



非块体材料金相教学探讨

程涛涛

(中国民航大学 天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300)

摘要: 在金相教学过程中, 金相试样的打磨和抛光是影响金相试样质量的两个重要环节。分析了传统块体材料和非块体材料显微组织结构的特点, 指出了非块体材料显微组织结构容易受到磨抛损伤的原因。在此基础上, 分析和总结了中国民航大学航空材料实验课程中, 多孔材料及热喷涂涂层在金相制备过程中典型的“脱落型”假象、“碾压型”假象、“孔洞长大型”假象和“黏着型”假象 4 种异常金相出现的原因, 并探讨了解决上述问题的方法。

关键词: 金相教学; 金相试样制备; 非块体材料; 异常金相

中图分类号: G642

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20210002

Discussion of Metallographic Teaching of Non-bulk Materials

CHENG Taotao

(Key Laboratory for Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In the process of metallographic teaching, grinding and polishing are two important processes that affect the quality of metallographic samples. The characteristics of microstructure of traditional bulk and non-bulk materials are analyzed in this paper, and the reason why the microstructure of non-bulk materials is easy to be damaged by grinding and polishing is pointed out. On this basis, the causes of four typical kinds of abnormal metallographic appearing in the experimental course of Aeronautical Materials in Civil Aviation University of China, such as “falling off type”, “rolling type”, “hole-growing type” and “adhering type”, were analyzed and summarized, and methods to solve the above-mentioned problems were discussed.

Key words: metallographic teaching; metallographic samples preparation; non-bulk materials; abnormal metallography

材料科学以实验为基础, 在其研究和发展过程中, 只有通过金相制备和金相分析才能完整地解释各种材料的微观组织结构和性能之间的相互关系^[1-2]。金相研究始于 19 世纪中期, 主要应用于铁路铁轨用钢铁材料显微组织结构的研究^[3]。一个多世纪以来, 随着科技的进步, 新材料层出不穷, 金相学的范围已经从传统的钢铁、金属与合金拓展至玻璃、陶瓷、水泥等无机非金属材料以及塑料、纤维、橡胶等有机高分子材料^[4-7]。早期传统的金相学, 主要研究的是金属与合金的显微组织结构, 以及它们与物理、化学和力学性能之间的关系, 目前, 广义的金相组织是指任何物质在微观状态下的混合

状态以及相互作用状况。金相学研究领域的不断拓展, 一方面, 促进了金相制备技术的进步与发展; 另一方面, 也给广大金相教学人员带来了技术难题和挑战。

金相教学主要是让学生掌握各种材料金相制备及显微组织分析的方法, 该实验课程对于培养学生的动手能力, 提升学生观察问题、发现问题、分析问题及解决问题的能力均具有重要的意义^[7-10], 因此, 金相试样的制备及观察实验课一直是我国高等院校材料专业大学生的培养方案中的必修课。为了进一步突出金相教学的重要性, 2011 年 6 月, 作为在全国范围内举办全国大学生金相技能大赛的一次预演, 北京科技大学举办了

收稿日期: 2021-01-05; 修回日期: 2021-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(51501222); 天津市教委科研计划项目(2020KJ030); 中国民航大学实验技术创新基金(2022CXJJ49)。

作者简介: 程涛涛(1987-), 男, 博士生, 实验师, 主要从事航空器表面工程方面的教学和研究。E-mail: cheng604@126.com

首届北京科技大学金相实验技能大赛并取得了圆满成功,至今,全国大学生金相技能大赛已经成功举行了 9 届,极大地促进了我国广大金相教学教师金相教学经验的交流和金相制备技术的进步^[11-13]。

1 金相教学问题的产生

学校材料专业大三年级的学生,在专业基础课材料科学基础中的金相试样的制备及观察实验项目中第一次接受金相制备的实验课,实验教学过程中使用的试样材料为 45 号钢,显微组织为铁素体+珠光体,为传统的块体材料,通过本次金相实验课程的学习和实践,学生们能够掌握传统块体材料金相试样制备的流程和实验方法。

在掌握传统块体材料金相试样制备的流程和实验方法基础上,学校材料专业大四年级的专业课航空材料中,涉及多种非块体材料金相试样的制备试验课程,如航空发动机中常用的金属蜂窝材料、热喷涂涂层等。由于非块体材料与传统块体材料(如钢铁材料)显微组织结构的差异性,使得许多学生基于材料科学基础中的 45 号钢的金相试样制备流程和实验方法,得到的非块体材料的金相中出现多种非真实的显微组织结构(以下简称假象)。

