

Mo含量对Mo-Ni-B堆焊合金组织和性能的影响*

温永策^{1,2}, 孙俊生^{1,2}, 焦恩理¹, 李正阶^{1,2}, 赵乐平¹

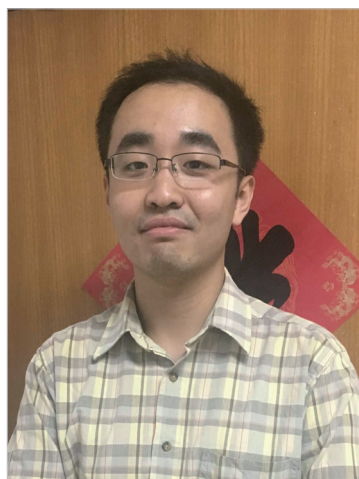
(1. 山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 济南 250061;

2. 江苏德龙镍业有限公司, 盐城 224000)

[摘要] 设计制备了 Mo-Ni-B 系合金粉块新材料, 采用 TIG 堆焊工艺在 Q235 钢基体上制备 Ni 基三元硼化物堆焊合金。研究了合金粉块中 Mo 含量对三元硼化物堆焊合金层组织、物相、硬度、耐磨性、耐蚀性的影响。结果表明, 堆焊金属主要由三元硼化物 $Mo_2M'B_2$ 、 $MoNi_4$ 、 $Mo_3(B, Si)_3$ 、 $\gamma-(Fe, Ni, Mo, Cr)$ 等相组成; Mo 含量对堆焊合金的显微组织有较大影响; 随着合金粉块中 Mo 含量的增加, 堆焊合金和三元硼化物的显微硬度均明显下降; 在所研究堆焊合金中, Mo 44.18% 的耐蚀性最好, Mo 37.53% 的堆焊合金的耐磨性能是 Q235 钢的 27.7 倍。

关键词: 三元硼化物; TIG 堆焊; 组织性能

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.13.054



温永策

硕士研究生, 研究方向为焊接新材料。

Mo-Ni-B 三元硼化物基金属陶瓷具有优良的耐蚀、耐磨、抗氧化性及较高的硬度和熔点, 广泛应用于防弹体、辊道、阀门、注塑机、热挤压机

* 基金项目: 山东省重点研发计划资助 (2016GGX102016)。

等耐磨耐蚀领域^[1-3], 烧结是常用的制备方法。文献 [4] 采用反应硼化烧结法制备了 Mo_2NiB_2 基金属陶瓷, 研究了 Cr、V 等元素作用。Yuan 等^[5] 采用反应烧结法, 以 Mo 粉、B 粉、Ni 粉为原材料制备了 Mo_2NiB_2 硬质合金, 研究了硬质合金的相组成和烧结过程中液相的作用。反应烧结需要真空烧结设备, 无法制作较大零件的表面覆层, 烧结对基体的韧性、强度等性能影响也较大, 因此电弧、激光熔敷制备 Mo_2NiB_2 覆层受到人们的关注。代宽宽等^[6] 利用激光熔覆技术, 在 Q235 钢基体表面上制备了以 Mo_2NiB_2 陶瓷相为硬质相的涂层, 结果表明, 原位合成的 Mo_2NiB_2 激光熔敷涂层与基体形成良好的冶金结合, 组织无明显缺陷; 同时激光熔敷涂层的存在大大提高了基体表面的耐蚀性。刘宗德等^[7] 通过钨极氩弧熔覆技术, 在镍基高温合金基体上制备了 Mo、B 原子比不同的熔覆层, 熔覆

层的物相主要为含 Cr 的 Mo_2NiB_2 三元硼化物和 Ni-Mo 固溶体粘结相, 熔覆层的显微硬度为 700~800HV, 当 Mo、B 的原子比为 1 时, 熔覆层的耐蚀性较好。

目前, 三元硼化物覆层在制备过程中会在一定程度上导致材料强韧性降低, 且制造成本较高。因此, 急需开发一种硼化物堆焊材料, 克服原制备工艺弊端。另外, 合金元素的含量对 Mo_2NiB_2 基金属陶瓷的组织性能有重要影响, 但是目前对堆焊合金中合金元素的影响规律尚缺乏深入系统的研究。本文采用钨极氩弧熔敷技术在 Q235 基体上制备 Mo-Ni-B 堆焊合金, 研究 Mo 含量对堆焊合金显微组织、物相、耐蚀性、耐磨性的影响规律。

