

HKS-G 表面强化技术对 Cr8 冷作模具钢耐磨性的影响

元 莎¹, 蒋起臣², 侯惠敏¹, 陈 浩¹, 刘修苹¹, 蒋 鹏¹

(1. 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083;

2. 北京北方车辆集团有限公司, 北京 100713)

摘要: 研究一种新型的表面强化处理方法 HKS-G, 以提高 Cr8 冷作模具钢表面耐磨性。采用多源多弧离子镀法, 在真空状态下通入 N_2 气体, 在 Cr8 冷作模具钢表面形成多元系 HKS-G 涂层。通过 XRD、SEM、EDS、金相显微镜、洛氏硬度计等研究涂层厚度、组织、性能对材料表面耐磨性的影响。根据 Archard 模型, 利用仿真模拟有涂层和无涂层模具的磨损量, 计算模具寿命。结果表明: HKS-G 表面涂层厚度为 $10.8\ \mu\text{m}$, 涂层硬度达到 3326 HV。涂层与基体结合较好, 且有过渡层存在, 涂层的截面硬度梯度变化平缓。HKS-G 涂层膜基结合良好, 等级为 HF1 级。HKS-G 涂层模具的最大磨损量为 $2.1\times 10^{-8}\ \text{mm}$, 与无涂层模具相比, 最大磨损量减少了 23%, 模具寿命达到 476190 次。HKS-G 表面强化处理可提高模具材料的耐磨性, 延长模具寿命。

关键词: Cr8 冷作模具钢; 表面强化; 涂层; 硬度; 耐磨性; 模具寿命

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.11.019

中图分类号: TG142

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 11-0144-05

Effect of HKS-G surface strengthening technology on wear resistance of Cr8 cold work die steel

Yuan Sha¹, Jiang Qichen², Hou Huimin¹, Chen Hao¹, Liu Xiuping¹, Jiang Peng¹

(1. China Academy of Machinery Beijing Research Institute of Mechanical and Electrical Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China;

2. Beijing North Vehicle Group Corporation, Beijing 100713, China)

Abstract: A new surface strengthening treatment method HKS-G was studied to improve the surface wear resistance of Cr8 cold work die steel, and using multi-source and multi-arc ion plating method, N_2 gas was introduced under vacuum state to form a multi-component HKS-G coating at the surface of Cr8 cold work die steel. Then, the influences of coating thickness, microstructure and properties on the surface wear resistance of the material were studied by XRD, SEM, EDS, metallographic microscope, Rockwell hardness tester, etc. According to the Archard model, the wear amount of coated and uncoated dies were simulated to calculate the die life. The results show that the surface coating thickness of HKS-G is $10.8\ \mu\text{m}$, and the coating hardness reaches 3326 HV. The coating has a good bonding with the substrate, and there is a transition layer. The hardness gradient of the coating section changes smoothly. HKS-G coating has good adhesion with the grade of HF1. The maximum wear amount of die with HKS-G coating is $2.1\times 10^{-8}\ \text{mm}$, which is 23% less than that of uncoated die. The die life reaches 476190 times. HKS-G surface strengthening treatment can improve the wear resistance of die materials and extend the die life.

Key words: Cr8 cold work die steel; surface strengthening; coating; hardness; wear resistance; die lifespan

随着我国汽车行业和模具行业的迅速发展, 冷作模具钢在汽车方面的要求也逐渐提高^[1]。冷作模具的应用主要包括冷冲压模、冷锻模等^[2]。Cr8 钢因具有良好的淬透性、韧性和抗疲劳性能等, 成为

目前使用最多的冷作模具钢材料^[3]。在实际应用过程中, 苛刻的服役条件对模具表面的耐磨性能提出更高的要求, 为提高模具的耐磨性, 通过表面强化处理在模具表面“增加”一层高强度、高耐磨性的“硬化层”是理想的选择^[4-9]。表面强化是通过改善模具的表层组织结构和性能, 提高耐磨性能的工艺方法。目前, 在冷作模具钢应用领域, 表面强化处理在模具使用过程中起到至关重要的作用。

Cr8 钢模具在使用过程中其表面易因耐磨性不足, 产生早期裂纹而失效, 导致使用寿命降低, 为

收稿日期: 2024-08-13; 修订日期: 2024-11-15

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2016YFB0300405)

