物流车用钢表面激光熔丝沉积 CoCrW 合金组织及力学性能研究①

李禄

(长春汽车职业技术大学 汽车商贸管理学院, 吉林 长春 130117)

摘 要: 为提升物流车用钢的强度和硬度,采用激光熔丝沉积技术在钢基体表面制备 CoCrW 合金层,并采用直接时效处理诱发碳化物析出。通过显微组织观察与力学性能测试,分析了时效处理对合金相组成、显微硬度及拉伸性能的影响。结果表明,沉积样品由单一的 γ-Co 固溶体组成,时效处理促使 γ-Co 固溶体部分转变为 ε-Co 固溶体;经过时效处理后,CoCrW 合金内部析出了第二相 $Cr_{23}C_6$ 碳化物,并均匀分布在基体内部,第二相强化显著提升了 CoCrW 合金的显微硬度,其平均显微硬度为(534±17.6)HV,比沉积样品显微硬度提升约 0.4 倍;沉积样品抗拉强度为(787±16) MPa,伸长率为(16.6±0.45)%,时效样品抗拉强度为(1 318±10.7) MPa,伸长率为(11.74±0.33)%,时效样品抗拉强度较沉积样品抗拉强度提升约 0.67 倍。时效样品抗拉强度的提升主要归因于碳化物析出引起的第二相析出强化、HCP 相转变对基体的强化和细晶强化的协同作用。

关键词: 激光熔丝沉积; 相组成; 显微硬度; 抗拉强度; 钴基合金; 表面涂层

中图分类号: TN249 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.042

文章编号: 0253-6099(2026)03-0279-05

Microstructure and Mechanical Properties of CoCrW Alloy Fabricated by Laser Wire Deposition on Steel for Logistics Vehicles

LI Lu

(*Automobile Business Management College*, *Changchun Technical University of Automobile*, *Changchun* 130117, *Jilin*, *China*)

Abstract: To enhance the strength and hardness of steel used in logistics vehicles, CoCrW alloy samples were fabricated on the surface of steel substrates by laser wire deposition technology, and direct aging treatment was adopted to induce carbide precipitation. The effects of aging treatment on the phase composition, microhardness and tensile properties of the alloy were analyzed through microstructure observation and mechanical property tests. The results show that the as-deposited sample is composed of single γ-Co solid solution, and aging treatment promotes the partial transformation of γ-Co solid solution to ε-Co solid solution. In addition, $Cr_{23}C_6$ carbides are precipitated inside the CoCrW alloy after aging treatment and are uniformly distributed in the matrix. The second phase strengthening effect derived from carbides significantly improves the microhardness of the as-deposited sample, with an average microhardness of (534±17.6)HV, which is increased by about 0.4 times after aging treatment. The tensile strength and the elongation of the as-deposited sample are about (787 ± 16) MPa and (16.6±0.45)%, respectively, while those of aged sample reach (1 318±10.7) MPa and (11.74±0.33)%, respectively. The tensile strength is elevated by approximately 0.67 times after aging. The enhancement in tensile strength is mainly attributed to the synergistic effect of second-phase precipitation strengthening caused by carbide precipitation, strengthening of the matrix induced by HCP phase transformation and grain refinement strengthening.

Key words: laser wire deposition; phase composition; microhardness; tensile strength; cobalt-based alloy; surface coating

CoCrW 系合金是司太立合金中的经典合金体系,它具有卓越的耐高温、耐热腐蚀、耐磨损及优异的热稳定性和强度,在航空航天、汽车、电力等领域被广泛应用[1-4]。此外,高温热处理后,高硬度的碳化物在基体

① **收稿日期**: 2025-12-02
基金项目: 中国物流与采购联合会研究项目(JZW2025206)
作者简介: 李禄(1988—),女,吉林省吉林市人,博士,副教授,主要研究方向为物流工程技术。E-mail:liluchangchunedu@126.com

内部析出,能显著提升合金的强度和硬度[5]。然而,传统的铸造或堆焊工艺在制备 CoCrW 系合金时会产生碳化物粗化、应力集中、元素偏析等问题,严重制约了 CoCrW 系合金在复杂构件中的应用[6-7]。

