激光熔覆层裂纹问题的研究进展

李广琪[1]，王丽芳[2]，赵 亮[1]，朱刚贤[1]，石世宏[1]

(1. 苏州大学 机电工程学院，江苏 苏州 215021；2. 苏州大学 工程训练中心，江苏 苏州 215021)

摘 要：从激光熔覆层裂纹的产生机制、影响因素、控制措施及外力辅助调控等方面，总结了控制裂纹产生的主要措施，可为因内应力造成零件易于开裂的难题提供借鉴。同时，对未来控制熔覆层裂纹问题的发展进行了展望。

关键词：激光熔覆；裂纹；内应力；调控方法

DOI: 10.14158/j. cnki. 1001–3814. 20192189

中图分类号：TG174.44 文献标识码：A 文章编号：1001-3814(2021)16-0013-05

Research Progress on Crack Problem of Laser Cladding Layer

LI Guangqi[1], WANG Lifang[2], ZHAO Liang[1], ZHU Gangxian[1], SHI Shihong[1]

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China; 2. Center of Engineering Training, Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract: From the aspects of crack generation mechanism, influencing factors, control measures and auxiliary control of external force, the main measures to control crack generation were summarized. It can be used for reference for the difficult problem that parts are easy to crack caused by internal stress. At the same time, the development of controlling crack problem of cladding layer in the future was prospected.

Key words: laser cladding; crack; inner stress; regulation method

激光熔覆技术是利用高能量密度的激光束为热源，将基体上的涂层材料和基体表面一薄层同时熔化，并快速凝固，显著改善基层表面的耐磨、耐热及抗氧化等特性的工艺方法[1]，与堆焊等其他工艺方法相比，激光熔覆具有变形程度低、组织致密、基材与涂层结合效果良好等优势[2]。然而，激光熔覆是一个急冷急热的快速作用过程，堆叠过程中热量分布不均极容易造成较大的温度梯度，从而形成不均匀的温度场，在随后的快速凝固及冷却中将产生内应力，内应力来不及释放，在最终的成形零件中会形成残余应力。残余应力作为一种有害的内应力，将直接影响熔覆层的力学性能及尺寸的稳定性，严重时将直接导致裂纹缺陷[3-4]。开裂问题已成为长期制约激光熔覆技术发展和应用的瓶颈[5]。

本文首先从分析激光熔覆层裂纹产生机理开始，其次阐述激光熔覆层裂纹问题的研究现状，最后总结控制裂纹产生的防止措施，为解决内应力造成零件易于开裂的难题提供借鉴，同时对未来控制熔覆层裂纹问题的发展进行了展望。

收稿日期：2019-07-19

基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFB1100300)；苏州市科技计划项目(SYG201643)

作者简介：李广琪(1995–)，男，山西长治人，硕士研究生，主要研究方向：激光快速成形技术；电话：15581745250；E-mail:1183695769@qq.com

通讯作者：王丽芳(1979–)，女，陕西合阳人，实验师，硕士，主要研究方向：激光快速成形技术及数值模拟；E-mail:lfwang@suda.edu.cn

1 激光熔覆层裂纹产生机理

激光熔覆过程是一个急热急冷的过程，高能量密度的激光束作用在基材表面产生熔池，同时将送入熔池的金属粉末熔化，随后在快速凝固的过程中，液态熔池冷却收缩会受到周围较冷基材的束缚，在熔覆层内部产生内应力，若内应力没有及时调控释放，就易造成裂纹缺陷。这种残余内应力主要来源于热应力[6]。热应力的产生主要是由于基材与熔覆层材料之间热物理性能差异较大，受激光辐照后产生了较大的温度梯度，这种温度梯度造成基材和熔覆层体积膨胀速率不一致，结果产生热应力。由文献[7]可知，裂纹的产生必须满足以下临界条件：

$$\delta_{max}<\varepsilon_f \quad (1)$$

式中：δ_{max} 为最大塑性应变；ε_f 为热应力产生的应变。即当熔覆层局部区域的塑性 δ_{max} 不足以承受由热应力产生的应变 ε_f 时，裂纹就会产生。