2 金相试样制备过程分析

金相试样的制备过程,主要包括试样的取样、镶嵌、打磨(粗磨、精磨)、抛光(粗抛、精抛)、清洁处理及腐蚀处理 6 个基本步骤,每一个环节的操作是否恰当都会影响最终金相试样的质量^[14-15],其中,在金相试样的打磨和机械抛光过程中,试样材料会受到巨大的机械力的作用,如果操作不当,容易造成试样显微组织结构的损伤,因此,打磨和抛光(以下简称磨抛)是影响金相试样质量最显著的两个环节。

金相试样的打磨,本质上是砂纸上的磨粒对试样表面的微切削作用,即通过砂纸上磨粒的尖锐棱角来切削试样表面凸出区域的材料,并将去除的材料通过离心力作用和冷切介质冲洗转移出试样表面。金相试样的机械磨抛过程类似,主要适用于实验室抛光,其基本过程为手工或机

械夹持精磨之后的金相试样在金相试样抛光机上高速运动,利用抛光布上的抛光材料对试样表面细小磨痕的微切削作用,最终获得无划痕的试样表面。

对于传统的块体材料,如钢铁材料或合金材料,由于试样为实体冶金结构,其金相显微组织主要由晶粒和晶界构成,晶界的强度虽然低于晶粒内部,但是远远高于孔洞、裂纹等缺陷处的强度,并且块体材料内部基本无裂纹、孔洞等大尺度缺陷,因此块体材料表现出来的强度相对较高,能够更好地承受在磨抛过程中磨粒和抛光材料的切削力作用。

对于非块体材料,如烧结而成的金属蜂窝或热喷涂制备的涂层,其金相显微组织主要表现为多孔(孔洞尺度可达微米级)及机械堆叠层状结构的特征,如热喷涂涂层,其粒子层间界面结合率最大约为 32% 左右,涂层中三分之二的粒子界面为未结合界面,涂层的综合强度(性能)仅为实体材料的 10%~30%^[16]。与块体材料的晶界相比,在非块体材料金相显微组织中的大尺度孔洞和机械堆叠界面处的强度显著下降。因此金属蜂窝或热喷涂涂层试样在打磨和抛光过程中,其显微组织容易受到磨粒和抛光材料的切削力作用的影响,导致获得假象。

3 非块体材料典型的假象及解决方法

基于金相磨抛原理,以及非块体材料显微组织结构的分析,在非块体材料金相制备过程分析的基础上,通过多年的金相教学的积累,总结了学生在非块体材料金相制备过程中容易出现的 4 类假象及解决方法。

3.1 金属蜂窝材料“脱落型”假象

如图 1 所示为手工磨抛制备金属蜂窝金相试样过程中出现的一种异常金相照片,从图 1 中可以看出,显微组织结构中除了镍铝烧蚀体和镶嵌树脂之外,出现了大量“脱落坑”,这种异常金相我们称之为“脱落型”假象。

