

锅炉“四管”用耐磨耐蚀涂层研究进展

刘鹏飞, 陶凯, 周香林, 张济山

(北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

[摘要] 总结了锅炉“四管”失效的形式和机理。热腐蚀和高温冲蚀磨损是锅炉“四管”失效的主要原因, 采用热喷涂金属涂层、陶瓷涂层及金属陶瓷复合涂层等可以有效控制热腐蚀和高温冲蚀磨损。目前制备高性能涂层常用的方法有等离子喷涂、电弧喷涂、超音速火焰喷涂等。详细介绍了高镍铬合金涂层的研究状况和喷涂工艺的特点, 最后展望了纳米结构涂层在该领域的研究进展和应用前景。

[关键词] 锅炉“四管”; 涂层; 热腐蚀; 高温冲蚀磨损; 纳米结构涂层

[中图分类号] TG174.442

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2007)01-0075-03

Research Progress in Wear and Corrosion Resistance Coating of Boiler Tubes

LIU Peng-fei, TAO Kai, ZHOU Xiang-lin, ZHANG Ji-shan

(State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, Beijing University of
Science and Technology, Beijing 100083, China)

[Abstract] The broken mechanism of boiler tubes was summarized. The hot corrosion and high temperature erosion were recognized as being cause of utility boiler tube failures. The use of coating which can control hot corrosion and high temperature erosion is effectively, such as metallic, ceramic and metal ceramic composite coating. There are some methods that are plasma spraying, arc-spraying and hypersonic flame spraying technology to prepare alloy coating with high erosion and corrosion resistance. The recent research progress of high Ni-Cr alloy and characteristics of spraying were introduced in detail. Finally, the research progress and potential application of nano surface technology was prospected in this field.

[Key words] Boiler tubes; Coating; Hot corrosion; High temperature erosion; Nanostructured coating

0 引言

在火力发电厂中, 高温高压锅炉的“四管”(即水冷壁管、过热器管、再热器管、省煤器管), 尤其是过热器管和再热器管的腐蚀与磨损问题, 是长期困扰行业发展重要经济和技术问题。据统计, 由于锅炉“四管”爆漏, 某火力发电厂的强迫停运约占非计划停运次数的50%。5a内, 按爆管部位统计, 水冷壁为156次, 占总数的22.8%; 过热器181次, 占总数的26.5%; 省煤器166次, 占总数的24.3%; 再热器52次, 占总数的7.6%^[1]。

燃煤火力发电厂中, 锅炉“四管”产生的腐蚀、磨损、积灰、结渣等一系列问题十分突出, 管道使用寿命降低, 爆漏现象频繁。解决上述问题比较经济而有效的办法是采用热喷涂技术制备耐磨耐蚀涂层, 从而提高管道使用寿命, 节约维修成本, 延长维修周期和经济效益^[2]。

1 锅炉“四管”爆漏原因与机理

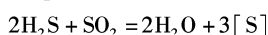
1.1 锅炉“四管”腐蚀破坏

腐蚀导致“四管”爆漏主要原因: 一是管内水蒸气在高速流体、温度、化学环境的相互影响下促进了碳钢和低合金钢表面氧化保护层的溶解, 导致腐蚀破坏; 二是烟气中的S、V、Cl与沉积在管壁的盐类等物质一起腐蚀管壁。其中, 以S的高温腐蚀尤为严重, 燃料在锅炉中燃烧生成硫化物是外腐蚀的根源。“四管”的高温腐蚀与部件工作环境的温度、气体成分、煤质成分和煤颗粒的运动状况等因素有关, 具有腐蚀速度快、腐蚀区域相对集中以及突发性强等特点^[3]。

1) 硫化物型腐蚀机制

硫化物是锅炉高温腐蚀的主要因素: 一是烟气中的硫化氢与管壁金属作用产生的腐蚀; 二是由不可燃硫在高温作用下生成硫酸盐混入灰分熔敷于管壁表面, 由此形成腐蚀^[4]。