2 控制激光覆层裂纹问题的研究现状

激光熔覆技术虽然取得了长足的进步，但该技

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

术尚未得到广泛应用，主要是由于在成形零件内部夹杂着气孔、裂纹等缺陷。裂纹问题是成形过程中最常见、破坏性最大的一种缺陷，使产品的实用性能较差，造成此技术难以在工业应用中获得推广。因此，对于熔覆层裂纹问题的探讨具有重要的研究意义及价值。

2.1 熔覆层产生裂纹的影响因素

影响激光熔覆层裂纹的因素错综复杂，不可单一而论。但多数国内外相关研究表明，这些影响因素大致可分为材料的热物理特性、激光工艺参数和表面热处理 3 个方面[8]。

材料的热物理特性对于激光熔覆层裂纹有着重大影响。裂纹尤其容易发生在熔覆层和基体交接界面处，这是由于基体材料和熔覆层材料热物理特性不相匹配所导致。常见的一些热物理参数主要包括材料的比热容、泊松比、弹性模量、热膨胀系数。其中影响较大的是热膨胀系数。在熔覆过程中，基体材料与熔覆层材料受热膨胀与冷却收缩速率的不同步性导致了拉应力的产生，在熔覆层内部极易产生裂纹。因此，选择热膨胀系数接近的基体材料和熔覆层材料可以有效降低熔覆层的开裂敏感性。

工艺参数的选取对于熔覆层裂纹产生有直接的影响[9]。因此在进行激光熔覆时，对于工艺参数的合理选取非常关键。大量研究表明：随着扫描速度提高，裂纹率增加。激光功率提高，开裂倾向降低。送粉速率增加，开裂倾向也随之加大。随熔覆层数的增加，裂纹数增多，开裂倾向增大[10]。

热处理主要是指对基体和熔覆层进行热处理以降低温度梯度的方式对熔覆层裂纹产生显著影响。研究表明，当对基体材料进行预热和缓冷，可显著降低裂纹开裂倾向。这是因为热处理工艺影响了熔覆层温度梯度的分布，进而改变熔覆层的应力状况，大大降低了熔覆层因应力集中而出现开裂的倾向。

2.2 调控激光熔覆过程中熔覆层开裂的方法

根据裂纹产生机制和影响因素分析，可知裂纹的产生主要是因为材料的塑性极限不足以承受由热应力产生的应变，所以，如何在熔覆材料凝固前将其内部的热应力释放或消除是控制裂纹问题的关键。本文从影响激光熔覆层裂纹的 3 大因素展开研究。

2.2.1 合理控制材料的热物理性能

有效的控制热应力值的大小可以降低裂纹的产生。热应力在激光熔覆层中的表现形式为拉应力，该拉应力的大小可以由以下公式计算[11]：

$$\sigma_{th}=\frac{E\Delta\alpha\Delta T}{1-\nu} \tag{2}$$

$$-\sigma_2\frac{1-\nu}{E\Delta T}<\Delta\alpha<-\sigma_1\frac{1-\nu}{E'\Delta T} \tag{3}$$

式中：σ_{th} 代表热应力，MPa；E 为弹性模量，MPa；ν 代表泊松比；$\Delta\alpha$ 为基材材料与熔覆层材料的热膨胀系数之差；ΔT 熔覆层温度与环境温度之差，℃；σ_1，σ_2 分别为熔覆层与基体的抗拉强度，MPa；E' 代表基体材料的弹性模量，MPa。由表达式(2)可知，热应力值与温差、泊松比、弹性模量以及膨胀系数之差有关。随着 $\Delta\alpha$ 减小，热应力也随之减小。同时由式(3)可知，$\Delta\alpha$ 应控制一个合理区间内。因此，尽可能地选取与基体热物理特性参数接近的熔覆材料，可以有效地降低热应力，从而降低熔覆层发生开裂的敏感性。

激光熔覆前，在基体表面涂一层韧性好、抗开裂性强、与基体物理性质相匹配的金属粉末可有效抑制裂纹的产生。常见的涂层材料有镍基合金。实验结果证明，该方法已在不同基体上取得了成功。Huang 等[12]采用激光诱导的方法使 Ni 基合金涂覆在基体表面上。结果表明，过渡层的添加有效抑制了涂层的开裂。

