

等离子弧堆焊 TiB₂-金属陶瓷涂层的组织及性能

王晓峰，单平，王惜宝，胡绳荪

(天津大学 材料科学与工程学院，天津 300072)

摘要：采用等离子弧堆焊设备，通过钛合金和硼合金粉末之间的高温冶金反应，在堆焊过程中原位合成了 TiB₂，在普通碳钢表面制备了含 TiB₂ 的金属陶瓷层。并对堆焊层进行了显微组织、X 射线衍射分析、硬度及抗裂性能试验。试验结果表明，这种一步性原位合成工艺所获得的堆焊层主要由针状 TiB₂ 晶须与 Fe 及其硼、碳化合物组成，陶瓷层与基体间实现了冶金结合；堆焊层抗裂性能优于不含 TiB₂ 的铁基 B₄C 堆焊层。

关键词：等离子弧堆焊；TiB₂；金属陶瓷；组织；抗裂性能

中图分类号：TG455 文献标识码：A 文章编号：0253-360X(2005)07-33-05



王晓峰

0 序 言

随着现代化工业的高速发展，提高结构件在恶劣环境（高温、腐蚀、磨损等）条件下的使用性能显得日趋迫切和重要。目前广泛采用的硬质合金是 WC-Co 金属陶瓷，其硬质相为 WC（熔点为 2780 °C，密度为 15.7 g/cm³），Co 为粘结相。一种新型硬质合金——TiB₂-金属陶瓷正在崛起。TiB₂ 硬质相具有许多优异的性能：熔点高（2980 °C）；高温硬度高（3370 HV）；导电率（电阻率为 15.2~28.4 Ω·m）与导热率高；杨氏模量高 [414 GPa (1090 °C)]；化学稳定性与耐蚀性良好；比重轻（4.50 g/cm³）等^[1,2]。使其成为制备金属陶瓷复合材料的最佳增强剂候选材料。但是由于 TiB₂ 为共价性极强的化合物，其自扩散系数相当低，难于得到高密度的烧结体。因此发展了许多原位合成 TiB₂ 颗粒或晶须增强的金属基复合材料的涂层新技术。

文中采用等离子弧堆焊设备，通过钛合金和硼合金粉末之间进行冶金反应，在堆焊期间原位合成 TiB₂。由于熔池的快速凝固作用，所形成的 TiB₂ 晶须致密地分散于金属基体中，该金属基体来源于堆焊过程中所使用的合金粉末。这种一步性工艺所获得的涂层主要是 TiB₂ 与 Fe 及其化合物等粘结相，实现了陶瓷层与基体间的冶金结合，研究探讨了该涂层的显微组织及性能。

收稿日期：2004-08-30

基金项目：天津市自然科学基金资助项目（003603811）

1 试验材料及试验方法

试验中使用的合金粉末为铁钛 (FeTi) 粉末和碳化硼 (B₄C) 粉末。铁钛粉末成分见表 1，B₄C 粉末为牡丹江磨料二厂生产的 W10 磨料粉末，成分见表 2。试验采用的试板为 200 mm × 40 mm × 8 mm 的 45 钢板。将两种成分的合金粉末按照比例机械混合均匀，利用试验用水玻璃作为粘结剂制成团聚物，将合金粉末团聚物按照 100 mm × 10 mm × 3 mm 的尺寸在试板表面制备预敷涂层。将该试件置于室内阴干 12 h 左右。

表 1 铁钛合金粉末的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of Fe-Ti alloy powder

Fe	Ti	C	O	Al	Si	Ca	Mn
49.14	21.07	3.80	10.65	2.50	3.10	1.84	7.90

表 2 B₄C 粉末成分 (质量分数, %)Table 2 Composition of B₄C powder

B	B ₂ O ₃	游离 C	Fe ₂ O ₃
≥76	≤0.3	≤2.0	≤1.0

等离子弧堆焊设备采用沈阳工业大学研制的 LP-1 型等离子弧堆焊设备。根据相关的研究结论^[3]，选取合金粉末成分为 80TiFe+20B₄C（质量分数, %），堆焊电流分别为 160 A、200 A、240 A 进行单道堆焊试验，制成试件，研究堆焊层组织及性能。其它工艺参数为：离子气流量为 280 L/h，喷