1) “脱落型”假象分析

针对图 1 所示的“脱落型”异常金相,分析认为主要有以下 2 个原因。

①起始打磨的 SiC 砂纸为 80 号砂纸,磨粒过大,在打磨过程中对低强度的多孔材料造成的损

伤较大，破坏了镍铝烧结体的网状整体结构，使得该区域的镍铝材料容易脱落。

②磨抛过程中，不均匀且过大力度，造成多孔材料中某些区域出现大的应力集中，破坏了镍铝烧结体的网状整体结构，使得该区域的镍铝材料容易脱落。

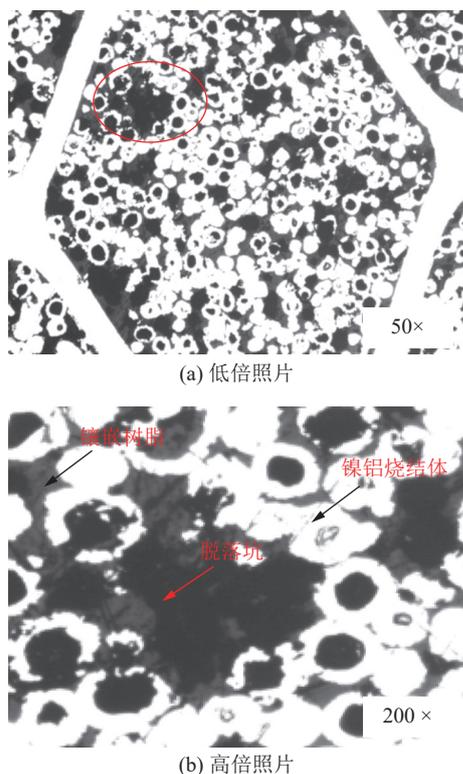


图1 金属蜂窝材料“脱落型”假象

2) 针对“脱落型”假象的改进及效果

针对该多孔材料实验教学过程中容易出现的“脱落型”假象改进如下，首先在给学生准备金相试样过程中，我们改进了取样方式，利用线切割取样替代了原来的手锯取样，获得了表面平整度非常好的金相试样，大大降低了金相试样待磨面的粗糙度；其次，在打磨过程中我们将起始打磨的砂纸从80号调整为400号，并且在磨抛过程中要求学生一定要减小手工磨抛的力度，同时尽量保证力量平稳。按照上述优化后的手工金相磨抛方案，制备的金属蜂窝材料金相试样的照片如图2所示。

从图2中可以看出，改进手工打磨过程后制备的蜂窝金相结构中，镍铝烧结体互相连接，间隙中填满了镶嵌树脂，未发现镍铝烧结体脱落的

现象，整个金属蜂窝材料的微观组织结构完整性保持良好。

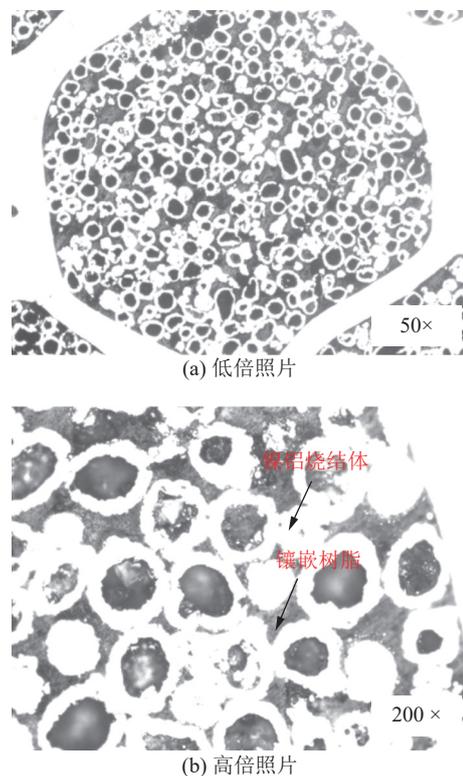


图2 改进手工磨抛过程后金属蜂窝材料正常金相

3.2 金属蜂窝材料“碾压型”假象

图3所示为机器磨抛制备金属蜂窝材料金相试样过程中出现的一种异常金相照片，从图3中可以看出，多孔材料的孔隙中几乎填满了“碾压态”镍铝烧结体，仅有少量的空心球的孔隙和镍铝烧结体之间的间隙，几乎没有发现镶嵌树脂的存在，这种异常金相我们称之为“碾压型”假象。

1) “碾压型”假象分析

针对图3所示的“碾压型”异常金相，分析认为主要有以下两个原因。

①金相试样中几乎没有发现任何的冷镶嵌树脂，说明冷镶嵌环节出了问题，导致树脂没有渗入蜂窝试样镍铝烧结体的间隙中，在磨抛的过程中不能起到包覆和保护镍铝烧结体的作用。

②整个金属蜂窝材料孔隙中几乎全部填满了“碾压态”的镍铝烧结体，而非正常的“颗粒态”镍铝烧结体，说明在机器磨抛过程中，由于磨抛盘与试样之间非常平稳，磨抛过程中间隙接近为零，并且压力很大，导致磨抛去除的镍铝烧