2.2.2 优化工艺参数

合理的工艺参数不仅可以使工艺简单化，还能获得高质量的成形件。大量研究表明，进行激光熔覆时工艺参数的选取对于熔覆层裂纹的产生有着重要的影响，主要包括激光功率、扫描速度、光斑直径、搭接率、送粉速率等。激光熔覆工艺参数与熔覆层裂纹的发生存在极为复杂的关系，由于各参数影响的复杂性和研究的不够深入，缺乏可靠的理论模型，通常只能根据经验或在大量实验的基础上进行选择。通过不断改变激光熔覆工艺参数来观察激光熔覆层中的裂纹数量，可以得出以下结论：

选择合适的激光功率。张磊等[13]为了探究镍基合表面的裂纹形成机理，通过在镍基合金表面进行熔覆实验，结果发现，当激光功率较低时，裂纹开裂倾向严重，随着激光功率增大，裂纹密度降低。郑启池等[14]为了探究不同功率输入对熔覆层裂纹产生的影响，通过在 45 钢基材表面进行不同功率下的 Ni45 镍基合金粉末激光熔覆的多道搭接实验。结果表明，随功率的增大，熔覆层的裂纹发生趋势为先增多而后减少。实验中综合考虑激光功率和扫描速度的激光线能量(P/V_s)与裂纹率之间的关系，发现随着激光线能量提高，熔覆层开裂倾向减小。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

选择合理的扫描速度、送粉速度。许多研究表明,裂纹对扫描速度的变化较敏感,在其他工艺参数一定的条件下,扫描速度的提高会减小熔池的深度,基体与金属粉末的结合质量下降,从而增大了温度梯度分布,热应力随之增大,裂纹率提高。若扫描速度过小,则会在熔覆层表面留下纹路[15],影响成形件的质量。研究表明,在多道搭接激光熔覆中,当扫描速度小于某特定值时,裂纹也会产生。送粉速率和裂纹产生也存在着一定联系。送粉速率的提高导致熔覆层堆积厚度的增加,裂纹率先呈上升趋势,当送粉速率提高到一定值时,裂纹率又呈下降趋势[16]。

选择合适的光斑直径。在激光熔覆过程中,若光斑直径过大,则输入热能过低,金属粉末与基体材料不能彻底熔融,结合质量下降,导致裂纹开裂倾向增大。但光斑过小,晶粒细化效果不佳,导致熔覆层硬度不够,为了验证光斑直径对裂纹的影响规律,付福兴等[17]用 40Cr 作为基底材料,选用 Ni60 作为熔覆粉末进行熔覆实验,光斑的大小通过调焦来实现。结果表明,激光光斑直径与熔覆层的裂纹产生存在着一定规律,在控制其他参数不变的情况下,光斑的大小会影响裂纹的数目和形貌。随光斑直径的增大,熔覆层的裂纹数目逐渐增加,裂纹的开裂程度会逐渐加剧。

选择合适的搭接率。搭接率的选取不仅影响熔覆层的形状形貌,更直接影响熔覆层质量。搭接率过小,各熔道之间凹陷程度较大,严重影响成形件形貌。相对大的搭接率会形成平整的熔覆层表面,但过大的搭接率会导致气孔、裂纹的产生[18]。因此,选择合适的搭接率不仅可以获得良好的表面形貌,还可以有效避免裂纹的产生。

2.2.3 对材料进行热处理

对材料施加一定的热处理工艺,可以很大程度上改变温度梯度分布、缓解应力集中,有利于减小裂纹开裂倾向。一方面,热处理可以使材料的韧性提高,应力集中问题得到缓解,从而提高材料的综合力学性能。另一方面,热处理使化合物或硬质相的形式析出。因此,对材料施加热处理加工,不仅可以增强韧性、改善材料的综合力学性能,还能细化晶粒,使硬度提高,抑制裂纹的产生[19]。

张磊等[13]对镍基合金进行激光熔覆,实验结果表明,当基体的预热温度不断升高时,熔覆层的开裂敏感性下降。Jia 等[20]通过在 AISI1010 普通碳素钢上熔覆 1Cr18Ni9 不锈钢材料,发现当基体进行预热处理时,冷却速率较基体不进行预热时下降了 2/3。可见采用基体预热的方法可以降低熔覆层的冷却速率,从而抑制裂纹的产生。对基材进行热处理虽然可以有效抑制熔覆层裂纹的产生,但在实际操作过程中困难较大。熔覆层的凝固是一个急冷的过程,应力从产生到集中导致材料开裂的过程也非常迅速,甚至裂纹产生时熔覆过程还没结束。因此,热处理应该贯穿整个熔覆过程,且持续到激光熔覆后的一段时间。