枪摆频 0.37 Hz 喷枪摆幅为 10 mm, 焊接速度为 52 mm / min。

光学显微镜下观察不同堆焊电流时的堆焊层组织。采用理学 D max2400 型衍射仪对焊接电流为 200 A 的堆焊层进行 X 射线衍射, 分析堆焊层成分。

利用 HVA - 10A 型小负荷维氏硬度计(载荷 10 kg 加载 15 s) 测试堆焊层横截面沿直线从母材到堆焊层表面的维氏硬度。

采用平板堆焊法测定堆焊层的抗裂性能。具体试验过程如下: 在 200 mm × 40 mm × 30 mm 的 45 钢板上采用与原试验相同的工艺参数堆焊出一条长 150 mm, 宽约 15 mm 的试验堆焊层, 冷却至室温后用 10 倍放大镜仔细检查 150 mm 长度堆焊层上出现的裂纹条数(不记起弧处及弧坑处裂纹)及每条裂纹的长度。每个试验均以相同规范做三次, 然后计算其平均裂纹数作为该工艺下堆焊层抗裂性能指标。

2 试验结果及分析

2.1 堆焊层的组织及硬度

2.1.1 堆焊层中组织成分及分布

200 A 堆焊电流的堆焊层 X 射线衍射分析结果如图 1 所示。由图中可以看出, 该堆焊层由多相物质组成。对照粉末衍射卡片, 可以确定该堆焊层上表面的物质主要有: TiB₂, Fe₂B、马氏体(α -Fe)、残余奥氏体(γ -Fe)及 TiC 等化合物。另外, 图 1 中 TiB₂, α -Fe 的衍射峰较之堆焊层中的其它化合物强度较强, 表明这两种物质在堆焊层中所占的比重较大、数量较多。如图 2a 所示为堆焊层横截面靠近上表面组织。可以看到堆焊层组织中存在较多数的针状 TiB₂。

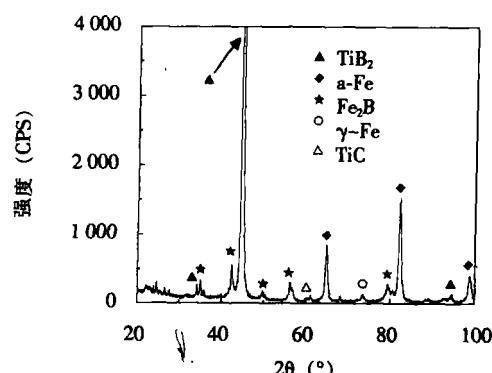
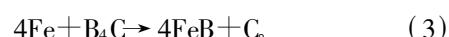
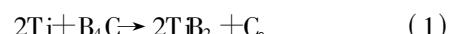


图 1 堆焊层上表面 X 射线衍射图谱

Fig 1 XRD analysis results of surface on coating

等离子弧堆焊时, 当采用 FeTi 粉末和 B₄C 粉末作为堆焊材料时, 经过等离子弧加热, 形成熔池, 合金粉末在等离子弧高温下发生一系列冶金反应^[4,5], 生成一系列产物。可能发生的反应如下



根据式(1)、(2)、(3)计算可知, 当堆焊层合金粉末全部熔化后, 熔池内部的含 Ti 量应为 16.85% (质量分数) 左右, 含 B 量为 15.2% (质量分数) 左右。因此, 熔池金属中 Ti:B 质量比为 1:1.1, 相当于 B-Ti 平衡相图^[6] 中含 Ti 量为 56.2% 的成分点。假设熔池按平衡状态冷却, 在熔池凝固过程中, 当温度降低到 3232 °C 时, 熔池中首先析出 TiB₂, 并且剩余部分 B 原子。该部分剩余的 B 原子占整个熔池的 7.23%, 相当于 B-Fe 相图^[6] 中含 B 量为 12.83% 的成分点。那么当熔池温度继续降低时将析出 Fe₂B 及少量的 FeB 相。因此如果不考虑 C 的影响, 当按平衡状态冷却时, 室温下应得到大量的初晶相 TiB₂、Fe₂B 和少量的 FeB、马氏体、残余奥氏体的混合组织。这基本与 X 射线衍射分析结果相符, 唯一不同在于在堆焊层靠近表面区域未发现 FeB 相。但是, 在堆焊层中下部靠近熔合线部分的金相照片中却出现了少量的 FeB 相, 如图 2b 所示。这是由于 FeB 的密度 (7.15 g/cm³) 比 TiB₂ 的密度 (4.52 g/cm³) 要大将近一倍, 接近 Fe 密度。因此, 当形成熔池时, 密度较小的 TiB₂ 有上浮的趋势, 而密度较大的 FeB 则集中在熔池的中下部。因此当熔池凝固之后在堆焊层中形成了组织的不均匀分布, 即 TiB₂ 主要集中在堆焊层的中上部, 而密度较大的 FeB 集中在熔池的中下部。因此在堆焊层上表面的 X 射线衍射图谱分析中未出现 FeB 而在堆焊层中下部靠近熔合线部分的组织照片中发现了少量的 FeB。