结体直接被挤压进入没有渗入镶嵌树脂的镍铝烧结体之间的间隙和空心球的空隙中。

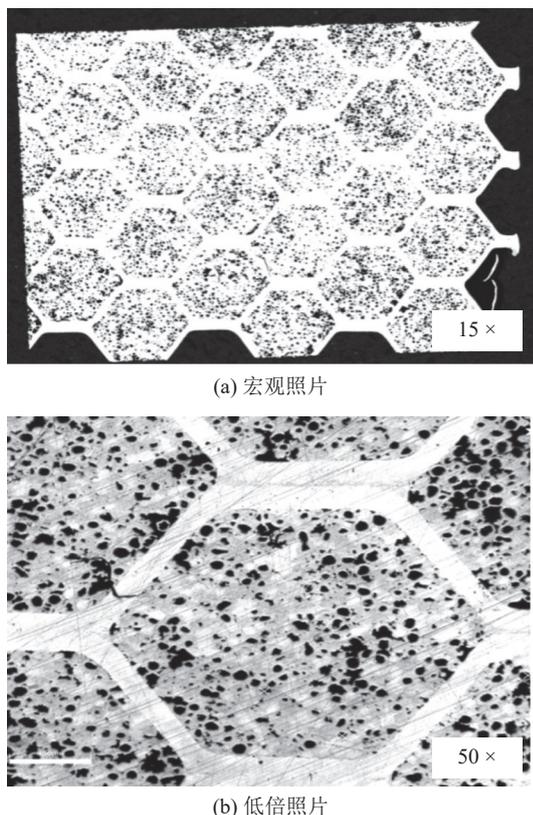


图 3 金属蜂窝材料“碾压型”假象

2) 针对“碾压型”假象的改进及效果

针对该多孔材料实验教学过程中容易出现的“碾压型”假象改进如下。

① 教学实验过程中增加了真空辅助冷镶嵌的步骤，因为该金属蜂窝材料的孔洞中存在着大量的空气，不利于常规冷镶嵌过程中树脂的浸渍和渗透，为了提高冷镶嵌树脂的渗透效果，将原来的常规冷镶嵌改进为真空辅助冷镶嵌。

② 在机器自动磨抛过程中，将机器磨抛压力从 10 N 降低为 5 N，降低试样对磨抛去除的金属材料的碾压作用力，同时将磨抛盘转速从 200 r/min 提高至 350 r/min，使得磨抛过程中切削掉的金属材料能够通过离心力和冷却水快速地转移出去。按照上述优化后的机器自动金相磨抛方案，得到的金相照片如图 4 所示。从图 4 中可以看出，改进后的金属蜂窝材料通过机器自动磨抛制备的金相中，镍铝烧结体互相连接，间隙中填满了镶嵌树脂，未发现“碾压态”镍铝烧结体，整个蜂窝中“颗粒态”镍铝烧结体结构完整性保持良好。

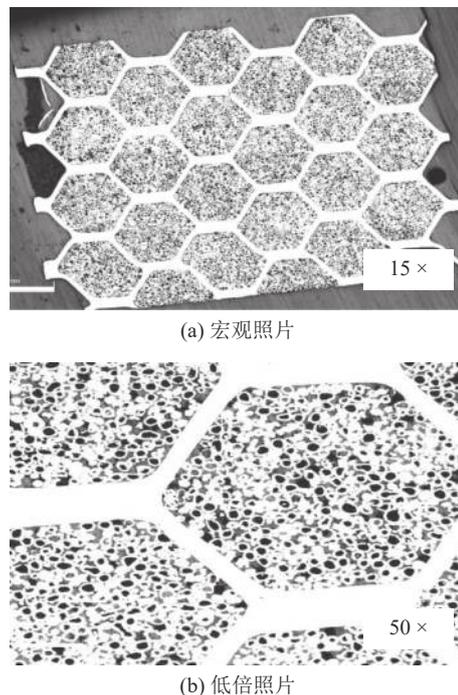


图 4 改进镶嵌和机器磨抛过程后金属蜂窝材料正常金相

3.3 超音速火焰喷涂碳化钨涂层“孔洞长大型”假象

图 5 所示为机器磨抛制备超音速火焰喷涂碳化钨涂层金相试样过程中出现的一种异常金相照片，从图 5 中可以看出，碳化钨涂层显微组织结构中出现了大量的大尺寸孔洞，这种异常金相我们称之为“孔洞长大型”假象。

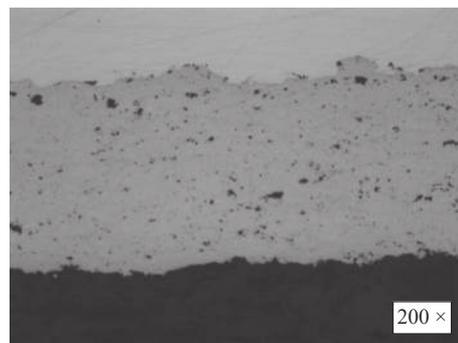


图 5 碳化钨涂层“孔洞长大型”假象

1) “孔洞长大型”假象分析

针对图 5 所示的“孔洞长大型”异常金相，分析认为主要有以下两个原因。

① 碳化钨涂层为陶瓷涂层，具有陶瓷材料硬脆的属性，在磨抛过程中，原有的细小孔洞缺陷处，处于应力集中位置，如果机器磨抛施加的载荷过大，容易造成原有细小孔洞附近碳化钨材料裂纹的萌生、扩展，最后导致部分碳化钨材料脱

