

DOI: 10.11973/jxgccl202010013

# Cr-Mo-Ni 系和 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的组织和耐磨性能

韩丽梅, 李 丽, 田 猛

(江苏省(沙钢)钢铁研究院, 张家港 215625)

**摘 要:** 采用气体保护焊对 718 钢板进行堆焊, 对比研究了 Cr-Mo-Ni 系和 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的组织、硬度与耐磨性能。结果表明: 2 种药芯焊丝堆焊层均与母材熔合良好, 无焊接缺陷; Cr-Mo-Ni 系药芯焊丝堆焊层的显微组织由马氏体和少量残余奥氏体组成, Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的显微组织由细小马氏体、较多铁素体、极少残余奥氏体组成, 铁素体内有碳化物析出; Cr-Mo-Ni 系药芯焊丝堆焊层的平均硬度为 571 HV, 高于 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的 (519 HV); 2 种药芯焊丝堆焊层的耐磨性能均优于母材的, 且 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的耐磨性能优于 Cr-Mo-Ni 系药芯焊丝堆焊层的, 这与 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝中的钨、钒元素可促进堆焊层中晶粒的细化与耐磨碳化物的形成有关。

**关键词:** 堆焊层; 药芯焊丝; 耐磨性能; 显微组织

中图分类号: TG457.11

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2020)10-0062-05

## Microstructure and Wear Resistance of Cr-Mo-Ni and Cr-Mo-W-V Flux Cored Wire Surfacing Layers

HAN Limei, LI Li, TIAN Meng

(Institute of Research of Iron and Steel, Jiangsu Province and Sha Steel, Zhangjiagang 215625, China)

**Abstract:** 718 steel plate was welded by gas shielded surfacing, and the microstructure, hardness, and wear resistance of Cr-Mo-Ni and Cr-Mo-W-V flux cored wire surfacing layers were studied. The results show that the two flux cored wire surfacing layers without weld defects were well fused with the base metal. The microstructure of Cr-Mo-Ni flux cored wire surfacing layer was mainly composed of martensite and a small amount of retained austenite. The microstructure of Cr-Mo-W-V flux cored wire surfacing layer mainly consisted of fine martensite, much ferrite and very little retained austenite, and carbides precipitated in ferrite phase. The average hardness of the Cr-Mo-Ni flux cored wire surfacing layer was 571 HV, which was higher than that of Cr-Mo-W-V flux cored wire surfacing layer (519 HV). The wear resistance of the two flux cored wire surfacing layers was better than that of the base metal, and the wear resistance of Cr-Mo-W-V flux cored wire surfacing layer was the best, because the elements of tungsten and vanadium in the microstructure of Cr-Mo-W-V flux cored wire surfacing layer improved the grain refinement and wear resistance carbide precipitation.

**Key words:** surfacing layer; flux cored wire; wear resistance; microstructure

## 0 引 言

热轧连机组卷曲侧导板装置在冷热交替、复杂应力、滑动摩擦条件下服役一段时间后, 其工作表面

会出现磨损、断裂等问题。为降低侧导板的生产成本并延长使用寿命, 常采用堆焊、激光熔敷等表面技术对失效工作表面进行修复<sup>[1-2]</sup>; 修复后的工作表面能够具有较高的高温强度、良好的韧性与耐磨性能。目前, 国内用于堆焊修复的焊接材料主要有 Cr-Mo 系列焊条和药芯焊丝, 其中药芯焊丝因合金成分调整方便、熔敷效率高等优点而在实际生产中得到更

收稿日期: 2019-11-20; 修订日期: 2020-09-04

作者简介: 韩丽梅(1991—), 女, 辽宁盘锦人, 工程师, 硕士

广泛的应用<sup>[3-5]</sup>,其合金体系主要包括 Cr-Mo-V、Cr-Mo-Nb、Cr-Mo-Ni、Cr-Mo-Ni-W、Cr-Mo-W-V 等。部分学者指出,高硬度的堆焊金属并不一定具有优良的耐磨性能,耐磨性受堆焊层金属中合金元素种类和含量、显微组织粗细和均匀性、硬质相形态和分布等因素的综合影响<sup>[6-9]</sup>。Cr-Mo-Ni 系和 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝是基于国外同类焊丝同步开发的堆焊药芯焊丝,所获得的堆焊层具有耐磨性能良好、成本较低等特点,但有关这 2 种药芯焊丝在卷曲侧导板堆焊修复方面的研究及应用相对较少。因此,作者选用 Cr-Mo-Ni 系和 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝对卷取侧导板用 718 钢进行堆焊,对比研究了 2 种药芯焊丝堆焊层的显微组织、硬度及耐磨性能,并探讨了耐磨性能的影响因素,拟为这 2 种

