动车组车轴增材再制造材料选择和性能评价

侯有忠[1]，齐先胜[1]，邓鸿剑[1]，李世亮[2]，牛富杰[1]

（1.中车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东 青岛 266111；
2.陕西天元智能再制造股份有限公司，西安 710018）

摘 要：目的 选择最佳材料用于动车组车轴的再制造，以符合车轴的力学性能及轮对压装技术要求。**方法** 以激光熔覆技术作为增材再制造技术工艺方法，选择不同化学成分的合金材料，通过熔覆金属的力学性能、线膨胀系数、过渡熔合区成分、稀释区组织以及硬度突变情况对比分析，确定最佳车轴再制造材料。对所选材料激光熔覆试件的宏观组织、微观组织、化学成分、硬度、力学性能进行检测，并开展轮对压装试验，通过光学显微镜、扫描电镜、纳米压痕法进行分析。**结果** Schaeffler 组分图预测 Fe310、Fe314 的激光熔覆金属熔合过渡区组织为奥氏体 A+铁素体 F 组织，但是实际过渡区的硬度值高于 600HV，说明有硬质马氏体相析出，而 Fe310 和 NiCrMo 合金的熔合区硬度值未发生突变，Fe310 的力学性能略低于 EA4T 钢，且线膨胀系数与基体差距较大，因此不适用于车轴的再制造。选择 NiCrMo 合金作为车轴再制造增材材料，其熔覆金属的抗拉强度为 790 MPa，屈服强度为 542 MPa，冲击韧性为 68 J/KU$_5$，且具有相近的线膨胀系数。另外，NiCrMo 合金纳米压痕的压缩弹性模量 E_r 为 180~185 GPa，与基体 EA4T 钢（185~190 GPa）相近，最终经再制造车轴的轮轴压装试验，其压装曲线的最大压装力在 680~1160 kN 范围内，曲线也符合标准要求。**结论** 选择 NiCrMo 合金作为动车组车轴再制造激光熔覆材料，其热膨胀系数、力学性能以及压缩弹性模量与基体 EA4T 钢相近，且激光熔覆金属过渡区域无脆硬的马氏体组织产生，并通过了轮对的压装试验，满足动车组压装曲线要求。

关键词：再制造；动车组；车轴；激光熔覆；NiCrMo 合金；压装曲线

中图分类号：TG146；U266 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2020)12-0162-08

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.12.018

Material Selection and Mechanical Property Evaluation for Additively Remanufactured EMU Axles

HOU You-zhong[1], QI Xian-sheng[1], DENG Hong-jian[1], LI Shi-liang[2], NIU Fu-jie[1]

(1.CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd, Qingdao 266111, China;
2.Shaanxi Tyontech Intelligent Remanufacturing Co., Ltd, Xi’an 710018, China)

ABSTRACT: The work aims to select the optimum material for remanufacturing of EMU axles and meet the mechanical property requirements of the axle and the conditions of the wheelset press-fitting. The appropriate material for the remanufacturing of the EMU axles was determined through selecting alloy materials of different chemical composition as well

收稿日期：2019-11-10；**修订日期：**2020-03-10
Received：2019-11-10；**Revised：**2020-03-10
作者简介：侯有忠（1966—），男，高级工程师，主要从事动车组检修工艺工作。邮箱：houyouzhong.sf@crrcgc.cc
Biography：HOU You-zhong (1966—), Male, Senior engineer, Research focus: EMU maintenance technology. E-mail: houyouzhong.sf@crrcgc.cc
引文格式：侯有忠，齐先胜，邓鸿剑，等. 动车组车轴增材再制造材料选择和性能评价[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 162-169.
HOU You-zhong, QI Xian-sheng, DENG Hong-jian, et al. Material selection and mechanical property evaluation for additively remanufactured EMU axles[J]. Surface technology, 2020, 49(12): 162-169.

as comparing and analyzing mechanical properties, coefficient of linear expansion, composition in the dilution zone of fusion area, and hardness variation of the deposited metal by laser cladding technology. The cladded specimens were analyzed in terms of macroscopic structure, microstructure, chemical composition, hardness, mechanical properties and wheelset press test by optical microscopy, scanning electron microscopy and nano indentation. The microstructure of the laser cladding fusion area for Fe314 and Fe316 should consist of A+F as predicted by Schaeffler composition diagram, but the hardness value of the actual fusion area was higher than 600HV, which implied the existence of martensite formation. On the other hand, the hardness of the fusion zone was consistent with the deposited Fe310 and NiCrMo alloy. The mechanical properties of Fe310 were lower than those of EA4T steel, and the coefficient of linear expansion was much different from that of the EA4T steel. As such, Fe310, Fe314, and Fe316 were regarded not suitable for remanufacturing of EMU axles. NiCrMo was selected instead because the tensile strength was 790 MPa, the yield strength was 542 MPa, the impact toughness was 68 J/KU$_5$ for the deposited NiCrMo alloy, and it had a similar coefficient of linear expansion compared with EA4T steel. In addition, the compressive elastic modulus Er in nano indentation was 180~185 GPa for the NiCrMo alloy, which was close to the compressive elastic modulus Er of 185~190 Gpa for the EA4T steel. The press-fit curve of remanufactured axles showed the maximum pressing force in the range of 680~1160 kN, which was deemed acceptable. NiCrMo alloy is selected as the laser cladding material for remanufacturing of EMU axle because its thermal expansion coefficient, mechanical properties and compressive elastic modulus of cladding metal and substrate EA4T steel are similar, and there is no brittle martensite structure in the transition zone of laser cladding metal, it has passed the press-fitting test of wheelset, and it meets the requirements of press-fitting curve of EMU.

