

标准及检测

结晶器铜板涂层界面结合强度的测定

张宏杰, 温茂远, 侯振, 里达

(鞍钢附属企业公司一炼钢冶金修造厂, 辽宁 鞍山 114000)

摘要: **目的** 准确测定结晶器铜板涂层的界面结合强度。**方法** 考虑到结晶器铜板的涂层属于厚韧性涂层/韧性基体材料体系,宜采用标准的剪切法定量测量其界面结合强度。推荐井玉安等设计的涂层宽度为1 mm的剪切试样及专用模具,并通过该方法测试铜合金基材、电镀层/铜合金、喷涂层/铜合金的界面结合强度。**结果** 测得的铜合金基材的剪切强度离散系数最小;各类涂层的结合强度值离散性与GB/T 13222—1991方法测出的数据相比,相对较小。**结论** 推荐的测试方法较GB/T 13222—1991方法准确度高,适合于结晶器铜板涂层的结合强度测试,且测试时宜先测铜合金基材的剪切强度,以有效减小试验的系统误差。

关键词: 连铸机结晶器; 铜合金; 涂层; 界面结合强度; 结合力; 测试方法

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2014)03-0169-06

Determination of Interface Bonding Strength of Casting Mold Coating

ZHANG Hong-jie, WEN Mao-yuan, HOU Zhen, LI Da

(No. 1 Metallurgy Mechanical Repairing Plant of Ansteel Group, Anshan 114000, China)

ABSTRACT: **Objective** To accurately determine the interface bonding strength between coating and mold copper. **Methods** Considering that the casting mold coating belongs to a kind of thick, tough coating & toughness-based material, a standard shearing strength test method was used to measure its interface bonding strength. It was suggested to measure the bonding strength on coating interface using the series of specific mold with a sample of 1 millimeter in width as established by Mr. Jing Yu-an. Then interface bonding strength of the copper, electroplate layer/copper alloy, spray layer/copper alloy were researched. **Results** By testing and analyzing, the variance coefficient of shearing strength for copper was the lowest and the variance coefficients measured using Jing's method were lower than those measured with GB 13222—1991 for all kinds of layers. **Conclusion** The veracity of Jing's method was better than that of GB 13222—1991 and it was more suitable for testing the bonding strength of mold copper coating. In order to reduce system errors, the copper's shearing strength must be tested at first.

KEY WORDS: continuous casting mold; copper alloy; coating; the interface bonding strength; bonding stress; test methods

在现代钢铁工业中,以连铸机结晶器为核心的铸钢工艺的出现,是一次重大的技术革命。连铸机上使

收稿日期: 2013-12-12; 修订日期: 2014-01-23

Received: 2013-12-12; Revised: 2014-01-23

作者简介: 张宏杰(1972—),男,内蒙古人,硕士,高级工程师,主要研究方向为冶金设备表面处理与防护。

Biography: ZHANG Hong-jie(1972—), Male, from Inner Mongolia, Bachelor, Senior engineer, Research focus: surface treatment and protection of metallurgical equipment.

用的结晶器铜板大都涂镀表面强化层,以延长铜板的使用寿命。这对提高钢铁企业的生产效率,降低生产成本具有十分重要的意义。结晶器铜板的弯月面区域存在交变的热应力和高温腐蚀^[1-4],使该处涂层表面易产生热裂纹,并使涂层逐步剥落,表现为涂层和基体界面结合不佳。如何精确测试涂层与基体的结合强度,是首要问题。

理论上讲,界面结合强度应以涂层从基体上分离所需的能量来表示,但分离瞬间的能量不易直接测得,故常用涂层从单位面积基体上分离所需的力作为结合强度值。这个力被称作结合力,但在实际的定量测试中,测试值都是结合强度,单位是 MPa。

除了直接拉伸法测得的值是真正的结合强度外,其他测试方法所测得的数值均是界面结合强度与涂层及基体的弹性、塑性或弹塑性行为有关的试验参数综合作用的结果。由于涂层品种、基体材料的多样性以及弹塑性行为的复杂性,目前还没有一种标准的测试方法适合于各类涂层/基体材料体系。对于某种特定涂层/基体材料可行的结合强度测试方法,对另一种材料体系可能就不合适,因此导致目前结合强度的测量方法具有多样性和复杂性。