落，从而形成大尺寸的孔洞。

②磨抛时间过长，砂纸上磨粒和抛光布上抛光材料失去棱角，从而失去切削能力，使得磨抛过程中磨粒和的抛光材料的切削作用转变成为钝化的磨粒和抛光材料与碳化钨涂层之间的接触疲劳磨损。这种接触疲劳作用，一方面会导致更多的点蚀孔洞的出现；另一方面，同样会造成原有细小孔洞的扩大。

2) 针对“孔洞长大型”假象的改进及效果

针对超音速火焰喷涂碳化钨涂层实验教学过程中容易出现的“孔洞长大型”假象改进如下。

①首先降低磨抛过程中的载荷，将机器磨抛压力从 15 N 降低为 10 N，在保证足够切削力的同时尽量避免涂层缺陷处发生应力集中。

②其次，减少单张砂纸的打磨时间，将每张砂纸的打磨时间从 1 min 减少至 0.5 min，并在抛光过程中增加抛光液的供给速率，将抛光液的供给速率从 20 mL/min 增加至 35 mL/min，从而保障砂纸上的磨粒和抛光上的抛光微粒在打磨和抛光过程中始终保持良好的微切削能力。按照上述优化后的超音速火焰喷涂碳化钨涂层金相磨抛方案，制备的碳化钨涂层金相试样的照片如图 6 所示。从图 6 中可以看出，碳化钨涂层的微观组织结构中，孔洞尺寸明显变小，孔隙率明显降低。

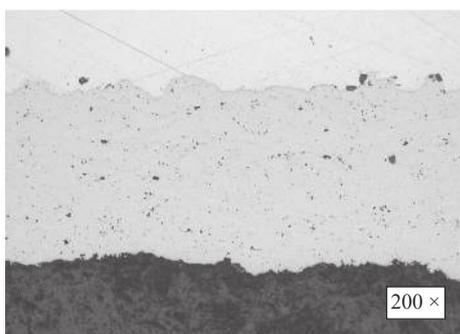


图 6 改进磨抛工艺后碳化钨涂层正常金相

3.4 等离子喷涂铝硅氮化硼涂层“黏着型”假象

如图 7 所示为机器磨抛制备等离子喷涂铝硅氮化硼涂层金相试样过程中出现的一种异常金相照片，从图 7 中可以看出，铝硅氮化硼涂层显微组织结构中，大量的白色铝硅相被黏附在涂层表面，呈现大片白色的黏着区，这种异常金相我们称之为“黏着型”假象。

1) “黏着型”假象分析

针对图 7 所示的“黏着型”异常金相，分析

认为主要原因是：在机器磨抛过程中，施加的载荷过大，同时由于铝硅氮化硼涂层试样与砂纸或抛光布之间的间隙几乎为零，从而导致切削掉的铝硅材料容易被黏着在涂层表面，而氮化硼为具有一定润滑作用的固体润滑相，因此氮化硼相不容易被黏着。

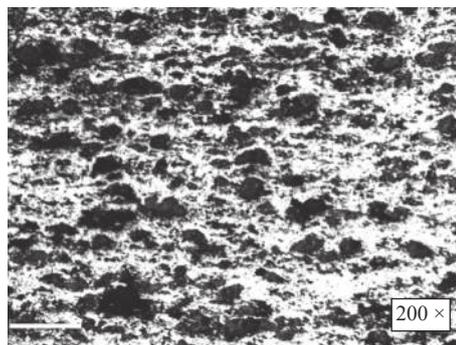


图 7 铝硅氮化硼涂层“黏着型”假象

2) 针对“黏着型”假象的改进及效果

针对等离子喷涂制备的铝硅氮化硼涂层实验教学过程中容易出现的“黏着型”假象改进如下。

①降低磨抛过程中的载荷，将机器磨抛压力从 10 N 降低为 5 N。

②在磨抛过程中加入适量的 KBM401 润滑剂型液体润滑剂，降低铝硅金属的黏附作用。

按照上述优化后的超音速火焰喷涂碳化钨涂层金相磨抛方案，制备的等离子喷涂铝硅氮化硼涂层金相试样的照片如图 8 所示。从图 8 中可以看出，铝硅氮化硼涂层的微观组织结构中，无明显的黏着区，白色铝硅相所占比例明显降低。

