模具局部激光熔覆耐磨涂层研究及应用

刘宗义[1]，张振林[2]，孙军浩[3]，张义海[1]，冯珂[3]，焦伟[3]

1.四川省宜宾普什模具有限公司　四川宜宾　644007
2.高端装备先进材料与制造技术实验室　四川成都　610031
3.宜宾上交大新材料研究中心　四川宜宾　644005

摘要：注塑模具流道出口工况苛刻，极易发生磨损，导致其形状和尺寸发生变化，对产品的质量和生产效率造成较大影响。基于此，本研究采用激光熔覆技术对注塑模具流道出口进行局部强化，针对强化涂层材料成分的设计、熔覆成形和缺陷控制、组织性能分析、实际工件加工工艺调控等开展研究。结果表明：相比商用耐磨涂层材料，所开发的涂层材料具备优异的熔覆成形和无裂纹缺陷，硬度由强化前基体硬度400HV提升至900HV以上，涂层耐磨性能相对基体提升43倍，摩擦系数由基体的0.635降至0.412，极大改善了模具的耐磨性能；强化涂层内部晶粒细小，主要由马氏体和原位陶瓷碳化物保障其耐磨性，并残留少量奥氏体保障其韧性；通过特殊的路径规划和工艺控制，在注塑模具局部强化中得到成功应用，强化后模具的服役寿命提升3倍以上。

关键词：注塑模具；激光熔覆；微观组织；耐磨性能

Research and application of local laser cladding wear-resistant coating on mould

LIU Zongyi[1], ZHANG Zhenlin[2], SUN Junhao[3], ZHANG Yihai[1], FENG Ke[3], JIAO Wei[3]

1. Push Mold Co., Ltd., Yibin 644007, Sichuan, China
2. High-end Equipment Advanced Materials and Manufacturing Technology Laboratory, Chengdu 610031, Sichuan, China
3. SJTU-Yibin Innovation Center for Advanced Materials, Yibin 644005, Sichuan, China

Abstract: The outlet working condition of the injection molding die is harsh. It is very easy to be worn, damaging the outlet shape and size of the flow channel. It has a great impact on the product quality and production efficiency. Therefore, it is urgent to strengthen the outlet of the flow channel. Based on this, the laser cladding technology is used to locally strengthen the outlet of the injection molding die. The composition of the reinforced coating is designed. The cladding appearance and defect is controlled. The microstructure and mechanical property is analyzed. The process control of the actual workpiece processing is studied. Compared with the commercial wear-resistant coating materials, the hardness of the coating materials increased from 400HV to above 900HV. The wear-resistant performance of the coating increased 43 times compared with the matrix. The friction coefficient decreased from 0.635 to 0.412. The wear-resistant performance of the die is greatly improved. The inner grain of the reinforced coating is

基金项目：宜宾市科技计划项目（2022GY002）；高端装备先进材料与制造技术实验室开放课题（2023KFKT0004）；
四川省科技创新创业苗子工程（2022JDRC0071）。

通信作者：孙军浩，主要从事增材制造研究，E-mail：1392672372sjh@sjtu.edu.cn。

fine. Its strength and abrasion resistance are mainly guaranteed by martensite and in-situ ceramic carbide. A small amount of austenite is left to guarantee its toughness. Through special path planning and process control, it has been successfully applied in local strengthening of injection molding dies. The service life of the strengthened dies has been increased by more than 3 times.

Keywords：injection mould；laser cladding；microstructure；friction and wear property

1　序言

塑胶制品在航空航天、电子、机械、汽车及人们日常生活中得到广泛应用，注塑模具是塑胶制品生产过程中必不可缺的工具。注塑模具每天要历经成千上万次的注塑过程，注塑流道出口工况条件比较苛刻，处于反复摩擦及腐蚀介质的服役环境，极易磨损和腐蚀，造成注塑流道出口形状和尺寸发生变化，这极大地影响了产品的质量以及生产过程的稳定性，情况严重时会导致模具的直接报废，给企业造成巨大的损失[1，2]。因此，需要对注塑模具浇口部位进行强化，以提升模具的使用寿命、保障产品生产质量。