试验材料和方法

1 试验材料

选用市售纯 Ni 粉、无定型 B

粉、Mo 粉和 Cr 粉,按设计比例在球磨机中球磨混合均匀,粒度控制在 50~100 μm 。以水玻璃为粘结剂,加入量为合金粉末质量的 5%,采用专用模具制作 5mm \times 4mm \times 480mm 合金粉块。

采用 ZX7-315STG 钨极氩弧焊机在 5mm 厚的 Q235 钢板上熔敷合金粉块制备 Mo-Ni-B 堆焊合金。熔敷工艺参数为:钨极直径 3mm,直流正接,电流 110A,气体流量 10L/min。通过改变合金粉末的配比改变堆焊合金的成分,合金粉块的成分设计(质量分数)为 10% Cr-4.75% B-x% Mo+ 余量 Ni, Mo 的加入量为 37.53%、44.18% 和 50.77%。

2 试验方法

金相试样用氢氟酸、浓盐酸、浓硝酸比为 2 : 3 : 5 的混合溶液腐蚀。采用 XJP-6A 金相显微镜(OM)、JSM-6600V 型扫描电镜(SEM)及其自带能谱仪(EDS)对组织微观形貌进行分析,并对显微组织进行点成分分析和线扫描成分分析。通过 Rigaku D/MAX-rC 型 X 射线衍射仪分析堆焊合金的物相组成。采用 DH V-1000 型显微硬度计分析堆焊合金的显微硬度,试验施加的载荷为 0.1kg,加载时间为 10s。采用上海辰华 660e 电化学工作站测试熔敷金属表面的耐蚀性能,试验以饱和甘汞电极作为参比电极,以铂片作为辅助电极,以质量分数为 3.5% 的氯化钠溶液为电解液。采用 M-2000 型摩擦磨损试验机测试熔敷金属的耐磨性能,对磨轮直径 40mm,经过渗碳处理的 20CrMnTi,硬度为 59.2~60.2HRC,转速为 400 r/min,所加载荷为 150N。

试验结果与讨论

1 显微组织分析

图 1 为不同 Mo 含量的合金粉块堆焊合金显微组织,主要由先析出的白色块状组织和分布于其间的

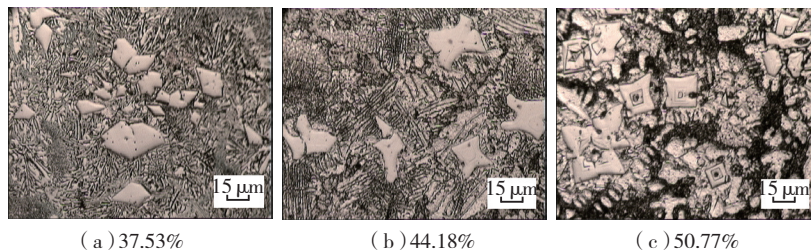


图1 不同Mo含量堆焊层显微组织

Fig.1 Microstructure of the deposited metal with different Mo contents

共晶组织组成。可以看出,Mo 含量对堆焊合金的显微组织有较大影响,Mo 含量由 37.53% 增加到 44.18%,白色块状组织略有减少,共晶组织略有增加;Mo 含量再增加到 50.77%,显微组织中出现了大量的白色块状组织,且在白色块状组织周围出现了包围白色块状组织生长的不规则白色片状组织,其组织更加细密。

图 2 为含 Mo 37.53% 时熔覆金属显微组织,采用扫描电镜自带的 EDS 对图中所示的硬质相及周围共晶组织进行成分测试,结果如表 1 所示。

由于 B 的相对原子质量很小,因此在 EDS 测试结果中的含量并不精确,只可以用来说明 B 元素存在,具体质量分数与原子比没有参考价值。由于谱图 2 中含有硼元素,因此可知四边形黑色组织为硼化物。四边形硼化物的成分如表 1 中的谱图 2 所示。四边形硼化物中 Cr、Ni、Fe 3 种元素所占原子比总和为 9.03%,与 Mo 的原子百分含量之比约为 50%。