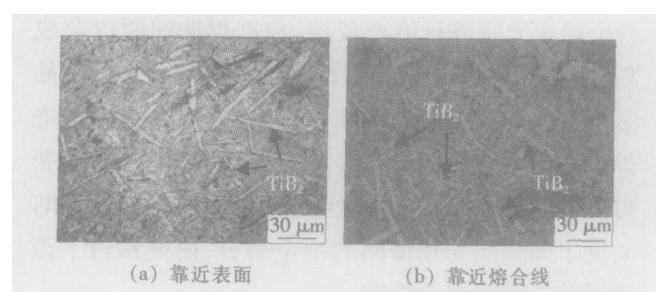


图 2 堆焊层横截面组织

Fig 2 Microstructure of transverse section of coating

2.1.2 焊接电流对堆焊层组织的影响

预敷 3 mm 涂层的钢板经等离子弧堆焊后得到余高为 1 mm 左右的堆焊层, 熔深为 2~5 mm 左右。在给定的工艺参数条件下, 随着堆焊电流的增加, 熔

深有加大的趋势, 余高无明显变化。图 3a、b、c 分别为 160 A、200 A、240 A 堆焊电流时金相显微镜观察到的堆焊层横截面的典型组织。

由该图观察发现, 不同电流时堆焊层中 TiB₂晶

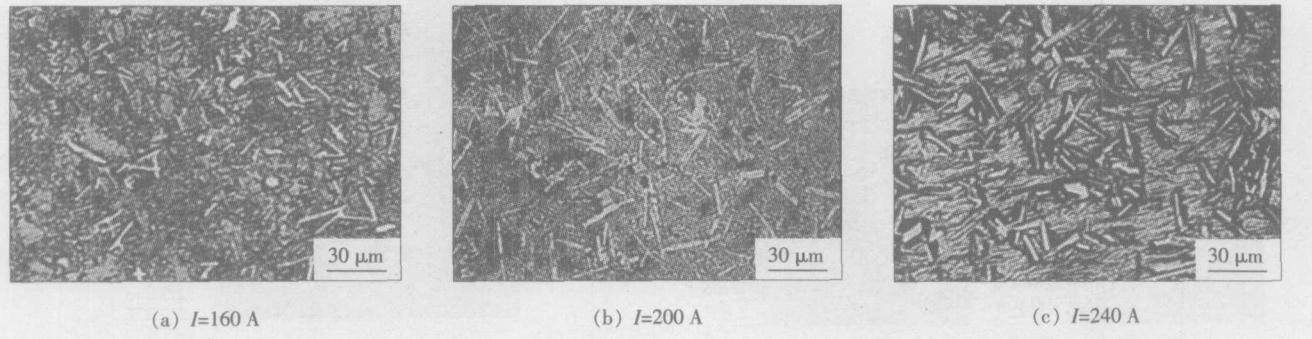


图 3 焊接电流对堆焊层微观组织的影响

Fig. 3 Effect of welding current on microstructure of coating

须的形态及分布有很大不同。电流较小 (160 A) 时, 堆焊层中白色针状 TiB₂ 数量较少, 并且大小及分布不均匀; 随着电流增加, 中等电流 (200 A) 及大电流 (240 A) 时, 堆焊层中 TiB₂ 数量增多, 并且分布趋于均匀、大小相近。各电流值堆焊层组织均为 TiB₂ 晶须 + Fe₂B + 共晶基体 (含硼渗碳体 Fe₃(C, B)、马氏体、残余奥氏体)。