作者简介: 元 莎 (1990-), 女, 博士研究生

E-mail: 741916485@qq.com

通信作者: 蒋 鹏 (1964-), 男, 博士, 博士生导师, 研究员

E-mail: jp1964@163.com

满足模具行业的高效率生产，对模具耐磨性的要求也越来越高。因此，通过研究表面改性提高耐磨性对延长模具的使用寿命、节约成本、提高产能利用率有重大意义。武汉科技大学谢志雄等^[5]对模具表面进行热扩散法碳化物覆层处理（Thermal Diffusion Carbide Coating Process，TD 覆层处理）研究，结果表明 TD 覆层处理得到的覆层具有很高的硬度。邹隽^[6]对 Cr12MoV 钢进行盐浴渗钒处理，发现碳化钒覆层比较均匀、致密性较好、表面的显微硬度较高，耐磨性和耐腐蚀性均大幅度提高。前人对 TD 覆层处理的研究较多，但 TD 覆层处理的温度较高，材料在高温过程中易变形。因此，降低表面处理温度、用物理沉积进行表面涂层为最优的表面改性方法。目前，在物理气相沉积（Physical Vapor Deposition，PVD）法的基础上，适当地降低表面处理温度，在材料表面形成多元系涂层 TiCrAl 的研究并不多见。本文研究一种新型的表面处理方法 HKS-G，以提高 Cr8 冷作模具钢的耐磨性和寿命，并利用 Ansys 模拟模具表面处理之后的磨损量，预测疲劳寿命，为表面强化处理研究工艺提供实用型方案。

1 实验方法

实验采用的 Cr8 冷作模具钢的化学成分如表 1 所示。Cr8 冷作模具钢原材料切为两块尺寸为 30 mm×20 mm×50 mm 的试样，对试样进行真空淬火和高温 520 ℃回火处理，对热处理之后的试样表面进行磨光，采用酒精和丙酮去除表面的油污，水洗，烘干，放在干燥箱内。对两块试样分别进行 HKS-G 表面处理。HKS-G 工艺过程为：采用多源多弧离子镀 PVD 法，在真空状态下通入氮气，流量为 3 L·min⁻¹，炉内气压为 40 Pa，镀膜温度为 390~450 ℃，设定偏压为 60 V，多弧电流为 150 A，在工件表面形成总厚度为 8~12 μm 的 TiAlCr 多元涂层。

在表面处理后的两块试样上分别切下 10 mm×10 mm×5 mm 的试样进行表面清洗，在试样侧面进行表面预磨、抛光，采用体积分数为 4% 的酒精硝酸溶液浸蚀。材料的韦氏硬度按照 GB/T 230.2—2022^[7]进行测试，采用 Zeiss Axio Scope A1 研究级光学显微镜进行观察。按照 GB/T 16594—2008^[8]和 GB/T 15616—2008^[9]进行试样的制备、研磨和浸蚀，并采用 Gemini SEM 场发射扫描电子显微镜观察材料的显微组织，对表面处理层等进行能谱分析。

表 1 实验钢的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of experiment steel
（%，mass fraction）

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
1.07	0.94	0.38	8.47	2.18	0.37

2 实验结果与分析

2.1 涂层的微观结构分析

图 1 为 Cr8 钢经 HKS-G 表面处理后的显微结构图。由图 1 可以看出，HKS-G 涂层与基体的结合状态较好，且较致密，涂层厚度达到 10.8 μm。利用 X 射线衍射（X-ray Diffraction，XRD）技术对涂层进行衍射图谱测量，如图 2 所示。HKS-G 表面处理的主要物相为 TiCrAl，TiCrAl 涂层物相为 NaCl 面心立方结构中的 B1 结构。Al 取代了面心立方结构 TiCr 中的一部分 Ti 原子，形成固溶体，TiCr 的衍射峰向高角位偏移。在形成置换型固溶体过程中，晶格收缩，使 TiCrAl 晶面介于 TiCr 和 TiAl 之间。HKS-G 涂层有 4 个明显的衍射峰，分别为（111）、（200）、（220）和（222）。HKS-G 的镀层方式为离子镀，靶向材料以离子的形式沉积至材料表面，以形核的方式生长为柱状晶，在离子镀层的过程中，表面能对材料的影响较小，在基体涂层的过程中，靶材以动态离子方式射入，离子的应变能较大，有利于在（200）方向择优生长。