药芯焊丝在卷曲侧导板堆焊修复中的应用提供理论基础。

## 1 试样制备与试验方法

试验用母材为尺寸 300 mm×200 mm×60 mm 的 718 钢板,堆焊采用的焊丝为 Cr-Mo-Ni 系和 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝,直径均为 1.6 mm,母材和药芯焊丝的化学成分见表 1。在母材上开 U 型坡口,打磨清除坡口两侧各 30~50 mm 范围内的铁锈、油脂等。采用 Power Wave 455M/STT 型焊机进行焊前无预热及焊后无热处理的气体保护堆焊,焊接电流为 320~350 A,焊接电压为 30~36 V,保护气体为 20%(体积分数,下同)CO<sub>2</sub>+80%Ar,气体流量为 12~20 L·min<sup>-1</sup>,焊丝干伸长为 18~20 mm。

表 1 母材和焊丝的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of base metal and flux cored wires (mass)

材料	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	W
母材	0.28~0.40	0.60~1.00	0.20~0.80	1.40~2.00	0.80~1.20	0.30~0.55	—	—
Cr-Mo-Ni 系焊丝	0.10~0.20	0.50~1.00	0.50~1.00	9.00~10.00	1.50~2.00	2.00~3.00	—	—
Cr-Mo-W-V 系焊丝	0.10~0.25	0.50~1.00	0.50~1.00	5.00~7.00	—	2.00~3.00	0.30~1.00	1.50~3.00

在堆焊层处截取金相试样,经粗磨、细磨、抛光,用由 1.5 g CuCl<sub>2</sub>, 33 mL HCl, 33 mL H<sub>2</sub>O 组成的 1 号卡琳腐蚀剂腐蚀后,采用 ZEISS SIGMA 型场发射扫描电镜(SEM)观察显微组织,并采用 SEM 附带的能谱仪(EDS)进行微区成分分析。采用 Nano Indenter G200 型纳米压痕仪对堆焊层不同组织处的硬度进行测试;采用 Tukon 2500 型全自动维氏硬度计由堆焊层中心向两侧取点进行硬度测试,载荷为 49 N,保载时间为 10 s。在堆焊层处截取尺寸为  $\phi 4.8$  mm×12.7 mm 的小圆柱销试样,采用 MMW-1 型立式万能摩擦磨损试验机进行干摩擦磨损试验,对磨盘为尺寸  $\phi 31.7$  mm× $\phi 16$  mm×10 mm 的淬火 45 钢,试验载荷为 200 N,摩擦转速为 300 r·min<sup>-1</sup>,摩擦时间为 30 min;试验后,用酒精超声清洗试样,采用场发射扫描电镜观察磨损形貌。使用精度 0.1 mg 的电子天平称取磨损前后试样的质量,通过计算单位长度滑动距离的磨损量,即磨损率来表征材料的耐磨性能,计算公式为

$$v = (m_t - m_0) / l \quad (1)$$

式中: $v$  为试样的磨损率,g·m<sup>-1</sup>;  $m_t$  为试样磨损后的质量,g;  $m_0$  为试样磨损前的质量,g;  $l$  为试验过程中试样的滑动距离,m。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 宏观形貌

由图 1 可知,采用 Cr-Mo-Ni 系和 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝对母材进行堆焊后,堆焊层均与母材熔合良好,未发现气孔、夹渣、裂纹等焊接缺陷。