KEY WORDS: remanufacturing, EMU, axle, laser cladding, NiCrMo alloy, press-fitting curve

动车组列车车轴基体材料为 EA4T 钢[1]，其成分体系属于 25CrMo4 系钢，具有优异的力学性能，但由于车轴材料表面硬度为 220~250HV，相对而言，硬度低。在动车组组装、退卸和检修过程中，车轴的轮座、集电环座、齿轮座等配合部位会产生划伤、磕碰及微振磨蚀。当损伤深度大于 0.1 mm 时，进行报废处理[2]，从而造成巨大的资源浪费以及动车组运营成本增高。因此，开发和研究车轴再制造技术，恢复车轴的使用性，充分利用车轴的剩余使用寿命，可降低高铁运营成本，以促进资源循环高效利用[3-4]。

激光熔覆技术是以同轴或侧向送粉方式在被熔覆基体表面熔覆特定材料，经激光辐照使之和基体表面一同熔化，快速凝固后，形成稀释度极低、与基体呈冶金结合的表面覆层的工艺方法，从而达到表面改性或增材修复的目的[5]。该技术作为表面处理或激光增材关键技术之一，已广泛用于机械零部件的再制造。对于动车组列车车轴的再制造，目前国内外已有学者在此领域进行了研究探索。李丛辰等[6]研究了在 EA4T 钢表面激光熔覆 Fe314 不锈钢熔覆层的微观组织、物相结构以及硬度等，结果表明：Fe314 熔覆层的组织由底部的平面晶与平面晶上方垂直于界面生长的粗大树枝晶组成，熔覆层中部和上部组织以交叉树枝晶为主；熔覆层的硬度值在 338~404HV$_{0.2}$之间，硬度值高于母材。蔡擎等[7]研究了 EA4T 钢表面激光熔覆 Fe-Cr-Ni 合金的组织与性能，结果表明：激光熔覆层经热处理后的残余应力为压应力，但是熔覆金属的冲击试验结果表现为脆性。综上所述，因所采用熔覆金属为脆性材料，熔覆金属韧性较差，并不满足于车轴再制造的要求。为了解决车轴再制造增材材料选择问题，本文依据 Schaeffler 组分图预测激光熔覆熔合过渡区的组织形态，以增材材料熔覆金属的力学性能相当或略高于基体 EA4T 钢为基本原则，对几种典型高合金铁基材料和镍基材料的纯熔覆金属的性能进行检测和对比分析，并通过轮对的压装曲线验证材料固有属性是否满足轮对过盈联接要求。增材材料选型研究是车轴再制造的重要研究课题之一。

1　试验

1.1　车轴再制造增材材料的选择依据

车轴激光增材再制造材料分为同质增材材料和异质增材材料。所谓同质增材是指熔覆金属的化学成分与基体材质化学成分基本一致或相近，而异质增材是指熔覆金属的化学成分与基体材料完全不同。目前，适用于激光熔覆增材的粉末材料必须具有自熔性，且为了提供材料表面的特殊性能，熔覆金属的化学成分多异于基体材料，而以异质增材为主。动车组车轴 EA4T 钢属于低合金钢，若采用该类材料制成激光熔覆金属粉末，会因不具有自熔性和抗氧化性差等原因而不适用于激光熔覆。因此，可选择中、高铬（Cr）的合金钢以及镍（Ni）基合金材料作为车轴激光增材再制造材料，但是这类材料牌号种类繁多，选择最合理的金属粉末材料是车轴再制造的关键。本文以 Schaeffler 组分图（见图 1）预测不同化学成分的熔覆金属与 EA4T 熔合过渡区的组织来选择粉末材料。根

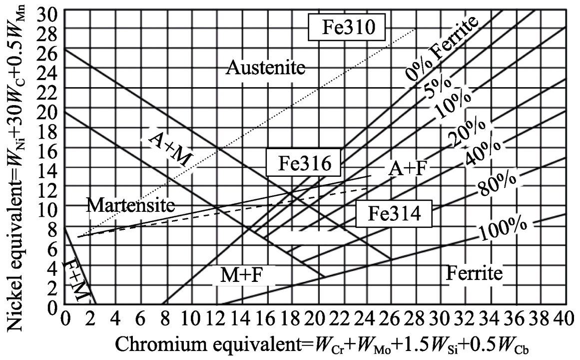


图 1 用 Schaeffler 组分图预测熔合区的组织[9]
Fig.1 Prediction of microstructure of fusion zone using Schaeffler compositional map[9]

据朱蓓蒂等[8]研究激光工艺对稀释率的研究成果：工艺对熔覆金属稀释率的影响较大，而粉末填充量决定了稀释率。若假设激光熔覆的稀释率小于 10%，根据 Schaeffler 组分图计算 Fe314、Fe316、Fe310 有不同的镍当量值（Nieq），并可预测 Fe314、Fe316 与 EA4T 钢熔合区域的组织为 A+F，而 Fe310 与 EA4T 钢熔合区的组织为奥氏体组织，这三种材料的熔合区均无硬脆的马氏体（M）相析出，可适用于 EA4T 钢的熔覆。镍基 NiCrMo 合金的熔合区组织亦为奥氏体组织，也可以作为车轴的增材再制造材料。