近年来,激光熔丝沉积技术作为丝材定向能量沉积工艺的代表性技术之一,受到众多学者的关注[8]。与激光熔覆技术或激光选区熔化技术相比,激光熔丝沉积的丝材利用率接近 95%[9-13]。采用激光熔丝沉积技术可避免激光熔覆加工所带来的高成本,同时其加工过程中较小的热影响区和较低的稀释率可制备出性能优异的钴基合金。然而,现阶段针对 CoCrW 系合金的微观组织演化机制、高温相稳定性及其强化机制的研究较为匮乏。本文采用激光熔丝沉积技术制备 CoCrW 合金试样,并对试样在氩气条件下进行 900 ℃/4 h 时效处理,详细分析热处理对 CoCrW 合金试样沉积样品和时效样品显微组织及力学性能的影响规律,旨在为延长高价值部件使用寿命与提升其性能提供理论与技术支撑。

1 试验方法

选择物流车用精抛光 45 钢作为基体材料,长×宽×厚尺寸为 15 mm×15 mm×25 mm。采用 TD-6000 大功率光纤激光器进行激光熔丝沉积,以商用司太立 31 合金焊丝为激光熔丝,制备 Co-Cr-W 沉积层。商用司太立 31 合金焊丝直径 1.5 mm,其主要成分如表 1 所示。光纤激光器激光功率为 2 500 W,同步送丝速度为 600 mm/min。激光熔丝沉积过程中,单层沉积厚度约为 1.3 mm,累计沉积 5 层;全程采用氩气保护,保护气流量约 20 L/min;单道重叠率为 50%。为研究热处理对沉积层组织及性能的影响,采用热处理炉对沉积样品进行 900 ℃/4 h 时效处理,以促进碳化物析出。热处理前进行样品切割,并采用耐高温石英管对样品进行封存并通入氩气保护,隔绝氧气,避免热处理过程中发生氧化反应。

表 1 司太立 31 合金焊丝主要成分(质量分数)

Table 1 Main composition of Stellite 31 alloy welding wire %

Ni	Mo	Cr	W	C	Fe	Co
3.3	0.9	25.3	8.6	0.31	2.4	余量

分别对沉积样品和时效样品进行切割取样,并采用标准金相制备方法制备金相试样。采用王水对 2 种样品进行腐蚀,腐蚀时间均为 30 s。采用 X 射线衍射仪对 2 种样品的相组成进行表征,扫描速度为 4 (°)/min。采用扫描电镜和配套能谱仪分别对 2 种样品进行显微组织表征,并检测元素分布。此外,采用 EBSD 表征 2 种样品的晶体学特性。EBSD 测试前对样品表面进行电解抛光,电解液选用 10% $HClO_4$+90% 乙醇,电解电压为 20 V,温度为-20 ℃,电解时间 30 s。

随后采用显微硬度计对热处理前后试样的表面硬度进行检测,每个样品在表面不同位置测试 10 次,测试载荷为 500 g。采用万能试验机对 2 种样品进行拉伸性能测试,切取的样品垂直于成型方向,测试过程中加载速度为 1 mm/min,最大载荷为 20 kN。每种样品分别测试 3 次,以保证试验数据准确。

2 分析与讨论

2.1 相组成分析

图 1 为激光熔丝沉积 CoCrW 合金试样沉积样品和时效样品的 XRD 衍射图谱。结果表明,沉积样品由单一的 γ-Co 相组成,具有面心立方结构(FCC)。激光熔丝沉积过程中快速熔化和冷却作用抑制了 Co 在平衡状态下由 FCC 结构向密排六方结构(HCP)的缓慢扩散型相变,导致 FCC 结构并未向 HCP 结构转变[14]。Co 平衡相变温度约为 420 ℃,温度低于 420 ℃时 HCP 结构更稳定,但 Cr、W、C 等元素固溶在 γ-Co 相中,显著降低了 FCC 相向 HCP 相变的驱动力,从而导致 FCC 结构得以保留。大量的合金元素降低了 Co 的层错能,而 HCP 相需要通过 FCC 相晶格的层错叠加才能发生转变,因此同样抑制了 FCC 向 HCP 结构的转变[15]。经过 900 ℃/4 h 时效处理后,FCC 基体中的堆垛层错扩展为 HCP 核,促进了 FCC 相向 HCP 相的转变,生成了具有密排六方结构的 ε-Co 相。沉积过程中会形成过饱和固溶体,C 含量(质量分数)通常大于 0.6%,时效处理后,大量 C 原子析出,形成一定含量的 $Cr_{23}C_6$碳化物。HCP 相的生成与碳化物的析出同步发生,析出的碳化物会产生钉扎位错和晶界,从而阻碍 HCP 相的长程扩散,因此仅有一部分 FCC 相转变为 HCP 相[16]。