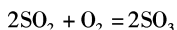
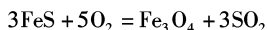
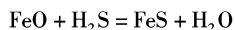
锅炉燃料普遍含S, 在燃烧过程中S几乎都氧化成SO₂, 其中约有6%~7%的SO₂进一步氧化成SO₃。高温下, SO₂和SO₃均呈气态。反应过程如下:



[收稿日期] 2006-10-25

[基金项目] 国家“863”计划资助项目(2002AA331080)

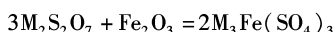
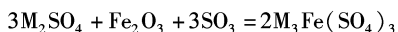
[作者简介] 刘鹏飞(1982-), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 研究方向为纳米表面技术。



硫化物型腐蚀所生成的 FeS, 熔点是 1195℃, 在温度较低时一般不会发生氧化反应, 当温度较高时, FeS 与 O₂ 就发生缓慢氧化反应而生成黑色的磁性 Fe₃O₄ 和 SO₂, 新生成的 SO₂ 在管壁 Fe₃O₄ 的催化作用下进一步被氧化成为 SO₃。反应后腐蚀产物中含有 FeS、Fe₃O₄、SO₂、SO₃ 等成分, 其中 FeS 较疏松, 不起保护作用, 因而腐蚀会一直进行下去^[5]。所以当 H₂S 的浓度越高, 壁温越高, 腐蚀速度越快。硫化物型腐蚀持续发展的条件是: 1) 铁矿颗粒能到达壁面; 2) 近壁附近是还原性气氛; 3) 有较高的壁面温度。一般认为应大于 350℃^[6]。

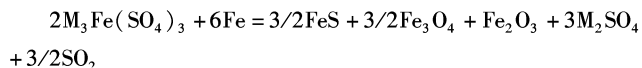
2) 硫酸盐型腐蚀机制

燃煤含较多 K、Na、S 等成分^[3], 燃烧升华逸出的碱性金属氧化物 K₂O 和 Na₂O 会冷凝在换热管壁上, 这些氧化物与管壁周围的 SO₃ 反应生成硫酸盐, 形成了松散的结焦层, 焦层中的硫酸盐在含有 SO₃ 的烟气作用下会与管壁氧化层 Fe₂O₃ 反应生成 Na₃Fe(SO₄)₃ 和 K₃Fe(SO₄)₃, 这种腐蚀称为硫酸盐型腐蚀。反应方程式如下:



方程式中 M 代表 K 或 Na。

这些复合硫酸盐熔点低 [Na₃Fe(SO₄)₃、K₃Fe(SO₄)₃、(Na, K)₃Fe(SO₄)₃ 的熔点分别为 624、618、552℃], 所以它们在锅炉的环境里呈液态^[7]。当在有 O₂ 供给的条件下, 液态复合焦硫酸盐可以得到再生, 将腐蚀大量的金属^[8]。



这样上述腐蚀过程循环进行, 使管壁不断受到腐蚀。

1.2 锅炉“四管”磨损破坏

据统计, 由于磨损破坏, “四管”维修费用占总维修费用比例高达 50% 以上。煤在燃烧后存在大量飞灰和未完全燃烧的炭粒子, “四管”会受到飞灰和粒子的冲蚀磨损, 尤其在表面温度 600℃ 以上的区域最为严重^[9]。

在锅炉的实际运行中, 颗粒冲击“四管”表面形成冲蚀磨损。这种冲蚀磨损除了受温度影响外, 还与颗粒的形状、硬度、颗粒大小和攻角有关。

对于水冷壁、省煤器的工作环境, 颗粒的形状与攻角对其磨损的影响尤为明显。以水冷壁管为例, 当球形颗粒、多角形颗粒或尖角形颗粒以较大攻角冲击水冷壁管表面时, 产生塑性变形, 从而在锅炉钢表面形成冲击坑和坑周围凸起的“唇片”; 在随后颗粒的不断冲击下, “唇片”不断被压延, 在其根部应力集中区形成裂纹并扩展, 最终形成片状磨屑从水冷壁管表面流失^[10]。这种循环作用使管壁慢慢变薄, 直至破坏。