1.2 车轴再制造试件和材料

所选择铁基 Fe314、Fe310、Fe316 以及镍基 NiCrMo 合金粉末，均为粒度在 53~105 μm 的球形粉末，四种材料的化学成分见表 1。制备板状坡口型试件（见图 2）和车轴代表性试件（见图 3），分别用于评价熔覆金属的力学性能和激光熔覆车轴的匹配性性能，试件基体材料均取自车轴 EA4T 钢。

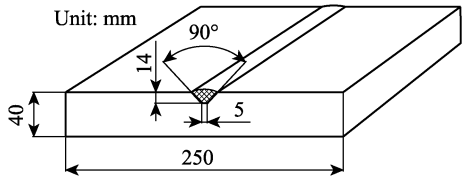


图 2 板状坡口形试件
Fig.2 Test plate with groove

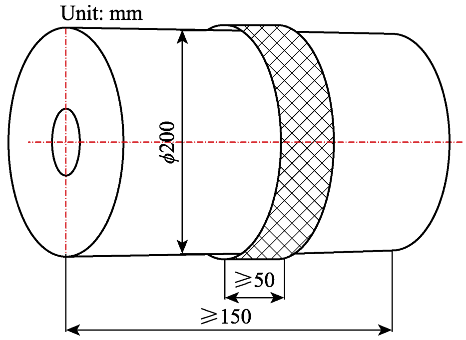


图 3 车轴熔覆代表性试件
Fig.3 Representative test piece for axle cladding

表 1 不同车轴再制造增材激光熔覆粉末材料的化学成分
Tab.1 Chemical composition of laser cladding powder materials for remanufacturing of EMU axles

wt%

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe	Other
Fe314	0.20	1.04	0.139	0.034	0.0087	17.84	10.16	0.056	0.034	Rem	B: 0.024
Fe316L	0.03	0.3~0.65	1.0~2.5	0.03	0.03	18~20	11~14	2.0~3.0	0.75	Rem	—
Fe310	0.08~0.15	0.30~0.65	1.0~2.5	0.03	0.03	25.0~28.0	20.0~22.5	0.75	0.75	Rem	—
NiCrMo Alloy	≤0.1	≤0.5	≤0.5	≤0.02	≤0.015	20.0~23.0	≥58.0	8.0~10.0	—	≤5.0	Nb: 3.15~4.15

1.3 试件的制备

1.3.1 试件的激光熔覆参数

板状坡口试板和车轴熔覆代表性管状试件的激光熔覆工艺基本相同，激光熔覆设备采用进口 Laserline 4KW 半导体-光纤耦合激光器，配合柔性执行机构及控制系统。激光熔覆关键参数见表 2。

1.3.2 激光工艺要求和注意事项

1）试件准备：清理干净熔覆区域及周围的油、锈、水等污物。

2）设备启动：先开启保护气和送粉系统，然后开启激光器。

3）激光熔覆：板状坡口试件采用单向熔覆方式，并及时清理前道残留的粉末，防止未熔合和夹渣。

4）熔覆尺寸：板状坡口试板熔覆金属填充略高于母材 1 mm 以上，车轴代表性试件熔覆宽度大于 50 mm，单层厚度 0.5~0.8 mm。

5）无损检测：对板状坡口形试板，按照 NB/T 47013.2—2015[10]对熔覆金属及热影响区进行 100%RT（X 射线）检测。对车轴代表性试件，按照 NB/T 47013.5—2015[11]进行 100%渗透检测。

1.3.3 再制造全尺寸车轴的制备

采用 NiCrMo 合金作为激光增材材料修复 3 根完整的车轴，激光熔覆工艺参数参照表 2。在车轴齿轮座和轮座位置分别激光熔覆 2 层，且熔覆金属厚度不小于 1.0 mm，激光熔覆后，机加工至与新轴相同的尺寸和精度，并选择材质为 ER8 的车轮进行压装试验。

表 2　激光熔覆关键要素及参数
Tab.2 Variables and parameters of laser cladding

Type	Essential Variables	Parameters	Note
Laser characteristics	Laser type	Semiconductor-fibre	
	Model No. of equipment	Laserline 4 kW	Robot No.: KR60HA
	Laser power	2.0~2.25 kW	
	Spot size	ϕ3.0 mm	
	Speed	10 mm/s	
Preheat/postheat	Preheat or postheat	None	Inter pass temp≤100 ℃
Gas	Powder feed gas/Flow	Ar,8 L/min	Ar≥99.997%
	Shielding gas/Flow	Ar,13 L/min	
Technique	Heat input	≤0.225 kJ/mm	
	Amount of lap	50%	
	Distance between nozzle and work piece	14~15 mm	
	Powder feed mode		
	Powder feed speed	22~25 g/min	
	Multiple and single layer	Multiple layers and passes	Test piece of Groove plate
		Two layers and multiple passes	Cladding on axle surface, and a single layer thickness is 0.6 mm

1.4　性能检测

采用 DHV-1000Z 数显显微维氏硬度计(加载 50 g) 测定熔覆金属、熔合区域、热影响区以及母材的硬度分布。采用 11XD-PC 光学显微镜和 JEOL-6010 型扫描电镜对四种熔覆金属及母材熔合过渡区的微观组织和元素组成进行观察和分析。