由图 2 可以看出,三元硼化物周

围为层片状的共晶组织。采用 EDS 测试颜色较暗的片层,成分如表 1 谱图 1 所示。在较暗的片层中没有 B 元素,含有大量的 Mo、Ni、Fe 等元素,同时还有少量的 Cr、Si、C 等元素,其中 C、Si 原子半径较小,作为间隙原子存在于固溶体的间隙中。谱图 3 为共晶组织的 EDS 分析结果,各种元素均有探测到,且 Mo、Ni、Cr 元素含量较高。

图 3 为含 Mo 44.18% 的显微组织和 EDS 测试区域,表 2 为硬质相谱图 1 处点分析测试结果。硬质相组织呈蝴蝶型,蝶状组织中 Mo 的原

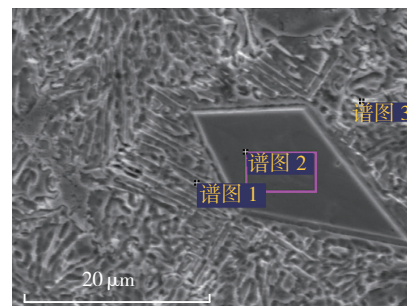


图2 含Mo 37.53%熔覆金属显微组织和 EDS测试区域

Fig.2 Microstructure and EDS location of deposited metal with 37.53% Mo

表1 含Mo 37.53%熔覆金属显微组织EDS测试结果

位置	百分比	元素						
		Mo	B	Cr	Fe	Ni	C	Si
谱图 1	质量百分比 /%	20.84	—	6.13	41.39	29.61	0.79	1.24
	原子百分比 /%	12.85	—	6.97	43.84	29.83	3.91	2.61
谱图 2	质量百分比 /%	77.43	26.48	6.53	13.91	2.12	—	—
	原子百分比 /%	17.74	73.23	2.76	5.47	0.80	—	—
谱图 3	质量百分比 /%	37.43	13.02	4.46	24.75	16.26	1.42	2.66
	原子百分比 /%	14.93	46.09	3.28	16.96	10.60	4.52	3.62

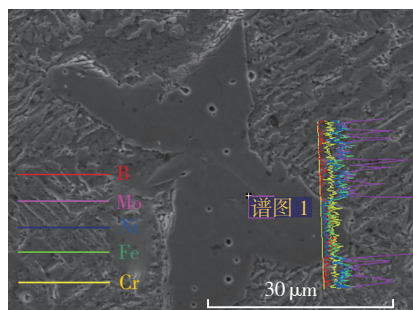


图3 含Mo 44.18%熔覆金属显微组织和EDS测试区域

Fig.3 Microstructure and EDS location of deposited metal with 44.18% Mo content

表2 含Mo 44.18%硬质相点分析测试结果

百分比	元素				
	B	Cr	Fe	Ni	Mo
质量百分比 /%	23.75	9.4	3.51	3.53	72.54
原子百分比 /%	70.39	4.41	3.73	1.47	20.00

子百分数为 20%，而 Fe、Ni、Cr 元素原子总和为 9.61%，约为 Mo 原子百分比的 1/2。由于 Fe 是由氩弧熔敷时由母材稀释进入熔敷金属的，因此在熔覆层中的含量并不是很高，但依然能在三元硼化物中发现 Fe 的含量高于 Ni，说明在氩弧熔敷时，Fe、Cr 更容易进入三元硼化物。

采用 EDS 对硼化物和基体进行线扫描，结果如图 3 所示。含 Mo 44.18% 时的显微组织由蝴蝶状硼化物和共晶组织组成。周围的共晶组织为层片状的两相交互组成，其中一相含有较多的 Mo，另一相基本不含 Mo。Mo 的含量与 B 的含量出现了相同的变化趋势，即同时增大或减小。而在 Mo 的硼化物之间为富含 Fe、Ni 的粘结相。Cr 含量在共晶组织和硼化物中相差不大，既能固溶于硼化物也能固溶于粘结相固溶体中。