2 锅炉“四管”防磨防腐蚀的对策

锅炉“四管”在工作时受到磨损和腐蚀, 并且温度很高, 因

此要求“四管”能够具有耐高温腐蚀和磨损的性能。目前, 高蒸汽参数锅炉中使用的“四管”管材一般为铁素体钢和奥氏体钢, 如新型 9% ~ 12% Cr 系耐热钢、TP304H、TP247H 和 Super304H 等^[11], 使用时都需要进行表面喷涂处理, 以提高使用寿命。常见的热喷涂涂层的材料有 Ni-Cr^[12-13]、Fe-Cr^[13]、TAF A95MXC 和 Inconel625 等, 这些基体合金以 Ni、Co、Fe 基合金粉末为主, 通过固溶其它的合金元素, 可以起到支撑体作用, 从而使涂层具有较好的耐腐蚀性能。另外, 还有通过添加陶瓷相的金属复合涂层, 使涂层具有很高的强度和较好的耐冲蚀性能。

2.1 锅炉“四管”常用耐磨耐腐蚀涂层——镍铬涂层

研究表明, 金属 Ni 在 635℃ 以上的硫化气氛下腐蚀速度较快, 而 Cr 的抗硫化腐蚀效果比较好的合金元素之一^[14]; 当 Cr 的含量足够高时, 镍基合金的耐腐蚀性能被改善, 甚至可以在高于 635℃ 以上的温度下使用。此外, 在镍基合金元素添加钴、硅、铝和其他的微量合金元素也可以提高抗硫化腐蚀特性^[15]。

Ni、Cr 与 S 反应原理是金属的阳离子向外扩散和 S 的阴离子向内移动, 由于 Ni 的扩散比 Cr 快, 开始时外表面主要产物是 NiS、NiS₂^[16]。当 Cr 被氧化, 在涂层表面形成 Cr₂O₃ 或尖晶石结构氧化物时, 就会阻挡腐蚀介质进入涂层基体, 防止镍连续生成 NiS、NiS₂, 抑制热腐蚀的快速发展^[11]。其中 Cr 含量越高, 合金的硫化速度越低, 而且优先氧化形成的氧化膜就越致密、完整。

当 Cr 的含量低于 40% 的时候, 不能形成单一而连续的 Cr 的硫化膜, 还存在一定量 Ni 的硫化膜, 不能有效地起到抑制元素扩散的作用。Cr 含量也不是越高越好, Cr 含量过高, 会使涂层脆性增大, 对涂层强度和附着力不利。只有当 Cr 含量达到临界浓度时, 才能在临近涂层表面的内层形成单一而连续的铬的硫化膜 (CrS) 或氧化膜 (Cr₂O₃), 从而阻碍腐蚀气氛向涂层内的侵入及基体中金属元素向外扩散。

镍铬合金复合涂层也应用较广, 一般通过外加和原位生成两种途径引入的陶瓷相和金属间化合物相。通常情况下, 涂层的硬度越高, 涂层的耐磨损能力越强; 而且硬度也与粒子低角度碰撞耐磨的机械性能相关, 所以可以通过提高涂层的硬度、强度、弹性模量和化学稳定性, 来提高抵抗外界冲蚀磨损的性能。例如, 添加 Cr₃C₂ 陶瓷相时, 镍铬合金涂层的耐磨能力显著提高。试验证明, 在同等条件下, 镍铬合金复合涂层磨损减薄厚度明显低于单一合金涂层^[17]。

2.2 涂层制备工艺——热喷涂技术

高性能耐磨耐腐蚀涂层粉末含有 Ni、Cr、Co、W 等高熔点合金元素及陶瓷相, 要求采用高能热源等设备制备涂层, 达到较高的结合强度和致密度, 保证涂层质量^[18]。目前应用较多的热喷涂技术主要有等离子喷涂、电弧喷涂和火焰喷涂。