在板状坡口试件中，各取 2 件直径为 6 mm 的标准圆形拉伸试样，采用万能力学试验机检测纯熔覆金属抗拉强度、屈服强度、伸长率。各取三件尺寸为 55 mm×10 mm×10 mm 的标准夏比 U 型冲击试样，缺口深度为 5 mm，采用夏比冲击试验机测定不同熔覆金属在(20±2) ℃条件下的 KU_5 冲击吸收功。

采用美国 Agilent Technologies 公司的 Nano Identer G200 型纳米压痕仪测量 EA4T 钢上熔覆 NiCrMo 合金熔覆金属、熔合过渡区和母材的压缩弹性模量和纳米压痕硬度值。由中车四方股份对再制造全尺寸车轴进行轮对压装试验，检测压装加载应力值 *F* 与位移 *S* 的压装曲线。

2　结果及分析

2.1　显微维氏硬度检测和分析

四种熔覆材料的激光熔覆、熔合区、热影响区以及母材的显微维氏硬度分布曲线如图 4 所示。Fe314 和 Fe316 熔覆金属熔合区的硬度值发生突变，硬度值高达 600HV 以上。依据 Schaeffler 组分图预测：这两种材料熔合线处的组织中出现了脆硬的马氏体组织。Fe316 熔覆金属熔合区的扫描电镜线扫化学成分变化曲线和不同区域的成分点扫见图 5 和表 3。在距离熔合线 0.6 mm 范围内，化学成分呈梯度式变化，但当第二次熔覆后，母材对熔覆金属的稀释率下降，硬度值为纯熔覆金属的维氏硬度值。Fe316 纯熔覆金属硬度平均值为 $180HV_{0.5}$，Fe314 纯熔覆金属硬度平均值为 $350HV_{0.5}$。对于 Fe310 和 NiCrMo 合金，Nieq 值和 Creq 值较高，熔合区域的化学成分经母材稀释后，组织仍为奥氏体组织，无马氏体组织析出，因此其硬

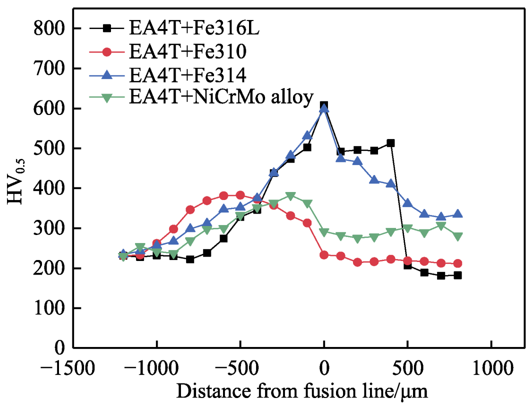


图 4　不同材料的硬度变化曲线
Fig.4 Hardness curve of different materials

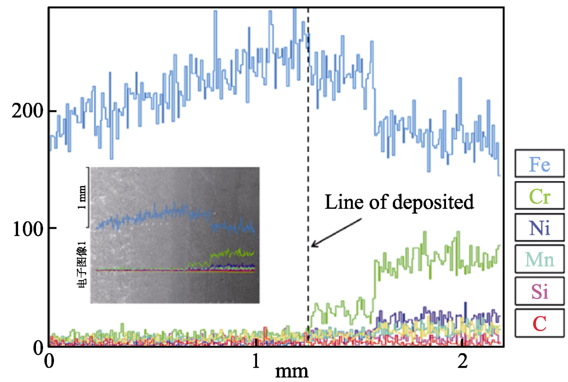
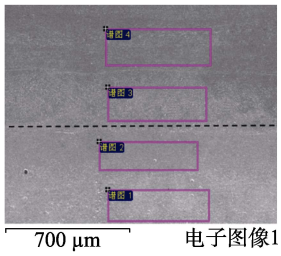


图 5　Fe316 熔覆金属及母材的线扫描结果
Fig.5 EDS line scan results of Fe316 cladding metal and base metal

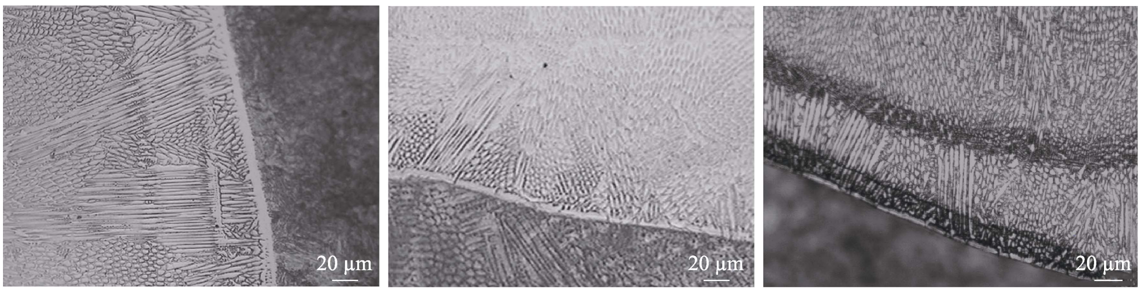
表 3　Fe316 在 EA4T 钢不同区域的点成分扫描结果
Tab.3 Point scan results of Fe316 on EA4T steel