综上研究表明,从材料特性、工艺参数优化及工艺调控的角度在一定程度上可以调控内应力及降低裂纹产生的倾向。但是,当激光增材制造工艺本身的调控能力达到极限时,而内应力导致的裂纹问题依然难以控制,此种情况下就需要考虑借助外部手段进行解决[21]。

2.3 外力辅助方法调控熔覆层内应力裂纹问题

2.3.1 激光冲击强化辅助调控熔覆层开裂行为

激光冲击强化技术是利用高功率密度、短脉冲的激光透过透明约束层后作用在工件表面产生的冲击波来改善材料的抗疲劳性能、提高金属材料硬度、强度。与传统的表面强化技术相比,激光冲击强化技术具有非接触、热影响作用小、强化效果突出等优点[22]。何卫锋等[23]将激光冲击强化技术应用于激光熔覆试件的表面强化,熔覆层表面残余应力由冲击前的拉应力变成压应力,熔覆试样的疲劳强度由 401 MPa 提高到 450.8 MPa。同时发现,熔覆层经过激光冲击强化后产生了高密度的位错,表面的晶粒得到了细化、成形件硬度显著增加,使用性能大大提高,应力场趋于均匀,有效抑制了裂纹的产生。段成红等[24]研究了对 TC17 合金进行冲击强化后的残余应力分布。结果表明,单面冲击后在冲击表面引入了压应力,使应力场分布趋于综合。

激光冲击强化技术发展迅速,在越来越多的领域得到了广泛应用,具有广阔的发展前景。但产生的一些问题也不可避免,如冲击强化效率普遍较低、吸收层材料的涂敷比较耗时效率低下。在线加工监测系统需要完善,需要研制出大能量、短脉冲、高频率的高性能激光器,以满足激光冲击强化技术工业应用的要求。

2.3.2 超声振动辅助调控熔覆层开裂行为

超声振动是机械振动的一种,具有工艺简单、无污染的特点。主要作用于金属凝固过程,可以改善组织、有效地提高力学性能。超声振动具有加热、空化、

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

振动作用等，在液态金属凝固过程中进行有效干预，从而达到改善组织分布，避免应力集中、使应力场趋于均匀化[25]。王玉玲等[26]在 3540 Fe/CeO_2 涂层表面施加超声振动，结果表明，施加超声振动的涂层组织明显细化、硬度提升效果显著。当超声振动施加角度5°时，熔覆层内部无气孔及裂纹缺陷，耐磨效果最为显著。

同样，通过施加超声振动可使熔覆层内应力更加均匀，降低裂纹产生的倾向。但目前所采用的超声振动大多是从基板底部引入，不能保证对整个熔覆区域实现有效超声干预。而在空气中对熔覆区直接进行超声振动虽然可以避免超声波强度衰减，但是对熔覆区施加振动时角度难以精确控制，会影响到该方法的有效性。

2.3.3 电磁搅拌辅助调控熔覆层开裂行为

电磁搅拌是利用磁极在旋转时形成的电磁感应原理产生磁力场，通过对熔池干预从而改变液态金属的凝固行为，使材料性能得到改善[27]。姜志恒等[28]利用磁场辅助激光沉积开展实验，结果发现，磁场的作用大大改善了涂层的组织分布，促进晶粒细化，增强硬度、有效抑制了熔覆层内裂纹的形成。刘洪喜等[29]发现旋转磁场可使熔池的温度梯度分布趋向均匀，熔覆层的裂纹得到有效控制。

激光熔覆是一个比较耗时复杂的过程，长时间工作磁极的磁性会有所衰减，导致电磁力减小，从而对熔池的搅拌调控作用减弱，工作效率下降，难以使温度梯度分布均匀化，制造过程中容易出现质量不稳定现象。

2.3.4 高频微锻造辅助调控熔覆层开裂行为

高频微锻造技术是利用高频率的锻造头快速锻打激光束刚扫描后的熔覆层区域，使其发生细小的塑性变形。锻造头的快速冲击作用引入了残余压应力场，与熔覆层内部的拉应力相抵消，使应力场趋于均匀，起到调整内应力、抑制裂纹产生的作用。