激光熔覆技术灵活性高，可对结构复杂、尺寸精度高的零部件进行局部强化，熔覆层和基体结合强度高，基体损伤小，比较适合精密注塑模具的局部强化[3]。

H13钢具有良好的热强性、韧性和抗热疲劳性能，广泛应用于模具行业[4，5]。研究者也通过激光熔覆方法来提升H13钢的耐磨性能。首先，研究者采用陶瓷颗粒相强化的复合涂层来提升耐磨性能，主要包括TiC/H13复合涂层[6]、Stellite-WC复合涂层[7]，这些复合涂层均能大幅度提升H13钢的表面耐磨性能和模具的服役寿命，然而，熔覆过程中陶瓷颗粒强化相容易发生烧蚀而形成孔洞，这会对注塑模具生产产品表面质量造成很大影响。其次，研究者在H13钢表面熔覆异种体系合金材料来提升耐磨性能。NORHAFZAN等在H13钢表面制备了NiTi涂层，硬度是H13钢的2.9倍[8]。刘洪喜等[9]在H13钢表面制备自熔性的Ni基涂层，耐磨性提升了3.8倍。这些涂层显著提升了H13钢的表面耐磨性，但异种材料和H13钢的热膨胀系数相差较大，使得注塑后产品不同位置散热区别较大，对塑胶产品质量造成较大影响。基于上述分析，H13钢表面制备铁基涂层材料成为注塑模具强化的优先选择。曹俊[10]在H13钢表面制备Fe104合金涂层，钢的耐磨性有所增加，但该涂层在脱模的过程中受脱模剂的影响而容易失效。任建华[11]在H13钢表面制备CPM9V熔覆层，硬度和耐磨性有所提升，但仍难以满足高频注塑条件的需求。FENG等[12]通过在基体表面熔覆高耐磨的铁基涂层材料，耐磨性有显著提升，然而，涂层内部却容易产生裂纹，通过降低应力有助于降低涂层裂纹。

根据上面分析，尽管采用激光熔覆技术可以使材料表面硬度和耐磨性能有所增加，但当硬度过大时，熔覆层中容易产生裂纹。虽然采用预热的手段可以降低裂纹的敏感性，但这增加了工艺的复杂性，降低了效率，在精密注塑模具的局部强化中很难得到应用。因此，如何在保障涂层具有高的硬度和耐磨性，同时在不预热的条件下也不产生裂纹，这成为注塑模具局部强化的关键所在，本研究将从材料和工艺两方面来进行突破。

2　耐磨材料的设计及试验过程

为了最大程度的提升注塑模具的耐磨性能，提升注塑模具的服役寿命，特意设计了高耐磨、高强韧的铁基涂层材料，通过元素的调控，同时提升熔覆涂层的耐磨性和抗裂性。其中，Cr元素对基体有固溶强化作用，Nb、V、Ti的添加会原位形成硬质颗粒相，进一步提升熔覆层的耐磨性能，同时，Fe和W等元素的添加会形成共晶析出相，在提升熔覆层硬度的同时，也起到一定的抗裂性，所设计成分的元素及组成见表1中涂层3。注塑模具所用的基体材料为H13钢，具体成分见表1，另外，选用常用的商用耐磨不锈钢涂层材料和本研究所设计的材料进行对比，其中，涂层1为赫格纳斯（中国）有限公司生产的R401粉末，涂层2为天津铸金科技开发股份有限公司生产的FJ-21粉末，具体成分见表1中涂层1、涂层2。

表1　涂层和基体材料化学成分（质量分数）（%）

元素	C	Cr	Si	Mo	Ni	Mn	B	Nb	V	W	Fe
基体	0.4	5.3	0.9	1.3	—	0.4	—	—	1	—	余量
涂层1	0.2	18	—	0.5	2.5	—	—	—	—	—	余量
涂层2	0.4	13.6	1.1	—	0.3	0.4	1.8	—	—	—	余量
涂层3	0.9	3.7	0.4	—	0.5	0.5	0.9	0.7	2.8	7.2	余量