2.2.1 等离子喷涂

等离子喷涂能量集中、焰流速度高, 有利于高熔点喷涂材料的软化甚至熔化; 工艺过程稳定, 调节性能好, 可以对金属、陶瓷及有机材料等进行喷涂; 没有氧化性气体作工作气体, 降低了涂层中合金元素的氧化可能; 喷涂后涂层致密度高, 结合强度较高; 对工件热变形小, 喷涂效率高^[19]。该工艺缺点是其设备复杂、不便搬运、能源利用率低、成本高, 影响其在实际工况中的应用。

西安交通大学采用等离子喷涂工艺在锅炉表面喷涂 Cr₃C₂-NiCrAl 金属陶瓷涂层, 在陕西省秦岭电厂、韩城电厂等单位推广

使用,取得良好的经济效益^[20]。

2.2.2 电弧喷涂

电弧喷涂是目前在锅炉“四管”防护中最常用的一种热喷涂技术,它具有喷涂效率和能源利用率高;设备相对灵活,便于现场作业,涂层性能优异等特点,特别适用于水冷壁管防护的现场喷涂操作。近年来,新开发的超音速电弧喷涂(简称HVOF)采用燃烧于丝材端部的电弧将均匀送进的丝材熔化,经过伐尔喷嘴加速后的超音速气流将熔化的丝材雾化成粒度细小、分布均匀、速度更高的粒子,从而能够制备出的涂层比传统电弧喷涂结合强度更高,孔隙率和表面粗糙度更低。

美国TAFA公司和瑞典Kanthal公司联合开发并专用于高温硫化环境中抗硫腐蚀的预合金线材45CT^[21-22],成分为:43% Cr, 0.1% Fe, 4% Ti, 其余为Ni。这种材料的热膨胀系数与碳钢管非常接近,大大降低了应用过程中机械剥落的可能性;合金中Ni的存在能够降低涂层的脆性;材料中加入的钛能使结合强度得到明显改善,可保证在7年内不变薄、不剥落。

马世宁等^[23]研制的电弧喷涂SL涂层+高温封孔剂的防护体系,通过在天津大港电厂和邯郸电厂等锅炉水冷壁的实际应用,防腐效果明显。

2.2.3 超音速火焰喷涂

超音速火焰喷涂(简称HVOF)是20世纪80年代出现并发展起来的一种热喷涂先进技术。它是利用丙烷、丙烯等碳氢系燃气或氢气与高压氧气在燃烧室或特殊的喷嘴中燃烧,产生高温高压燃气(焰流速度高达1500m/s以上),将粉末送进火焰中,产生熔化或半熔化的粒子高速撞击沉积在基体表面上以获得高质量的涂层^[24]。在HVOF喷涂过程中,粒子并没有完全熔化,粒子本身细小均匀,速度极高,在焰流中的停留时间短,这就降低了粒子被氧化的可能,从而使涂层达到预先设计的结构和性能。喷涂粒子的冲击速度极高,涂层的残余应力低,达到较好的结合强度^[25]。这样HVOF涂层具有良好的致密性和极低的氧化物含量,腐蚀气体很难渗透进来,涂层表现出良好的抗腐蚀性能。

美国Metalspray公司用HVOF技术制备的DS-200(75Cr₃C₂/25NiCr)涂层^[20],具有极低的孔隙率(1%~2%)、非常细的晶粒度(10~20μm)、均匀的组织、高结合强度(61.8MPa以上)、抗拉裂的卵石结构以及高硬度,且涂层表面非常光滑。这种材料具有非常好的抗冲蚀腐蚀能力,专用于锅炉管道高温冲蚀严重部位。

3 纳米涂层的研究进展及其应用前景

随着纳米表面技术研究的深入,对纳米涂层作为结构涂层的高强度、高塑性、高韧性等力学性能的研究越来越多,利用纳米涂层的耐高温腐蚀,耐磨损方面研究还较少,尤其是在锅炉“四管”上的应用,国内在该领域的研究水平与美国等发达国家相比还有较大差距。目前,在国外出现了纳米涂层应用在锅炉“四管”上相关报道。

