超级爆炸喷涂镍基钴基涂层高温氧化及摩擦磨损性能

王长亮，崔永静，汤智慧，陆峰

（中国航发北京航空材料研究院 航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室，北京 100095）

摘要：目的 针对装备向高温高速发展的需求，开展 NiCr-Cr_3C_2、CoMoCr 及 NiCrAlY 涂层的高温摩擦磨损性能对比研究。**方法** 针对上述三种涂层，通过超级爆炸喷涂工艺进行涂层制备，并测试涂层孔隙率、显微硬度、结合强度等基本性能，开展 650 ℃/260 h 的抗氧化试验和 400、650 ℃的销盘式摩擦磨损试验，对比涂层的各项性能和在高温条件下的氧化质量增量、摩擦系数、磨损质量损失。**结果** 抗氧化试验后，NiCr-Cr_3C_2、CoMoCrSi 及 NiCrAlY 涂层氧化增重 0.18、0.1、0.005 mg/(cm^2·h)。650 ℃时，摩擦系数分别为 0.5、1.0、0.6。**结论** 超级爆炸喷涂工艺制备的涂层组织、结合强度均优于等离子喷涂等常规喷涂工艺。高温下的氧化产物 Co_3O_4 与 Cr_2O_3 对高温摩擦系数有不同的影响。NiCr-75Cr_3C_2 和 NiCrAlY 涂层在 400、650 ℃可作为与 SG37A 材料的对磨副材料。

关键词：NiCr-Cr_3C_2；NiCrAlY；CoMoCrSi；高温摩擦；高温磨损；高温氧化；爆炸喷涂；CCDS2000

DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2020.01.014

中图分类号：TG174.4　　**文献标识码：**A

文章编号：1672-9242(2020)01-0090-07

High Temperature Oxidation and Friction Behavior of Nickel Based and Cobalt Based Coating Deposited by Super Detonation Spray

WANG Chang-liang, *CUI Yong-jing*, *TANG Zhi-hui*, *LU Feng*

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Corrosion and Protection for Aviation Material, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the friction and wear resistance properties of NiCr-Cr_3C_2, CoMoCrSi and NiCrAlY coating at high temperature to meet the high temperature and high speed development demands of equipment. These two kinds of coating were deposited by super detonation spray process. The porosity, micro-hardness, bond strength of these coatings were tested. High temperature oxidation and high temperature wear resistant were studied at 650 ℃ for 260h as well as 400 and 650 ℃ respectively to compare oxidation mass gain, friction coefficient and friction mass loss under different high temperature conditions. The oxidation mass gain of the coatings were 0.18,0.1,0.005 mg/(cm^2·h). At 650 ℃, the friction coefficient were 0.5, 1.0 and 0.6. The microstructure and the binding strength of the coating sprayed by super detonation are better than plasma process. The oxidation products Co_3O_4 and Cr_2O_3 at high temperature have different effects on the high temperature friction coefficient. NiCr-75Cr_3C_2 and NiCrAlY coating should be used for the friction pair materials of SG37A at 400 and 650 ℃.

收稿日期：2019-09-18；**修订日期：**2019-11-18

Received：2019-09-18；**Revised：**2019-11-18

基金项目：国家科技重大专项（2017-Ⅶ-0013-0110）

Fund: National science and technology major projects (2017-Ⅶ-0013-0110)

作者简介：王长亮（1981—），男，山东人，高级工程师，主要研究方向为表面工程、热喷涂涂层技术。

Biography: WANG Chang-liang (1981—), Male, from Shandong, Senior engineer, Research focus: surface engineering, thermal spray coating technology.