图1所示为激光熔覆设备，在熔覆过程中，使用的激光器为LDF5000，光束为直径1.2mm的圆形光斑，设置激光功率为1400W，熔覆速度为1.5m/min，送粉速率为1.2r/min，两道间搭接率为50%。通过对于光束路径的规划，实现不同成分熔覆粉末在模具基体材料上耐磨涂层的制备。

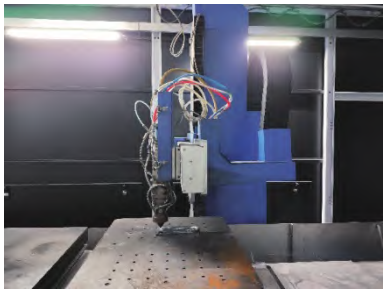


图1　激光熔覆设备

熔覆完成后，使用光镜（OM）、电子背散射（EBSD）对熔覆层成形和微观组织进行观察分析，并对涂层的硬度和摩擦磨损性能进行测试，其中，摩擦磨损设备为艾泰克仪器科技生产的多功能摩擦磨损试验机MFT-5000，测试过程如图2所示。

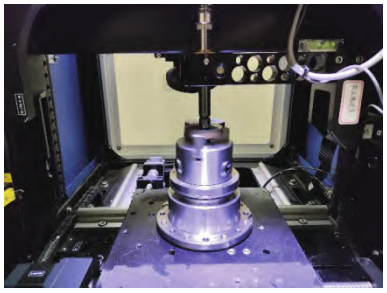
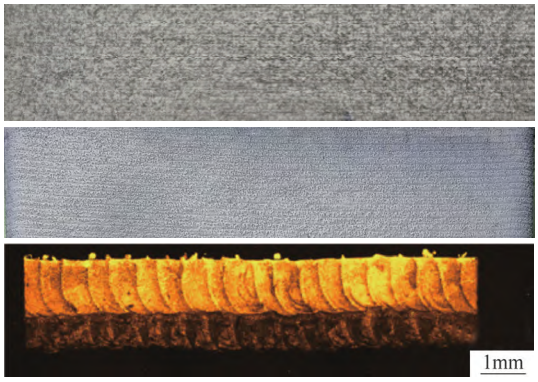


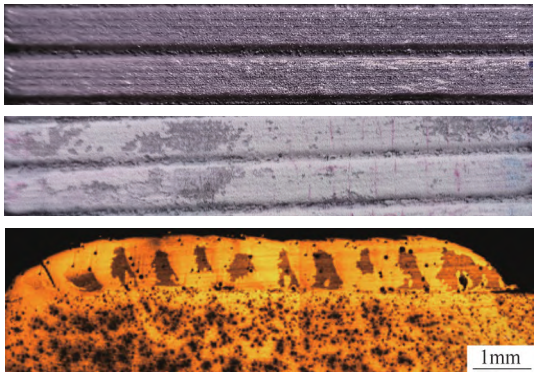
图2　材料摩擦磨损测试

3　涂层材料的熔覆成形和微观组织分析

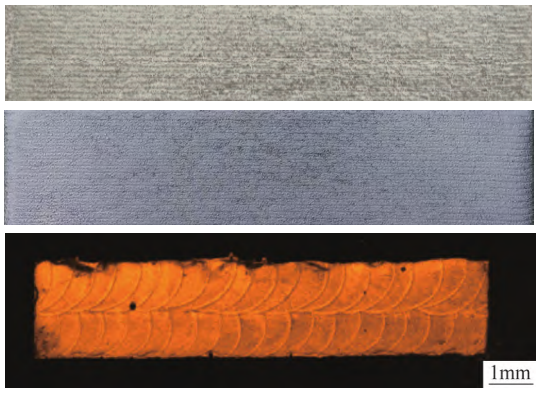
对不同成分的涂层材料在模具钢基体上的激光熔覆成形进行比较，结果如图3所示。根据图3a、c可知，使用涂层材料1和所开发的涂层材料3进行激光熔覆时，熔覆层成形较好，表面光滑连续，从接头截面看，内部缺陷较少，熔覆层和基体结合良好，界面处没有发现裂纹等缺陷。然而，使用涂层材料2进行激光熔覆后，从表面可以直接观测到，