高频微锻造机构因动力源的不同分为机械式、超声频式、电磁式等类型。皮政清等[30]采用机械式微锻造结构对激光熔覆 CoNiCrWC 复合涂层开裂行为进行实验研究。结果表明，高频微锻造可明显调控 CoNiCrWC 激光熔覆复合涂层的开裂行为，涂层表面晶粒得到细化，裂纹数目明显减少，裂纹尺寸减小，部分裂纹在高频微锻造的作用下得到减轻。樊湘芳等[31]利用机械式微锻造机构对激光熔覆 Ni60A 合金层进行微锻造，实验结果发现，高频微锻造在涂层表面引起了塑性变形，产生了残余压应力场，熔覆层表面的残余拉应力转变为压应力，内应力的转变有效抑制了裂纹的产生。

利用高频微锻造技术对于抑制熔覆层裂纹产生、均匀熔覆层内应力有显著的效果，但是对于熔覆层温度有极大的限制。若熔覆层温度过高，微锻造的击打可能会在熔覆层表面产生裂纹。若熔覆层温度过低，锻造不能很好的均匀熔覆层内部应力，则裂纹趋势不能控制。

3 总结与展望

通过分析激光熔覆层裂纹产生机理及其影响因素，研究表明，在熔覆过程中合理匹配熔覆层及基体材料的热物理性能、优化工艺参数及热处理方法对于控制抑制熔覆层裂纹产生有良好的效果。但这类控制措施错综复杂，相互影响，不易控制，往往由于一个参数的选取会导致整个参数的影响，优化一组绝对准确的工艺参数非常困难。同时，还存在当激光增材制造工艺本身的调控能力有限的问题，就需要考虑借助辅助外部手段。实验证明，通过外力如激光冲击强化、超声振动、电磁搅拌、高频微锻造等辅助措施来改变物理场从而改善熔覆层开裂行为是行之有效的方法，但这些方法也存在一定局限性。所以，针对熔覆层裂纹问题，最好的方法是：在选择合适的材料匹配特性、优化工艺参数及合理的热处理措施的条件下，辅助外力措施调控熔覆层内应力，进而控制熔覆层裂纹，这将是下一步的重点研究方向。同时，在熔覆层快速升温、冷却过程中，若能采用自主开发稳定的温度闭环控制系统来保持温度梯度处于恒定的状态，对于控制熔覆层裂纹也将是行之有效的。

参考文献：

[1] 徐滨士，董世运．激光再制造[M]．北京：国防工业出版社，2016．

[2] Wang X H, Zhang M, Liu X M, et al. Microstructure and wear properties of TiC/FeCrBSi surface composite coating prepared by laser cladding[J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 202(15): 3600-3606.

[3] Zhou S F, Dai X Q, Zheng H Z. Microstructure and wear resistance of Fe-based WC coating by multi-track overlapping laser induction hybrid rapid cladding [J]. Optics and Laser Technology, 2011, 44(1): 190-197.

[4] Wu G L, Ren F C, Zhang J, et al. Microstructure

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

characteristics and performance of a novel composite stellite alloy fabricated by laser cladding [J]. Laser in Engineering, 2019,42(4/6):303-321.

[5] Yedra A G, Pfleger M, Aramendi B, et al. Online cracking detection by means of optical techniques in laser-cladding process[J]. Structural Control and Health Monitoring,2019,26(3):2291-2295.

[6] 赵亚凡,陈传忠. 激光熔覆金属陶瓷涂层开裂的机理及防止措施[J]. 激光技术,2006,30(1):16-22.

[7] 关震中. 激光加工工艺手册[M]. 北京:中国计量出版社,2007.

[8] 王新林,漆海滨. 厚层激光熔覆层裂纹控制的综合实验研究与理论分析[J]. 南华大学学报(理工版),2001,15(3):36-40.

[9] 赵海鸥,李春华. 激光熔覆工艺特性及裂纹敏感性研究[J]. 金属热处理,2001,26(1):18-21.

[10] 洪蕾,吴钢. 激光制造技术基础[M]. 北京:人民交通出版社,2008.

[11] Radaj D. 焊接热应力[M]. 北京:中国机械出版社,1997.

[12] Huang Y J, Zeng X Y. Investigation on cracking behavior of Ni-based coating by laser-induction hybrid cladding[J]. Applied Surface Science,2010,256(20):5985-5992.