KEY WORDS: NiCr-Cr_3C_2; NiCrAlY; CoMoCrSi; high temperature friction; high temperature wear; high temperature oxidation; detonation spray; CCDS2000

NiCrAlY 涂层在高温下具有很好的抗氧化性能，是高温合金零件常用的抗氧化防护涂层[1]。镍基高温合金的高温抗氧化防护涂层研究向更高温度和更长寿命方向发展[2]。NiCr-Cr_3C_2 涂层由于其优异的耐磨性能，使用超音速火焰喷涂制备的涂层的摩擦特性被广泛研究[3-7]。Tribaloy 系列涂层的特殊相组成，使得其具备良好的耐磨性能，广大学者研究了其在润滑剂环境及常温环境下的摩擦磨损特性[8-13]。

随着装备向高温高速等苛刻环境的应用发展，长寿命部件在高温下的抗氧化和耐磨防护共同作用需求越来越迫切。上述三种涂层是否在抗氧化和高温耐磨两方面都有较好的特性，需要进一步开展性能评价研究。针对热喷涂工艺面临的涂层孔隙率大和结合强度低的问题[14]，文中采用超级爆炸喷涂工艺进行了三种涂层的制备，并对其进行性能评价。

1　试验

1.1　基体材料

试样基体材料选用 GH625，试样材料均经过 930 ℃保温 1 h，水冷热处理，其化学成分见表 1。其中孔隙率、显微硬度、微观形貌试验等试样尺寸为 10 mm×10 mm×1 mm，结合强度试样尺寸为 ϕ 25.4 mm×7.88 mm；销-盘摩擦磨损下试样尺寸为 24 mm×7.78 mm，中温氧化试样尺寸为 50 mm×30 mm×3 mm，各试样的表面粗糙度 *Ra* 为 0.8 μm。摩擦磨损对磨上试样选用 SG37A 材料。

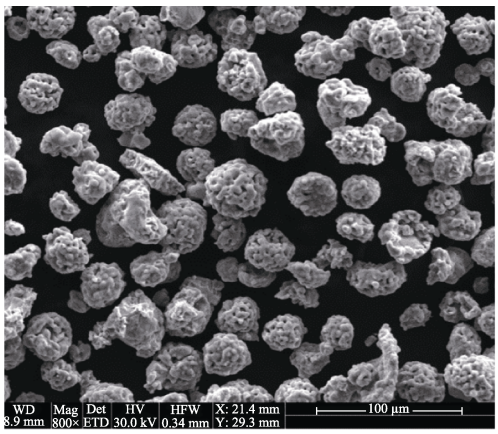
表 1　GH625 的化学成分

Tab.1 Chemical composition of GH625　　%

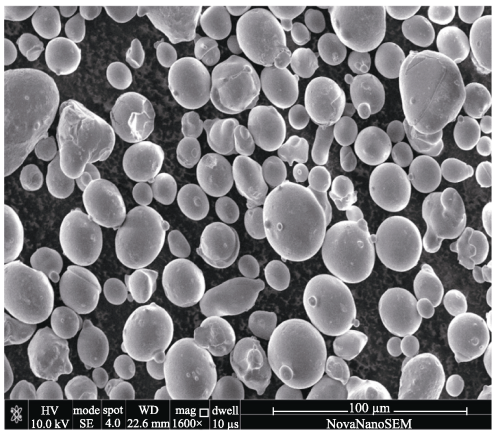
元素	C	Cr	Co	Mo	Al	Ti	Ni
质量分数	0.10	20.0~23.0	1.0	8.0~10.0	0.4	0.4	余量
元素	Nd	Fe	Mn	Si	P	S	Cu
质量分数	3.15~4.15	5.00	0.50	0.50	0.015	0.015	0.07

1.2　涂层粉末材料

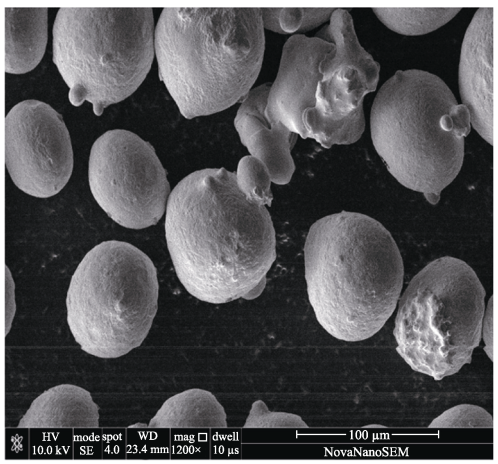
NiCr-Cr_3C_2 为团聚烧结型粉末，名义成分为 25NiCr-75Cr_3C_2，粒度为 15~45 μm。CoMoCrSi 为真空气雾化粉末，名义成分为 Co28Mo17Cr2Si，粒度为 15~45 μm。NiCrAlY 为真空气雾化粉末，名义成分为 Ni 22Cr 10Al 1.0Y，粒度为 50~100 μm。三种粉末的微观形貌如图 1 所示。