图 4 是含 Mo 50.77% 的熔覆金属显微组织和 EDS 测试区域。该试样的硬质相形状比较特别，出现了很多内部包含有不规则组织，或黑色点状物的回字形块状组织。采用 EDS 对硬质相及周围共晶组织进行成分

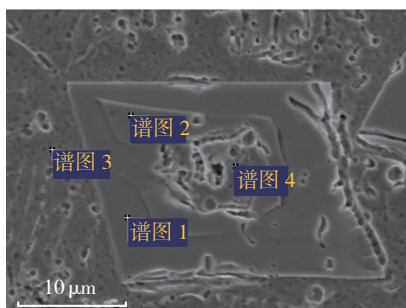


图4 含Mo 50.77%熔覆金属显微组织和EDS测试区域

Fig.4 Microstructure and EDS location of deposited metal with 50.77% Mo content

测试，结果如表 3 所示。

同样，EDS 测试结果中 B 元素的具体含量没有参考价值，只能证明 B 元素的存在。在谱图 1、谱图 2 中均检测到 B 元素，因此回字形组织为富硼相。谱图 1 为回字形硼化物的外侧成分，Cr、Ni、Fe 这 3 种元素所占原子比总和为 9.28%，与 Mo 的原子百分含量之比为 43.38%。谱图 2 为回字形硼化物内部台阶的成分，Cr、Ni、Fe 这 3 种元素所占原子比总和为 9.58%，与 Mo 的原子百分含量之比为 48.00%。在合金粉块中的 Mo 含量达到 51.03% 时，熔敷金属中的 Mo 在三元硼化物中的含量较高，导致硼化物内部其他金属元素原子与 Mo 原子含量的比值小于 50%。

对回字形硼化物周围的区域进行 EDS 测试，化学成分如表 3 中的谱图 3 所示。回字形硼化物中心区

域的成分测试结果如表 3 中的谱图 4 所示。谱图 4 和谱图 3 相似，都没有检测到 B，含有大量的 Fe、Ni、Mo、Cr 等元素，同时含有少量的 C、Si。谱图 4 与谱图 3 对比可以看出，谱图 4 中的 Mo 含量较低，原子百分比下降了 5.44%，而 Cr、Fe、Ni 的原子百分比相对提高了 0.89%、2.05%、0.16%。

2 硬度分析

图 5 为不同 Mo 含量堆焊合金离开熔合线不同位置的显微硬度。可见，随着合金粉块中 Mo 含量的增加，堆焊合金的显微硬度明显降低。当 Mo 含量为 37.53% 时，硬度最高，介于 544~645HV 之间，平均值为 608.5HV；当 Mo 含量增加为 44.18% 和 50.17% 时，显微硬度平均值分别为 486.8HV 和 425.7HV。对 3 块试样在测试方向上进行分析，熔合区附近由于母材的稀释作用，铁镍奥氏体树枝晶较多，且晶粒很大，因此显微硬度较低。随着离开熔合线距离的增加，Fe 的稀释作用减弱，Cr、Mo 在奥氏体中的固溶效果增强，树枝晶的显微硬度提高。同时枝晶间的晶界较多，枝晶间的硼化物相增加，也使堆焊合金的显微硬度提高。在堆焊合金的顶端，组织中含有大量的先析出硼化物，显微硬度最大。当距熔合线的距离超过 1.5mm 时，显微硬度值趋于稳定。当 Mo 含量不同时，三

表3 Mo含量50.77%熔覆金属显微组织EDS测试结果

位置	百分比	元素						
		Mo	B	Cr	Fe	Ni	C	Si
谱图 1	质量百分比 /%	61.99	22.64	5.22	7.94	2.22	—	—
	原子百分比 /%	21.39	69.33	3.32	4.71	1.25	—	—
谱图 2	质量百分比 /%	59.80	23.78	5.44	8.38	2.60	—	—
	原子百分比 /%	19.96	70.46	3.35	4.81	1.42	—	—
谱图 3	质量百分比 /%	25.61	—	6.56	33.31	32.43	0.77	1.32
	原子百分比 /%	16.15	—	7.63	36.09	33.42	3.86	2.85
谱图 4	质量百分比 /%	17.44	—	6.61	36.84	37.19	0.55	1.37
	原子百分比 /%	10.71	—	7.50	38.89	37.34	2.68	2.88