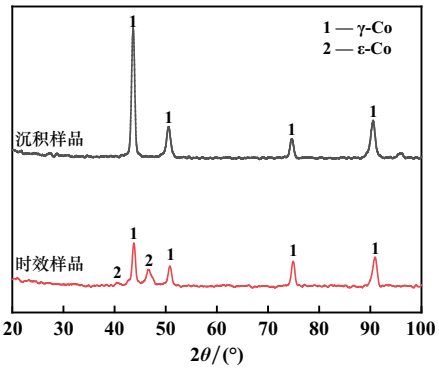
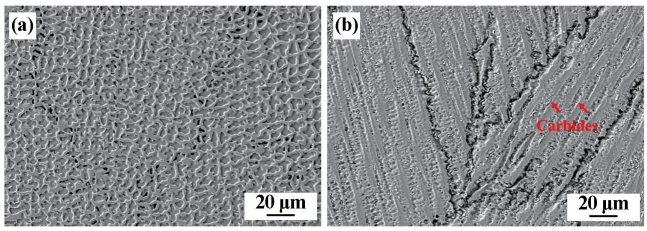


图 1 样品 XRD 衍射图谱

Fig. 1 XRD patterns of samples

2.2　元素分布及晶体学特性

图 2 为样品显微组织形貌。沉积样品具有均匀致密的胞状晶组织,符合激光增材制造过程中超高冷却速率形成的亚稳态结构[17]。在沉积样品中并未观察到明显的第二相颗粒析出,表明其由单一的过饱和固溶体结构组成,与 XRD 分析结果一致。时效样品基体内部观察到细小的第二相颗粒析出,第二相颗粒呈棒状或块状,均匀、弥散分布在基体内部,提高了合金的第二相强化效应,能显著提升材料的强度和硬度[18]。



(a) 沉积样品; (b) 时效样品

图 2　样品显微组织形貌

Fig. 2　Microstructure morphology of samples

为进一步分析析出的第二相颗粒的成分,采用能谱仪测试了时效样品的元素分布,结果如图 3 所示。结果表明,析出的第二相颗粒主要由 Cr 元素和 C 元素组成,推测为 $Cr_{23}C_6$ 碳化物。时效处理后,钴中碳溶解度大幅降低,迫使过量的碳和铬向能量有利的部位(枝晶边界和位错)扩散,该温度下,$Cr_{23}C_6$ 碳化物具有更高的稳定性(界面能最低且晶格失配应变最小),它们在此处形核[19]。沿枝晶边界呈链状分布的碳化物证实了这一由晶界扩散控制的析出过程,最终通过消耗过饱和溶质原子降低系统自由能,同时提高合金硬度[20]。

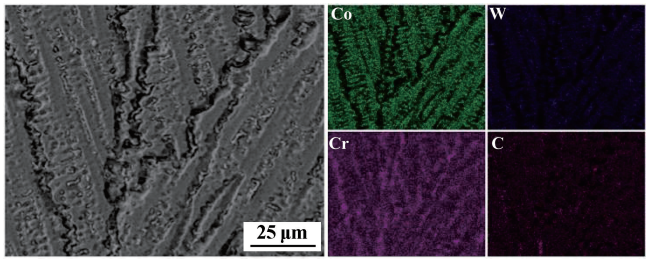
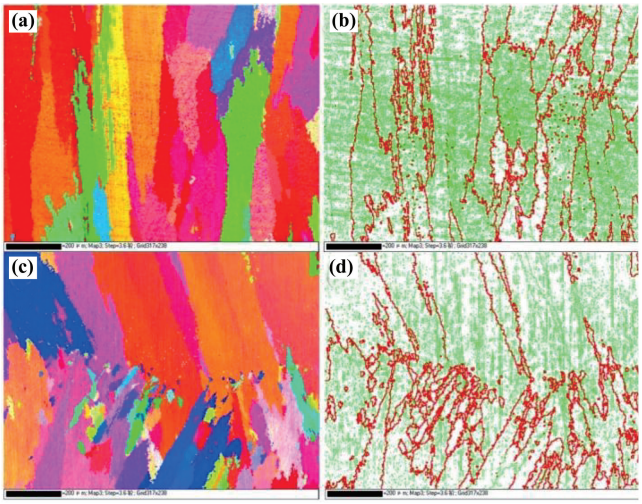