纳米颗粒比表面大,活性高,在热喷涂过程中颗粒被均匀加热熔融,这与喷涂微米级颗粒时,仅仅使颗粒表面产生熔融有所不同。由于熔融程度好,纳米颗粒在碰到基材后变形剧烈,平铺

性明显优于微米级颗粒^[26]。纳米涂层的实质性作用在于晶界分散体积分数高,晶界作为快速扩散通道,不易形成贯穿的通路^[27],更有效地阻止腐蚀介质对内部基体的侵入。另外,由于纳米氧化物可以钉扎晶界,抑制晶粒的高温长大,所制备的纳米氧化物涂层,具有良好的高温强度,优异的抗高温氧化性能。Lou Hanyi等^[28-30]用磁控溅射获得微晶与纳米晶涂层,与相同成分的铸态粗晶相对比,不仅改善了涂层的抗高温氧化与热腐蚀性能,而且改变氧化膜成分。

一般认为在低载荷条件下,材料的磨损率随增强体颗粒的增大而减小,当颗粒脱落、破裂变得锋利时,材料的磨损率将显著增加^[31]。如用微米颗粒作为增强体时,大的微米粒子使得材料表面变得粗糙,并且常有大的微米颗粒半露在表面而成为摩擦副之间的磨料,而用纳米颗粒作为增强体时,在摩擦磨损过程中纳米颗粒不容易从软基体中拔出,并且其从基体上脱落后可以用于修复表面细微的孔隙,光滑材料表面,减少摩擦因数;纳米结构涂层致密,裂纹短而小,磨损表面光滑平整,使涂层耐磨性能优于微米级颗粒涂层。D. J. Branagan等^[32]通过电弧喷涂制备的铁铬(SHS7170)纳米涂层,具有比较高的结合强度和良好的韧性。涂层在锅炉实际环境下应用,高温磨损受到粒子攻角变化影响很小,尤其是在600℃以上时候,对比传统的电弧制备的涂层,具有更好的耐高温磨损性能。

可见,用热喷涂技术制备的纳米涂层防腐、耐磨性能优异,在锅炉“四管”方面具有良好的应用前景。

[参考文献]

- [1] 黄鹤. 贵州省电站锅炉“四管”爆漏情况与原因分析[J]. 贵州电力技术, 2000, 4(3): 5-10
- [2] Uusitalo M A, Vuoristo P M J, Mantyla T A. Elevated temperature erosion-corrosion of thermal sprayed coating in chlorine containing environments[J]. Wear, 2002, (252): 586-594
- [3] 齐慧滨, 郭英倬, 何业东, 等. 燃煤火电厂锅炉“四管”的高温腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(2): 113-119
- [4] 周松, 陈本荣, 刘永忠, 等. 火电厂锅炉水冷壁管的防腐防腐[J]. 火电厂锅炉水冷壁管的防腐防腐治理, 2003, (1): 46-48
- [5] 徐远鹏. 锅炉水冷壁高温腐蚀原因及对策[J]. 中国电力, 2005, 10(10): 76-79
- [6] 徐夕仁, 马春元, 李京. 1000t/h 锅炉水冷壁高温腐蚀问题的探讨[J]. 山东电力技术, 1998, 6: 25-27
- [7] Sidhu T S, Prakash S, Agrawal R D. Hot corrosion performance of a NiCr coated Ni-based alloy[J]. Scripta Materialia, 2006, (55): 179-182
- [8] 张昌建, 和瑞生, 张洪志, 等. 流化床锅炉和煤粉锅炉高温腐蚀的机理及防治[J]. 煤炭工程, 2003, 7: 65-66
- [9] Higuera Hidalgo V, Belzunce Varela J, Carriles Menendez A, et al. High temperature erosion wear of flame and plasma-sprayed nickel-chromium coatings under simulated coal-fired boiler atmospheres[J]. Wear, 2001, (247): 214-222
- [10] 景永伟, 刘少光. 流化床锅炉水冷壁管冲蚀磨损特性及防磨措施[J]. 动力工程, 2005, 25(5): 747-755
- [11] 赵双群, 谢锡善, Gaylord D Smith. 新型镍基高温合金在模拟燃煤锅炉环境中的腐蚀[J]. 金属学报, 2004, 40(6): 659-663