元硼化物的数量、分布、大小不同,造成熔覆层硬度不同。Mo 含量为 37.53% 时, Ni 含量相对较高,形成较多三元硼化物,熔覆层平均硬度最高。Mo 含量增加为 44.18% 时,三元硼化物数量较少,基体大多为较粗的层片状共晶组织,熔覆层平均硬度有所下降。当 Mo 含量增加为 50.77% 时,三元硼化物进一步减少,基体组织以硬度值较低的铁镍固溶体为主,因而熔覆层平均硬度最低。

3 耐蚀性分析

图 6 为 Mo 含量分别是 37.53%、44.18%、50.77% 的 Mo-Ni-B 堆焊合金层的电化学阳极极化曲线。腐蚀电位和维钝电流密度如表 4 所示。Mo 含量由 37.53% 增加到 44.18% 时,维钝电流密度减小,钝化膜趋于稳定,堆焊合金的耐蚀性能提高;但当 Mo 含量由 44.18% 增加到 50.77% 时,维钝电流密度略有提高,耐蚀性能稍降。从图 6 可以看出,在质量分数为

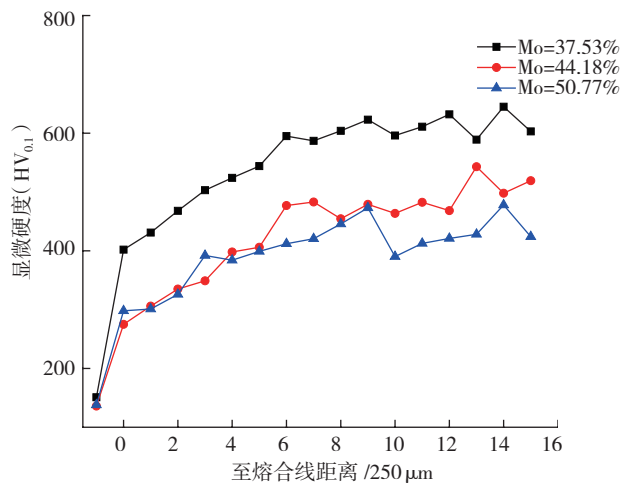


图5 不同Mo含量堆焊合金的显微硬度

Fig.5 Microhardness of the deposited metal with different Mo content

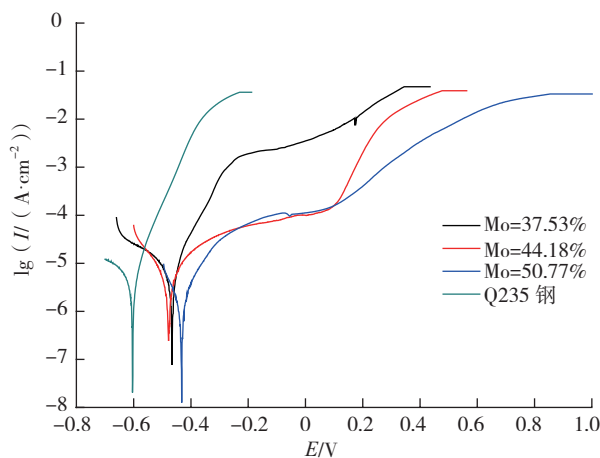


图6 不同Mo含量的熔敷金属阳极极化曲线

Fig.6 Anodic polarization curve of the deposited metal with different Mo contents

表4 不同Mo含量堆焊合金电化学腐蚀参数

Mo 质量分数 /%	腐蚀电位 /V	维钝电流密度 / (A·cm ⁻²)
37.53	-0.466	2.24×10^{-3}
44.18	-0.478	7.7×10^{-5}
50.77	-0.432	1.19×10^{-4}