堆焊电流对堆焊层中 TiB₂ 晶须形态的影响可以通过比较不同堆焊电流时 TiB₂ 的长度、宽度及长宽比来衡量。堆焊层中 TiB₂ 晶须的长度、宽度及长宽比测量结果见表 3。由该表可以看出, 随着电流的增加, TiB₂ 晶须的大小及长宽比均增加, 并且长度方向的增加速度大于宽度方向。这是由于随着电流的增加, 即堆焊热输入的增加, 熔池最高温度升高, 在熔池凝固过程中结晶时间变长, 熔池中的 TiB₂ 晶须获得较长的长大时间。因此, 当熔池冷却后形成的堆焊层中 TiB₂ 晶须的长度、宽度均有所增加。

表 3 堆焊层中 TiB₂ 晶须尺寸

Table 3 Size of TiB₂ whisker in coating

电流 I/A	长度 $a/\mu\text{m}$	宽度 $b/\mu\text{m}$	长宽比
160	6~8	1~2	5~6
200	13~14	1~2	8
240	15~20	1.5~3	10

2.1.3 堆焊层横截面硬度

堆焊层横截面从母材到表面的维氏硬度分布测试结果如表 4 所示。

表 4 堆焊层横截面硬度测试结果

Table 4 Data of hardness of transverse section of coating

距离 d/mm	-1	0	1.3	1.5	2.1	3.0	3.2
硬度 HV	281	336	397	417	446	882	1 206

图 4 为根据表 4 所列测试结果数据绘制的堆焊层横截面硬度分布图。可以看出, 堆焊层横截面硬度存在梯度分布。堆焊层中远离熔合线处硬度远高于母材, 并且从母材到堆焊层表面之间存在一个明显的有一定宽度的硬度渐变区, 越靠近表面, 堆焊层的硬度越高。这是由于堆焊层中 TiB₂ 的密度 (4.52 g/cm^3) 小、熔点高 (2980°C), 堆焊过程中熔池凝固时, 高熔点的 TiB₂ 首先凝固, 并且由于密度小, 有上浮的趋势, 熔池凝固后, 越靠近堆焊层表面 TiB₂ 越富集从而具有较高的硬度。

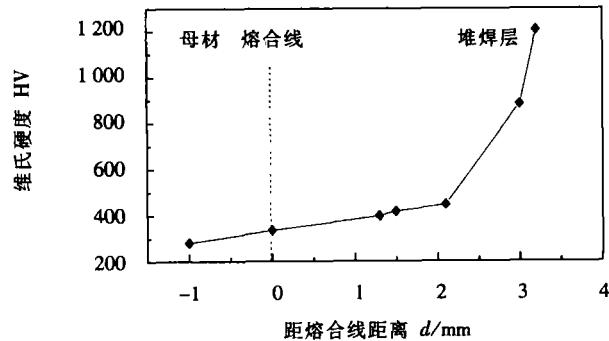


图 4 堆焊层横截面硬度分布

Fig. 4 Hardness of transverse section of coating

2.2 堆焊层的抗裂性能

堆焊电流较大(240 A)时, 堆焊层中出现了显微裂纹, 如图 5a 所示。显微裂纹向不同方向扩展, 并且在扩展过程中遇到 TiB₂ 晶须时发生了折弯, 如图 5b 所示。这是由于 TiB₂ 晶须的硬度高、断裂韧度高, 可以阻碍裂纹扩展。

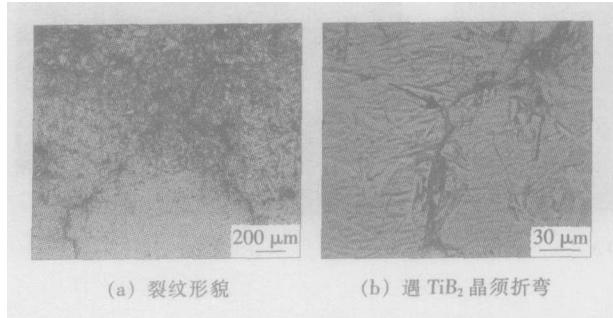


图 5 堆焊层中显微裂纹

Fig. 5 Micro crack of coating

堆焊电流较大时堆焊层中出现显微裂纹是由于当堆焊合金粉末中的 B₄C 含量较高时, 随着堆焊电流的增加, B₄C 熔化、分解量也增加, 使基体中含碳量、含硼量增加, 碳、硼元素均使堆焊层塑性降低, 在熔池凝固及随后的冷却过程中拉应力的作用下, 当堆焊层承受的拉应力在某一温度超过金属的晶间强度, 与 TiB₂ 相连的基体开裂导致了显微裂纹的产生, 属于热裂纹。

