生成TiC颗粒的关键因素。当焊接电流为120 A、焊接速度为8 mm/s、氩气流量为10~12 L/min时,能获得良好的性能及表面成型复合涂层。原位生成的TiC颗粒均弥散分布于熔覆层中,涂层的显微硬度可达1 100HV。

1.2.2 氩弧熔覆Fe基复合涂层

焦少彬等人^[18]将不同比例的Fe粉和SiC粉末均匀混合,预涂在Q235钢表面,采用不同的氩弧熔覆工艺制备了SiC熔覆涂层。通过对不同工艺得到熔覆层的对比试验发现,熔覆电流为150 A,氩气流量为8 L/min, SiC的质量分数为80%时获得的熔覆层性能最好。

杨皓宇等人^[19]采用氩弧熔覆技术,在45钢表面制备出WC颗粒增强的复合涂层。熔覆层强化机制包括WC等硬质相的弥散强化、细晶强化以

及 C, W 等合金元素进入固溶体产生的固溶强化。熔覆层硬度和耐磨性得到显著提高,显微硬度呈梯形分布,表面硬度最高,过渡区次之,基体硬度最低,耐磨性约为基体的 6 倍。

郭国林等人^[20]利用氩弧熔覆技术,在 Q235 钢表面熔覆一层 Fe 基合金耐磨涂层。结果表明,在 Q235 钢表面制备了以马氏体组织和 γ -(Fe-Cr-Ni-C) 合金固溶体为基体,以 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$, Fe_3C , Fe_2B 等化合物为增强相的合金涂层;涂层的显微硬度可达 600HV,涂层的耐磨性较基体提高近 8 倍。

徐峰等人^[21]以 Ti 粉、C 粉、Fe 粉为原料,利用氩弧熔覆技术在 Q235 钢表面原位合成了 TiC 增强 Fe 基复合涂层。结果表明,复合涂层与基体层冶金结合,界面无气孔、裂纹等宏观缺陷;熔覆层组织由等轴晶和树枝晶组成,主要分布于晶界处和晶粒内;熔覆层表面硬度最高为 57.9HRC,是基体的 2 倍;内部硬度随着与表面距离的增加而减小。

王永东等人^[22]以 Mo 粉、Si 粉为原料,利用氩弧熔覆技术在 Q235 钢材表面原位合成了 $\text{FeMoSi}/\text{Fe}_3\text{Si}$ 金属硅化物复合涂层。结果表明,复合涂层由 α -Fe、初生相 FeMoSi 三元金属硅化物树枝晶和枝晶间的鱼骨状 $\text{FeMoSi}/\text{Fe}_3\text{Si}$ 共晶组织组成;涂层的显微硬度达到 1 000HV_{0.2},较基体提高 3 倍左右;相对耐磨性较基体 Q235 钢提高近 11 倍。

焦少彬等人^[23]采用氩弧熔覆技术,在碳钢基体表面采用不同工艺方法制备了含有 Si 粉和 Fe 粉的涂层。结果表明,Si 的含量由表向里逐渐减少,在氩弧熔覆过程中 SiC 颗粒发生分解,形成了碳化物;由于碳化物的存在,熔覆层硬度达到 45.8HRC 以上,比基体硬度提高 1 倍以上,摩擦因数较基体有所提高,磨损失重比基体小,具有良好的耐磨性。

王永东等人^[24]以 Mo 粉、Si 粉、Ni 粉为原料,采用氩弧熔覆技术在 Q235 钢材表面原位合成了 $\text{MoNiSi}/\text{Ni}_3\text{Si}$ 金属硅化物复合涂层,分析和测试了涂层的显微组织、显微硬度及耐磨性。结果表明,在 Q235 钢表面成功制备了以 $\text{MoNiSi}/\text{Ni}_3\text{Si}$ 为基体,以金属硅化物 MoNiSi 为增强相的复合涂层;涂层的显微硬度可达 1 000HV,涂层耐磨性较基体提高 12 倍。

王永东等人^[25]以 Ti 粉、C 粉、Ni 粉和 Ni60A 粉末为原料,利用氩弧熔覆技术在 16Mn 钢材表面成功制备出 Ni 基增强相复合涂层,应用 OM, SEM, XRD 对复合涂层的显微组织和物相进行了分析,并测试了不同载荷作用下的磨损性能。结果表明,熔覆层与基体结合,无气孔、裂纹等缺陷,呈冶金结合,复合涂层物相由 $(\text{Ti}, \text{Nb})\text{C}$ 颗粒、 γ -Ni 奥氏体枝晶和枝晶间

的 Cr_{23}C_6 共晶组织组成。随着载荷的增加,复合涂层磨损量缓慢增大,16Mn 钢磨损失重迅速增大,熔覆涂层的耐磨性较基体提高近 11 倍,其磨损机制主要为擦伤式磨损。

王永东等人^[26]以 Fe 粉、Ti 粉和 B 粉为原料,利用氩弧熔覆技术在 Q235 钢基材表面制备出 TiB/FeB 增强 Fe 基复合涂层,应用 SEM 和 XRD 方法分析了涂层的显微组织,并测试了涂层的硬度和耐磨性。结果表明,在 Q235 钢表面成功制备了以 $\alpha\text{-Fe}$ 为基体,以 TiB/FeB 颗粒为增强相的复合涂层;涂层的显微硬度可达 1 100HV,涂层耐磨性较基体提高近 12 倍。复合涂层的磨损机理为显微擦伤式磨损。

