

包 Al 层聚集对搅拌摩擦焊接头力学性能的影响 *

康 旭 史清宇 孙 凯

(清华大学机械工程系先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

王 鑫

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘 要 通过拉伸以及三点弯曲实验, 研究了底部包 Al 层聚集现象对搅拌摩擦焊接头力学性能的影响. 利用 OM, SEM 和 EDS 分析了底部包 Al 层聚集现象降低接头力学性能的原因. 实验结果表明: 焊接前未去除包 Al 层的试样, 其抗拉和抗弯强度要比焊前或者焊后去除包 Al 层的试样低. 焊接过程中, 焊缝底部平铺的包 Al 层在搅拌头的作用下, 被流动的金属材料挤到了洋葱环的两侧, 并在底部产生聚集. 由于包 Al 层的力学性能较差, 聚集的位置成为了接头中力学性能薄弱的区域. 在受到拉应力作用时, 聚集的包 Al 层首先发生断裂, 形成接头中的微裂纹. 在拉应力的持续作用下进而扩展成宏观裂纹, 诱导接头过早断裂.

关键词 搅拌摩擦焊, 包 Al 层, 力学性能, 微观组织

中图分类号 TG453

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2010)12-1517-05

INFLUENCES ON MECHANICAL PROPERTIES OF FRICTION STIR WELDED JOINTS BY Al CLAD ACCUMULATION

KANG Xu, SHI Qingyu, SUN Kai

Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

WANG Xin

Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084

Correspondent: SHI Qingyu, professor, Tel: (010)62784578, E-mail: shqy@tsinghua.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.50875146)

Manuscript received 2010-06-10, in revised form 2010-08-17

ABSTRACT Friction stir welding (FSW) is increasingly used in joining the high strength aluminum alloys. Compared to traditional fusion welding methods, one of advantages of FSW is to obtain defect-free joints more easily. Besides the forms of FSW tools and welding parameters, certain characteristics of the base material can also affect the quality of welded joints. There is usually a protective layer on aluminum alloy surface to prevent corrosion, called Al clad. Generally the mechanical properties of Al clad are significantly lower than those of the base metal. In this paper, tensile and three-point bending tests were applied to investigate the influence of accumulated Al clad on mechanical properties of joints. The mechanism of reducing the mechanical properties of joints, caused by the accumulated Al clad was analyzed by OM, SEM and EDS. The results show that the mechanical properties of the welded joints are lower than those of the joint with which the bottom Al clad on the base material is removed before or after welding. The Al clad tiled on bottom of the base material is squeezed to both sides of the onion ring in the role of the FSW tool and gathered in the bottom after welding. Due to the poorer mechanical properties of Al clad than the base metal, the Al clad aggregation positions become the weak areas in the joints, leading to the formation of the micro cracks in the joints under tensile stress where the micro cracks continue extending to generate macro cracks under the continuous

* 国家自然科学基金资助项目 50875146

收到初稿日期: 2010-06-10, 收到修改稿日期: 2010-08-17

作者简介: 康 旭, 男, 1985 年生, 硕士生

DOI: 10.3724/SP.J.1037.2010.00276

tensile stress. This is the main reason of joint breaking more easily under low stress.

KEY WORDS friction stir welding, Al clad, mechanical properties, microstructure

搅拌摩擦焊 (FSW) 作为一种固相连接技术, 已经在焊接领域发挥出了重要作用^[1,2]. 铝合金由于其自身特点, 传统熔化焊接方法不易得到质量优良的接头, 特别是 2XXX 系 Al-Cu 合金以及 7XXX 系 Al-Zn 合金. FSW 在这方面恰恰能够很好地避免熔化焊接中出现的各种不利因素^[2]. 因此, 采用 FSW 方法稳定地获得性能优异的焊接接头具有重要的工程价值, 也是目前研究的热点.