Spe.	C	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo	Total	Graphic
Spe.1	0.13	1.07	1.18	97.62	—	—	100.00	
Spe.2	0.13	1.50	1.17	96.48	—	0.73	100.00	
Spe.3	0.15	8.74	1.33	81.07	6.66	2.04	100.00	
Spe.4	0.14	17.30	—	67.39	11.93	3.24	100.00	
Max.	0.15	17.30	1.33	97.62	11.93	3.24		
Min.	0.13	1.07	1.17	67.39	6.66	0.73		

度值曲线平滑过渡。对于母材热影响区，硬度值升高，但不高于 380HV$_{0.5}$。这是由于激光熔覆过程中，母材受到激光热辐射，升温至奥氏体温度，激光离开加热区域后，母材金属瞬间降温，热影响区组织相当于激光淬火处理。当第二道熔覆时，热影响区组织又相当于经历回火作用，但是硬度值高于母材，可以通过再制造的退火热处理工艺恢复其原硬度值。故而从过渡区组织形态来看，Fe310 和 NiCrMo 合金比 Fe314 和 Fe316 的熔覆金属更适合于车轴的增材再制造。

2.2　微观组织及形态和分析

Fe310、Fe316 和 NiCrMo 合金在 EA4T 基体上的熔覆层的光学显微组织形貌如图 6 所示。三种材料的激光熔覆金属组织细密，均由与基体界面形成的一条“亮白”平面晶、细长柱状晶以及胞状晶组成。由文献[12]的研究成果可知，激光熔覆熔池液态金属以急快的冷却速率（可达 10^4 ℃/s 以上）凝固，结合金属凝固理论——液相中温度梯度 G 与凝固速率 R 对凝固模式的影响（见图 7），可以推断：熔覆金属熔合线（S/L）处的温度梯度 G_L 较大，凝固速度 R 最小，成分过冷很小，晶体呈平面晶生长；随着结晶过程向熔覆金属上部推进，温度梯度 G 减小，凝固速率 R 逐渐增加，G/R 逐渐减小，成分过冷逐渐增大，界面生长方式由平面晶逐渐过渡到细长柱状晶和胞状晶。另有文献[13]也阐述了这种高 Cr 合金或镍基合金在激光熔覆条件下的组织形态。



a Fe310+EA4T　　b Fe316+EA4T　　c NiCrMo+EA4T

图 6　Fe310、Fe316 和 NiCrMo 合金与 EA4T 钢熔合区的组织形态(光学显微组织)
Fig.6 Microstructure of Fe310, Fe316 and NiCrMo alloy and EA4T steel fusion zone (optical microscopy images)

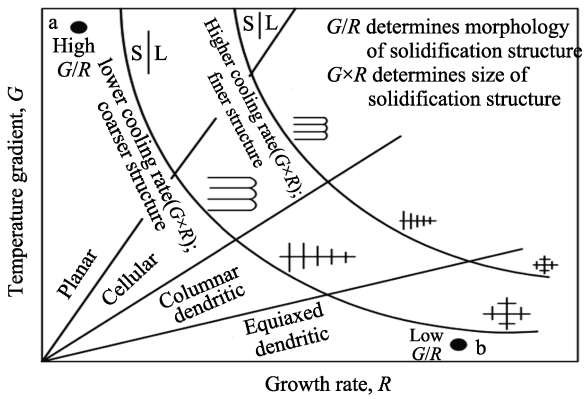


图 7　温度梯度 G 与晶体生长速率 R 对凝固形态和晶粒尺寸的影响[9]
Fig.7 Effect of temperature gradient G and growth rate R on morphology and size of solidification microstructure[9]

2.3　力学性能和分析

四种材料的力学性能和夏比 KU$_5$ 冲击韧性的试验结果见表 4。可以看出，Fe314 熔覆金属的冲击韧性较差。这是由于为了提高熔覆材料的硬度和自熔性，Fe314 粉末金属成分（表 1）中增加了一定量的低熔点硼（B）元素，在激光熔覆快速凝固过程中，这些低熔点、低质量密度的非金属物质来不及溢出表面，而弥散分布在熔覆金属中，形成夹渣，使得该熔覆金属冲击韧性差和伸长率低。Fe310 和 Fe316 两种金属粉材料不含或含极少量的 B 元素，熔覆金属的冲击韧性较好，但 Fe316 抗拉强度均低于 EA4T 钢要求值，Fe310 熔覆金属的抗拉强度虽然满足最低抗拉强度 650 MPa 的要求，但裕度不足。而 NiCrMo 合金各项力学性能和冲击韧性指标均满足要求。

表 4　不同材料的力学性能和 KU_5 冲击韧性性能

Tab.4 Mechanical properties and KU_5 impact toughness properties of different materials

Material type	Test temp. /℃	Tensile strength/ MPa	Yield strength /MPa	Extensibility /%	Impact value/(Jat20 ℃)	
					Traverse	Longitudeinal
EA4T		650~800	⩾415	⩾18	⩾25	⩾40
Fe310	20±2	651	500	22	65, 63, 59	
Fe314		615	523	12	4.2, 4.4, 5.2	
Fe316		563	413	50	98, 87, 93	
NiCrMo Alloy		790	542	35.5	68, 70, 74	