a）涂层1激光熔覆成形和接头



b）涂层2激光熔覆成形和接头



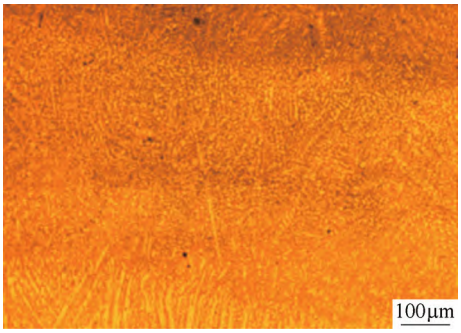
c）涂层3激光熔覆成形和接头

图3　不同涂层材料激光熔覆成形及相应接头

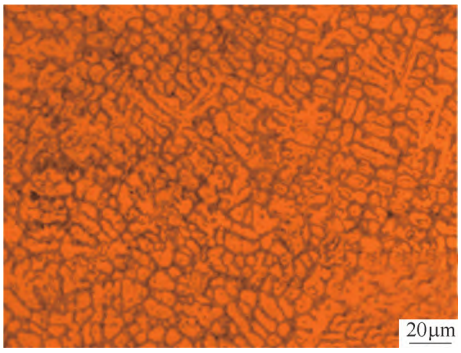
在熔覆层中形成了许多垂直于熔覆方向的裂纹，且从接头截面看，裂纹几乎贯穿了整个熔覆层，该裂纹形成于熔覆过程中或者熔覆刚结束时，形成过程中伴随着清脆的响声，呈现出典型的冷裂特征，因此，涂层材料2的韧性和抗裂性比较差。

进一步对涂层的显微组织以及形成相进行分析，由于涂层材料2合金成分C和B的含量高，淬硬性强，在熔覆过程中会产生大量硬度高的马氏体组织，然而，材料2奥氏体和碳化物形成元素较少，组织塑性能力调整有限，熔覆后发生了开裂，在此不

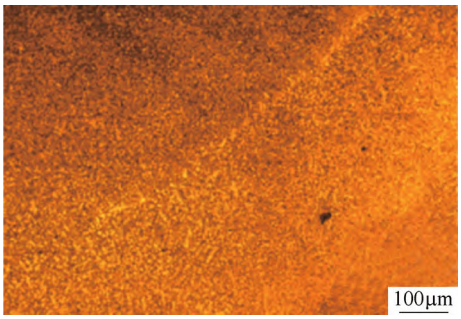
再对其进行分析，仅对涂层材料1和所开发的涂层材料3进行分析，结果如图4所示。通过图4a、b的对比分析，使用涂层材料1进行激光熔覆时，微观组织呈现明显的柱状晶生长，晶粒尺寸较大；然而，使用涂层材料3进行激光熔覆时，同样的热量输入及散热条件下，晶粒细小，没有明显的柱状晶形成，熔覆层内部出现了较多的析出相形成。进一步对涂层材料1和3的相组成进行分析，并对形成相的比例和尺寸进行统计，不同涂层材料激光熔覆接头相分布如图5所示，不同涂层磨损性能测试结果见表2。