国内外已经有不少学者对各种铝合金的焊接性进行了细致的研究^[3-10]. 其中研究的重点主要集中在了焊接工艺对于接头成型的影响以及对接头力学性能的影响方面. Elangovan 和 Balasubramanian^[11] 研究了不同的搅拌针形式以及轴肩直径对于接头成型的影响, 找到了一种相对优化的搅拌头形式. Lombard 等^[5] 研究了搅拌头转速以及焊接速度对接头力学性能的影响, 指出搅拌头转速对于搅拌摩擦焊是一个决定性的工艺参数. 除了搅拌头形式以及焊接工艺对接头会有影响之外, 也有学者^[12-14] 指出, 在焊接铝合金时, 母材表面的包 Al 层同样会对接头的力学性能产生影响. 柯黎明等^[12] 对包 Al 层卷入接头内部的原理进行了分析, 提出改变搅拌针的形状和长度会改变搅拌摩擦焊底部的成形, 进而改变包 Al 层进入焊缝的深度. 董春林等^[13] 研究了包 Al 层对焊缝电化性能的影响, 发现包 Al 层的存在可以起到较好的防护作用. 严铿等^[14] 通过实验证明了包 Al 层的存在会对接头抗拉强度产生不利影响, 并且下表面的包 Al 层相对于上表面的包 Al 层影响程度更大. 目前国内外对于包 Al 层影响接头性能的研究较少, 基本集中在包 Al 层对性能的影响方面, 并没有从微观上详细论述影响接头力学性能的原因.

由于在接头的金相组织观察中, 并没有发现接头上表面包 Al 层进入焊缝内部的现象, 经分析认为, 由于轴肩的搅拌、破碎等作用, 使得上表面的包 Al 层弥散地分布在焊缝中, 相对于底部包 Al 层对接头的力学性能影响较小^[14,15], 故在本文中未对上表面的包 Al 层进行讨论. 本文通过实验, 证明了接头底部包 Al 层的聚集现象会降低接头的抗拉性能和抗弯性能, 并且通过对比不同接头的金相组织、拉伸断口以及弯曲断口组织, 解释了包 Al 层的聚集造成力学性能下降的原因. 由于底部包 Al 层聚集的现象与被焊材料的流动有着紧密的联系, 本文结合相关文献讨论了底部包 Al 层聚集产生的原因.

1 实验方法

实验所用材料为 7A52 铝合金, 其上下表面均有一层

由 Al 和 Zn 元素构成的包 Al 层, 厚度约为 0.2 mm. 其具体成分 (质量分数, %) 为: Fe 0.26, Si 0.11, Mn 0.25, Cu 0.13, Mg 2.46, Ni 0.05, Cr 0.17, Zn 4.71, Ti 0.06, Zr 0.08, Al 余量.

选取 7A52 板材的规格为 150 mm×75 mm×6 mm, 沿板材长度方向进行焊接. 焊接参数如下: 搅拌头转速为 1100 r/min, 焊接速度为 100 mm/min, 轴向控制参数为下压量, 并且下压量固定为 0.5 mm, 焊接时倾角为 2.5°. 搅拌头采用锥形带螺纹搅拌针, 轴肩直径 20 mm, 搅拌针根部直径 7 mm, 端部直径 4 mm. 第 1 组试样焊接前后均未去除包 Al 层 (No.1), 第 2 组试样焊前用砂纸打磨去除板材底面包 Al 层 (No.2), 第 3 组试样焊后采用铣床去除底面包 Al 层 (No.3). 每组试样做 3 次实验, 文中的实验数据均为 3 次实验的平均值. 考虑到焊后包 Al 层会进入焊缝内部, 所以先通过金相观察方法找出底部包 Al 层最大的卷入深度, 然后控制铣床将被卷入的包 Al 层部分完全铣除. 焊接采用专用的搅拌摩擦焊设备, 焊后按照国家标准在焊缝中部截取拉伸、三点弯曲试样进行力学性能测试, 实验机为 WDW 电子万能试验机. 采用 HIROX 三维光学显微镜 (OM) 对焊缝截面金相进行观察, 采用 JSM-6064LV 扫描电子显微镜 (SEM) 对拉伸以及弯曲断口进行观察.

2 实验结果与分析

2.1 力学性能

在固定焊接参数 (搅拌头转速 1100 r/min, 焊接速度 100 mm/min) 的情况下, No.1—No.3 试样的抗拉强度分别为 370, 390 和 395 MPa; 分别为母材的 80.4%, 84.7% 和 85.8%. 通过对比发现, 焊前去除包 Al 层 (No.2) 与焊后去除包 Al 层 (No.3) 均有利于得到拉伸性能更加优良的接头.