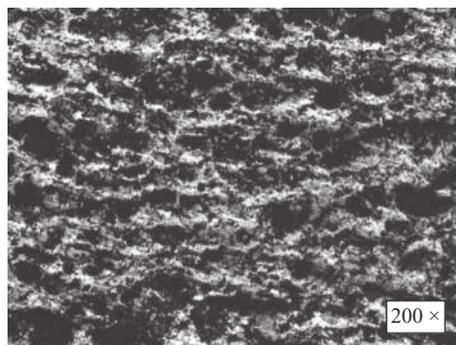


图 8 改进磨抛工艺后铝硅氮化硼涂层正常金相

4 结束语

在材料类专业学生的金相制备实验课教学过程中，针对不同类别的试样材料，其金相制备过程亦具有显著的差异性。传统块体金属材料金相

制备过程的切割、打磨、抛光等基本过程,已经不能完全适用于具有特定功能的非块体材料(多孔材料、涂层等)金相试样的制备。经过多年的金相教学实验经验的总结和分析,我们在非块体材料金相制备实验教学过程中,首先针对具体的材料、结构和制备工艺进行前期分析,让学生明白非块体材料显微组织及结构与传统块体金属材料的差异性;然后针对每种非块体材料的特性,选择合适的取样手段,并通过调整起始打磨砂纸的粒度、磨抛压力、磨抛时间,改进镶嵌方法,增加润滑介质等方法。一方面,可以有效地避免非块体材料金相教学实践中假象的出现;另一方面,极大地促进学生发现问题、探索解决方法的主观能动性。针对非块体材料金相制备的实验教学受到了学生的欢迎,并取得了良好的教学效果。

参考文献

- [1] 杨涓,瞿广宇.材料科学实验“现代金相照相技术”的探索与改革[J].*实验科学与技术*,2016,14(4):139-140.
- [2] 杨城.隐藏在金相试样制备技术之后的科学[J].*计算机与数字工程*,2015,43(1):137-141.
- [3] 郭可信.金相学史话(1):金相学的兴起[J].*材料科学与工程*,2000(4):2-9.
- [4] 金迪.金相实验技术在金属材料研究中的应用[J].*科技视界*,2015(13):305.
- [5] 潘颖慧,潘应君,柯德庆,等.Si₃N₄晶须对原位形成Mo₂NiB₂金属陶瓷组织与性能的影响[J].*材料热处理学报*,2020,41(10):111-116.
- [6] 郑樑,李俊杰,曹崑,等.高分子材料的降噪性能评价方法[J].*工程塑料应用*,2020,48(10):106-109.
- [7] 乔桂英,肖福仁,张福成.金相实验技术课教学改革实践及体会[J].*河北大学学报(自然科学版)*,1999(S1):39-41.
- [8] 左由兵,罗宏,鲁越,等.金相试样的制备与观察实验的教学改革探讨[J].*山东化工*,2020,49(23):208-209.
- [9] 朱贺.热处理及金相实验项目对机务类学生未来职业发展影响探讨[J].*科技风*,2019(31):239.
- [10] 黄鹏,孙建林,刘亚东,等.金相实验教学标准试样的研制与应用[J].*实验室研究与探索*,2020,39(9):171-174.
- [11] 赵立娟,赵建华.依托金相大赛的金相制样实验课程教学改革[J].*高校实验室工作研究*,2018(4):17-19.
- [12] 吴腾,涂军,宋述鹏,等.基于金相大赛探索规范化实验教学[J].*实验室科学*,2019,22(6):229-231.
- [13] 石晓辉,张敏,乔珺威.全国大学生金相技能大赛:提升学生工程能力及素养的关键实践[J].*中国现代教育装备*,2020(15):101-103.
- [14] 张伯承.革新金相制样技术提高实验教学质量[J].*实验室研究与探索*,1988,7(3):94-90.
- [15] 邹允勇.谈《金相实验》教学方法[J].*海南矿冶*,1999(4):35-36.
- [16] 李长久,大森明,荒田吉明.等离子喷涂Al₂O₃涂层内粒子间结合的研究[J].*西安交通大学学报*,1994(4):1-6.

编辑 钟晓