1 结合强度的测试方法

现有的几十种涂层结合强度测试方法可归纳为定性和定量两大类。定性法以经验判断和相对比较为主,一般难以给出力学参量,但简单快速,一般不需要专门设备。定量法以临界载荷指标来表征和评价涂层/基体界面结合的力学性能,主要采用以下两种形式:1) 基于力的观点,测定涂层从单位面积基体上剥离时所需力的大小,即涂层与基体的界面结合强度,包括界面拉伸强度、界面剪切强度、四点弯曲试验法^[5-6]、界面压入试验法、扭转试验法等,单位为 MPa; 2) 基于能量的观点,测定涂层从基体上开裂或剥离时所需能量的大小,如界面断裂韧度、激光划痕法、部分动态结合强度试验法等,单位有 MPa·m^{1/2} 及 W 等。

在表面工程领域,需要应用相对成熟稳定、重现性好的结合强度测试方法,且应满足两个条件:一是要有能合理反映涂层从基体上剥离时的良好力学模型;二是要能够较准确地测量出有关反映界面结合性能的力学参量^[7-13]。常见的结合强度测试方法如下。

1.1 定性测试结合力

GB 5933—1986《轻工产品金属镀层的结合力测试

方法》中,镀层结合力的测定方法有:弯曲法、锉刀法、划痕法、摩擦法、热循环法、杯突法、阴极处理法等。

GB/T 5270—2005/ISO 2819《金属基体上的金属覆盖层(电沉积和化学沉积层)附着强度试验方法》中,镀层结合力的测定方法有 14 种:摩擦抛光试验、钢球摩擦抛光试验、喷丸试验、剥离试验、锉刀试验、磨锯试验、凿子试验、划线和划格试验、弯曲试验、缠绕试验、拉力试验、热震试验、深引试验及阴极试验。

欧洲航天标准 EN2830:1993《Aerospace series-adhesion test for metallic coatings by shearing action》中规定的方法是:用锯将金属涂层试样分割,剖面水平卡在工作台上,用挫刀从基体向涂层方向水平地挫试样,肉眼观察涂层是否剥落,判断涂层的结合力是否合格。

以上方法都是定性方法,可根据试验结果判断合格与否,但不能给出定量的数值。

1.2 定量测定结合强度

GB 9796—1988《热喷涂铝及铝合金涂层试验方法》中的测试方法是直接拉伸法,它规定:将涂层试样与配副胶粘起来进行拉伸,涂层被拉脱时的载荷与涂层面积之比为涂层的界面结合强度。这种试验方法结果是可靠的^[14-17],但受到粘结物与镀膜间结合强度的限制。目前 E-7 胶的最大拉伸强度为 90 MPa,因此拉伸试验无法测出高于 90 MPa 的结合强度。此外,这种方法受到材料缺陷、杂质、表面状态和试样位置对中的影响,测得的数值不稳定。

YB/T 4119—2004《连铸机结晶器铜板技术规范》中,涂层结合强度定量测试采用剪切法,但未对试样制备作出具体规定。

GB/T 13222—1991《金属热喷涂层剪切强度的测定》中的方法是:在试样喷涂面上喷涂厚 0.8~1.1 mm、宽 10 mm 的涂层,然后放在如图 1 所示的合金工