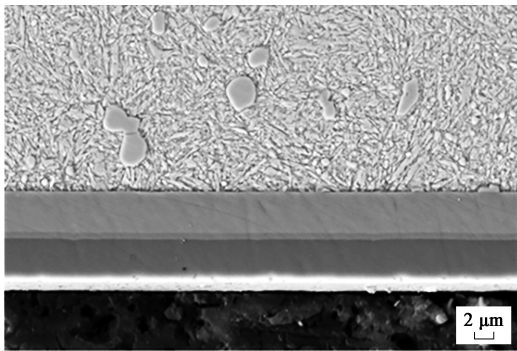


图 1 HKS-G 表面处理后的 Cr8 冷作模具钢的显微组织
Fig. 1 Microstructure of Cr8 cold work die steel after HKS-G surface treatment

为进一步分析 HKS-G 涂层的主要元素分布，对涂层分别进行线扫描和面扫描。图 3 为 HKS-G 涂层的线扫描图和面扫描图。综合 XRD 物相分析可知，HKS-G 涂层的化学成分为 TiAlCrN。HKS-G 涂层分层较明显，属于多元系涂层，涂层元素呈浓度梯度出现，表面外层涂层含有大量的 Al 和 Ti，表面涂层

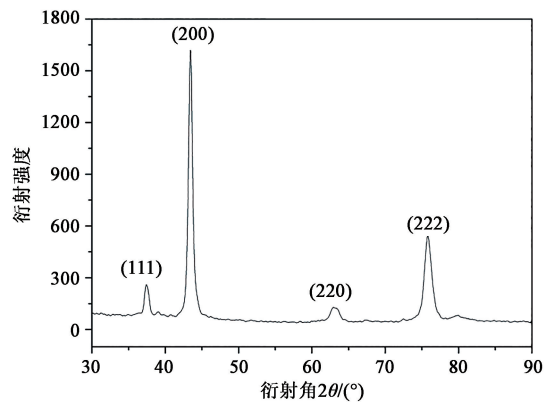


图 2 HKS-G 涂层的衍射图谱
Fig. 2 Diffraction pattern of HKS-G coating

外层与基体中间涂层部分含有大量的 Cr 元素，这种形式形成的多元系涂层的致密性较好，基体与涂层之间元素互相扩散，增强了基体与涂层的结合力。HKS-G 涂层与基体的结合力更强，元素的浓度梯度较明显，多元系合金形成的涂层能够大大提高材料的耐磨性。

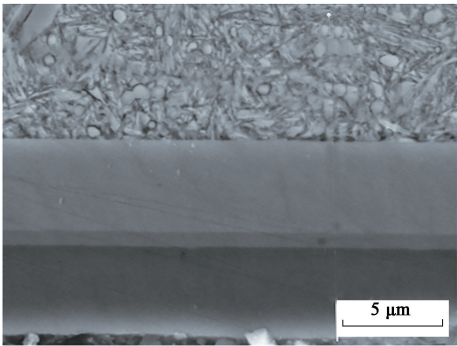
2.2 表面涂层硬度

对试样表层进行硬度测量，每个位置检测 3 点的硬度并取平均值，结果如表 2 所示。材料经过真空气淬+高温回火之后，硬度为 710 HV；经 HKS-G 表面处理后，硬度提高至 3326 HV，提高了近 3.7 倍。HKS-G 涂层是多元系涂层结构，硬度较高，增强了模具的耐磨性，提高了模具的使用寿命，与图 2 和图 3 分析结果一致。