a NiCr-75Cr_3C_2



b CoMoCrSi



c NiCrAlY

图 1　粉末微观形貌

Fig.1　The powder microstructure

1.3　工艺设备

爆炸喷涂技术是利用气体爆炸产生的能量，将喷涂粉末加热到一定温度和速度，喷射到基体表面，形成涂层。具体来说，它是通过阀门将一定比例和流量的氧气和乙炔引入一端封闭的长约 1.2 m 的水冷枪管

中，同时与经载气送入的喷涂粉末混合，通过火花塞点火瞬间引爆，爆炸中心的温度高达 3400 ℃以上，爆炸轰击波的速度可以达到 1500 m/s 以上，爆炸波和高温火焰将待涂覆的粉末颗粒加速加热，轰击到基体表面，形成涂层。通入气体和粉末的爆炸过程，每秒可重复 4~10 次。根据涂层所要求的厚度反复进行，直到涂层厚度大于 200 μm。超级爆炸喷涂除使用乙炔外，同时使用丙烷作为爆炸燃料，增加爆轰波的速度。文中使用 CCDS2000 超级爆炸喷涂系统制备了三种涂层。喷涂距离为 200 mm，氧燃比为 1.1，工作压力为 0.15 MPa，送粉速度为 0.15 g/s，喷枪频率为 4/s。

1.4　试验方法

1）采用 Quanta 600 扫描电镜（SEM）分析涂层的微观形貌，包括微观结构、孔隙率、氧化物等。使用 Image-Pro Plus 软件计算涂层样品 SEM 照片中气孔、孔洞等所占的面积百分比，每个试样取 5 个或以上视场进行分析，取平均值作为一个试样的孔隙率。

2）对制备好的金相试样测试其涂层的截面显微硬度，采用 Struers 公司的 Duramin 型低载荷维氏硬度计，在 2.94 N 载荷下加载 15 s，测定涂层的硬度，每个试样取点不少于 5 个，取平均值。

3）将结合强度试样端面喷涂到 200~300 μm 的厚度，涂层要尽可能均匀，把另一未喷涂试样的一端吹砂（40 目的氧化铝，压力约为 0.4 MPa）。采用 FM1000 胶将喷涂面和对偶件粘合，同时使用夹具，对试样施加一定的压力。将组合好的试样在 180 ℃下固化 (120±10) min。关闭烘箱，并使其冷却到环境温度。采用标准拉伸试验机以 1 mm/min 的速度拉断粘结好的试样，确定结合强度。每种涂层测试 3 个有效值。

4）依据 HB 5258《钢及高温合金的抗氧化性测定试验方法》进行涂层在 650 ℃下的循环氧化性能测试，通过测量试样的质量变化，研究涂层在中温区域的氧化动力学行为。热震性能测试采用水冷循环，650 ℃保温 10 min，放入 25 ℃水中记为一次循环，热震试验基体材料选用 GH625。

5）依据 ASTM G99，采用 SRV4 型摩擦磨损试验机进行销盘式摩擦磨损试验。SG37A 材料作为上试样，带涂层 GH625 材料作为下试样，记录涂层的摩擦系数和磨损质量损失情况。载荷为 10 N，频率为 15 Hz。

2　结果及分析

2.1　涂层微观形貌及孔隙率

NiCr-75Cr_3C_2 涂层材料的截面显微组织形貌如图 2a 所示，涂层均较为致密，截面形貌中浅黑色为 Cr_3C_2，白色为 NiCr，涂层致密。CoMoCrSi 涂层材料的截面显微组织形貌如图 2b 所示，涂层呈层状，有轻微的氧化物条带。NiCrAlY 涂层材料的截面显微组织形貌如图 2c 所示，微观层状结构不明显，一方面由于该合金喷涂过程熔融较好，另一方面由于原材料粉末颗粒较大，沉积每层间距较大。从表 2 可以看出，三种涂层的孔隙率均低于 1%，较等离子喷涂工艺制备的涂层更为致密[15-17]。