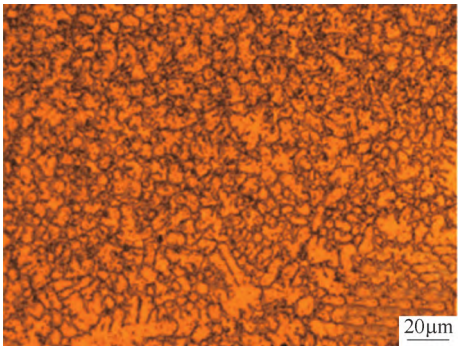
a）涂层1激光熔覆接头金相分析



b）涂层1激光熔覆接头金相分析



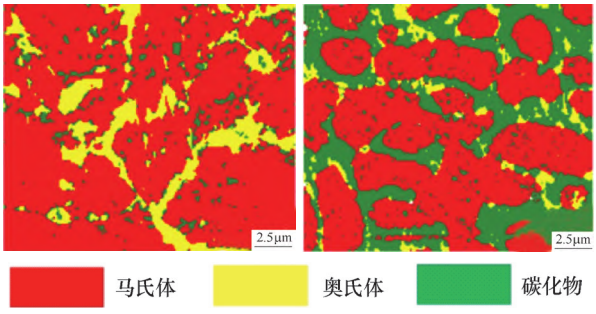
c）涂层3激光熔覆接头金相分析



d）涂层3激光熔覆接头金相分析

图4　不同涂层材料激光熔覆接头金相分析

根据测试结果，材料1所形成的熔覆涂层有大量块状马氏体和边界处残余奥氏体组成，在涂层上还析出少量尺寸很小的碳化物颗粒相，其中，马氏体使得涂层有较高的硬度和耐磨性，残余奥氏体保障涂层有一定的韧性，抑制裂纹的产生。材料3所形成的涂层中，马氏体量有所降低，但是形成了大量硬度更高的碳化物陶瓷相，这使得涂层有更优异的耐磨性能。另外，所开发的涂层材料3中，通过元素的添加，使得涂层中马氏体和碳化物陶瓷相的形貌和尺寸发生变化，特别是W元素的添加，会形成碳化物和Fe涂层基体组成的共晶相，这保障涂层兼具良好的耐磨性和韧性，提升涂层的抗开裂能力。此外，涂层中残留了少量的奥氏体，这也有助于抑制涂层中裂纹的产生。



a）涂层1　　b）涂层2

图5　不同涂层材料激光熔覆接头相分布

表2　不同涂层磨损性能测试结果

项目	涂层1		涂层3	
	质量分数（%）	尺寸/μm	质量分数（%）	尺寸/μm
马氏体	73.2	11.9	57.7	4.7
奥氏体	18.1	3.5	6.1	1.3
碳化物	8.7	0.7	36.2	3.7

4　不同涂层材料的性能测试分析

对不同成分的熔覆涂层进行硬度测试，结果如图6所示。从图6可看到，基体的平均硬度为400HV，涂层成分1、2和3的平均硬度分别为600HV、800HV和900HV，涂层1虽然没有开裂，但硬度不高；商用涂层材料2与所开发的涂层材料3相

比，材料2的硬度比材料3要低，且材料2所形成的熔覆涂层却发生了开裂，这表明所开发的涂层具有较好的强韧性能。

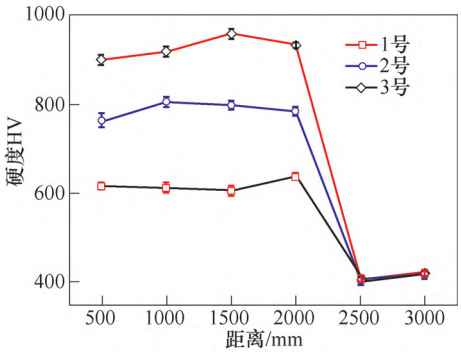


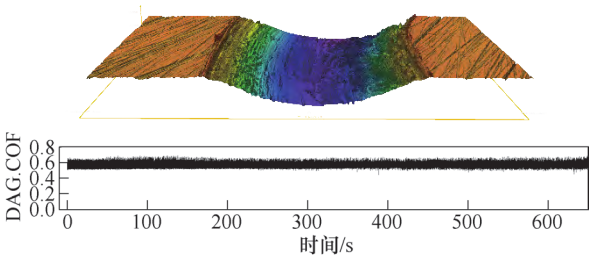
图6　不同涂层材料维氏硬度测试结果

对不同成分的熔覆涂层进行摩擦磨损测试，对测试后的磨痕进行了观察和分析测量， 不同材料摩擦磨损测试后磨痕和摩擦系数分析如图7所示，不同涂层磨损性能测试结果见表3 。