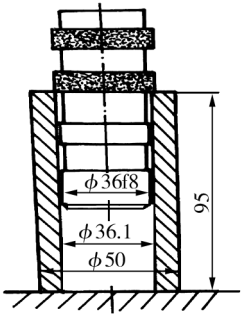


图 1 结合强度测定装置

Fig. 1 Device for bonding strength test

具钢模具上,用拉伸试验机测定界面剪切力。目前大多数的厚涂层(0.2 mm 以上)都是用这种方法测试。

2 测定结晶器铜板涂层的结合强度

2.1 测定方法的选择

当前工程中应用于连铸机结晶器铜板的涂层主要有两类——镍基、钴基合金电镀层和镍铬喷涂层。这两种涂层的厚度均超过 200 μm,属于厚韧性涂层/韧性基体材料体系。

要准确地测出涂层/基体界面结合的力学性能,首要考虑其弹性、塑性形变对测试体系的影响。脆性材料可以在开裂前只考虑弹性形变,忽略塑性形变;而韧性材料则应在开裂过程中重点考虑塑性形变。Era 等^[18]指出剪切法的不足之处在于,靠近涂层自由边界的界面附近存在应力集中。对于韧性材料体系,在实际测试过程中涂层底部与基体产生剥离时,由于涂层宽度为 10 mm,法向张应力使涂层上部塑性形变加剧,从而使得测定的剪切最大应力值小于实际的临界剪切应力,所以 GB/T 13222—1991 的方法不适用于测量厚韧性涂层/韧性基体材料体系。此外,考虑到试样制作要精确且简单的要求,文中对结晶器涂层结合强度的测定采用了井玉安等^[19]的设计,即涂层宽度为 1 mm 的剪切试样及剪切法测试结合强度的专用模具。通过试验认为,该测试方法准确度相对较高,数据离散系数小。

2.2 试样制作及模具设计

试样的示意图和实物图如图 2 所示。加工试样时,利用线切割设备从待测涂层上切取适当尺寸的试样,一般取 $H=((1\sim1.2)\pm0.02)$ mm, $L=((20\sim30)\pm1)$ mm,宽度 $B=(10\pm1)$ mm。试样不要太短,只要满足理论计算的最大剪切力不超过试验机额定载荷即可,过短则剪切力减小,会造成测量误差相对增大,测

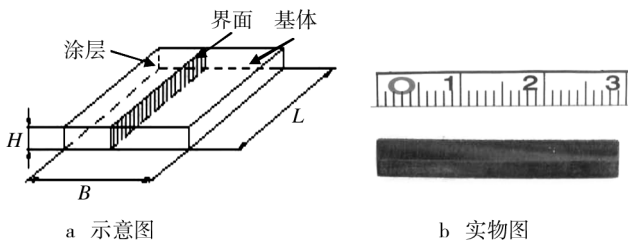


图 2 剪切试样

Fig. 2 Sample of shearing test

量精度下降。试样切割好后,先用 400# 水砂纸将切割面的痕迹磨掉,保证表面粗糙度 Ra 不大于 1.6 μm,且上下两表面互相平行;然后用 4% (体积分数) 的硝酸酒精溶液轻微腐蚀磨光的表面,使复合界面清晰地显现出来,如图 2b 所示。

设计的模具如图 3 所示。其中,冲头、上模、下模必须采用 W18Cr4V 或 Cr12 等工具钢制作,且要进行淬火处理,处理后刃口硬度不低于 60HRC。其余部件可以采用 45# 钢制作。

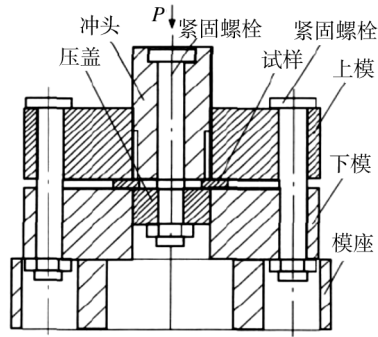


图 3 剪切模具示意

Fig. 3 Schematic diagram of mould for measuring shear strength

2.3 结合强度测试

采用 MTS810 型材料试验机测试涂层的结合强度。根据图 3 所示,将制备好的试样夹持在冲头和压盖之间,夹持时要注意试样的界面与下模剪口边缘对齐,以便剪切时恰好在界面处被剪断。另外,为防止冲头受力后倾斜,应在冲头和压盖之间对称放置两个厚度 H 相近(相差小于 0.04 mm)、长度 L 基本相等的试样于模具中,用螺栓将冲头和压盖锁紧,再放进下模的剪口中,用上模压住,用螺栓锁紧。两次锁紧是为了防止试样在受到剪切力作用时产生倾翻,影响测试精度。最后再将组合装置放在模座上,利用材料试验机在冲头上施加压力,直到试样在界面处被剪断为止。参考 GB/T 13222—1991 的要求,剪切速度一般不超过 1 mm/min,或加载速度不超过 9807 N/min。