堆焊层抗裂性能试验结果如表 5 所示。通过对不同工艺参数堆焊层的裂纹率, 可以看出含 TiB₂ 金属陶瓷堆焊层的抗裂性能要优于 20% B₄C + Fe 堆焊层, 说明相比主要由铁硼相和 B₄C 强化的 20% B₄C + Fe 堆焊层, TiB₂ 金属陶瓷堆焊层具有更好的抗裂性能。堆焊电流为 200 A 时堆焊层的裂纹率最低, 可能的原因是由于在 200 A 左右电流下 TiB₂ 晶须分布较均匀, 并且晶须的大小和分布与基体达到很好的匹配。因此也证明了在不采取任何措施的情况下, 200 A 左右电流为该成分合金粉末较佳的

堆焊电流。

试验中发现裂纹是堆焊层凝固后冷却过程中产生的, 并为横向贯穿形裂纹, 如图 6 所示, 应属于冷裂纹。

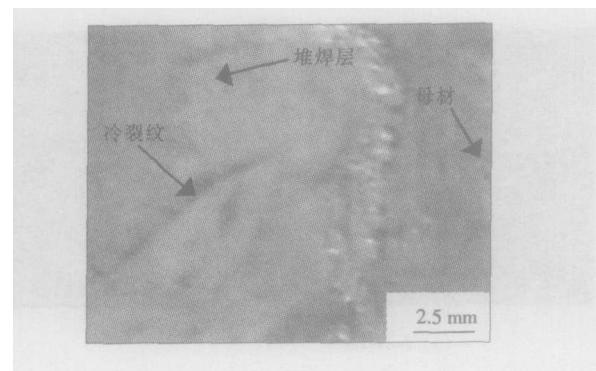


图 6 堆焊层冷裂纹宏观形貌

Fig. 6 Cold crack on surface of coating

堆焊层产生冷裂纹的原因主要是由于堆焊材料的成分与母材相差很多, 因该等离子弧堆焊过程属于异种金属的焊接。并且, 堆焊层中含 C 量(7.15%以上)和含 B 量(15.6%)均较大, 这两种元素均提高堆焊层的淬硬性, 使得堆焊层的淬硬倾向变大, 堆焊层有一定的脆性, 易出现裂纹。作为堆焊层硬质相的 TiB₂ 和母材的线膨胀系数和导热系数相差较大。由于堆焊层的线膨胀系数小于母材, 使得冷却时堆焊层的收缩率小于母材(TiB₂: 2.5~8.1 × 10⁻⁶ °C, Fe: 14.5 × 10⁻⁶ °C)。靠近熔合线处的堆焊层与母材距离较近, 冷却速度较快; 而远离熔合线处的堆焊层, 冷却速度相对较慢。这样就造成了堆焊层内部冷却速度的不均匀。靠近熔合线处的堆焊合金冷却速度较快, 而远离熔合线的堆焊合金冷却速度较慢, 收缩量小阻碍了前者的收缩, 使前者受到拉应力。堆焊层塑性较差、脆性较大, 当拉应力超过堆焊层内部的结合力时就会产生裂纹, 且裂纹容易扩展。因此, 堆焊层易出现横向贯穿形裂纹。

表 5 堆焊层抗裂性能试验结果

Table 5 Results of crack resistance test of coating

材料成分	堆焊电流 I/A	裂纹数 条				裂纹率 条/mm
		1	2	3	平均裂纹	
80FeTi + 20B ₄ C	160	2	3	3	2.6	0.0173
80FeTi + 20B ₄ C	200	0	1	0	0.3	0.0020
80FeTi + 20B ₄ C	240	3	5	4	4.0	0.0267
20% B ₄ C + Fe	200	7	6	7	6.7	0.0447

[下转第 43 页]