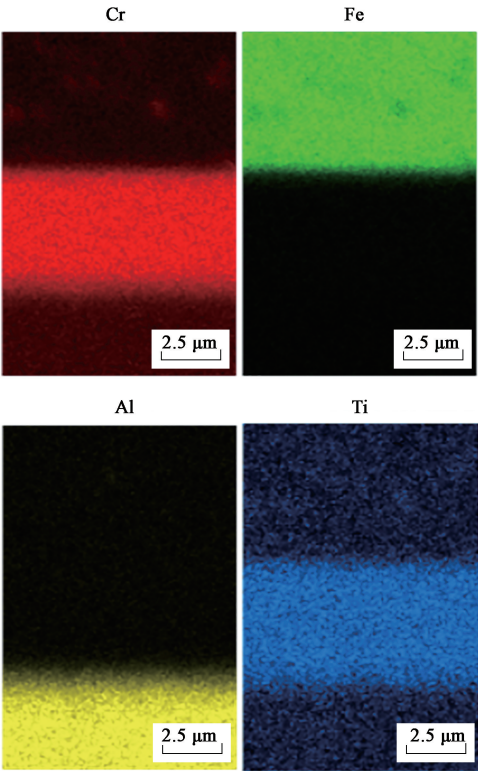
表 2 试样表层的硬度 (HV)

状态	位置				平均值
	1	2	3		
真空气淬+高温回火	705	712	713		710
HKS-G 表面处理	3331	3318	3329		3326

沿试样纵向进行解剖，检测距离基体表面不同位置的硬度，绘制成硬度变化曲线，如图 4 所示。由图 4 可以看出，随着距表面距离的增大，硬度值先平缓浮动后急剧下降，距表面距离不超过 10 μm 时，涂层的硬度值变化不明显，从基体最表层到距基体表面 2 μm 左右，截面硬度均在 3100~3300 HV 范围内，靠近基体表面的涂层截面硬度值变化较平稳。HKS-G 涂层的处理温度在 500 ℃左右，采用物理沉积方法进行涂层，在磁场中不停地发射靶原子 Cr、Al、Ti，形成合金涂层。根据图 3 可以看出，距离基体表面不同距离处涂层形成的合金化合物不同，



(a)



(b)

图 3 HKS-G 涂层的主要元素分布
(a) 显微组织 (b) 面扫描图

Fig. 3 Distributions of main elements in HKS-G coating
(a) Microstructure (b) Plane scanning diagrams

硬度值差距不大。元素在电流的作用下聚集长大为较均匀的颗粒，形成致密的涂层结构，提高了涂层硬度，从而提高了材料的耐磨性。HKS-G 表面处理涂层元素与基体元素存在扩散现象，基体中的 Cr、Si、Mn 等元素向覆层进行扩散，对涂层起到强化作用。涂层与基体的结合部分有过渡层，截面硬度在靠近基体部分平稳过渡到基体的硬度值。

2.3 膜-基结合力

膜-基结合力是评判硬质涂层的重要性能之一，能直接反应硬质涂层的实用性能，在很多实际使用

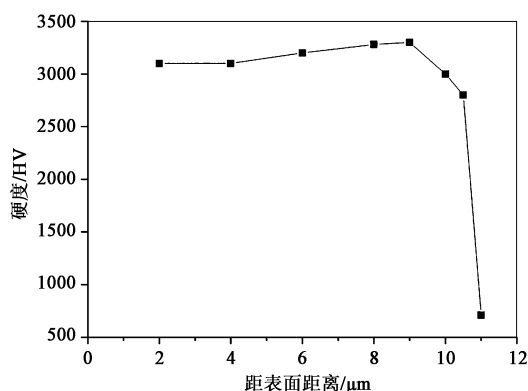


图 4 HKS-G 表面处理后涂层沿厚度方向的硬度分布

Fig. 4 Hardness distribution of coating along thickness direction after HKS-G surface treatment

的过程中,其重要性要高于涂层硬度。本实验使用洛氏硬度压痕的方法来表征 HKS-G 表面处理制备涂层的膜-基结合力。实验中将 150 N 的力加载于试样表面,压痕形貌用光学显微镜进行观察,如图 5 所示。HKS-G 涂层压痕形貌完整,边缘部分仅有少量的裂纹,无涂层剥落情况,判定为 HF1 级,说明膜基结合较好,主要是因为 TiAlCr 涂层成分含量的变化给基体到涂层提供了平缓过渡期,承受较大的力时,涂层的变形量较小,从而提高了基体-涂层的变形抗力,阻止涂层过早地断裂、与基体分离。