剪切法测试结合强度 τ (MPa) 的计算公式如(1)式所示。其中, P 为最大剪切负荷,单位 N; $A=H_1\cdot L_1+H_2\cdot L_2$,为试样剪切面面积,单位 mm^2 。试样的厚度 H 和长度 L 用游标卡尺测出。

$$\tau = P/A$$

(1)

3 结晶器铜板涂层测试结果与分析

测试了紫铜、铬钴铜基体(成分和性能见表 1)的

表 1 铜合金成分与性能
Tab.1 Composition & Property of copper alloy

铜基体 材料	$w_B/\%$			抗拉强度	屈服强度	伸长率	硬度 HB	I. A. C. S 导电率
	Cu	Cr	Zr	/MPa	/MPa	/%		(20 ℃)/%
铬钴铜	≥98.0	0.5 ~ 1.5	0.08 ~ 0.3	≥350	≥240	≥10	≥110	≥80
紫铜	≥99.9			≥190	≥40	≥30	≥50	≥98

结合强度；测试了以紫铜、铬钴铜为基材的电镀纯镍层(200HV)、镍钴合金层(310HV)、镍铬喷涂层 A(420HV)和镍铬喷涂层 B(700HV)的结合强度。

3.1 结合强度测试的剪切力-位移曲线

图 4a 是试样的典型剪切断面金相照片,试样的剪切断口上存在明显的塑性剪切痕迹。图 4b 表明,随着位移的下行,剪切力在达到峰值后迅速下降,符合理论剪切断裂过程。由于 GB/T 13222—1991 方法中涂层宽度为 10 mm,韧性材料在实际测试过程中涂层底部与基体产生剥离时,涂层上部产生塑性形变,但并不剥离。通过对比图 4b 和图 4c 很容易看出,这种情况下,剪切过程被拉长了,剪切力是逐步被释放

出来的,这就使测定的剪切临界应力值小于井玉安方法的测定值。因此对于厚韧性涂层/韧性基体材料体系,GB/T 13222—1991 方法测试值的准确性较差。

3.2 铜板涂层测试结果

通过结合强度计算公式,求出每对试样的平均结合强度,结果见表 2。从表 2 中的数据可看出,紫铜、铬钴铜基体的结合强度离散系数(标准差占平均数的百分比)最小,为 1.66% ~ 1.8%。这说明在没有涂层界面复杂应力影响的情况下,采用本方法测试数值的稳定性非常好,所以每次试验开始要先测试铜基体的结合强度,以减小该次试验的系统误差。

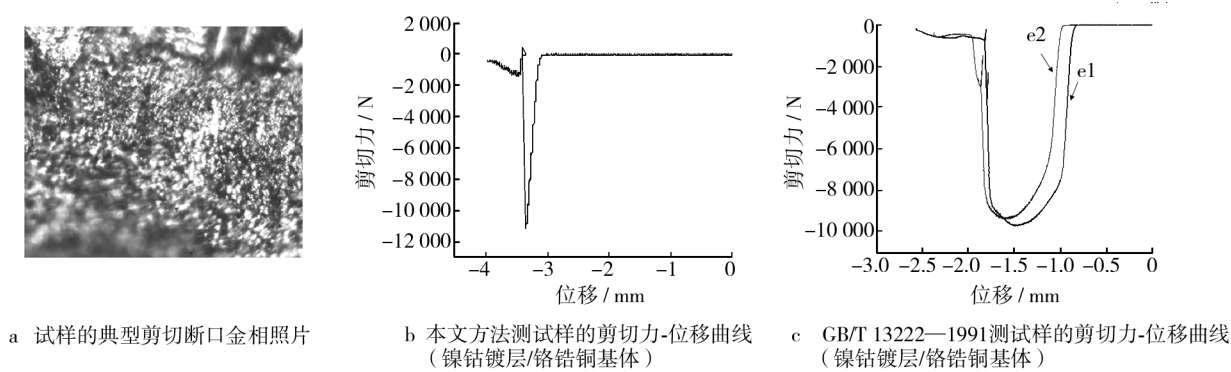


图 4 剪切断面金相照片和剪切力-位移曲线
Fig.4 Optical micrograph of shear cross section and force-displacement curve