的影响因素(如装配间隙和表面洁净度)提供了可

靠信息;初步实现铝合金焊点质量的人机结合控制。

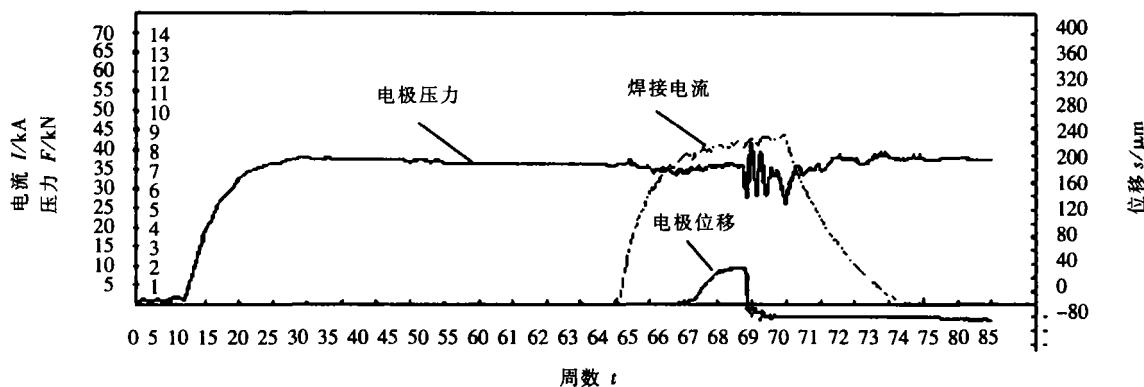


图 10 喷溅在三曲线上的反映

Fig 10 Characters of expulsion on three curves

参考文献:

- [1] RobertW, MesslerJr M in Jou Review of control systems for resistance spot welding past and current practices and emerging trends [J]. Science and Technology of Welding and Joining 1996 1(1): 1-9.
- [2] Xu J Khan JA. Nugget growth model for aluminum alloys during resistance spot welding [J]. Welding Journal 1999 78(11): 367s-372s
- [3] Tasi C L, Dai W L, Dickinson D W, et al. Analysis and development of a real-time control methodology in resistance spot welding [J]. Welding Journal 1991 70(12): 339s-351s

[上接第 36页]

3 结 论

(1) 等离子弧堆焊方法可以制备含 TiB₂ 金属陶瓷表面涂层, TiB₂ 在堆焊层中主要以晶须的形式存在。堆焊层组织为 TiB₂ 晶须搭成骨架结构, 由 Fe₂B 和 Fe₃(C, B)、马氏体、残余奥氏体混合组织组成的基体组织填充于该骨架结构中。随着堆焊热输入的增加(电流的增加), 堆焊层中 TiB₂ 晶须变得粗大。

(2) 从母材到堆焊层上表面之间存在一明显的有一定宽度的硬度渐变区, 越靠近上表面, 堆焊层的硬度越高。该类堆焊层的抗裂性能优于主要由铁硼相和 B₄C 强化的 20% B₄C+Fe 堆焊层。

参考文献:

- [1] 沃丁柱, 李顺林, 王兴业 等. 复合材料大全 [M]. 北京: 化

- [4] 关桥. 航空制造工程手册: 焊接分册 [M]. 北京: 航工工业出版社, 1996.
- [5] HB/Z77-84. 铝合金电阻点焊和缝焊工艺 [S].
- [6] 王永庆. 人工智能原理与方法 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.

作者简介: 罗贤星, 男, 1948出生, 研究员。主要从事机电一体化和电阻焊过程控制的研究工作, 获航空部科技进步二等奖 2项 三等奖 1项。发表论文 10余篇。

Email: bu@niam.jx.cn

- 学工业出版社, 2000 128-129.
- [2] 耶菲莫夫 АИ, 别洛鲁科娃 ДП, 瓦西里科娃 ИВ, 等. 无机化合物性质手册 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1987. 200
- [3] 宋均. 等离子喷焊工艺的研究 [D]. 天津: 天津大学, 1996. 20-24
- [4] 章桥新, 毛天尔, 汪声瑞. TiB₂ 基烧结材料的研究现状与进展 [J]. 材料科学与工程, 1993 (11): 3-47
- [5] Won-Ju Kim, Do-Hyeong Kim, Eul-Son Kang, et al. Two-step sintering of a TiB₂-Ni cement [J]. Journal of Materials Science, 1996, 31(21): 5805-5809.
- [6] 虞觉奇, 易文质, 陈邦迪, 等. 二元合金状态图集 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1987. 200-206

作者简介: 王晓峰, 男, 1977年 8月出生, 博士研究生。主要研究方向为材料表面改性及电阻焊工艺与设备等。发表论文 2篇。

Email: tdxwf2004@163.com

welded joint the first principal shear angle

Interface structure and distribution characteristics of vacuum fusion sintered Ni-based alloy coating containing rare earth element

XUAN Tian peng M IN Da HUO Y ing(Material Science and Engineering Institute Hefei University of Technology Hefei 230009 China). p19 - 22 26