图 3　时效样品元素分布

Fig. 3　Element distribution maps of aging samples

图 4 为样品反极图及晶界分布图。其中,沉积样品的平均晶粒尺寸为(45.7±4.6) μm,以沿热流方向生长的柱状晶为主;时效样品晶粒尺寸为(21.4±3.3) μm,并且部分柱状晶转变为细小等轴晶,表明高温热处理破坏了柱状晶的连续性。沉积过程中的快速凝固导致样品内部形成内应力,时效处理后,内应力释放,促进晶粒形核,从而导致晶粒尺寸减小[21]。晶粒尺寸的减小可显著提升合金的晶界强化效应,从而显著提升材料强度和硬度。



(a)~(b) 沉积样品; (c)~(d) 时效样品

图 4　样品反极图及晶界分布图

Fig. 4　Inverse pole figure and grain boundary distribution diagram of samples

2.3　显微硬度

图 5 为样品表面显微硬度。沉积样品显微硬度为(387±10.7)HV,时效样品显微硬度为(534±17.6)HV,时效处理后样品显微硬度提升约 0.4 倍。$Cr_{23}C_6$碳化物的析出引起第二相强化作用,从而显著提升时效样品的显微硬度。FCC 相向 HCP 相的转变同样提升了钴基合金的显微硬度。此外,晶粒尺寸的细化同样能提升材料硬度。

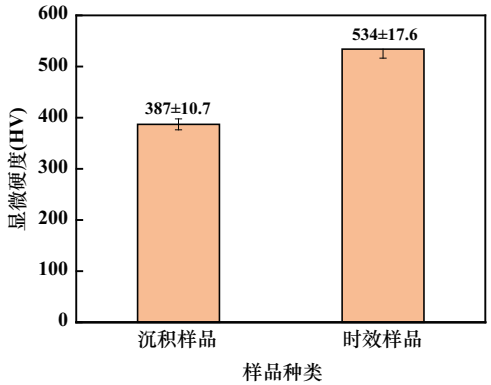


图 5　样品表面显微硬度

Fig. 5　Surface microhardness of samples

2.4　力学性能分析

样品的应力-应变曲线如图 6 所示。沉积样品抗拉强度为(787±16) MPa,伸长率为(16.6±0.45)%。

时效样品抗拉强度为(1 318±10.7) MPa,伸长率为(11.74±0.33)%,时效样品较沉积样品抗拉强度提升了约 0.67 倍。时效样品抗拉强度的提升可归因于以下三点:① 时效处理诱发了合金内部 $Cr_{23}C_6$ 相的析出,这些相均匀弥散分布在合金内部,引发了合金的第二相强化效应[22];② 时效处理后,一定含量的 FCC 相转变为 HCP 相,具有 HCP 结构的 ε-Co 相强度和抗变形能力显著优于具有 FCC 结构的 γ-Co 相[23];③ 高温热处理导致部分粗大的柱状晶转变为细小的等轴晶结构,晶粒尺寸细化,细晶强化作用增强。综上所述,时效处理后合金强度的提升可归因于碳化物析出引起的第二相析出强化、HCP 相转变对基体的强化和细晶强化的协同作用。