表 2　涂层孔隙率

Tab.2　The coating porosity　%

涂层材料	孔隙率						
	1	2	3	4	5	均值	等离子喷涂
NiCr-75Cr_3C_2	0.68	0.78	0.89	0.84	0.69	0.78	12.7
CoMoCrSi	0.28	0.32	0.26	0.19	0.20	0.25	11.31
NiCrAlY	0.92	0.95	0.84	0.88	0.97	0.91	2.16

2.2　硬度及结合强度

三种涂层的显微硬度见表 3。由于有 Cr_3C_2 硬质相，NiCr-75Cr_3C_2 硬度最高，约为 900 HV~1000 HV。NiCrAlY 因只有镍基合金组分，硬度较低，约为 400 HV~500 HV。CoMoCrSi 作为优异的 Tribaloy 系合金，700~1200 ℃热处理 10~60 min 后，生成的 Laves 相具有较高的硬度，约 1000HV[13]。由于喷涂过程受热时间较短，没有大量的 Laves 相生成，超级爆炸喷涂制备的涂层硬度在 650 HV~700 HV 范围内，相比等离子制备的涂层（500 HV~550 HV），硬度稍高[11]。

表 3　涂层显微硬度（$HV_{0.3}$）

Tab.3　Coating microhardness ($HV_{0.3}$)

涂层材料	显微硬度					
	1	2	3	4	5	均值
NiCr-75Cr_3C_2	960	912	998	892	956	943
CoMoCrSi	668	689	657	642	653	661
NiCrAlY	384	510	455	528	526	481

由于爆炸喷涂的粒子速度较其他热喷涂工艺方法更高，飞行粒子动能大，因此粒子与基体碰撞时的能量转移更大，涂层结合强度高。NiCr-75Cr_3C_2、NiCrAlY 测试结果均为胶断，涂层实际结合强度大于测试值，明显高出等离子喷涂工艺制备的涂层结合强度。CoMoCrSi 的结合强度约 63 MPa，大于等离子喷涂（28.7 MPa）和超音速火焰喷涂（47.2 MPa）的结合强度强度，见表 4。

