

# 金属复合板表面处理技术的研究现状及发展

李龙, 刘会云, 张心金, 殷福星

(中国一重能源装备材料科学研究所, 天津 300457)

**[摘要]** 金属复合板在制造过程中, 表面处理对界面的结合最为关键, 良好的表面结合状态是达到高强度结合界面的一个重要前提。对复合板的表面处理技术进行了简单概括, 并对比了机械处理法、化学处理法及其它处理法的优缺点和使用条件。最后指出, 机械处理结合化学脱脂的表面处理方法有利于提高金属复合板的结合质量和生产效率。

**[关键词]** 复合板; 表面处理; 结合质量

**[中图分类号]** TG178

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2012)05-0124-05

## Research Status and Progress on Surface Preparation of Clad Metal Plates

LI Long, LIU Hui-yun, ZHANG Xin-jin, YIN Fu-xing

(Energy Equipment Materials Science Institute, China First Heavy Industries, Tianjin 300457, China)

**[Abstract]** Surface preparation is considered to be the most important step of producing clad metals, and bond strength of clad metals greatly depends on the surface preparation. The surface preparation methods, such as mechanical treatment, chemical treatment, electrochemical treatment and other treatment methods, have been briefly overviewed, and their advantages or disadvantages are also described. As a result, mechanical treatment with chemical degreasing plays an important role in improving bond quality and production efficiency of clad plate metals.

**[Key words]** clad metals; surface preparation; bond strength

金属复合板是指在较厚规格低碳或低合金钢板(基层)的单面或双面复合上具有耐腐蚀等特性的较薄金属复层。钢板在复合之前, 应进行表面处理, 去掉表面沾附的污物、水气、氧化膜等<sup>[1]</sup>。复合板的结合强度是表征结合性能和复合质量的重要指标, 而表面对界面结合最为关键, 清洁的表面是达到高强度结合界面的一个重要前提。热轧金属复合板复层与基层的界面结合质量除了受表面清洁度的影响之外, 还受如表面粗糙度、变形制度、冷却制度及热处理工艺等多因素的影响<sup>[2-5]</sup>。

## 1 表面处理技术

在金属复合板的生产过程当中, 表面状态起着非常重要的作用。金属表面从外到内依次存在四层物质, 即吸附层、氧化层、过渡层和基体层。吸附层主要是由吸附的离子、气体、灰尘、水和油脂等构成, 氧化层由基体金属的氧化物构成<sup>[6-7]</sup>。吸附层和氧化层是影响金属复合板界面复合的主要表面因素, 如果在复合

之前能够将金属表面的吸附层及氧化层清理掉, 那么在随后的复合过程中, 复层与基层之间就可以直接接触, 通过变形可以形成牢固的冶金结合。所以表面清理主要就是去掉钢板表面的吸附层和氧化层, 得到干净、清洁的待复合表面。表面处理方法很多<sup>[2,5,7-8]</sup>, 在金属复合板的工业生产过程中, 对金属表面进行处理的方法有三类——机械法、化学法及其它方法。不同的方法对界面结合的影响和作用是不同的<sup>[2,9]</sup>。各种材料都有适合其自身的表面处理方法。

### 1.1 机械法

最传统的机械处理是利用机床, 如铣床、磨床等, 对表面进行加工清理。该处理手段的优点是氧化皮清理彻底, 加工的表面光洁度较高, 表面较为平整; 缺点是加工较为费时, 效率低下, 在处理大面积薄钢板时存在很大的难度。另外, 如果钢板不平度较大时, 加工量也会相应增加, 金属损耗大, 因此一般仅在小件试验中采用该处理方法<sup>[10]</sup>。表1对各种机械处理方法的特点进行了对比, 可根据具体情况进行选择。