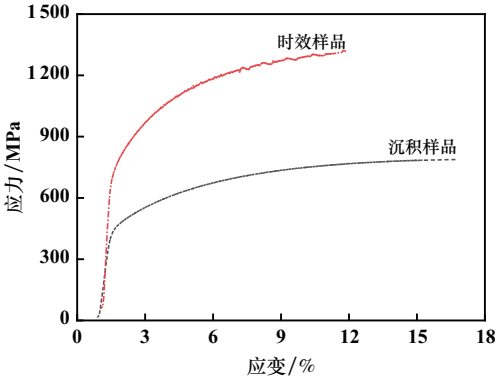
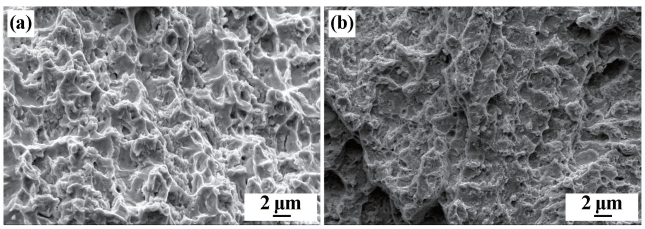


图 6 样品应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of samples

为进一步分析激光熔丝沉积钴基合金在时效处理前后的断裂机理,采用 SEM 表征了 2 种样品的断口形貌,结果如图 7 所示。沉积样品断口表面可观察到少量平坦解理面,并存在少量放射状撕裂棱,此外在解理面交界处存在韧窝,且分布较均匀,表明其断裂机理以微孔聚集型韧性断裂为主[24]。时效样品断口表面呈现大面积平摊解理面和韧窝,并且大量细小第二相颗粒均匀分布在断口表面,表明其断裂机理为脆性断裂和韧性断裂。在时效样品断口表面均匀分布的第二相颗粒,验证了碳化物析出而诱导的第二相强化提升了钴基合金的强度和硬度。



(a) 沉积样品;(b) 时效样品

图 7 样品断口形貌

Fig. 7 Fracture morphology of samples

3 结论

采用激光熔丝沉积技术在钢基体表面制备了 CoCrW 合金,并系统研究了时效处理对 CoCrW 合金显微组织、硬度及拉伸性能的影响,结果表明:

1) 沉积样品由具有 FCC 结构的 γ-Co 固溶体组成;时效处理后,部分 γ-Co 固溶体转变为具有密排六方结构的 ε-Co 固溶体。

2) 时效处理后,CoCrW 合金内部析出了碳化物 $Cr_{23}C_6$,并均匀分布在基体内部,碳化物引起的第二相强化提升了合金的显微硬度。时效样品平均显微硬度为(534±17.6)HV,较沉积样品显微硬度提升了约 0.4 倍。

3) 沉积样品抗拉强度为(787±16) MPa,伸长率为(16.6±0.45)%;时效样品抗拉强度为(1 318±10.7) MPa,伸长率为(11.74±0.33)%,时效样品较沉积样品抗拉强度提升了约 0.67 倍。时效处理后抗拉强度的提升主要归因于碳化物析出引起的第二相析出强化、HCP 相转变对基体的强化和细晶强化的协同作用。

参考文献(References):

[1] ZHANG C, CHEN F, WANG Q, et al. Additive manufacturing and mechanical properties of TC_4/Inconel 625 functionally graded materials by laser engineered net shaping[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023,862:144370.

[2] CHAURASIA J K, JINOOP A N, PAUL C P, et al. Effect of deposition strategy and post processing on microstructure and mechanical properties of serviced Inconel 625 parts repaired using laser directed energy deposition [J]. Optics & Laser Technology, 2024, 168: 109831.

[3] TRIPATHY M, GASKELL K, LAURETO J, et al. Elevated temperature fretting wear study of additively manufactured Inconel 625 superalloy[J]. Additive Manufacturing, 2023,67:103492.

[4] NIU M C, ZHOU G, WANG W, et al. Precipitate evolution and strengthening behavior during aging process in a 2.5 GPa grade maraging steel[J]. Acta Materialia, 2019,179:296-307.

[5] BERTSCH K M, MERIC DE BELLEFON G, KUEHL B, et al. Origin of dislocation structures in an additively manufactured austenitic stainless steel 316L[J]. Acta Materialia, 2020,199:19-33.

[6] NI C, SHI Y, LIU J, et al. Characterization of $Al_{0.5}FeCu_{0.7}NiCoCr$ high-entropy alloy coating on aluminum alloy by laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2018,105:257-263.