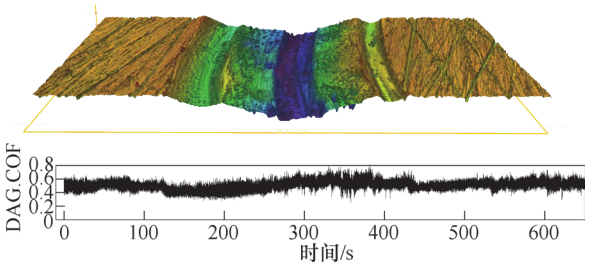
表3　不同涂层磨损性能测试结果

项目	平均摩擦系数	平均磨损体积/mm³
涂层1	0.5739	1.16185
涂层2	0.493	0.532
涂层3	0.412	0.0851
基体	0.635	3.6851

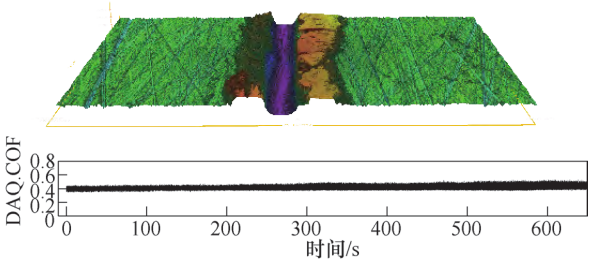
根据图7，基体在磨损测试中，形成了宽而深的沟槽，涂层1沟槽的深度明显降低，涂层2沟槽的深度有所降低，而涂层3则窄且浅的沟槽。根据表3得到的结果，就平均磨损体积而言，涂层1和3分别相对基体提升3倍和43倍，摩擦系数也比基体有所降低，基体与涂层1、涂层2和涂层3的摩擦系数分别为0.635、0.5739、0.493及0.412。



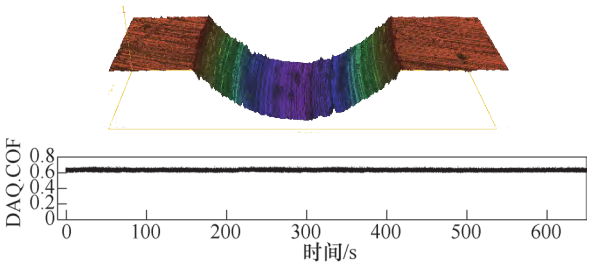
a）涂层1的磨痕及摩擦系数分析



b）涂层2的磨痕及摩擦系数分析



c）涂层3的磨痕及摩擦系数分析



d）基体的磨痕及摩擦系数分析

图7　不同材料摩擦磨损测试后磨痕和摩擦系数分析

5　注塑模具的局部强化

注塑模具是各种塑料制品生产中所必备的工具，在工业生产中应用广泛。图8所示为一种注塑模具，在使用过程中，中心的注塑端口服役条件苛刻，因容易发生磨损而造成模具的失效，影响产品质量和生产效率，需要对注塑端口进行局部强化。

具体局部强化的步骤如图9所示。首先，通过机械加工的方式在模具端口加工出球冠形凹槽（见图9a），凹槽的开口直径为4mm，凹槽的深度为2mm，凹槽底部与浇注通道顶部的距离为1.5mm。

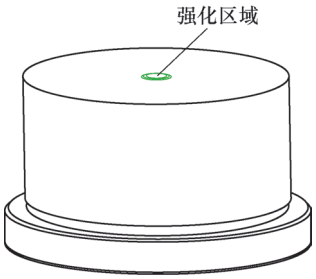
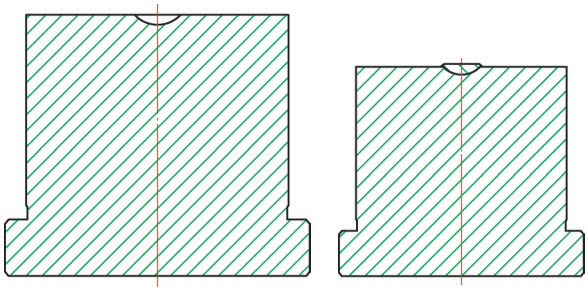