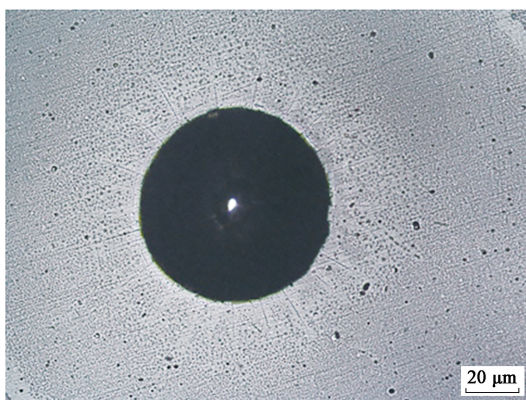


图 5 压痕形貌

Fig. 5 Indentation morphology

2.4 仿真模拟磨损量分析

冲压过程是比较复杂的塑性变形,模具在高压环境下反复承受机械载荷作用,易导致失效。其中,磨损是模具失效的主要因素。本次模拟采用 Archard 磨损模型对汽车大梁成形时的模具进行磨损仿真模拟。大量研究表明,Archard 模型运用较多,且与模具的实际磨损情况较吻合。磨损率表达式如式 (1) 所示^[9-12]:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{KP^n v^s}{H} \quad (1)$$

根据理论模型,进行积分得到式 (2):

$$W = \int \frac{KP^n v^s}{H} dt \quad (2)$$

式中: W 为磨损量; P 为模具受的正压力; v 为滑移速度; K 、 n 和 s 均为常数, $K = 2 \times 10^{-6}$, $n = 1$, $s = 2$; H 为硬度; t 为变形时间。

对模具进行仿真模拟得到模具磨损量,如图 6 和图 7 所示。由图 6 可知,无涂层模具的最大磨损量为 1.0083×10^{-7} mm,经过 HKS-G 表面处理之后,模具的最大磨损量为 2.1066×10^{-8} mm。有涂层和无涂层材料的最大磨损量相差 5 倍,材料经过 HKS-G 表面处理后,耐磨性增加,涂层与基体的结合强度增加,磨损量降低。模具最大磨损量一般在应力集中位置,经过表面处理,能有效降低材料的应力集中现象,减少模具受力磨损,增加模具寿命。根据理论磨损量预测模具寿命, HKS-G 表面处理之后模具寿命为 476190 次,无涂层模具寿命为 100000 次。因此,经过 HKS-G 表面处理之后,模具寿命提高了近 3.8 倍。

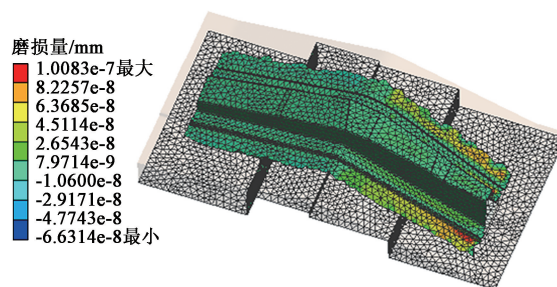


图 6 无涂层模具的磨损量

Fig. 6 Wear amount of die without coating

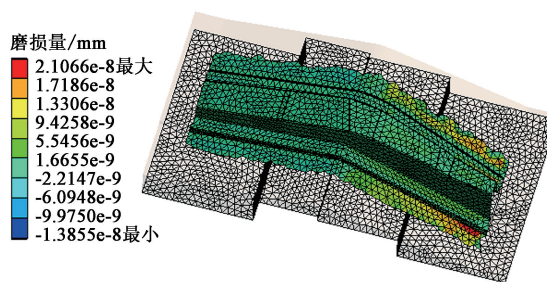


图 7 HKS-G 表面处理后模具的磨损量

Fig. 7 Wear amount of die after HKS-G surface treatment

3 结论

(1) HKS-G 表面处理技术的主要物相为 Ti-

CrAl。HKS-G 均沿着 (200) 方向择优生长。HKS-G 涂层元素与基体元素之间进行互扩散,膜-基界面有过渡层,基体材料在承受较大载荷时,可提高变形抗力,延长模具寿命。

(2) HKS-G 涂层厚度可达 10.8 μm , 涂层厚度均匀,致密性好;从表层到内部,HKS-G 涂层的硬度变化不大,靠近基体表面的涂层的硬度未出现急剧变化现象。