2.4　线膨胀系数性能和分析

不同材料在不同温度至室温条件下的线膨胀系数曲线如图 8 所示[14]。304 钢的平均线膨胀系数与 25 号钢、30CrMoA 钢差别较大，这两类材料在激光熔覆的非稳态凝固变化和极速的冷却条件下，在熔合线及热影响区处会产生局部梯度较大的应力分布，即残余应力较大，使得激光熔覆过程中或工件运行中存在熔覆金属和基体之间发生开裂的可能，特别是由于低温到高温的热循环引起开裂。NiCrMo 合金与低合金钢的线膨胀系数基本相近，在激光熔覆热循环中，熔覆金属及母材在温度变化中膨胀和收缩保持一致，有助于降低应力分布的梯度，减小残余应力。Fe316、Fe310 等 300 系列中、高铬含量的合金钢的线膨胀系数与 304 钢相近，EA4T 钢属于低合金钢，与 30CrMoA 具有接近的线膨胀系数。因此 NiCrMo 合金作为车轴激光增材再制造材料具有热膨胀系数相近这一特点，可以减少裂纹出现的几率。

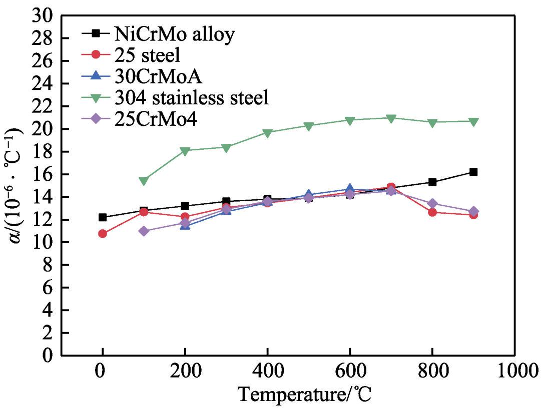
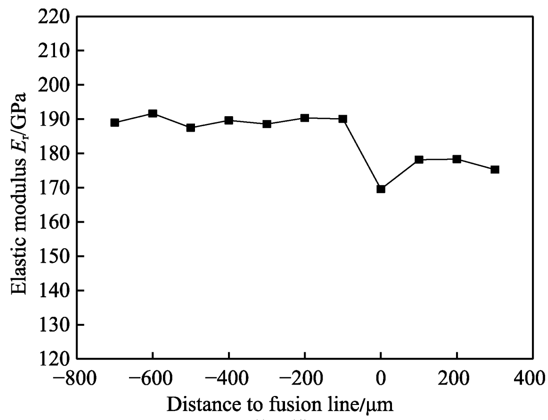


图 8　不同材料的平均线膨胀系数

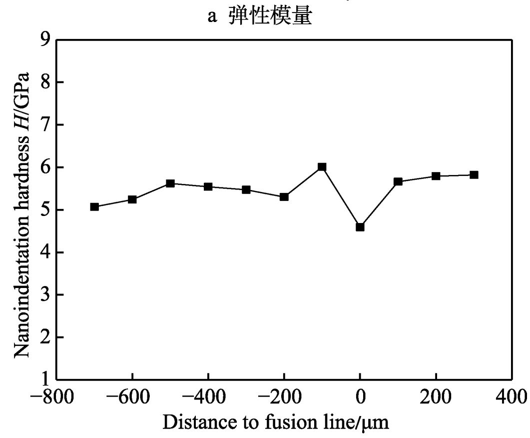
Fig.8 Average coefficient of linear expansion of different materials

2.5　弹性模量性能分析

车轴增材再制造材料选择的另一个重要因素是车轴材料的弹性模量，因车轴与车轮压装过盈量与配合材料弹性模量息息相关，而过盈量影响轮对的压装载荷应力参数，因此需要选择弹性模量与母材接近的材料。如图 9 所示，通过纳米压痕法检测的是材料的压缩弹性模量，其值略低于拉伸弹性模量（基体的拉伸弹性模量为 206 GPa，而熔覆金属材料的拉伸弹性模量约为 201 GPa）。由图 9 可以看出，熔覆金属的弹性模量 E_r 在 180~185 GPa 范围内，热影响区和母材的弹性模量 E_r 在 185~190 GPa 范围内，而熔合线的弹性模量略低于熔覆金属。这是由于激光熔覆过程中母材对于熔覆金属有稀释作用，熔合区 8 μm 范围内（如图 10 所示）的化学成分由高浓度向低浓度均匀梯度变化，而在梯度变化区域的化学成分较为复杂，该部位是熔覆金属性能的薄弱环节，也是车轴激光再制造技术研究特别关注和优化的重点之一。对于纳米硬度而言，其母材和纯熔覆金属的硬度基本一致，但是熔合区的纳米硬度值下降，亦是因母材对熔覆金属的稀释造成的成分变化导致的。