3.5% NaCl 溶液中,3 种堆焊合金的腐蚀电位相差不大,因此 Mo 含量对腐蚀电位的影响不大。

从图 6 可以看出, Q235 钢的腐蚀电流密度随着电压的升高迅速提高,没有出现电流密度平缓或缓慢上升的钝化区,说明 Q235 在电化学腐蚀过程中表面一直没有产生具有保护作用的钝化膜。而 3 种熔敷合金都发生钝化,形成较明显的钝化平台。因此,堆焊合金的耐蚀性能远高于 Q235 钢,这与堆焊合金中的 Cr、Mo 有关。Cr 在提高材料耐蚀性能方面,主要有 3 个突出的作用^[8]:(1)促使合金钝化,提高材料的钝化能力;(2)提高固溶体的电极电位,即提高基体组织的热力学稳定性;(3)使钢表面生成致密稳定的表面保护膜,从而提高钢的耐蚀性。而 Mo 的增加也促进合金钝化,提高材料抗点状腐蚀和间隙腐蚀的能力,从而改善了母材的耐蚀性。

4 耐磨性分析

由硬度分析可知,当 Mo 含量为 37.53% 时,硬度最高,因此选取该试样进行磨损试验。图 7 为 Mo 37.53% 堆焊合金和 Q235 磨损失重的比较。可见,随着磨损时间的增加,堆焊合金层和 Q235 钢磨损失重逐渐增加。磨损 40min 后,堆焊合金磨损失重 3.8mg,远低于 Q235 钢的 105.4mg,堆焊合金的抗磨性能约为 Q235 钢的 27.7 倍。

堆焊合金的耐磨性较好,一方面是由于其硬度较高;另一方面,堆焊合金中的 Cr、B、Mo 等元素被摩擦氧化成 Cr₂O₃、B₂O₃、Mo₂O₃ 等氧化物,存在于堆焊合金与对磨轮之间,相当于固体润滑剂,在一定程度上减少了两者的摩擦。同时, Cr₂O₃ 还可以被对磨轮挤压到堆焊合金中,使其更不容易被去除,耐磨性得到提高。由于 Mo₂O₃、Cr₂O₃、B₂O₃ 等氧化物的润滑减磨作用,以及磨损时堆焊合金的加工硬化作用,使堆

焊合金层在磨损的过程中,第 10min 至第 40min 内每 10min 内的磨损失重都要小于前 10min 的磨损失重,且随磨损时间的增加,每 10min 的磨损失重逐渐减少,如图 8 所示。由此可以说明,堆焊合金层在磨损过程中,耐磨性随着磨损时间的增加而不断提高,没有出现较明显的硬质相脱落现象。

结论

(1) 通过所设计的合金粉块新材料,采用 TIG 堆焊工艺成功在 Q235 钢基体上制备出 Ni 基三元硼化物堆焊合金,界面结合良好。

(2) 堆焊合金沿垂直于熔合线的方向从母材向焊缝中心生长,依

次为平面晶区、富硼共晶层、树枝晶区、等轴区,其主要由三元硼化物 $Mo_2M'B_2$ 、 $MoNi_4$ 、 $Mo_5(B, Si)_3$ 、 $\gamma-(Fe, Ni, Mo, Cr)$ 等相组成。

(3) Mo 含量对堆焊合金的显微组织有较大影响, Mo 含量由 37.53% 增加到 44.18%,先析出的三元硼化物略有减少,共晶组织略有增加; Mo 含量再增加到 50.77%,则先析出的三元硼化物增多,共晶组织减少。

(4) 随着合金粉块中 Mo 含量的增加,堆焊合金和三元硼化物的显微硬度均明显下降; Mo 含量为 37.53%、44.18%、50.77% 的 3 种堆焊合金中, Mo 44.18% 的耐蚀性最好; Mo 37.53% 的堆焊合金的耐磨性能

是 Q235 钢的 27.7 倍。

参考文献

[1] TAKAGI K. Development and application of high strength ternary boride base cermets[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2006, 179(9):2809-2818.

[2] TAKAGI K, KOIKE W, MOMOZAWA A, et al. Effects of Cr on the properties of Mo_2NiB_2 ternary boride[J]. Solid State Science, 2012, 14(11):1643-1647.

[3] 刘福田, 李兆前. 三元硼化物基金属陶瓷覆层性能的研究[J]. 机械工程材料, 2003, 27(7):30-34.