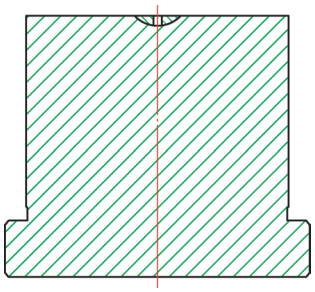
图8　注塑模具的强化部位

其次，根据凹槽形状，建立激光熔覆增材模型，对相关打印路径进行规划（见图9b）。其中，激光扫描路径为圆形，具体为从凹槽底部中心开始向

外扩展；分三层完成增材过程，包括先在凹槽底部激光扫描1～2圈形成耐磨底层，再在耐磨底层表面激光扫描2～4圈形成耐磨中层，最后在耐磨中层表面激光扫描4～6圈形成耐磨上层；设置激光功率为1400W，熔覆速度为1.5m/min，送粉速率为1.2r/min，搭接量为0.5mm，激光头抬升量为0.5mm，送粉器流量为12L/min，保护气流量为20L/min；另外，根据前面对不同成分所得到熔覆涂层的成形和性能分析，使用所开发的涂层材料3进行模具的局部熔覆强化。将模具固定在打印工位处，并调整激光斑点至熔覆起点，运行程序，完成模具局部强化过程。最后，通过机械加工的方式除去多余的材料（见图 9c），以及在耐磨层上打孔形成直径为1mm、深度为1.5mm的圆柱形注塑口，使注塑口连通模具内的注塑通道，并对其进行抛光处理，得到局部强化的注塑模具。



a）强化前流道出口处凹槽的加工　　b）激光熔覆工艺对凹槽进行局部强化



c）强化后流道出口的加工

图9　注塑模具局部强化的步骤

使用所开发的工艺及材料对试验件进行强化，强化后的接头截面如图10所示。从图10可看出，强化层内部满足要求，与基体材料结合良好，经测试，硬度和耐磨性能满足要求。最终，此技术在真正的模具强化中得到应用，结果如图11所示，经过注塑厂家对于强化后模具的使用寿命评估，和没强化的模具相比，强化后模具的服役寿命提升3倍以上，极大提升了模具的寿命和维护周期，降低企业的生产成本，提升企业的生产效率，保障产品的高质量生产。

图10　试验件进行强化后的接头截面

图11　局部强化工艺在产品上的应用

6　结束语

本文通过强化涂层材料成分的设计、熔覆成形和缺陷控制、组织性能分析，实现了高耐磨涂层的无缺陷制备，结论如下。

1）在传统商用耐磨涂层材料的基础上，通过对材料合金元素的调控，主要是通过W、B等元素的添加和比例控制，得到了马氏体和共晶原位陶瓷碳化物为主的耐磨涂层，涂层中残留少量奥氏体使得涂层有较好的韧性，熔覆过程没有发生开裂。

2）与基体材料及传统商用涂层材料相比，所开发的耐磨材料硬度超过900HV，涂层耐磨性能相对基体提升43倍，摩擦系数由基体的0.635降至0.412，极大地改善了模具的耐磨性能。

3）通过在模具浇口位置进行特殊的凹形槽设计，并进行三层多道的路径控制以及熔覆过程中严格的能量调控，在模具浇口部位成功实现高耐磨涂层的无缺陷制备，使得模具的服役寿命提升至原来的3倍以上，这对于保障企业加工产品的质量和加工效率、降低企业的成本具有重要意义。