**[收稿日期]** 2012-05-18; **[修回日期]** 2012-06-01

**[作者简介]** 李龙(1977—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 博士, 工程师, 主要从事金属复合板产品及技术的开发工作。

表 1 机械处理方法的对比

Tab.1 Comparison of mechanical surface preparation methods

方法	设备	优点	缺点	适用场合
抛丸	抛丸机	1)打击力大,能够有效去除氧化皮; 2)能使工件表面达到一定的粗造度;3)使工件表面的拉应力变为压应力状态;4)清理效率高,污染小。	1)无法彻底清除油污;2)灵活性差,受场地限制。	用于涂装前预处理。
喷丸	喷丸机			
喷砂	喷砂机	1)清理效果好,可除去氧化皮、油污等残留物;2)可选择不同粒度的磨料,达到不同的粗糙度;3)设备结构简单,维修费用低。	1)喷射过程中产生大量粉尘,污染环境,不利于人体健康;2)喷后的表面不易清理。	适用于金属复合板的预处理。
砂轮	砂轮机	1)设备简单、易于操作;2)表面光洁,粗糙度低。	1)容易发热而使工件变形,需冷却;2)对钢板的平直度要求高。	可用于金属复合板的预处理,主要用于较平直的厚板。
砂带	砂带机			
钢丝刷	不锈钢 钢丝刷	1)不锈钢丝韧性强,可对钢材表面进行除锈、去油、酸洗;2)钢丝刷辊高速旋转刷去氧化铁皮,效率高。	1)刷掉的氧化皮需及时清理;2)钢丝刷需定期更换,否则会影响清理效果。	可用于金属复合板的预处理,生产效率高。
高压水	高压水	1)不产生粉尘和锈尘;2)劳动强度低,生产效率高,成本低廉。	1)容易产生水锈;2)在水中添加防腐剂增加成本,回收水也较麻烦。	适用于大型、形状简单且对表面质量要求较低的产品。

### 1.1.1 抛丸和喷丸处理

抛丸主要是用电机带动叶轮体旋转,利用离心力的作用,使直径 0.2~3.0 mm 的丸子被抛掷出去并高速撞击零件表面的清理方法。喷丸是利用压缩空气将金属弹丸喷射到钢板表面,以除去金属氧化层的方法。从表 1 可以看出,抛丸或喷丸的主要优点是可去除表面氧化层,控制粗糙度,并能将工件表面的拉应力改为压应力状态<sup>[11]</sup>。但利用抛丸或喷丸处理较薄的材料时,容易使金属板发生变形,并产生较大的残余应力;另外,抛丸或喷丸处理无法彻底清除油污。因此,这两种处理方法常用于铸件表面的清理或者对零件表面进行强化处理,很少用于钢板复合前的预处理。

### 1.1.2 喷砂处理

喷砂清理技术起源于 19 世纪 80 年代<sup>[12]</sup>,它是以压缩空气为动力,将石英砂、金刚砂等喷料高速喷射到待处理金属板表面,使金属表面发生变化,由于喷料对金属板表面的冲击和磨切作用,金属表面可获得一定的清洁度和不同的粗糙度。喷料的粒径较大时,会对工件有一定的强化作用,不但能够清除表面氧化皮,提高表面粗糙度,还可以去除金属材料的内应力,提高金属表面耐磨性、受压能力等<sup>[13]</sup>。喷砂可用作复合板复合工艺的前处理工序,以获得活性表面,提高复合板之间的附着力。不过,喷砂清理的表面易有湿气,容易再生锈,具有清理效率低、劳动强度大、自动化程度低、喷后的表面不易清理等缺点。

### 1.1.3 机械打磨

机械打磨就是利用砂带机、砂轮机或钢丝刷等机械设备对金属表面进行打磨,除去金属板表面的吸附

层和氧化层等<sup>[14]</sup>。

砂带机是通过高速旋转的砂带的研磨来清除氧化铁皮的一种机械装置。砂带机主要使用布轮、麻轮、千叶轮、尼龙轮、砂带等抛光材料,广泛应用于各种金属平面、端面的打磨等。砂带机可通过步进电机和模拟测距仪的精确控制,确保精确的研磨深度。此外,把抛光膏涂在高速旋转的砂带上,利用剧烈摩擦,产生高温,可使加工面上形成极薄熔流层,填平加工面上的微观凹凸不平,从而降低钢板表面的粗糙度,获得光亮的镜面<sup>[15]</sup>。不过在对冷轧复合薄带进行处理时,如果金属表面复合前过于光滑,会导致两表面硬化层的相对剪切变形降低,反而不利于界面的结合<sup>[1,14]</sup>。