表 2 不同测试方法测出的结合强度数据
Tab.2 Bonding strength data from different test methods

试样材料	涂层厚度 /mm	井玉安方法			GB/T 13222—1991 方法		
		平均结合强度 /MPa	标准差 /MPa	离散系数 /%	平均结合强度 /MPa	标准差 /MPa	离散系数 /%
紫铜基体		122	2.2	1.80			
铬钴铜基体		145	2.4	1.66			
纯镍镀层/紫铜	1	235	5.6	2.39	226	8.9	5.30
镍钴镀层/铬钴铜	1	240	6.3	2.63	220	11.3	5.14
镍铬喷涂层 A/铬钴铜	0.2	110	3.6	3.27	95	5.1	5.37
镍铬喷涂层 B/铬钴铜	0.5	205	5.8	2.83	190	5.5	2.89

采用本文推荐方法测得的各类涂层的结合强度数据标准差为 3.6 ~ 6.3 MPa, 离散系数为 2.63% ~ 3.27%; 采用 GB/T 13222—1991 方法测出的数据标准差为 5.1 ~ 11.3 MPa, 离散系数为 2.89% ~ 5.37%。由此可见, 对于属于厚韧性涂层/韧性基体材料体系的结晶器铜板涂层, 本文推荐方法测试结合强度值的离散性相对较小。

4 结论

1) 在测量结合强度之前, 最好先确定涂层材料与基体材料的力学性能、外形尺寸, 然后选择某种或几种合适的方法进行测量。结晶器铜板的涂层属于较厚的韧性涂层/韧性基体材料体系, 宜采用标准的剪切法定量测量其界面结合强度。

2) 由于采用本文推荐的方法测试铜基体结合强度的数据稳定性好, 且试样制作简单, 所以在实际测试中, 要先测铜基体的结合强度, 可以有效减小试验的系统误差。而用 GB/T 13222—1991 方法测试铜基体的结合强度较困难, 数据重现性不好。

3) 考虑到韧性材料的特性, 采用井玉安等设计的涂层宽度 1 mm 的剪切试样及专用模具测量连铸机结晶器铜板涂层的结合强度。通过对比试验, 认定该测试方法准确度较高, 数据离散系数小。