a 弹性模量



b 纳米硬度

图 9　纳米压痕法检测弹性模量和纳米硬度曲线

Fig.9 Elastic modulus (a) and nanohardness (b) by nano indentation

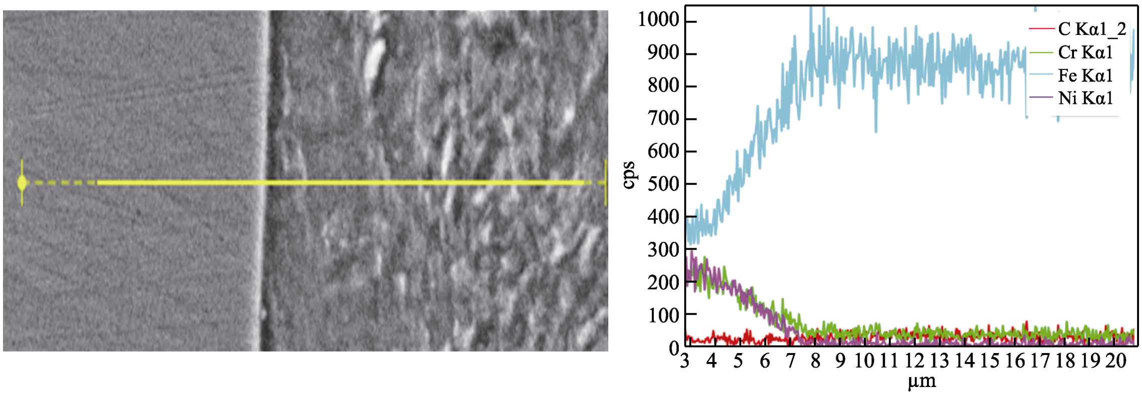


图 10　NiCrMo+EA4T 钢熔合过渡区的线扫描结果
Fig.10 EDS line scan results of fusion transition zone for NiCrMo + EA4T steel

2.6　再制造车轴的压装及检压试验分析

轮对是动车组车辆的重要部件，而轮对组装是保障轮对质量和列车运行安全的生产工序之一，再制造车轴的材料选择必须满足轮对组装的技术要求。轮对的装配方式是过盈配合联接，采用油压机冷压装装配，其压装工艺需符合 BS EN 13260[15]的要求。轮对压装过程中的最大压装历应满足 680 kN<F<1160 kN 的要求。对于过盈配合联接方式，按照过盈联接计算基础，压装时车轮压入和退卸的压出力的计算公式[16]如下。

压装力：

$$F_i = f\pi d l p_{max} \tag{1}$$

压出力：

$$F_0 = (1.3\sim1.5)F_i = (1.3\sim1.5)f\pi d l p_{max} \tag{2}$$

式中：P_{max} 为最大径向压力，有式（3）计算；f 为摩擦系数；d 代表车轴轮座位置的直径；l 代表接触表面的轴向长度。

$$p_{max} = \frac{\delta_{max}}{d\left(\frac{C_1}{E_1}+\frac{C_2}{E_2}\right)\times10^3} \tag{3}$$

式中：C_1 和 C_2 分别代表车轴和车轮的刚性系数；E_1 和 E_2 分别代表车轴和车轮的弹性模量；δ_{max} 代表过盈量。

根据式(1)—(3)可知，压装力与轮轴的金属材料属性有关，车轮轮毂面与车轴的轮座面接触面之间产生挤压和摩擦作用，材料受力过程经历弹性变形阶段，两种材料的弹性模量、泊松比以及摩擦系数都是影响压装力的因素。根据标准，车轮与车轴之间的过盈量已经明确规定为 0.220~0.313 mm，车轮的直径 d 亦是设计值。对于再制造车轴，加工保持与新轴一致。因此，再制造车轴与车轮的压装力仅与材料的固有金属属性有关，即再制造材料的弹性模量、泊松比以及与车轮钢 ER8 的摩擦系数。根据前文对于 NiCrMo 合金作为车轴增材再制造材料的性能研究，从材料的拉伸试验可知，冲击韧性以及压缩弹性模量等材料属性与 EA4T 钢基本相近似。因此，按照新轴的图纸尺寸精度和粗糙度等要求，制备了 3 件完整的再制造车轴并进行压装试验，由中车青岛四方车辆机车股份有限公司按照新轴与车轮的压装工艺进行压装。其中一个车轮的压装压力与位移的曲线如图 11 所示，其他压装曲线与该曲线的形态基本一致，每个车轮与车轴的过盈量、最大压装力和末端压装力见表 5。

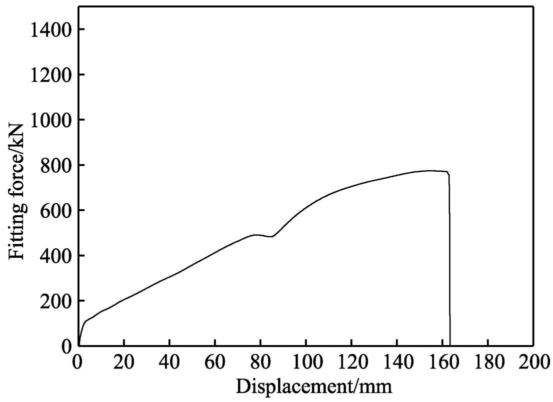


图 11　再制造车轴与车轮的压装应力曲线
Fig.11 Press-fitting curve between wheelsets and remanufactured axles

表 5　压装试验末端和最大应力值
Tab.5 End and maximum stress of press-fitting

No. for Axles	The end fitting force F/kN		The Max. Fitting force F/kN		Interference between axle and wheel/mm	
	Left wheel	Right wheel	Left wheel	Right wheel	Left wheel	Right wheel
1#	821	788	822	795	0.237	0.256
2#	862	866	843	845	0.264	0.260
3#	823	825	846	848	0.242	0.241