在拉伸实验的基础上对 3 组试样进行了三点弯曲实验. 由于包 Al 层聚集发生在焊缝的下表面, 所以采用背弯的弯曲形式. 实验测得 No.1—No.3 试样的抗弯强度分别为 651, 720 和 727 MPa. 可见, 包 Al 层的聚集会对三点弯曲的实验结果产生较大影响; 不论焊前还是焊后去除底部的包 Al 层, 抗弯强度均有明显的提升, 平均比 No.1 试样高 10% 左右. 通过三点弯曲实验可知, No.1 试样在弯曲角度约 35° 时出现明显的裂纹, No.3 试样弯曲 90° 以上时仍不出现裂纹 (图 1). 观察背弯后的试样, 发现 No.1 试样的焊缝底部存在明显的直线型裂纹, 裂纹的位置恰好对应包 Al 层聚集处, 而 No.3 试样的焊缝底部裂纹基本处于焊缝中部位置, 如图 2 所示.

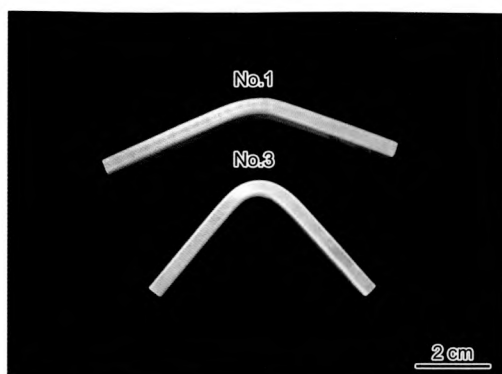


图 1 弯曲实验后 No.1 和 No.3 接头照片

Fig.1 Photo after bending test for ordinary joint (sample No.1) and Al clad removed after welding (sample No.3)

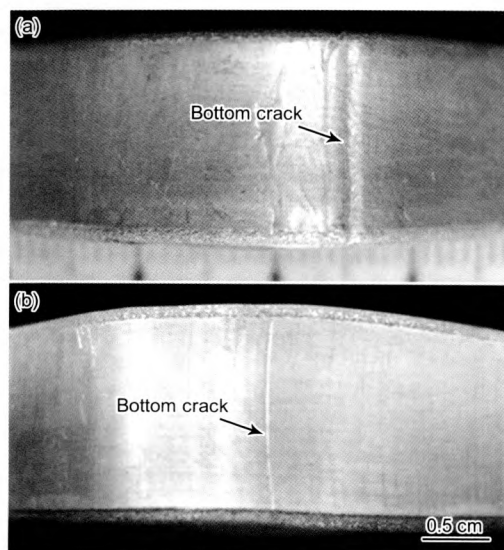


图 2 弯曲实验后 No.1 和 No.3 接头的底面裂纹形貌

Fig.2 Photos of cracks in the bottom of samples No.1 (a) and No.3 (b) after bending test

2.2 OM 观察

通过化学腐蚀的方法, 可以很好地观察到焊缝截面中包 Al 层的分布形态. 通常, 包 Al 层在腐蚀后呈现亮白色. 将 No.1 和 No.2 试样进行抛光腐蚀, 通过 OM 观察发现, 2 者在焊缝底部有较大区别 (图 3). 由图 3a 可见, No.1 试样的底部存在明显的白色亮带, 在洋葱环底部两侧, 产生了包 Al 层的聚集, 洋葱环正下方包 Al 层较薄. 洋葱环底部两侧包 Al 层聚集的程度不同, 在焊缝的前进侧, 包 Al 层聚集程度较大. 这种现象是造成搅拌摩擦焊接头容易在前进侧断裂的原因之一. 相比之下, 可以发现图 3b 中, No.2 试样的洋葱环底部两侧并没有观察到包 Al 层的聚集现象.

由于母材是经过轧制而成, 所以在焊后通过轧制流线可以观察到焊缝中金属的流动状态. 底部包 Al 层聚集的现象与焊接过程中被焊材料的流动有着密不可分的联系.

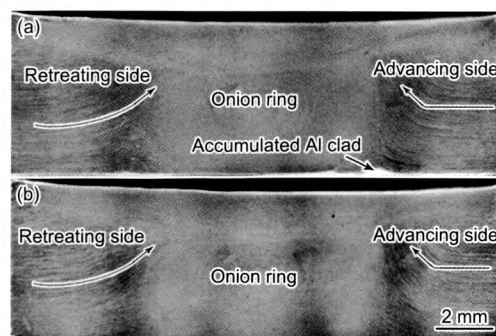


图 3 No.1 和 No.2 接头的横截面 OM 像

Fig.3 OM photos of a cross section of sample No.1 (a) and Al clad removed before welding (sample No.2) (b)

柯黎明等^[12]认为, 距离底面较近的平端面搅拌针相对于距离底面较远的球端面搅拌针更容易造成底部包 Al 层的聚集. 本实验所使用的搅拌针属于平端面, 易于造成底部包 Al 层的聚集. 由于板厚以及搅拌针长度、下压量一定, 由此确定搅拌针的平端面与垫板的距离为 0.3 mm, 几乎紧贴垫板. 以上 2 个条件完全满足文献 [12] 中的描述.