Abstract The microstructure phase structure and distributing characteristics of a lloy elements and microhardness of vertical section of vacuum fusion sintered Ni-based alloy coatings were studied in this paper. The results showed that rare earth elements (Ce + La) improved structure of Ni60 coating needle shaped phase transformed to small globular shaped phase and the metallurgical binding of interface between the steel matrix and coating was reinforced. New second phases WC, Ni₂B, NiB and Cr₆N_{2.5}Si precipitated in Ni60+RE coating. Rare earth elements held back the diffusion of Ni, Cr and Si atoms from coating to steel matrix and Fe atom from steel matrix to coating and alleviated dilution function of Fe atom from steel matrix to Ni based alloy coating. Rare earth elements increased Ni, Cr and Si contents and decreased Fe content in the coating too. The microhardness of Ni-based coating could apparently be enhanced by introduction of rare earth elements and microhardness values of two kinds of coating reached their maximum values at 0.4 mm near by coating surface.

Key words Ni60 self fluxing alloy rare earth element structure microhardness

Design and analysis of engine drive arc welding inverter and its control system

GA I Zhi wu DA I Jing min(Harbin Institute of Technology Harbin 150001, China). p23 - 26

Abstract Generating and welding dual use set consists of generator welding inverter automatic control system and internal combustion engine controlled by speed regulator. Each winding of the generator consists of four parts. When the parts were connected in series by shifting switch the set can serve as general generator when they are in parallel the set serves lower AC voltage to welding inverter. Thus high frequency transformer is not needed anymore in welding inverter. Analysis and calculation show that harmonic waves can lead to obvious difference between effective value and mean value of voltage and the output voltage rectified by diode bridge varies with load. So the controller for excitation system is designed to collect the voltage rectified by diode bridge as its input. Hence the dual use set has proved to be low cost multifunctional reliable stable easy to maintain and have a good dynamic characteristics which also provides the foundations for more advanced control.

Key words electricity generating electric welding machine inverter optimization control

Modeling and simulation of full digital controlled CO₂ arc welding system based on Matlab/Simulink

FENG Yue hai LIU Zhen yang LIU Jia YIN Shu yan(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology Beijing University of Technology Beijing 100022 China). p27 - 32

Abstract This paper presents an integrated simulation for full digital controlled welding system for CO₂ short circuiting welding using Matlab Simulink which consists of power inverter unit digital control unit wire feeder unit and short circuiting load unit. This full digital control inverter system for CO₂ arc welding was investigated from the point view of a whole part. The dynamic change processes of the droplet in short circuiting period and arcing period were considered in short circuiting load model and the signals of short circuiting and arcing switching were determined using the change of arc length and the theory of electricity explosion so the effect of full digital control was directly embodied by the behavior of the droplet and welding arc. The experimental results validated the developed simulation model and this simulation model can be applied to the research of digital regulator rules and dynamic behavior of CO₂ short circuiting welding with full digital controlled system.

Key words full digital controlled system waveform control simulation model short circuiting transfer CO₂ arc welding

Microstructure and properties of TiB₂ metal ceramics coatings by plasma transferred arc surfacing

WANG Xiao feng SHAN Ping WANG Xi baq HU Sheng sun(School of Materials Science and Engineering Tianjin University Tianjin 300072 China). p33 - 36 43

Abstract The TiB₂ whisker was synthesized in situ during the reaction of the alloy powders employing the plasma arc powder surfacing. Optical metallography scanning electron microscope X-ray diffraction hardness measuring and the crack resistant property were investigated. The results showed that the ceramic coatings mainly consisted of the TiB₂ whisker and the chemical compound of Fe, C and B and the coatings and the matrices were metallurgical bonded. The crack resistant property of the coatings was superior to that without TiB₂ whisker.

Key words plasma arc powder surfacing TiB₂ metal ceramic structure crack resistant property

Evaluation of nugget size and characteristics of influencing factors in resistance spot welding of aluminum

LUO Xian xing DENG Li peng ZHANG Chen shu JI Chun tao(Nanchang Institute of Aeronautical Technology Nanchang 330034 China). p37 - 43

Abstract In resistance spot welding weld quality is influenced by many factors which are coupled to each other and at the same time behave different features. With a test system developed in this project the features of these influencing factors can be drawn and analyzed based on the data acquired during welding. An online aluminum spot weld qual-