压装曲线合格的标准如下[17]：

1）在位移 0~30 mm 段，压装曲线必须呈上升趋势，且平稳成比例直线上升，范围内的最大应力不得超过 F_H=1.3d=260 kN。

2）在位移 75~90 mm 段，即轮毂压装至车轴的油槽位置开始至 25 mm 后，形成的压装力不能小于油槽前位置的最大应力。

3）在最后的 25 mm 位移段，允许曲线有下降趋势（即“降吨”）存在，但是“降吨”的最大应力不得高于 50 kN。

4）整个压装曲线应该符合 EN 13260 的要求，且最终末端压装力必须在最大压装力和最小压装力（680 kN）之间。

根据上述条件和表 5 的实测数据来看，三根再制造动车组车轴与车轮的压装力 F 与位移 S 的压装曲线完全符合要求。起始 0~30mm 段的压力小于 260 kN，在注油槽位置前段，压装曲线呈比例上升；在通过车轮油槽位置 25 mm 时，车轴及轮毂面接触面无增加，其曲线呈平直趋势，无增加或减少；随着越过 25 mm 宽的车轴表面注油槽后，曲线继续随压装位移而等比例增加，直到最大压装值；在最后 25 mm 的位置末端，压装力呈曲线下降，这是由于油压机即将运行停止，载荷缓停造成，其下降值均小于 50 kN，符合上述条件要求。

3　结论

1）镍基 NiCrMo 合金的纯激光熔覆金属的抗拉强度为790 MPa,屈服强度为542 MPa,冲击韧性为68 J/KU$_5$，与 EA4T 车轴钢的力学性能相当,并优于 Fe310、F314 以及 Fe316 等铁基合金的纯熔覆金属性能。

2）采用镍基 NiCrMo 合金作为车轴再制造材料，与 EA4T 的匹配性良好，熔覆金属的压缩弹性模量 E_r 为 180~185 GPa，EA4T 钢的弹性模量为 185~190 GPa。NiCrMo 熔覆金属组织由平面晶、细长柱状晶以及胞状晶组织构成，熔合过渡区无脆硬的马氏体相，但是在这约 8 μm 的稀释区范围内，其纳米压缩弹性模量和纳米硬度值均低于母材和熔覆金属，是熔覆层的薄弱区域。

3）通过采用 NiCrMo 合金激光增材再制造的动车组车轴的轮对压装试验可知，再制造车轴的尺寸精度、粗糙度等符合新品图纸要求，且轴座与轮毂孔亦满足正常检修和压装过盈量 0.220~0.313 mm 的条件下，其压装力及位移的 F-S 曲线符合 BS EN 13260 的规定，证明采用 NiCrMo 合金作为增材再制造车轴的材料是合理的。

4）动车组车轴的抗疲劳性能是保证列车运行安全的最重要性能，而选择 NiCrMo 合金进行激光增材再制造车轴，由于激光熔覆非稳态组织以及热输入的影响，将对车轴的抗疲劳性能产生影响，其影响程度和解决方案需要进一步探索和研究。

参考文献：

[1] BS EN 13261: 2009+A1: 2010, Railway applications—Wheelsets and bogies—Axles—Product requirements[S].

[2] 齐先胜, 侯有忠, 牛富杰, 等. 高速动车组车轴的再制造可行性分析[J]. 电焊机, 2017, 47(10): 8-15.
QI Xian-sheng, HOU You-zhong, NIU Fu-jie, et al. Feasibility analysis of remanufacture of high-speed trian unit axles [J]. Electric welding machine, 2017, 47(10): 8-15.

[3] 徐滨士, 夏丹, 谭君洋, 等. 中国智能再制造的现状与发展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 1-13.
XU Bin-shi, XIA Dan, TAN Jun-yang, et al. Current situation and development of intelligent remanufacturing in China[J]. China surface engineering, 2018, 31(5): 1-13.

[4] 朱子新, 徐滨士, 朱绍华, 等. 再制造工程的现状与应用前景[J]. 机械工艺师, 2001(5): 44-45.
ZHU Zi-xin, XU Bin-shi, ZHU Shao-hua, et al. Present situation and application prospect of remanufacturing engineering[J]. Machinery, 2001(5): 44-45.

[5] 李嘉宁. 激光熔覆技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
LI Jia-ning. Laser cladding technology and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.

[6] 李丛辰, 陈文静, 向超, 等. EA4T 钢表面激光熔覆 Fe314 合金熔覆层的微观组织及性能[J]. 电焊机, 2016, 46(5): 73-77.
LI Cong-chen, CHEN Wen-jing, XIANG Chao, et al. Microstructure and properties of Fe314 alloy cladding layer by layer caldding on EA4T Steel[J]. Electric welding machine, 2016, 46(5): 73-77.

[7] 蔡擎, 陈文静, 陈晓男, 等. EA4T 钢表面激光熔覆 Fe-Cr-Ni 涂层的组织与性能[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2017, 36(02): 33-37.
CAI Qing, CHEN Wen-jing, CHEN Xiao-nan, et al. Microstructure and mechanical properties of Fe-Cr-Ni alloy cladding layer on EA4T steel by laser cladding[J]. Journal of Xihua University (Natural science), 2017, 36(02): 33-37.

[8] 朱蓓蒂, 曾晓雁, 陶曾毅, 等. 激光工艺参数对熔覆层稀释率的影响[J]. 材料研究学报, 1994, 8(4): 315-318.
ZHU Bei-di, ZENG Xiao-yan, TAO Zeng-yi, et al. Effect of laser processing parameters on dilution of the cladded coating[J]. Chinese journal of materials research, 1994, 8(4): 315-318.

[9] SINDO K. Welding metalluray[M]. America: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

[10] NB/T 47013. 22015, 承压设备无损检测 第 2 部分: 射线检测[S].
NB/T 47013.2—2015，Nondestructive testing of pressure equipments. Part 2: Radiographic testing[S].

（下转第 219 页）