### 2.2 显微组织

由图 2 可以看出:Cr-Mo-Ni 系药芯焊丝堆焊层的显微组织由马氏体和少量残余奥氏体组成,其中残余奥氏体呈长条状、小圆块状分布在马氏体板条之间;Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的显微组织由马氏体、较多铁素体、极少残余奥氏体组成,其中铁素体和奥氏体分别呈长条状和小圆块状分布在马氏体板条之间,同时铁素体相内伴有细小的块状和球状碳化物析出。与 Cr-Mo-Ni 系药芯焊丝堆焊层相比,Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层组织中的马氏体板条更细小,板条间距更小,且板条无方向性,晶界角度多为大角度。Cr-Mo-Ni 系药芯焊丝与 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝均为高合金体系焊丝,在快速连续冷却的堆焊过程中,主要发生非扩散性马氏体相变,因此堆焊层基体的显微组织主要为马氏体。同时,焊接是一个非平衡凝固结晶过程,具有不同合金体系的两种药芯焊丝的焊接熔池会发生非平衡元素扩

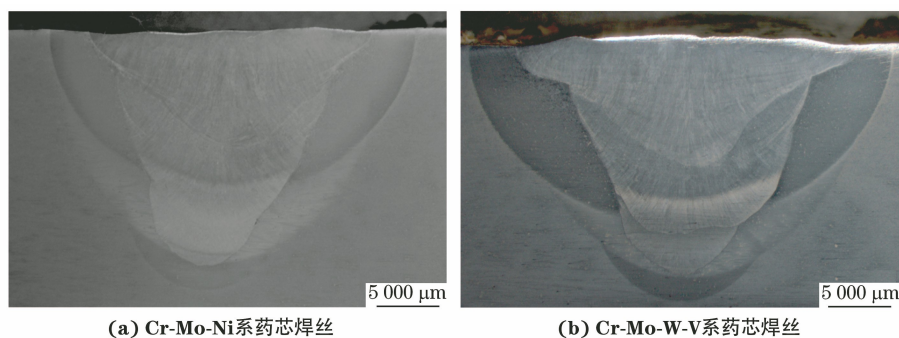


图 1 不同药芯焊丝堆焊层的宏观形貌

Fig. 1 Macroscopic morphology of different flux cored wire surfacing layers: (a) Cr-Mo-Ni flux cored wire and (b) Cr-Mo-W-V flux cored wire