在搅拌头旋转过程中, 由于螺纹的存在, 带动搅拌针周围的金属材料不断地向下流动. 当向下流动的金属遇到垫板后受到阻碍, 金属流动方向发生改变, 沿着搅拌针的两侧向后流动^[2,16]. 同时, 一部分金属材料遇到周围未受到搅拌作用的金属, 流动同样受到阻碍, 进而促使两股金属向上流动^[12,17]. 图 3 中洋葱环两侧向上弯曲的轧制流线便是最好的证据: 由于受到被搅拌针带向下方的金属的挤压作用, 本来未受到搅拌头直接作用的一部分材料随着金属流向上运动. 由此可见, 在这种流动状态下, 焊缝底面平铺的包 Al 层被两股金属流挤向了接头的中部, 并在洋葱环的两侧聚集, 最终产生了图 3a 所示的白色凸出的亮带.

接头弯曲后底面的照片 (图 2) 恰好符合 OM 观察的结果. 由图 2 可以看到, No.1 试样弯曲裂纹出现在焊缝底部包 Al 层聚集处, 裂纹笔直地贯穿整个截面; 而 No.3 试样弯曲裂纹出现的位置基本上处于压头的最下方, 即焊缝底部的中心处.

2.3 断口观察

通过对断口的宏观观察发现, No.1 试样的断口底部位置与包 Al 层聚集的位置相同, 并且轮廓平直, 颜色与断口其余部分有明显差异, 断口正常部分的颜色为灰色, 而断口底部位置的颜色为亮白色; No.2 和 No.3 试样的断裂位置约 2/3 出现在焊缝外 (即热影响区处), 约 1/3 出现在焊缝内部, 但位置并未与包 Al 层聚集位置重合, 断口底部轮廓为弧形, 并且整个断口面的颜色均为灰色.

图 4 和 5 给出了 No.1 试样的弯曲断口和拉伸断口 SEM 像. 可见, 无论是弯曲断口还是拉伸断口, 焊缝底部均存在光滑的暗带区域 (图 4a 和图 5). 弯曲断口的焊缝

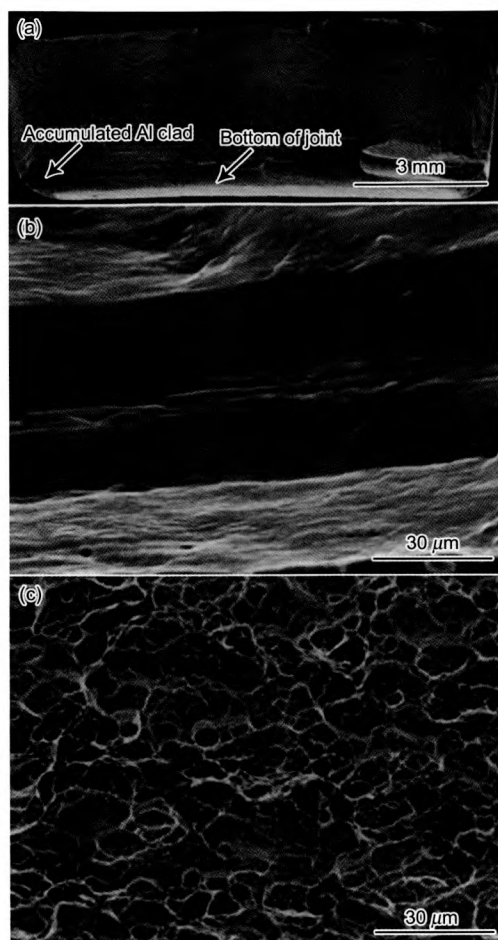


图 4 No.1 试样的弯曲断口形貌

Fig.4 Photos of bending fracture of sample No.1

- (a) cross-section of the joint
- (b) bottom of the joint where Al clad has been accumulated
- (c) middle of the joint

下部存在一条横贯整个焊缝截面的暗带, 暗带表面十分光滑 (图 4a 和 b). 将此区域放大至 1000 倍下依然只能观察到光滑的断面, 表明该区域力学性能极差. 而断口的其余区域韧窝状形貌十分明显, 并且韧窝大小均匀且较深, 撕裂棱比较明显, 表明接头的绝大部分区域塑性较好 (图 4c). 通过力学性能测试与 OM 观察结果推测, 焊缝底部的光滑暗带正是聚集的包 Al 层. 图 6 给出了 No.1 试样的弯曲断口底部 SEM 像及能谱 (EDS) 分析结果. 由 EDS 结果可知, 暗带区域成分基本为纯 Al, 其中只有 3.25% 的 Zn (质量分数) 存在 (图 6 中 A 区域), 暗带上方韧窝区域的成分正常 (图 6 中 B 区域). 以上的实验结果说明断口底部的暗带为聚集的包 Al 层.