参考文献

- [1] 张宏杰, 温茂远, 侯振, 等. 连铸机结晶器铜板失效分析及改进措施[J]. 炼钢, 2012, 28(1): 70—73.
ZHANG Hong-jie, WEN Mao-yuan, HOU Zhen, et al. Analysis on the Failure of Mold Copper Plate of Continuous Caster and Counter Measure [J]. Steelmaking, 2012, 28(1): 70—73.
- [2] 方克明, 于延明, 温茂远, 等. 结晶器铜板设计和生产维护技术探讨[J]. 重型机械, 2009(3): 2—6.
FANG Ke-ming, YU Yan-ming, WEN Mao-yuan, et al. Discussion about Designing and Maintaining of the Copper Plate of CCM Mold [J]. Heavy Mechanism, 2009(3): 2—6.
- [3] 方克明, 张宏杰. 连铸机结晶器铜板用 Ni-Co 合金镀层的探讨[J]. 连铸, 2002(3): 14—15.
FANG Ke-ming, ZHANG Hong-jie. Discussion of Ni-Co Coating on Mould Plate [J]. Continuous Cast, 2002(3): 14—15.
- [4] 王红, 方克明, 张宏杰. 薄板坯结晶器铜板组箱式电镀 Ni-Co 合金镀层特点及应用[J]. 连铸, 2005(1): 20—21.
WANG Hong, FANG Ke-ming, ZHANG Hong-jie. Features and Application on Ni-Co Alloy Coating of Copper Plate for Thin Slab Mould [J]. Continuous Cast, 2005(1): 20—21.
- [5] 林香祝, 陈仁悟, 何良干. 用四点弯曲法测定硬质涂层的结合力[J]. 陕西机械学院学报, 1985(4): 26—33.
LIN Xiang-zhu, CHEN Ren-wu, HE Liang-gan. The Measurement of Cohesive Strength between the Hard Coating Layer and Substrate by Four Point Bending Technique [J]. Transaction of Shaanxi Machine College, 1985(4): 26—33.
- [6] 林香祝, 陈仁悟, 薛玉峨. 硬质涂层的硬度及结合力的测试方法[J]. 真空学与技术, 1989, 9(3): 197—202.
LIN Xiang-zhu, CHEN Ren-wu, XUE Yu-e. Hardness and Adhesion Measurement of Hard Coating [J]. Vacuum Science and Technology, 1989, 9(3): 197—202.
- [7] 杨班权, 陈光南, 张坤, 等. 涂层/基体材料界面结合强度测量方法的现状与展望[J]. 力学进展, 2007, 37(1): 67—79.
YANG Ban-quan, CHEN Guang-nan, ZHANG Kun. A Review on Measurement Methods for Interfacial Bonding Strength between Coating and Substrate [J]. Advance in Mechanics, 2007, 37(1): 67—79.
- [8] 胡奈赛, 徐可为, 何家文. 涂层的结合强度评定[J]. 中国表面工程, 1998(1): 31—35.
HU Na-sai, XU Ke-wei, HE Jia-wen. Assess Bonding Strength of Coating [J]. Surface Engineering of China, 1998(1): 31—35.
- [9] MELO R M, TRAVASSOS A C, NEISSER M P. Shear Bond Strengths of a Ceramic System to Alternative Metal Alloys [J]. J Prosthet Dent, 2005, 93(1): 64—73.
- [10] 易茂中, 冉丽萍, 何家文. 厚涂层结合强度测定方法研究进展[J]. 表面技术, 1998, 27(2): 33—37.
YI Mao-zhong, RAN Li-ping, HE Jia-wen. Development of Bonding Strength Test Methods for Thick Coating [J]. Surface Technique, 1998, 27(2): 33—37.
- [11] 葛继平. 镀膜结合强度测试技术的研究进展[J]. 中国表面工程, 1995(2): 43—48.
GE Ji-ping. Development of Bonding Strength Test Methods for Film Coating [J]. Surface Engineering of China, 1995(2): 43—48.
- [12] ALMILHATTI H J, GIAMPAOLO E T, VERGANI C E, et al. Shear Bond Strength of Aesthetic Materials Bonded to Ni-Cr Alloy [J]. J Dent, 2003, 31(3): 205—216.
- [13] OLLENDORF H, SCHNEIDER D. A Comparative Study of Adhesion Test Methods for Hard Coatings [J]. Surface and Coating Technology, 1999, 113: 86—102.
- [14] 葛培林, 刘小萍, 尚魁平, 等. 离子氮化对 H13 钢表面 CrTiAlN 镀层结合强度的影响[J]. 表面技术, 2012, 41