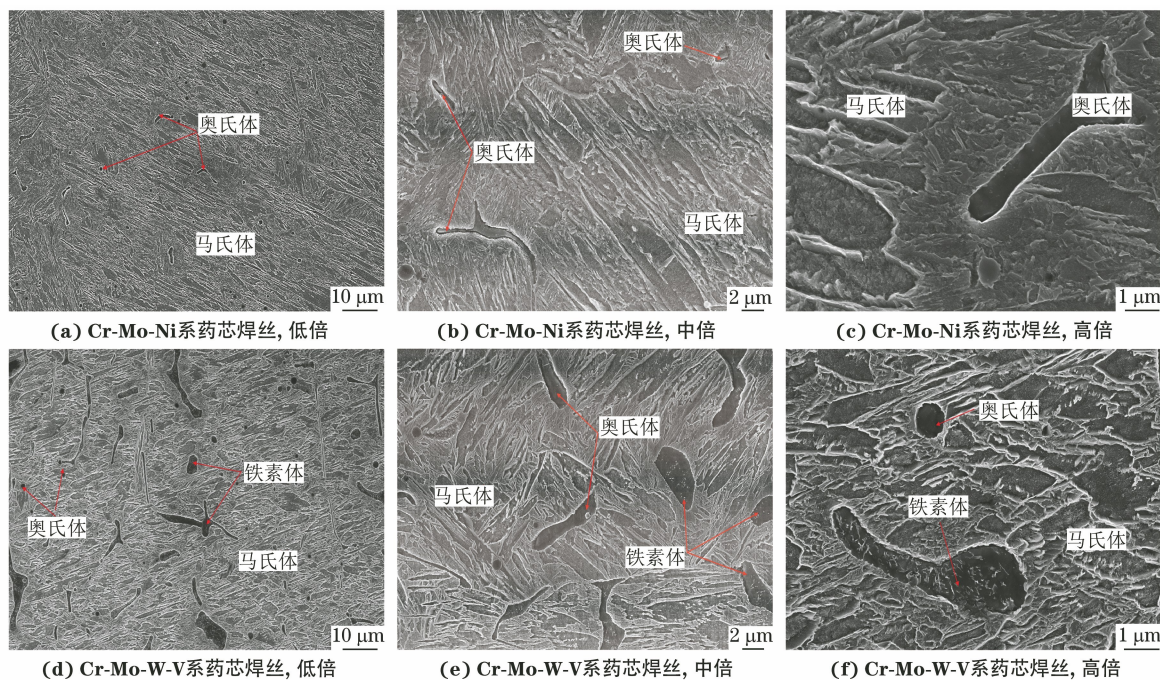


图 2 不同药芯焊丝堆焊层的显微组织

Fig. 2 Microstructures of different flux cored wire surfacing layers: (a) Cr-Mo-Ni flux cored wire, at low magnification; (b) Cr-Mo-Ni flux cored wire, at medium magnification; (c) Cr-Mo-Ni flux cored wire, at high magnification; (d) Cr-Mo-W-V flux cored wire, at low magnification; (e) Cr-Mo-W-V flux cored wire, at medium magnification and (f) Cr-Mo-W-V flux cored wire, at high magnification

散、溶质再分配、多种相变等过程,导致堆焊层呈现不同的组织形态。

2 种药芯焊丝的主要合金元素铬、钼、镍、钨、钒均可降低马氏体开始转变温度,推迟马氏体相变,使残余奥氏体数量增多;而同时铬、钼、钨、钒作为强碳化物形成元素,易形成难溶于奥氏体的合金碳化物,促进残余奥氏体转变分解,使残余奥氏体量减少。图 3 中点 1 和点 3 位于奥氏相上,点 2 位于铁素体+碳化物上。由图 3 和表 2 可知,在 Cr-Mo-Ni 系药芯焊丝中,奥氏体形成元素镍提高了富碳奥氏体的稳定性,少量富碳奥氏体在相变过程中未发生转变分解而被保留下来,以残余奥氏体的形态分布在马氏体板条中;Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝中

的钨、钒元素能够促使在相变过程中富碳奥氏体发生非平衡溶质再分配,钨、钒与碳元素结合而析出合金碳化物,导致大部分富碳奥氏体转变成铁素体+碳化物,只有极少部分富碳奥氏体未发生转变而保留下来。

### 2.3 硬度

由图 4 可以看出:Cr-Mo-Ni 系药芯焊丝堆焊层的硬度远高于 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的,二者的平均硬度分别为 571,519 HV。2 种药芯焊丝堆焊层的硬度产生较大差异的原因在于合金体系的不同使得各堆焊层具有不同的组织形态及含量。Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层中的马氏体板条间分布着数量较多的铁素体+碳化物;采



图3 不同药芯焊丝堆焊层的 EDS 分析位置

Fig.3 EDS analysis positions of different flux cored wire surfacing layers: (a) Cr-Mo-Ni flux cored wire, austenite; (b) Cr-Mo-W-V flux cored wire, ferrite and carbide and (c) Cr-Mo-W-V flux cored wire, austenite

表2 图3中不同位置的 EDS 分析结果(质量分数)

Table 2 EDS analysis results of different positions in Fig.3 (mass) %

位置	C	Si	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	W
1	3.56	0.78	0	10.25	0.69	78.35	1.20	5.17	0
2	1.61	0.70	1.60	6.45	0.61	80.55	0	5.19	3.29
3	2.09	0.72	0.75	6.18	1.05	82.31	0	3.93	2.97

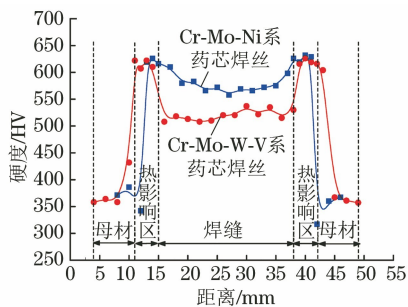


图4 不同药芯焊丝堆焊层的硬度分布曲线

Fig.4 Hardness distribution curves of different flux cored wire surfacing layers

用纳米压痕仪测得铁素体+碳化物、残余奥氏体、马氏体的平均硬度分别为 2.88, 3.92, 7.01 GPa, 可知铁素体+碳化物的硬度低于马氏体和残余奥氏体的。因此, 由马氏体和少量残余奥氏体组成的 Cr-Mo-Ni 系药芯焊丝堆焊层的硬度高于主要由马