王永东等人^[27]以 Ti 粉、C 粉、TiN 粉和 Ni60A 粉末为原料,利用氩弧熔覆技术在 16Mn 钢基材表面成功制备出 Ni 基增强相复合涂层,应用 OM, SEM, RD 对复合涂层的显微组织和物相进行了分析。结果表明,复合涂层物相由 TiC、TiN 颗粒、 $\gamma\text{-Ni}$ 奥氏体枝晶和枝晶间的 Cr_{23}C_6 共晶组织组成;涂层的硬度达到 900HV_{0.2},较基体 16Mn 钢提高了 3 倍多;相对耐磨性较基体 16Mn 钢提高了 8 倍。

1.2.3 氩弧熔覆 Ti 基复合涂层

孟君晟等人^[28]采用氩弧熔覆技术在 TC4 合金表面成功制备出 TiC 颗粒增强 Ti 基复合涂层。熔覆层组织均匀致密,与基体呈冶金结合。涂层中含有大量的 TiC 枝晶和条块状的 TiC 颗粒,硬度最高可达 9.57 GPa,约为基体的 3 倍,耐磨性为基体的 20 倍。

孟君晟等人^[29]为提高钛合金表面性能,利用氩弧熔覆技术,以 TiN 粉和 Ti 粉为原料,在 TC 合金表面成功制备出 TiN 增强 Ti 基复合涂层。由于加热过程中不同区域的温度不同,因此熔覆层表层组织由粗大的 TiN 棒状枝晶组成,底部由 TiN 棒状枝晶和 TiN 颗粒组成。熔覆涂层硬度较基体有显著提高,最高可达 9.5 GPa。熔覆硬度呈梯状分布,随着与表面距离的增加而降低。熔覆涂层具有优异的耐磨性能,其耐磨性较基体提高了约 9 倍。

孟君晟等人^[30]利用氩弧熔覆技术,在 TC4 合金表面原位合成了 TiC-TiB₂ 增强 Ni 基复合涂层,利用 SEM 和 XRD 等方法分析了涂层的显微组织,并测试了涂层的显微硬度。结果表明,熔覆组织主要由 TiC、TiB₂ 和 Ti(Ni, Cr) 组成, TiB₂ 主要以棒状形式存在;在所形成的 TiC-TiB₂/Ti 复合涂层中, TiC 和 TiB₂ 颗粒分布均匀且尺寸细小;熔覆涂层由表及里有不同

的组织;熔覆层与基体呈冶金结合,无气孔、裂纹等缺陷;涂层的显微硬度达到 13.8 GPa,较基体提高了 4.5 倍。

孟君晟等人^[31]利用氩弧熔覆技术在 TC4 合金表面制备出 TiC 增强的 Ti 基复合涂层,利用 SEM,XRD 和 EDS 分析了熔覆涂层的显微组织;利用显微硬度仪测试了复合涂层的显微硬度;利用摩擦磨损试验机测试了涂层在室温干滑动磨损条件下的耐磨性能。结果表明,氩弧熔覆涂层组织均匀致密,熔覆层与基体呈冶金结合,涂层中有大量的 TiC 树枝晶和条块状 TiC 颗粒;复合涂层明显改善了 TC4 合金的表面硬度,HV 平均硬度可达 9 GPa;复合涂层室温干滑动磨损机制为磨粒磨损和轻微黏着磨损。

孟君晟等人^[32]利用氩弧熔覆技术在 TC4 合金表面成功制备出 TiC、TiB 和 TiB₂ 增强 Ti 基复合涂层,利用 SEM,XRD 和 EDS 分析了熔覆涂层的显微组织;利用显微硬度仪测试了复合涂层的显微硬度;利用摩擦磨损试验机测试了涂层在室温干滑动磨损条件下的耐磨性能。结果表明,氩弧熔覆涂层组织均匀致密,熔覆层与基体呈冶金结合,TC4 合金表面有颗粒状 TiC、粗大棒状相 TiB₂ 及细小棒状相 TiB 生成;复合涂层明显改善了 TC4 合金的表面硬度,涂层的最高显微硬度可达 1 300HV_{0.2};复合涂层在室温干滑动磨损试验条件下具有优异的耐磨性,磨损机制主要是磨粒磨损,其耐磨性较 TC4 合金基体提高近 10 倍。

1.2.4 氩弧熔覆 Al 基复合涂层

汤文博等人^[33]以 Ti、Al 和石墨为混合粉末,按质量比 2:7:1 混合均匀,采用钨极氩弧焊,成功地在纯铝表面熔覆了 Al-Ti-C 合金体系的堆焊层。该涂层中没有 Al₄C₃ 脆性相,Ti、C 未完全溶入 Al 中,没有完全生成 TiC 颗粒。提高熔池高温停留时间有利于 TiV 的生成,以提高熔覆涂层的性能。

孟君晟等人^[34]以 Al 粉、Ti 粉和 C 粉为原料,利用氩弧熔覆技术,在 ZL104 合金表面原位合成了 TiC 增强 Al 基复合涂层。结果表明,氩弧熔覆过程中可以充分反应合成 TiC 颗粒;呈球状的 TiC 颗粒弥散分布于熔覆层中。熔覆层与基体结合致密;复合涂层的显微硬度可达 660HV_{0.2},涂层耐磨性较基体提高近 7 倍。

孟君晟等人^[35]利用氩弧熔覆技术,在 ZL104 合金表面原位合成了 TiCp/Al 复合涂层,利用 X 射线衍射、扫描电子显微镜及显微硬度计,研究了熔覆层的显微组织及性能。结果表明,(Ti+C)的质量分数在 30% 以下