钢丝刷不但能清洁表面,还可以使金属板的表面形成一定的粗糙度<sup>[16-17]</sup>。粗糙的表面不仅接触面积大,而且在复合变形过程中更易产生局部的剪切变形,从而使表面的硬化层和氧化膜破裂,并导致底层新鲜金属暴露,界面两侧的新鲜金属在正压力作用下通过硬化层的裂缝挤出并互相接触,使复合金属表面间距在轧制复合时达到原子间距尺寸,产生足够的结合力以克服金属间的界面势能,从而形成牢固的冶金结合<sup>[5,18]</sup>。不过在钢丝刷的处理过程中,也需要控制表面粗糙度,粗糙度太大时,结合强度不稳定。另外需控制钢丝刷的速度和力量,以免由于速度过快,产生的热量来不及散失,而使处理表面发生二次氧化。

研究发现,利用机械清理能成功实现复合并不仅仅是因为清理了表面,还因为通过加工硬化在接触面上制造了一层脆性覆膜<sup>[19-20]</sup>。加工中,脆膜破裂,产生无污染的高真空间隙,从而保证了接触面的活性和

结合的牢固性。

## 1.2 化学处理法

化学处理主要是利用溶液对金属表面进行溶解,以达到去除金属板表面吸附层及氧化层的目的。表2对三种化学处理方法进行了对比总结。对碳钢进行酸

洗,可除去表面的氧化层;不锈钢则普遍采用先碱洗、后酸洗的工艺,先碱洗去除油污等吸附层,再酸洗去除表面氧化层。化学处理适用于薄板件的清理,但会留下液体和气体组成的吸附层,若时间和温度控制不当,会使钢材产生过腐蚀现象,而且也会对环境造成污染。

表2 化学处理方法的对比

Tab.2 Comparison of chemical surface preparation methods

处理方法	原料	优点	缺点	适用场合
酸洗	酸液	1)可除去表面氧化皮;2)不同材料经不同成分处理液处理,表面可生成不同结构和成分的膜层;3)形状复杂的工件也可进行处理。	1)酸洗粗糙度不能保证;2)酸洗除去不锈钢表面厚氧化皮时,温度高,时间长,加工成本高;3)酸洗时间和温度不易控制,工作条件差;4)生成的钝化膜太厚,可能会阻碍基体和复层结合。	适用于碳钢表面氧化皮的去除,与“碱洗”组合适用于不锈钢表面氧化皮的去除。
碱洗	碱液	1)能有效去除表面油污;2)形状复杂的工件也可进行处理。	1)不能去除表面氧化层;2)需把碱液加热到一定的温度下进行表面处理,操作复杂,效率低。	仅在表面氧化皮对后续工艺无影响的情况下使用。
化学镀镍	镀镍液	1)厚度均匀;2)可沉积在多种材料的表面;3)可以处理形状比较复杂的零件。	1)溶液的调整和再生比较困难;2)化学镀镍前需要机械处理。	针对不锈钢工件表面要求镀镍的场合

### 1.2.1 酸洗

酸洗就是利用酸性溶液与氧化物发生化学反应,使之形成溶于酸溶液的盐类而被除去。酸洗按工艺主要分浸渍酸洗法、喷射酸洗法和酸膏除锈法,其中浸渍酸洗法应用较为广泛。酸洗法中,酸性溶液主要为盐酸、硫酸、硝酸、磷酸、铬酸、氢氟酸以及混合酸等。酸液的选择可根据材料的特性及具体要求而定,例如,铬酸化学处理结合电化学处理已经应用于航空航天材料Al/Mg合金复合板轧制前的表面处理上<sup>[21]</sup>。

酸洗可有效去除不锈钢和碳钢表面的氧化层,但是在去除厚氧化层时,除表2中提及的缺点外,在处理氧化层较厚的表面时易出现欠酸洗或过酸洗的情况;另外,酸洗后,需用丙酮、酒精和水等冲洗掉残余酸液,后续处理比较繁琐。不过日本JFE针对不锈钢复合板轧制前的表面处理开发了一种专用的连续酸洗设备,并成功地用于了不锈钢复合板的工业生产中<sup>[22]</sup>。

### 1.2.2 碱洗

碱洗是利用氢氧化钠、碳酸钠、磷酸三钠等配制成的低强度碱液对钢板表面进行清理。为提高除油效率,一般处理需在70~90℃进行,除油后,表面需用60℃左右的热水洗,将皂化产物和多余乳化剂洗去。该方法主要是通过皂化和乳化作用去除油污,因此不能去除表面氧化皮,仅能在表面氧化皮对后续工艺无影响的情况下使用。