在背弯过程中, 焊缝底部受到最大的拉应力. 由于包 Al 层在焊缝底部有 2 处明显聚集的区域, 这 2 个区域就成为了弯曲过程中焊缝最薄弱的地方. 当受到较小的拉应力时, 包 Al 层聚集处首先发生断裂, 形成如图 4b 所示的光滑断口, 随着拉应力逐渐增大, 此处应力集中愈发明显,

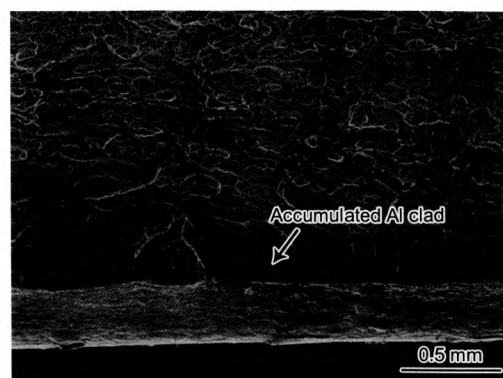


图 5 No.1 试样的拉伸断口底部 SEM 像

Fig.5 SEM image of the bottom of tensile fracture of sample No.1

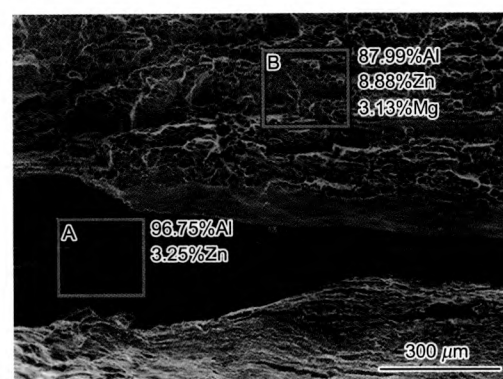


图 6 No.1 试样的弯曲断口底部 SEM 像及 EDS 结果

Fig.6 SEM image and EDS results of different positions in the bottom of bending fracture of sample No.1

微裂纹不断向内部扩展, 当拉应力达到一定程度时, 微裂纹扩展成为宏观裂纹并发生断裂. 正是由于包 Al 层聚集的存在导致了接头中过早地出现裂纹, 而这些微裂纹又诱导了断裂在相对较低的应力水平下发生. 在三点弯曲中, 由于焊缝的底面始终受到最大的拉应力作用, 所以聚集的包 Al 层使得接头的力学性能下降明显. 而在拉伸实验中, 聚集的包 Al 层降低力学性能的作用稍弱一些. 这主要是由于在拉伸过程中整个截面上都受到了同样大小的拉应力作用, 应力条件相对于背弯时不易于诱导微裂纹迅速扩展.

为了避免包 Al 层聚集对接头强度的不利影响, 可以采用焊前去除包 Al 层或焊后去除包 Al 层的方法. 这 2 种方法得到的接头, 其抗拉强度与抗弯强度基本一致. 但是去除包 Al 层的环节会增加焊接成本, 对于工业搅拌摩擦焊应用来讲是一个必须考虑的问题. 若焊前未去除包 Al 层, 焊接后包 Al 层会进入焊缝内部, 并且有可能进入深度很大, 这样会对焊后去除包 Al 层增加不必要的困难. 所以在焊前去除待焊接头的包 Al 层是一个相对合理的选择. 由于包 Al 层往往较薄 (约为 0.2 mm), 所以通过人工打磨的方法即可获得较好的去除效果.