氏体、铁素体+碳化物和极少残余奥氏体组成的 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的。

## 2.4 耐磨性能

母材、Cr-Mo-Ni 系和 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的磨损率分别为  $11.8587 \times 10^{-8}$ ,  $3.6415 \times 10^{-8}$ ,  $2.9707 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$ 。可知, 与母材相比, 药芯焊丝堆焊层具有良好的耐磨性能, 且 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的耐磨性能优于 Cr-Mo-Ni 系药芯焊丝堆焊层的。Cr-Mo-Ni 系药芯焊丝堆焊层的硬度比 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的高, 说明在不同合金体系中, 材料的高硬度不是评判高耐磨性的唯一标准。

由图 5 可知, Cr-Mo-Ni 系和 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的磨损机制均主要以黏着磨损为主, 磨粒磨损为辅。Cr-Mo-Ni 系药芯焊丝堆焊层的磨损表面较平整, 塑性变形较小, 局部存在较浅的犁沟, 并伴有较多的金属黏着; 而 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的磨损表面较粗糙, 塑性变形较大, 表面均匀分布着犁沟, 并伴有少量的金属黏着与脱落。在 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层中, 钨、钒元素的加入可细化晶粒组织, 使堆焊层获得板条间距细小、无方向性的马氏体基体组织; 钨、钒与碳元素在铁素

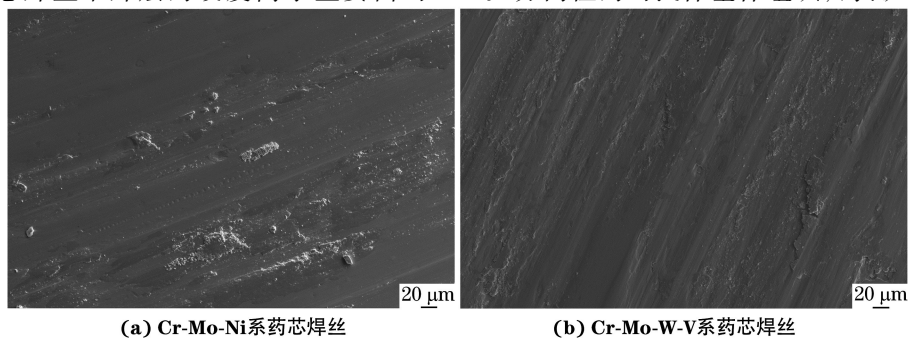


图5 不同药芯焊丝堆焊层的磨损形貌

Fig.5 Wear morphology of different flux cored wire surfacing layers: (a) Cr-Mo-Ni flux cored wire and (b) Cr-Mo-W-V flux cored wire

体组织中结合而弥散析出大量的碳化物,在干滑动摩擦过程中铁素体组织中弥散析出的合金碳化物可作为硬质相起到耐磨质点的作用,而强韧性较好的板条马氏体组织又为合金碳化物提供良好的支持。在载荷和摩擦热的作用下,具有这种组织的 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层虽然会产生较大的塑性变形,但不易发生大面积撕裂脱落,因此 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的磨损率较低。综上所述,堆焊层的耐磨性能取决于合金元素体系,是基体组织形貌、含量、性能,硬质相含量、形态、分布、性能等综合作用的结果,其中硬质相的固有性能是保证堆焊层具有良好耐磨性能的重要原因之一。

### 3 结 论

(1) Cr-Mo-Ni 系药芯焊丝堆焊层的显微组织由马氏体和少量残余奥氏体组成,Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的显微组织由马氏体、较多铁素体和极少残余奥氏体组成,铁素体内存在细小的块状和球状碳化物;与 Cr-Mo-Ni 系药芯焊丝堆层相比,Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层中马氏体板条更细小,板条间距更小,且板条无方向性。

(2) Cr-Mo-Ni 系药芯焊丝堆焊层的硬度高于 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的,其耐磨性能比 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的差;Cr-Mo-Ni 系和 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层的磨损机制均主要以黏着磨损为主、磨粒磨损为辅;Cr-Mo-W-V 系