表3总结了不同金属材料轧制复合的表面处理方法,可以看出,在机械处理过程中,基本都结合了化学脱脂过程。机械处理结合化学脱脂处理,是提高金属

复合板界面结合力较为有效的方法。脱脂阶段一般运用环保溶液,如乙烯、石油醚和乙醇,或者选择未氯化的溶液,如苯或丙酮等。Zhang等<sup>[5,9]</sup>研究了化学脱脂、钢丝刷、化学镀镍、热镀镍、镀铬等不同表面处理方法对结合强度的影响,并指出在复合时,粗糙的表面可以明显提高复合能力并显著降低轧制力。不过,不同的表面处理方法都存在一个优化的制度。例如,获得小粗糙度表面的处理方法对铝/铝复合较为适用,获得大粗糙度表面的钢丝刷处理有利于铝/铜复合和铝/钢复合<sup>[9]</sup>。对铝/铝材料来说,钢丝刷和镀镍处理比丙酮处理和阳极电镀能获得更高的结合强度<sup>[5]</sup>。喷砂法处理的铝/铜界面犬牙交错,表面有起伏;钢丝刷处理后的表面有微小突起,而化学方法处理的铜/铝界面比较平直。因此,喷砂后的界面结合强度最高,钢丝刷处理的次之,化学法处理的最低<sup>[14]</sup>。

### 1.3 其它处理方法

其它可用于金属复合板表面预处理的方法有电化学处理和激光表面处理等。电化学处理是指在特定的电化学反应器内,通过设计的电极反应以及由此而引起的一系列化学反应、电化学过程或物理过程,达到污染物降解、转化的目的。由于电化学处理后的表面容易产生孔洞和沟槽等刻蚀现象,可形成一定的粗糙度,从而增强了界面的结合能力<sup>[37]</sup>。但是电化学处理需要电源及相应设备,金属表面容易形成影响结合的膜层,处理的钢板尺寸也受到限制,因此在金属复合板的工业生产过程中一般不使用该技术。



表 3 金属轧制复合板的表面处理方法  
Tab. 3 Surface preparation methods of as-rolled clad metals

复合材料	表面处理方式	文献
铝/铝	钢丝刷、电化学镀镍、化学镀镍、阳极氧化、丙酮处理	[5]
铝/铝、铝/铜、铜/铜、铝/钢、钢/钢	化学脱脂、钢丝刷、化学镀镍、热镀镍、镀铬	[9]
铜/铜/铜	喷砂法、钢刷处理法、化学处理法	[14]
铜、铝	苯脱脂结合钢丝刷处理(钢丝直径 0.3 mm, 钢丝刷轮表面线速度 10 m/s)	[15]
铜、铝、锌、锡、铅	三氯乙烯脱脂结合钢丝刷处理	[23]
铜、铝、银	丙酮脱脂结合钢丝刷处理	[24]
铝	三氯乙烯脱脂结合不锈钢钢丝刷处理(钢丝刷轮直径 120 mm, 钢丝直径 0.35 mm, 钢丝刷轮表面线速度 23 m/s)	[25]
铝/钢、铜/不锈钢	脱脂结合刷子清理	[26]
铝/钢/铝	丙酮脱脂后吹干, 再利用钢丝刷清理	[27]
铜-银合金, 铜/锆	脱脂结合金属刷处理	[28]
铝/镍	脱脂结合金属刷处理	[29]
铝/铝	丙酮脱脂结合金属刷处理	[30]
钛/铝/铌	清理、脱脂结合不锈钢钢丝刷处理	[31]
铝/铝	金相砂纸	[32]
钢/钢	13%~15%(体积分数, 下同)的盐酸水溶液酸洗除锈+丙酮脱脂+碱水溶液中和	[33]
铝/不锈钢	钢刷辊打毛+高压水雾清洗	[34]
铝/不锈钢	化学处理: 不锈钢采用清洁剂+10%的稀盐酸+清水+丙酮脱脂, 铝采用清洁剂+10%的 NaOH 溶液+清水+体积分数 10%稀盐酸+烘干。机械处理: 清洁剂+钢丝刷	[35]
铝/铜	铝: NaOH 溶液碱洗+钢刷+丙酮+无水乙醇 铜: HCl 溶液酸洗+钢刷+丙酮+无水乙醇	[36]