LIU Futian, LI Zhaoqian. The properties of ternary boride based cermet cladding material[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2003, 27(7):30-34.

[4] TAKAGI K. High tough boride base cermets produced by reaction sintering[J]. Materials Chemistry and Physics, 2001, 67(1-3):214-219.

[5] YUAN B, ZHANG G J, KAN Y M, et al. Reactive synthesis and mechanical properties of Mo_2NiB_2 based hard alloy[J]. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2010, 28(2):291-296.

[6] 代宽宽, 宋光明, 吴钱林, 等. Mo-Ni-B 系三元硼化物陶瓷涂层激光熔覆制备及其腐蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(5):375-377.

DAI Kuankuan, SONG Guangming, WU Qianlin, et al. Corrosion performance of Mo-Ni-B ternary boride ceramic coating prepared by laser cladding[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(5):375-377.

[7] 刘宗德, 刘辉, 侯世香. 原位反应合成 Mo-Ni-B 系三元硼化物熔覆层的研究[J]. 金属热处理, 2009, 34(7):71-75.

LIU Zongde, LIU Hui, HOU Shixiang. In-situ synthesis of Mo-Ni-B ternary boride cladding[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(7):71-75.

[8] 刘福田, 黄巍岭, 杨俊茹, 等. 三元硼化物金属陶瓷熔覆层材料耐腐蚀性能研究[J]. 山东冶金, 2004, 26(5):37-41.

LIU Futian, HUANG Weiling, YANG Junru, et al. Study of corrosion resistance of ternary boride cermet clad materials[J]. Shandong Metallurgy, 2004, 26(5):37-41.

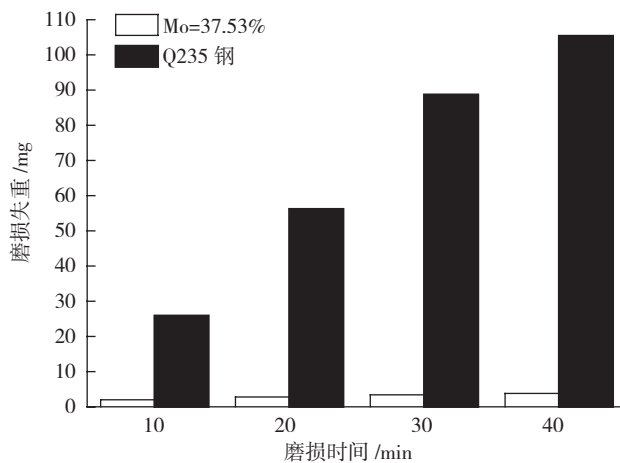


图7 含Mo 37.53%堆焊合金和Q235钢的磨损失重

Fig.7 Mass loss of the deposited metal with 37.53% Mo content and Q235

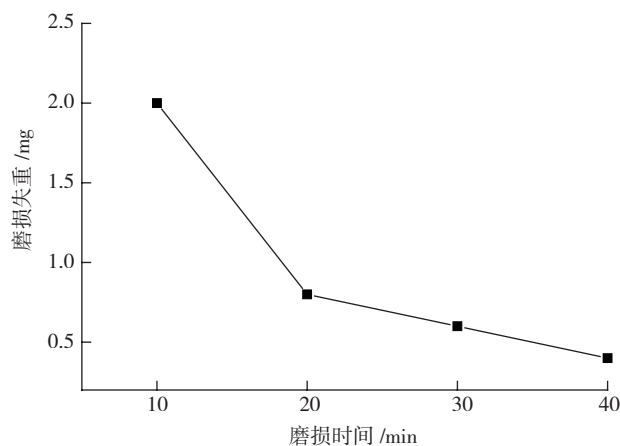


图8 含Mo 37.53%堆焊合金每10min内磨损失重的变化

Fig.8 Mass loss in per ten minute of the deposited metal with 37.53% Mo content

通讯作者: 孙俊生, 教授, 研究方向为焊接材料与焊接冶金, E-mail: mstsun@sdu.edu.cn。

Effect of Mo Content on Microstructure and Mechanical Property of Mo–Ni–B Surfacing Alloy