药芯焊丝中的钨、钒元素可细化马氏体组织,同时可与碳元素形成难溶于奥氏体的合金碳化物,促进富碳奥氏体分解成铁素体与碳化物,碳化物作为硬质相具有较高的耐磨性,使得 Cr-Mo-W-V 系药芯焊丝堆焊层具有更优异的耐磨性能。

### 参考文献:

- [1] 卢静,李勇,欧阳航,等.我国堆焊复合技术的应用与发展[J].世界有色金属,2018(10):195-197.
- [2] DUCHOSAL A, DESCHAUX-BEAUME F, LOURS P, et al. Analysis of weld-cracking and improvement of the weld-repair process of superplastic forming tools[J]. Materials & Design, 2013, 46: 731-739.
- [3] 方建筠,栗卓新,魏琪,等.马氏体时效钢金属粉芯焊丝堆焊层的性能[J].焊接学报,2006,27(5):77-80.
- [4] 封江坤,贺定勇,周正,等.热作模具用 Fe-Cr-Mo-Ni-W 气保护堆焊药芯焊丝的研制[J].热加工工艺,2016,45(21):224-226.
- [5] 肖君,王国红,周正,等. W 对 Fe-Cr-Mo-W-V 热锻模具堆焊合金组织与性能的影响[J].焊接,2016(11):45-49.
- [6] 刘政军,宋兴奎,唐兴涛.异种材质堆焊层组织及耐磨性[J].焊接学报,2011,32(4):99-102.
- [7] 彭思源,朱绍峰,刘露,等.合金元素对药芯焊丝堆焊层组织和性能的影响[J].热加工工艺,2015(7):32-35.
- [8] KIMAPONG K, POONAYOM P, WATTANAJITSIRI V. Microstructure and wear resistance of hard-facing weld metal on JIS-S50C carbon steel in agricultural machine parts[J]. Materials Science Forum, 2016, 872: 55-61.
- [9] MOORE M A. The relationship between the abrasive wear resistance, hardness and microstructure of ferritic materials [J]. Wear, 1974, 28(1): 59-68.

## 中文核心期刊《机械工程材料》2021 年征订启事

《机械工程材料》杂志创刊于 1977 年,由上海材料研究所主办,为中国机械工程学会材料分会会刊,是国内外公开发行的有关工程材料研究与生产应用的专业技术期刊,是中文核心期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中国核心学术期刊、《中国学术期刊影响因子年报》统计源期刊。

《机械工程材料》杂志报道内容涵盖金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料以及复合材料等传统及新型工程材料的最新研究及应用成果,主要栏目有综述、试验研究、新材料新工艺、材料性能及应用、纳米材料、残余应力、物理模拟与数值模拟、失效分析等,可供从事与材料生产研究相关的研发与技术人员阅读参考。近年来,《机械工程材料》杂志抓住国内外研究热点,推出了“先进陶瓷材料”“物理模拟与数值模拟”“先进复合材料”“电子陶瓷”“增材制造”等专题报道,受到了广大读者的欢迎。

《机械工程材料》杂志为大 16 开,每期 100 页以上,每月

20 日出版,国际标准连续出版物号为 ISSN 1000-3738,国内统一连续出版物号为 CN 31-1336/TB,国际期刊刊名代码(CONDEN)为 JGCAEL。国内各地邮政局(所)或本刊发行部均可订阅,邮发代号 4-221,发行价 22 元/册,264 元/年,可以破季破年订阅;本刊发行部还提供电子期刊订阅服务,电子期刊为 PDF 格式,通过 E-mail 发送给读者,订阅价为 90 元/年,比邮购费用低一半,且比邮局发行快 10 天左右。

### 欢迎订阅! 欢迎投稿! 欢迎刊登广告!

投稿网址: <http://www.mat-test.com/Submission>

联系地址:上海市虹口区邯郸路 99 号。邮编:200437

编辑部: 021-65556775-368, 021-65541496

mem@mat-test.com

发行部: 021-65556775-311, 021-65527634

wm@mat-test.com

广告部: 021-65556775-319, 021-65544943

admem@mat-test.com