用激光照射工件表面, 令金属表面结构改变的过程, 称为激光表面处理。激光处理可以把碳化物、硼化物和氧化物之类的颗粒随同金属基体中的各种合金同时掺入熔化表面, 以此获得各种物理和化学性能, 从而提高界面的结合强度<sup>[38]</sup>。另外, 激光处理后, 表面易获得极细或超细化的组织结构, 可使表面成分偏析减少, 表层的缺陷和微裂纹被熔合, 对复层和基层金属的复合较为有利。但在表面处理过程中, 为了有效防止氧化及元素烧损, 需利用惰性气体进行保护, 不易控制, 因此一般也不用于金属复合板的表面预处理中。

## 2 结语

在金属复合板生产过程中, 表面处理至关重要, 至于选择什么样的处理方法和手段, 需根据具体材料和要求而定。无论是哪一种处理方法, 都必须将金属钢板表面的吸附层、氧化层等去除干净, 直至表面露出新鲜金属的光泽。电化学处理方法和激光处理法一般用于表面不易处理的金属材料, 可以得到较强的结合性能和耐腐蚀性能, 但一般不用于不锈钢复合板的表面处理。化学处理法则适用于强度较小的金属, 与机械

法相比, 可以处理形状比较复杂的零件, 并且在复合加工过程中还可提高金属的耐腐蚀性; 但化学清理液一般容易残留在钢板表面难以清除, 相比而言, 机械清理优势明显。由于机械处理法相对简单, 成本较低, 且得到的界面结合强度较高, 因而被广泛应用于金属复合板, 特别是不锈钢复合板的生产中。

## [参 考 文 献]

- [1] LI L, YIN F X, NAGAI K. Progress of Laminated Materials and Clad Steels Production[J]. Materials Science Forum, 2011, 675/676/677: 439-447.
- [2] 杨栋, 刘波. 复合板轧制界面处理方法综述[J]. 甘肃冶金, 2010, 32(2): 20-23.
- [3] 胡永平, 唐启玲, 潘复生. 金属基复合材料的应用现状[J]. 铝加工, 1998(6): 52-56.
- [4] 耿林, 倪丁瑞, 郑镇洙. 原位自生非连续增强钛基复合材料的研究现状与展望[J]. 复合材料学报, 2006, 23(1): 1-11.
- [5] CLEMENSEN C, JUELSTORP O, BAY N. Cold Welding Part 3: Influence of Surface Preparation on Bond Strength