[13] 张磊,陈小明,刘伟,等. 激光熔覆 Ni 基合金裂纹形成机理及敏感性研究[J]. 激光与光电子学进展,2019,56(11):176-183.

[14] 郑启池,金亚娟,李瑞峰,等. 功率输入对激光熔覆镍基涂层组织和裂纹生成的影响[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2017,31(3):293-297.

[15] 周丹丹,孙荣禄. 扫描速率对激光熔覆 Ni 基 h-BN 复合涂层组织及性能的影响[J]. 金属热处理,2017,42(4):167-171.

[16] 丁阳喜,欧阳志明. 激光熔覆层裂纹的影响因素[J]. 材料研究与应用,2008,2(3):211-214.

[17] 付福兴,畅庚榕,赵小侠,等. 激光光斑直径对熔覆层裂纹的影响[J]. 激光与光电子学进展,2015,52(3):184-187.

[18] 杨宁,杨帆. 激光熔覆工艺参数对熔覆层质量的影响[J]. 热处理技术与装备,2010,31(4):17-19.

[19] Zhang D W, Lei T C, Zhang J G, et al. The effects of heat treatment on microstructure and erosion properties of laser surface-clad Ni-base alloy [J]. Surface and Coatings Technology, 1999,115:176-183.

[20] Jia Y P, Hao N H. Thermal-mechanical coupling finite element analysis of laser cladding process [C]//International Conference on Mechanic Automation & control Engineering. IEEE,2011:4696-4699.

[21] 黄卫东,林鑫. 激光立体成形高性能金属零件研究进展[J]. 中国材料进展,2010,29(6):12-27.

[22] 张永康. 先进激光制造技术[M]. 镇江:江苏大学出版社,2011.

[23] 何卫锋,张金,杨卓君,等. 激光冲击强化钛合金熔覆修复试件疲劳性能研究[J]. 中国激光,2015,42(11):93-99.

[24] 段成红,周俊景,裴亚田,等. TC17 钛合金单双面激光冲击残余应力分布研究[J]. 激光技术,2019,43(2):161-167.

[25] 陈畅源,邓琦林,宋建丽. 含量及超声振动对激光熔覆中裂纹的影响[J]. 南京航空航天大学学报,2005,37(11):44-48.

[26] 王玉玲,刘善勇,张翔宇,等. 超声振动辅助激光熔覆涂层实验及分析[J]. 中国机械工程,2018,29(21):2600-2605.

[27] 赵凯华,陈熙谋. 电磁学[M]. 北京:高等教育出版社,1985.

[28] 姜志恒,石岩,刘佳,等. 磁场辅助激光沉积涂层微观组织与性能研究[J]. 激光技术,2019,43(2):154-160.

[29] 刘洪喜,纪升伟,蒋业华,等. 旋转磁场辅助激光熔覆复合涂层的显微组织与性能[J]. 中国激光,2013,40(1):121-126.

[30] 皮政清,邱长军,樊湘芳,等. 高频微锻造对激光熔覆复合涂层开裂行为的影响[J]. 装备制造技术,2010,47(10):01-02.

[31] 樊湘芳,邱长军,周炬,等. 高频微锻造对激光熔覆层开裂行为与表面组织的影响[J]. 焊接学报,2011,32(1):101-104.

本刊开设封面“人物风采”栏目

为了宣传近年来在我国金属材料热加工领域取得突出成绩的科研人员,本刊决定开设封面“人物风采”栏目。

封面“人物风采”栏目以图文并茂的形式介绍近年来在我国金属材料热加工领域取得突出成绩的科研人员。这里的金属材料热加工领域包括金属材料、金属基复合材料的铸造、锻压、焊接、热处理、表面工程等,以及材料的组织性能研究。

风采人物的图片刊登在封面,图片应是人物的工作照,或者是以工作环境为背景的人物照。风采人物可以是一个人,也可以是一个团队。

风采人物的介绍文字刊登在正文补白处,主要介绍风采人物的科研成果。风采人物的图片和文字介绍由风采人物个人或所在组织提供。刊登的封面人物应得到所在组织的认可。对于大型组织,二级单位认可即可。

封面“人物风采”栏目是公益性栏目,不收取任何费用,也不支付任何费用。

热加工工艺编辑部真诚欢迎您与我们合作,共同办好封面“人物风采”栏目。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net