(3) HKS-G 涂层的硬度达到 3326 HV, 硬度提高了近 3.7 倍,膜-基结合等级为 HF1 级。皮膜可提高模具的耐磨性和耐腐蚀性。

(4) 根据仿真模拟,HKS-G 涂层模具的最大磨损量为 $2.1066 \times 10^{-8} \text{ mm}$,比无涂层模具减少 23%;理论寿命达 476190 次,经过 HKS-G 表面处理后,模具寿命提高了近 3.8 倍。在工业实际应用过程中,建议对 Cr8 冷作模具钢进行 HKS-G 表面处理。

参考文献:

- [1] 田新峰,叶立渊. 表面处理技术在汽车冲压模具上的应用和经验总结 [J]. 汽车工艺与材料, 2020 (8): 61-68.
Tian X F, Ye L Y. Application of surface treatment technology in automotive stamping die and summary of experience [J]. Automobile Technology & Material, 2020 (8): 61-68.
- [2] 张先龙,高盛. 冲压模表面强化处理技术和应用 [J]. 模具制造, 2012, 12 (12): 76-79.
Zhang X L, Gao S. The surface treatment technology and appliances of stamping die [J]. Die & Mould Manufacture, 2012, 12 (12): 76-79.
- [3] 杨丁丁,刘帅,张宇,等. 表面处理技术在汽车覆盖件模具零件中的应用 [J]. 模具工业, 2019, 45 (5): 63-65, 72.
Yang D D, Liu S, Zhang Y, et al. Application of surface treatment technology in parts of die for automobile cover panel [J]. Die & Mould Industry, 2019, 45 (5): 63-65, 72.
- [4] 新井透,王维新. TD 法在模具表面处理上的应用 [J]. 模具工业, 1986 (8): 58-64.
Xin J T, Wang W X. Application of TD method in die surface treatment [J]. Die & Mould Industry, 1986 (8): 58-64.
- [5] 谢志雄,程昌坤,董世杰. TD 涂层的组织与性能 [J]. 热加工工艺, 2005 (11): 31-32
Xie Z X, Cheng C K, Dong S J. Microstructure and properties of TD treated coating [J]. Hot Working Technology, 2005 (11): 31-32
- [6] 邹隼. TD 法盐浴渗钒在冷作模表面强化中的应用研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
Zou J. Study on Surface-strengthening of TD Method on Cold-work Die [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [7] GB/T 230.2—2022, 金属材料 洛氏硬度试验 第 2 部分: 硬度计及压头的检验与校准 [S].
GB/T 230.2—2022, Metallic materials—Rockwell hardness test—Part 2: Verification and calibration of testing machines and indenters [S].
- [8] GB/T 16594—2008, 微米级长度的扫描电镜测量方法通则 [S].
GB/T 16594—2008, General rules for measurement of length in micron scale by SEM [S].
- [9] GB/T 15616—2008, 金属及合金的电子探针定量分析方法 [S].
GB/T 15616—2008, Quantitative method for electron probe microanalysis of metals and alloys [S].
- [10] 邓亮. 汽车用金属板料热成形过程中摩擦行为研究进展 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (4): 14-20.
Deng L. Research progress on friction behavior during thermoforming for automotive sheet metal [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (4): 14-20.
- [11] 李行,章志兵,柳玉起,等. 汽车覆盖件模面设计中的复杂大孔洞填充算法 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 53-58.
Li X, Zhang Z B, Liu Y Q, et al. Filling algorithm on complex large hole in die face design for automotive cover panels [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (1): 53-58.
- [12] 方雅,户燕会,任燕,等. 汽车用 6061 铝型板温冲压减薄预测模型及实验验证 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 79-83, 201.
Fang Y, Hu Y H, Ren Y, et al. Thinning predictive model and experimental verification on warm stamping of 6061 aluminum plate for car [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (1): 79-83, 201.
- [13] 范芳,肖贵乾,武昭好,等. 某汽车覆盖件冷切边模具激光熔覆表面强化材料研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 208-215.
Fan F, Xiao G Q, Wu Z Y, et al. Research on laser cladding surface strengthening material for cold trimming die of an automobile panel [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (1): 208-215.