[7] YASAVOL N, ABDOLLAH-ZADEH A, GANJALI M, et al. Microstructure and mechanical behavior of pulsed laser surface melted AISI D2 cold work tool steel[J]. Applied Surface Science, 2013, 265: 653-662.

[8] 石锋,魏祥,陈志国,等. 超高速激光熔覆 Al_2O_3-316L 涂层工艺优化及耐腐蚀性能研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):178-182.
SHI Feng, WEI Xiang, CHEN Zhiguo, et al. Corrosion resistance of

Al_2O_3-316L coatings based on optimized extreme high-speed laser cladding technology [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):178-182.

[9] XU X F, GANGULY S, DING J L, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire+arc additive manufacture process [J]. Materials Characterization, 2018, 143:152-162.

[10] MAO Z F, LU X D, YANG H R, et al. Processing optimization, microstructure, mechanical properties and nanoprecipitation behavior of 18Ni300 maraging steel in selective laser melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022,830:142334.

[11] XU T Z, WANG T, WANG M S, et al. Influence of solid solution time on microstructure and precipitation strengthening of novel maraging steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2025,920: 147535.

[12] 陈磊. 激光熔覆司太立合金的研究[D]. 上海:上海工程技术大学, 2016.
CHEN Lei. Research on stellite alloy coating by laser cladding[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2016.

[13] 陈兴东,郭维华,杨建平,等. GH901 基体表面等离子喷焊司太立 6#合金层的组织与性能研究[J]. 电焊机, 2021,51(3):76-83.
CHEN Xingdong, GUO Weihua, YANG Jianping, et al. Study on microstructure and properties of Stellite 6# alloy layer by plasma spray welding on GH901 substrate[J]. Electric Welding Machine, 2021,51(3):76-83.

[14] ZHONG M L, LIU W J, YAO K F, et al. Microstructural evolution in high power laser cladding of Stellite 6+WC layers[J]. Surface and Coatings Technology, 2002,157(2/3):128-137.

[15] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J S, et al. Additive manufacturing of metallic components: Process, structure and properties[J]. Progress in Materials Science, 2018,92:112-224.

[16] ROBERTS I A, WANG C J, ESTERLEIN R, et al. A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009,49(12/13): 916-923.

[17] DÍAZ E, AMADO J M, MONTERO J, et al. Comparative study of co-based alloys in repairing low Cr-Mo steel components by laser cladding[J]. Physics Procedia, 2012,39:368-375.

[18] DENG D W, ZHANG C P, CHEN R, et al. Microstructure and microhardness of 17-4PH deposited with co-based alloy hardfacing coating[J]. Physics Procedia, 2013,50:177-184.

[19] STOYANOV P, ANDRE K, PRICHARD P, et al. Microstructural and mechanical characterization of Mo-containing stellite alloys produced by three dimensional printing[J]. Procedia CIRP, 2016,45: 167-170.

[20] MOTALLEBZADEH A, ATAR E, CIMENOGLU H. Sliding wear characteristics of molybdenum containing Stellite 12 coating at elevated temperatures[J]. Tribology International, 2015,91:40-47.

[21] KONDRAT'EV S Y, KRAPOSHIN V S, ANASTASIADI G P, et al. Experimental observation and crystallographic description of M_7C_3 carbide transformation in Fe-Cr-Ni-C HP type alloy[J]. Acta Materialia, 2015,100:275-281.

[22] LIN W C, CHEN C. Characteristics of thin surface layers of cobalt-based alloys deposited by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2006,200(14/15):4557-4563.

[23] ARABI JESHVAGHANI R, SHAMANIAN M, JABERZADEH M. Enhancement of wear resistance of ductile iron surface alloyed by stellite 6[J]. Materials & Design, 2011,32(4):2028-2033.

[24] HEJWOWSKI T. Sliding wear resistance of Fe-, Ni- and Co-based alloys for plasma deposition[J]. Vacuum, 2006, 80(11/12):1326-1330.

引用本文:李禄. 物流车用钢表面激光熔丝沉积 CoCrW 合金组织及力学性能研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):279-283.

LI Lu. Microstructure and mechanical properties of CoCrW alloy fabricated by laser wire deposition on steel for logistics vehicles [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):279-283.