3 结论

(1) 铝合金表面通常有一层防腐作用的包 Al 层, 搅拌摩擦焊过程中材料的流动会使得焊缝底面的包 Al 层产生聚集, 聚集的位置在洋葱环底部的两侧, 前进侧聚集程度相对更大。

(2) 包 Al 层的聚集现象造成了接头抗拉强度与抗弯强度的下降。其中未去除包 Al 层的接头抗拉强度和抗弯强度相对于去除包 Al 层的接头分别下降 5% 左右和 10% 左右。

(3) 微观组织观察表明, 焊缝底部的包 Al 层力学性能很差, 在拉应力的作用下首先形成了焊缝中的微裂纹, 这种微裂纹在受力时产生应力集中, 诱导了接头的过早失效。

参考文献

- [1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, Murch M G, Templesmith P, Dawes C J. *Gr Br Pat Appl No. 9125978.8*, 1991
- [2] Mishra R S, Ma Z Y. *Mater Sci Eng*, 2005; R50: 1
- [3] Colegrove P A, Shercliff H R. *Sci Technol Weld Join*, 2003; 8: 360
- [4] Threadgill P L, Leonard A J, Shercliff H R, Withers P J. *Int Mater Rev*, 2009; 54(2): 49
- [5] Lombard H, Hattingh D G, Steuwer A, James M N. *Eng Fract Mech*, 2008; 75: 341
- [6] Zhou P Z, Li D H, He D Q, Deng H. *Trans Chin Weld Inst*, 2007; 28(10): 5
- [7] Wang W, Shi Q Y, Li T, Li H K. *Trans Chin Weld Inst*, 2008; 29(5): 77
- [8] Zhao J J, Zhang P, Wang W X, Ma L, Hu W W. *Trans Chin Weld Inst*, 2005; 26(5): 61
- [9] Fu Z H, He D Q, Zhou P Z, Hu A W. *Trans Chin Weld Inst*, 2006; 27(5): 65
- [10] Zhou P Z, Zhong J, He D Q. *Chin J Nonferr Met*, 2006; 16: 964
- [11] Elangovan K, Balasubramanian V. *Mater Des*, 2008; 29: 362
- [12] Ke L M, Pan J L, Xing L, Wang S L. *Trans Chin Weld Inst*, 2007; 28(5): 33
- [13] Dong C L, Shen C B, Wang Z Z. *J Dalian Jiaotong Univ*, 2009; 30(6): 42
- [14] Yan K, Ma Z X, Zhang J. *J Mater Eng*, 2008; (9): 44
- [15] Sato Y S, Yamashita F, Sugiura Y, Park S H C, Kokawa H. *Scr Mater*, 2004; 50: 365
- [16] Guerra M, Schmidt C, McClure J C, Murr L E, Nunes A C. *Mater Charact*, 2003; 49: 95
- [17] Yang Q, Mironov S, Sato Y S, Okamoto K. *Mater Sci Eng*, 2010; A527: 4389

材料研究与信息交流平台 —— “材料期刊网” 正式开通

“材料期刊网”(www.jmonline.org) 由中国科学院金属研究所创建, 是中国首家材料、冶金领域研究与信息交流平台, 旨在整合共享资源, 展示最新的材料、冶金领域科研成果, 促进本领域学术交流。

● **专业覆盖全**——“材料期刊网”涵盖材料领域所有的热点, 范围包括: 钢铁材料、有色金属材料、高分子材料、先进复合材料、纳米材料及应用、薄膜与涂层、磁性材料、高温结构材料、陶瓷材料、生物医用材料、能源与环境等。

● **信息容量大**——“材料期刊网”目前收录以《金属学报》为代表的材料领域 6 种核心期刊, 全文论文数量 2 万余篇, 并将逐步吸引国内优秀材料和冶金类期刊加盟。同时提供国内知名学者和研究机构信息、本领域 SCI 热点论文、国家重点实验室等各类信息。

● **数据更新快**——即时更新加盟期刊最新论文信息。同时提供文章发表绿色通道, 对于重要科技成果, 提供网络版预发布。

● **独特便捷的检索功能**——通过作者、主题词、关键词等, 实现站内所有期刊的精确检索, 同时执行中、英文双语自动搜索。

● **精炼、整合、共享**——提供本领域内最好、最快、最热、最有用的论文(主编推荐、最新录用、高点击排行、综述栏目)。

● **超强期刊搜索引擎**——提供强大的科技期刊搜索功能, 对搜索到的文献提供全文或摘要链接、关键词链接以及参考文献交叉链接、作者关联、机构关联等。

● **个性化服务**——提供多种提醒、定制、推送文献的服务功能。可定制个人数字图书馆, 建立个性化的科研社交圈, 建立虚拟课题组, 上传发布个人专著等, 还可开通专家空间以及博客。

● **投稿指南**——提供期刊的影响因子、退稿率、审稿周期、发表周期等指标供作者投稿时参考。