WEN Yongce^{1,2}, SUN Junsheng^{1,2}, JIAO Enli¹, LI Zhengjie^{1,2}, ZHAO Leping¹

(1. Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution and Processing of Materials, Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. Jiangsu Delong Nickel Industry Co. Ltd., Yancheng 224000, China)

[ABSTRACT] New alloy powder blocks with Mo–Ni–B system were designed. Ni-based ternary boride deposited alloys were fabricated on Q235 steel substrates using argon arc welding process. Effect of Mo content on microstructure, phase, hardness, wear resistance and corrosion resistance of ternary boride deposited alloy was studied. The results show that the deposited metals consisted of ternary boride phases, such as $\text{Mo}_2\text{M}'\text{B}_2$, MoNi_4 , $\text{Mo}_3(\text{B}, \text{Si})_3$, $\gamma-(\text{Fe}, \text{Ni}, \text{Mo}, \text{Cr})$, etc. Besides, Mo content has a great influence on the microstructure of deposited metals. In this study, the alloy with 44.18% Mo content has the best corrosion resistance and the wear resistance of alloy with 37.53% Mo content is 27.7 times higher than Q235 steel.

Keywords: Ternary boride; TIG cladding; Microstructure and property

(责编 逸飞)

(上接第47页)

6Al–4V[J]. *Wear*, 2001, 250(1–12):642–649.

[10] 陈明. TC4 钛合金及其喷丸处理后的微动损伤特性[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.

CHEN Ming. Study on the fretting behavior of TC4 titanium alloy and its shot peening treatment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

[11] 周仲荣, LÉO V. 微动磨损[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

ZHOU Zhongrong, LÉO V. *Fretting wear*[M]. Beijing: Science Press, 2002.

[12] LI J, LU Y H, ZHANG H Y, et al. Effect of grain size and hardness on fretting

wear behavior of Inconel 600 alloys[J]. *Tribology International*, 2015, 81:215–222.

[13] MERIAUX J, BOINET M, FOUVRY S, et al. Identification of fretting fatigue crack propagation mechanisms using acoustic emission[J]. *Tribology International*, 2010, 43(11):2166–2174.

[14] 彭金方. 几种金属材料弯曲微动疲劳试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

PENG Jinfang. Experimental study of several metal materials on bending fretting fatigue[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

[15] VINGSBO O, SÖDERBERG S. On

fretting maps[J]. *Wear*, 1988, 126(2):131–147.

[16] SUZUKI S, TANAKA Y, KODAMA M, et al. Mechanical properties and SSRT results of various kinds of irradiated stainless steels[C]// *Proceeding of 12th ICG–IASCC Meeting*, Toronto, 1996.

[17] LI H, EBRAHIMI F. Synthesis and characterization of electrodeposited nanocrystalline nickel–iron alloys[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2003, 347(1/2):93–101.

通讯作者: 付雪松, 博士, 研究方向为喷丸强化与微动损伤等, E-mail: xsfu@dlut.edu.cn.

Investigation on the Fretting Wear of Ti–6Al–4V Alloy Treated With Wet Peening

ZHANG Xinhua^{1,2,3}, FU Xuesong⁴, GAI Pengtao^{1,2,3}, LI Ruidong⁴, LI Kang⁴

(1. AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China;

2. Aeronautical Key Laboratory for Plastic Forming Technologies, Beijing 100024, China;

3. Beijing Key Laboratory of Digital Plasticity Forming Technology and Equipment, Beijing 100024, China;

4. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China)

[ABSTRACT] Wet peening was taken on Ti–6Al–4V titanium alloy as a surface strengthening treatment. Effect of shot peening on fretting wear behavior was investigated under different conditions of partial slip, mixed slip and gross slip. The fretting wear experiment indicates that wet peening has little influence on fretting wear behavior of Ti–6Al–4V titanium alloy at condition of gross slip. However, wet peening can inhibit crack initiation occurred in accumulation of plastic deformation zone when the condition is partial slip. It is suggested that the improvement of local yield strength at surface layer by shot peening was the key reason for avoiding local fatigue damage.

Keywords: Wet peening; Ti–6Al–4V titanium alloy; Fretting wear; Local fatigue

(责编 李丹)