(下转第80页)

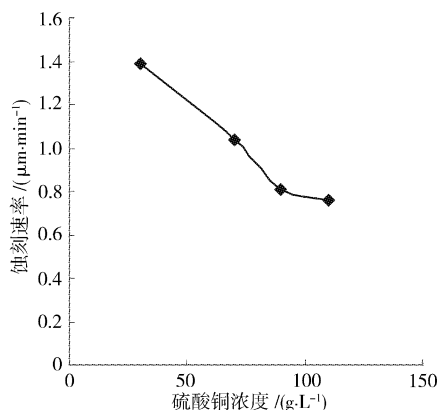


图6 硫酸铜含量对SPS体系蚀刻速率的影响

Figure 6 Effects of CuSO_4 concentration on SPS etching velocity

也就趋于稳定。当硫酸铜含量继续增加到 130g/L 时,蚀刻速率基本保持一稳定值。由此可以看出,该体系的容铜量相当大,按含铜量计算为 28g/L,而过硫酸钠体系的容铜量为 25g/L。

图6的试验结果表明:在硫酸铜存在条件下,过硫酸钠体系的蚀刻速率迅速下降,随着铜离子浓度的增加,蚀刻速率不断下降,反应难控制,对铜板的蚀刻程度也很不均一,可能导致大量废板的产生。

从上面的分析可以看出,硫酸铜含量对过硫酸氢钾复合盐体系的影响并不大,而过硫酸钠的体系有着非常大的影响。这主要是因为 Cu^{2+} 不能够催化单过硫酸氢钾的氧化反应,但可以显著催化过硫酸盐的氧化反应。过硫酸化合物的氧化反应比起单过硫酸化合物更加复杂,前者通常是通过难以控制的自由基反应进行的。这也是单过硫酸氢钾体系相对过硫酸钠体系的蚀刻速率更稳定、更可控的又一原因。

图7为经过KMPS体系蚀刻铜板的电镜照片。可看出,

(上接第77页)

- [12] Higuera Hidalgo V, Belzunce Varela J, Martinex de la Calle J, et al. Characterization of NiCr flame and plasma sprayed coatings for use in high temperature regions of boilers[J]. Surface Engineering, 2000, (16):137-142
- [13] Higuera Hidalgo V, Belzunce Varela J, Fernandez Rico E. Erosion wear and mechanical properties of plasma-sprayed nickel and iron-based coatings subjected to service conditions in boilers[J]. Tribology International, 1997, (30):641-649
- [14] Levi T P, Licht K A, Tack A J. Corrosion performance of types 310s and 410 stainless steels in forming gas containing 1% H_2S or 1% H_2S /1% HCl at 600°C[J]. Materials at High Temperatures, 2001, (18): 65-70
- [15] Uusitalo M A, Vuoristo P M J, Mantyla T A. High temperature corrosion of coatings and boiler steels in reducing chlorine-containing atmosphere[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, (161):275-285
- [16] Li Xuefeng. Corrosion behaviours of two nickel-based coatings in H_2S -containing environments[J]. Surface and Coating Technology, 2004 (183):212-215
- [17] Wang Buqian, Zheng Rongshui. Hot erosion behavior of carbide-metal composite coatings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, (143/144):87-92
- [18] 张阁,周香林,张济山,等. 水轮机过流部件用高耐磨耐蚀涂层制备技术[J]. 表面技术, 2004, 2(1):4-7
- [19] 谭昌瑶,王钧石. 实用表面工程技术[M]. 北京: 新时代出版社, 1998.
- [20] 徐连勇,荆洪洋,霍立兴,等. 热喷涂技术在电站锅炉“四管”防护上的应用[J]. 湖北电力, 2003, 27(2): 48-50
- [21] Tamura H. Generation of a high velocity jet in the electro-thermal ex-