- (2):79—81.
- GE Pei-lin, LIU Xiao-ping, SHANG Kui-ping, et al. The Influence of Prior Plasma Nitriding on the Adhesion Strength of CrTiAlN Coating Formed on H13 Steel [J]. Surface Technology, 2012, 41(2):79—81.
- [15] 黄珂, 杨伏良, 陈力学, 等. 划痕法测定 TiAlN 涂层结合强度的研究[J]. 表面技术, 2013, 42(5):107—110.
- HUANG Ke, YANG Fu-liang, CHEN Li-xue, et al. Study on the Adhesion Strength of a TiAlN Coating by Scratch Tester [J]. Surface Technology, 2013, 42(5):107—110.
- [16] 陈焕铭, 高亚红, 吕琼, 等. 化学镀 Ni-P-W/Al₂O₃ 复合镀层与 NdFeB 基体的结合强度研究[J]. 表面技术, 2012, 41(4):13—15.
- CHEN Huan-ming, GAO Ya-hong, LYU Qiong, et al. Investigation on the Interfacial Bonding Strength between Ni-P-W/Al₂O₃ Coating and NdFeB Matrix[J]. Surface Technology, 2012, 41(4):13—15.
- [17] 殷秀银, 柏立庆, 吴玉萍. 扩散处理后的 FeCrNi 涂层结合强度与断口特征研究[J]. 表面技术, 2012, 41(5):64—69.
- YIN Xiu-yin, BAI Li-qing, WU Yu-ping. Research on the Bonding Strength and Fracture Morphology of the Diffusion Treated FeCrNi Coating[J]. Surface Technology, 2012, 41(5):64—69.
- [18] ERA H, OTSUBO F, UCHIDAA T, et al. A Modified Shear Test for Adhesion Evaluation of Thermal Sprayed Coating [J]. Materials Science and Engineering, 1998, 251(12):166—172.
- [19] 井玉安, 董海雪, 孙本良, 等. 薄规格双金属复合板剪切强度的测试方法[J]. 材料热处理技术, 2011, 40(12):103—106.
- JING Yu-an, DONG Hai-xue, SUN Ben-liang, et al. Test Methods for Shear Strength of Thin Bi-metal Sheet[J]. Material & Heat Treatment, 2011, 40(12):103—106.
- (上接第 136 页)
- [49] ZHANG Y H, YU S W. The Study of BiCr_xFe_{1-x}O₃ Thin Films Synthesized by Sol-Gel Technique[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2010, 30(2):271—275.
- [50] DENG H, DENG H M, YANG P X, et al. Effect of Cr Doping on the Structure, Optical and Magnetic Properties of Multiferroic BiFeO₃ Thin Films [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2012, 23(6):1215—1218.
- [51] CHENG M, TAN G Q, XUE X. et al. Preparation of Nd-doped BiFeO₃ Films and Their Electrical Properties [J]. Physica B: Condensed Matter, 2012, 407(17):3360—3363.
- [52] QI X, DHO J, TOMOV R, et al. Greatly Reduced Leakage Current and Conduction Mechanism in Aliovalent-ion-doped BiFeO₃ [J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(6):062903.
- (上接第 157 页)
- [42] TANG F, AJDELSZTAIN L, KIM G E, et al. Effects of Variations in Coating Materials and Process Conditions on the Thermal Cycle Properties of NiCrAlY/YSZ Thermal Barrier Coatings[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 425:94—106.
- [43] WANG H Y, ZUO D W, WANG M D, et al. High Temperature Frictional Wear Behaviors of Nano-particle Reinforced NiCoCrAlY Cladded Coatings [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21:1322—1328.
- [44] MULLER J, NEUSCHUTZ D. Efficiency of α -alumina as Diffusion Barrier between Bond Coat and Bulk Material of Gas Turbine Blades [J]. Vacuum, 2003, 71:247—251.
- [45] 汪新衡, 钱书琨, 刘安民, 等. 激光熔覆纳米 Al₂O₃ 颗粒增强 Ni 基合金涂层界面组织和高温热腐蚀性能[J]. 表面技术, 2013, 42(6):23—26.
- WANG X H, QIAN S K, LIU A M, et al. Interface Microstructure and High Temperature Corrosion of Nano-Al₂O₃ Particle Reinforced Ni-based Alloy Powder Laser Cladding [J]. Surface Technology, 2013, 42(6):23—26.
- [46] 王泽华, 王长浩, 周泽华, 等. 高温反应合成金属陶瓷复合涂层技术的研究现状[J]. 表面技术, 2012, 41(3):115—119.
- WANG Z H, WANG C H, ZHOU Z H, et al. A Survey on Technology of High-temperature Reactive Synthesis M/C Composite Coating [J]. Surface Technology, 2012, 41(3):115—119.
- [47] KAMAL S, JAYAGANTHAN R, PRAKASH S. Mechanical and Microstructural Characteristics of Detonation Gun Sprayed NiCrAlY+0.4wt. % CeO₂ Coatings on Superalloys [J]. Materials Chemistry and Physics, 2010, 122:262—268.
- [48] WANG H Y, ZUO D W, CHEN X F. Microstructure and Oxidation Behaviors of Nano-particles Strengthened NiCoCrAlY Cladded Coatings on Superalloys [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(3):297—304.