- [J]. Metal Construction, 1986(10): 625—629.
- [6] 张胜华. 铜铝轧制复合板的界面结合机制[J]. 中南工业大学学报, 1995, 26(4): 509—513.
- [7] MANESH H D. Assessment of Surface Bonding Strength in Al Clad Steel Strip Using Electrical Resistivity and Peeling Tests[J]. Materials Science and Technology, 2006, 22(6): 634—640.
- [8] 周兆, 汤佩钊, 李晓林, 等. 刨花板/铝/环氧树脂复合板力学性能分析[J]. 包装工程, 1999, 20(1): 8—10.
- [9] ZHANG W, BAY N. Cold Welding—Experimental Investigation of the Surface Preparation Methods[J]. Welding Research Supplement, 1997, 76(8): 326—330.
- [10] 谢广明, 骆宗安, 王光磊, 等. 真空轧制不锈钢复合板的组织和性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(10): 1398—1401.
- [11] 王金钟. Q6945 钢板抛丸除锈清理设备的研制与开发[J]. 铸造设备研究, 2001(6): 7—10.
- [12] 李钦奉. 喷嘴直径对喷砂清理效率的影响[J]. 材料保护, 2001, 34(12): 51—52.
- [13] 李钦奉. 喷砂技术及表面清理效率的研究[J]. 中国修船, 2000(3): 13—15.
- [14] 姜国圣, 王志法. 表面处理方式对铜/铝/铜复合材料界面结合效果的影响[J]. 稀有金属, 2005, 29(1): 6—10.
- [15] 王小彬. 机械制造技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 63.
- [16] CHEN L C, YANG Z G, JHA B, et al. Clad Metals Roll Bonding and Their Application for SOFC Interconnects[J]. Journal of Power Sources, 2005, 152(12): 40—45.
- [17] AKIHITO Y, TAKESHI M, TAKESHI Y, et al. Development of Nonferrous Clad Plate and Sheet by Warm Rolling with Different Temperature of Materials[J]. ISIJ International, 1991, 31(6): 647—654.
- [18] CAVE J A, WILLIAMS J D. The Mechanism of Cold Pressure Welding by Rolling[J]. J Inst Met, 1973(101): 203—207.
- [19] BAY N. Cold Welding 1: Characteristics, Bonding Mechanisms, Bond Strength[J]. Metal Construction, 1986(6): 369—372.
- [20] BAY N. Cold Pressure Welding: The Mechanisms Governing Bonding[J]. Journal of Engineering for Industry, 1979(101): 121—127.
- [21] HIROAKI M, SADA O W, SHUJI H. Fabrication of Pure Al/Mg-Li Alloy Clad Plate and Its Mechanical Properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169(1): 9—15.
- [22] NISHIDA S, MATSUOKA T, WADA T. Technology and Products of JFE Steel's Three Plate Mills[J]. JFE Technical Report, 2005(5): 1—8.
- [23] VAIDYANATH L R, NICHOLAS M G, MILNER D R. Pressure Welding by Rolling[J]. British Welding Journal, 1959, 6(1): 13—28.
- [24] MOHAMED H A, WASHBUSH J. Mechanism of Solid State Pressure Welding[J]. Welding Research Supplement, 1975(9): 302—310.
- [25] WRIGHT P K, SNOW D A, TAY C K. Interfacial Conditions and Bond Strength in Cold Welding by Rolling[J]. Metals Technology, 1978(1): 24—31.
- [26] PAN D, GAO K, YU J. Cold Roll Bonding of Bimetallic Sheets and Strips[J]. Materials Science and Technology, 1989, 5(9): 934—939.
- [27] MANESH H D, TAHERI A K. Bond Strength and Formability of an Aluminum-clad Steel Sheet[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2003(361): 138—143.
- [28] OHSAKI S, KATO S, TSUJI N, et al. Bulk Mechanical Alloying of Cu-Ag and Cu/Zr Two-phase Microstructures by Accumulative Roll-bonding Process[J]. Acta Materialia, 2007, 5(8): 2885—2895.
- [29] SAUVAGE X, DINDAB G P, WILDEB G. Non-equilibrium Intermixing and Phase Transformation in Severely Deformed Al/Ni Multilayers[J]. Scripta Materialia, 2007, 56(3): 181—184.
- [30] TSUJI N, TOYODA T, MINAMINO Y, et al. Microstructural Change of Ultrafine-grained Aluminum during High-speed Plastic Deformation[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 350(1/2): 108—116.
- [31] ZHANG R G, ACOFF V L. Processing Sheet Materials by Accumulative Roll Bonding and Reaction Annealing from Ti/Al/Nb Elemental Foils[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 463(1/2): 67—73.
- [32] YAN H Z. Key Factors for Warm Rolled Bond of 6111-aluminium Strip[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2006, 16(1): 84—90.
- [33] 何美凤, 符定梅, 韩静涛, 等. 含有助复剂扩散-轧制复合钢板的研究[J]. 材料开发与应用, 2005, 20(4): 15—17.
- [34] 王强, 许树勤, 董贤帮. 表面机械处理及扩散退火对复合板性能的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(1): 57—59.
- [35] 董贤帮, 庞玉华, 张静. 界面处理方法对不锈钢/铝多层复合板结合强度的影响[J]. 轻合金加工技术, 2009, 37(3): 33—43.
- [36] 王小红, 唐获, 许荣昌, 等. 铝-铜轧制复合工艺及界面结合机理[J]. 有色金属, 2007, 59(1): 21—24.
- [37] 韩风, 潘鼎, 黄永秋. 电化学表面处理提高碳纤维复合材料界面性能的机理研究[J]. 化工新型材料, 2000(9): 20—23.
- [38] 迟彩芬. 激光表面处理技术的现状及其工业应用[J]. 中国科技信息, 2005(24): 129.