KMPS 体系蚀刻铜板的效果,表面统一光滑、连续、界面不粗糙,蚀刻效果非常完美。

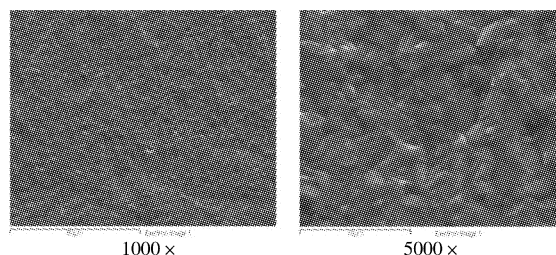


图7 经KMPS蚀刻后铜板的电镜照片

Figure 7 TEM of Cu board etched by KMPS

3 结 论

通过以上的研究分析表明,过硫酸氢钾体系在 PCB 的微蚀中蚀刻速率均一可控,容铜量更大,铜面更加光滑,连续完美。而过硫酸钠体系相对溶解速度较慢,蚀刻速率难以控制,蚀刻效果较为粗糙、暗淡。因此,过硫酸氢钾体系是目前 PCB 行业较为理想的微蚀体系。

[参考文献]

- [1] 魏静,罗韦因.印刷线路板精细蚀刻的影响因素[J]. 表面技术, 2005, 34(2):49-55
- [2] 蔡坚,马莒生. Cu 在 FeCl_3 溶液中的蚀刻研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(6):82-85
- [3] 田波. 微带蚀刻工艺影响因素探讨[J]. 表面技术, 2004, 33(2): 50-51
- [4] 吴水清. 硫酸 P 过氧化氢蚀刻工艺[J]. 电镀与环保, 1999, 19(5):27-30
- [5] explosion of conductive ceramic powders[J]. J of Thermal Spray Technology, 1998, 7(1):87-92
- [22] Demerbas A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals[J]. Energy Conversion and Management, 2001, 42:1357-1378
- [23] 马世宁,刘谦,李长青,等. 热电厂锅炉水冷壁热腐蚀治理技术及其应用[J]. 中国机械工程学报, 2002, 13(17): 1468-1471
- [24] Ak N F, Tekemir C, Ozdemir I, et al. NiCr coatings on stainless steel by HVOF technique[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, (173/174):1070-1073
- [25] 樊自拴,孙东柏,俞宏英,等. 超音速火焰喷涂技术研究进展[J]. 材料保护, 2004, 37(9):33-35
- [26] 徐海燕,周惠娣,陈建敏,等. 热喷涂高性能陶瓷复合涂层的研究进展[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 6(30):5-8
- [27] 李铁藩. 金属高温氧化和热腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [28] Lou Hanyi, Wang Fuhui, Xia Banqie, et al. High-temperature oxidation resistance of sputtered micro-grain super alloy K38G[J]. Oxidation of Metals, 1992, (38):299-307
- [29] Lou Hanyi, Wang Fuhui, Zhu Shenlong, Xia Banqie, Zhang Lixin. Oxide formation of K38G super alloy and its sputtered micrograined coating[J]. Surface and Coating Technology, 1994, (63):105-114
- [30] 陈国锋,楼翰一. 溅射 Ni-8Cr-3.5Al 纳米晶涂层的抗高温氧化行为[J]. 金属学报, 2000, 36(1):59-61
- [31] 张晖,何宜柱. 纳米颗粒增强金属基复合涂层的进展研究[J]. 安徽工业大学学报, 2006, 1(23):21-25
- [32] Branagan D J, Breitsameter M, Meacham B E, et al. High-performance nanoscale composite coating for boiler applications[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2005, (14):196-204