参考文献：

[1] 孙建明，白艳霞，曾学淑. 注塑模具高效加工应用研

究[J]. 机电产品开发与创新，2024，3（37）：57-59.
[2] 王静，吴浩杰. 注塑模具随形冷却管道自动生成技术[J]. 工程塑料应用，2024，5（52）：121-127.
[3] SIDDIQUI A，DUBEY A. Recent trends in laser cladding and surface alloying[J]. Optics & Laser Technology，2021，106619（134）：1-20.
[4] 罗洪峰，史留勇，林茂. H13钢耐铝液腐蚀表面处理的研究进展[J]. 铸造技术，2017，66（3）：250-253.
[5] 杜学芸，杨帆，董仕营. H13热作模具钢的强化处理及增材制造研究[J]. 金属加工（热加工），2021（8）：24-28.
[6] LU CH Q，CHEN ZH Y，YAN Y Q，et al. Enhanced high-temperature wear performance of H13 steel through TiC incorporation by laser metal deposition[J]. Optics & Laser Technology，2023，16（99）：1-12.
[7] KARMAKER DEBAPRIYA，MUVVALA GOPINATH，NATH ASHISH. High-temperature abrasive wear characteristics of H13 steel modified by laser remelting and cladded with stellite 6 and stellite 6/30% WC[J]. Surface and Coating Technology，2021，422（25）：1-12.
[8] NORHAFZAN B，AQIDA S，CHIKARAKARA E，et al. Surface modification of AISI H13 tool steel by laser cladding with NiTi powder[J]. Applied Physics A，2016，122（384）：1-6.
[9] 刘洪喜，唐淑君，蔡川雄，等. 模具钢表面激光原位制备Ni基合金复合涂层的微结构与性能[J]. 中国激光，2013，40（6）：156-161.
[10] 曹俊. H13模具钢表面激光再制造Fe基合金熔覆层组织和性能的研究[D]. 镇江：江苏大学，2019.
[11] 任建华. 40Cr 模具钢激光熔覆层组织及性能分析[J].模具工业，2017，43（7）：59-61.
[12] FENG Y L，PANG X T，FENG K，et al. A method for evaluating the crack resistance and predicting the preheating temperature of high hardness coating prepared by laser cladding[J]. Surface and Coating Technology，2022，432（25）：1-12.

MW 20241107

（上接第73页）

[3] 李青锋，张艳. 新型奥氏体耐热钢与马氏体耐热钢焊接工艺探究[J]. 电力与能源，2018，39（4）：556-559.
[4] 张俊华，牛锐锋，赵宏刚. 10Cr13Ni2马氏体钢焊接接头组织及腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术，2018，30（6）：620-624.
[5] 高强，郭建亭，刘午，等. TiA1合金与42CrMo扩散钎焊的界面组织及形成机理[J]. 航空材料学报，2003（S1）：51-54.
[6] 何鹏. TiAI与40Cr钢复合阻隔法扩散连接机理及工艺研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2001.
[7] 何鹏，张秉刚，冯吉才，等. 以TiV/Cu、V/Cu为中间层的TiA1合金与40Cr钢的扩散连接[J]. 宇航材料工艺，2000（4）：53-57.
[8] HE P，FENG J C，ZHANG B G，et al. Microstructure and strength of diffusion-bonded joints of TiAl base alloy to steel[J]. Materials Characterization，2002，48（5）：401-406.
[9] HE P，FENG J C，ZHANG B G，et al. A new technology for diffusion bonding intermetallic TiAl to steel with composite barrier layers[J]. Materials Characterization，2003，50（1）：87-92.
[10] DONG C，DONG H G，YU L Z，et al. Microstructure and mechanical properties of friction welds between TiAl alloy and 40Cr steel rods[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2014，24（10）：3126-3133.
[11] 方一，曾凡勇，肖志威，等. 自动电阻焊在不锈钢垫块焊接中的应用研究[J]. 金属加工（热加工），2021（11）：14-19.
[12] 张惠，立江红，张正举，等. 中频智能一体式焊钳技术在汽车生产中的应用研究[J]. 内然机与配件，2021（8）：219-220.
[13] 王恒，刘黎明，柳绪静. 镁铝异种材料TIG焊接接头扩散行为分析[J]. 焊接学报，2005（7）：5-8，81.
[14] 宗波，董恒平，冯冲. C元素含量对TiAl合金显微组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺，2018，47（16）：104-107.

MW 20240806