2.3　高温氧化试验

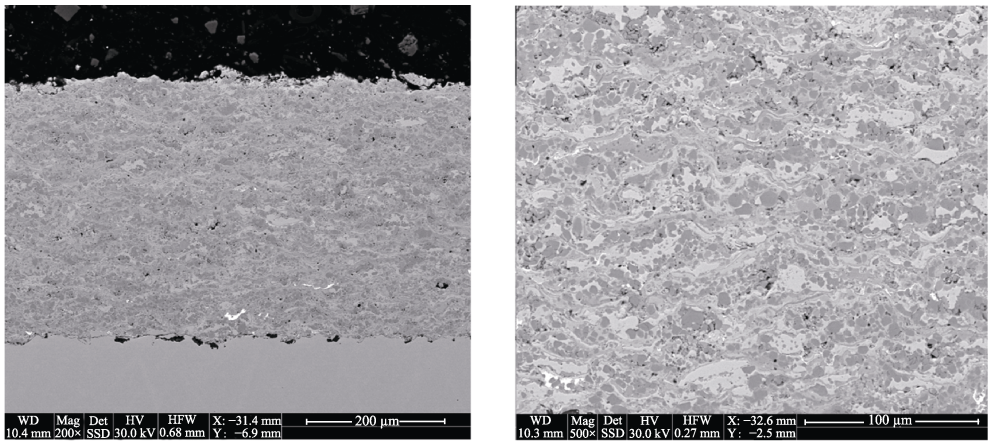
NiCrAlY 是性能优异的高温抗氧化涂层，与物理

表 4　涂层结合程度

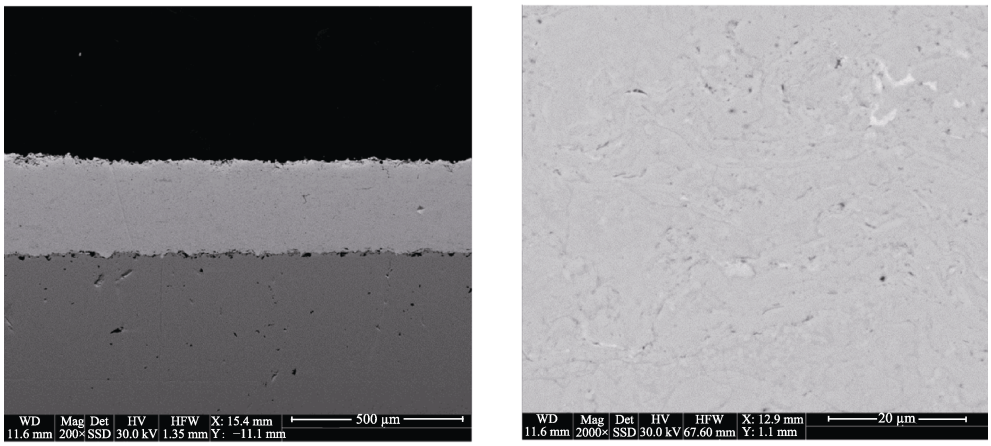
Tab.4　The coating bond strength　　MPa

涂层材料	结合强度				
	1	2	3	均值	等离子喷涂[9,17-18]
NiCr-75Cr_3C_2	77.1	79.6	80.5	79.1	42
CoMoCrSi	60.5	61.7	67.6	63.3	28.7
NiCrAlY	77.46	79.02	73.30	76.6	55

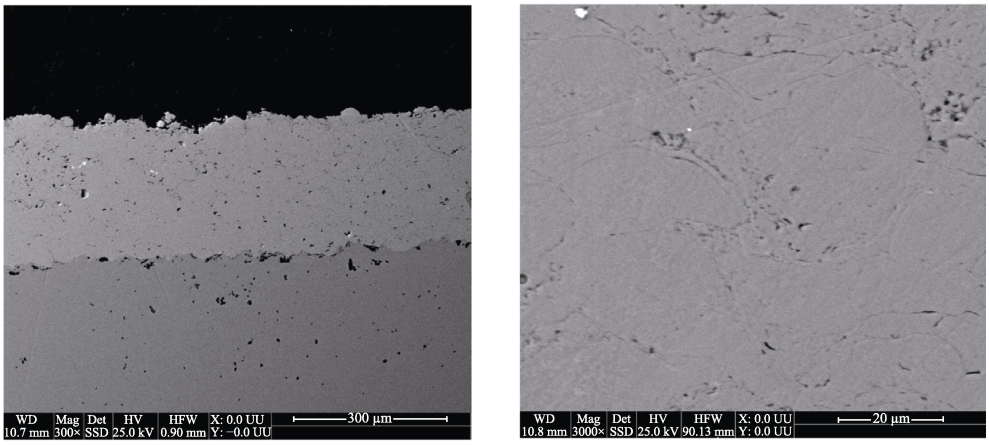
气相沉积方法相比，热喷涂方法制备的 NiCrAlY 涂层是层状沉积的，每层之间易出现孔洞、氧化物，涂层中还会有未熔颗粒，致密性稍差。由于其表面在高温下均能形成致密的 Al_2O_3 或 Cr_2O_3 氧化膜，阻止涂层进一步氧化，因此氧化质量增量最低，650 ℃平均氧化质量增量约 0.005 mg/(cm^2·h)。GH625 材料在 650 ℃下抗氧化性能良好，几乎与 NiCrAlY 涂层质量增量相当，平均氧化质量增量约 0.007 mg/(cm^2·h)。CoMoCrSi 在高温下会生成 Co_3O_4、$CoMoO_4$、MoO_3、



a NiCr-75Cr_3C_2



b CoMoCrSi



c NiCrAlY

图 2　涂层截面形貌

Fig.2　The coating section morphology

$CoCr_2O_4$ 氧化物[19]，也具有一定的抗氧化性，平均氧化质量增量约 0.1 mg/(cm^2·h)。NiCr-75Cr_3C_2 由于 NiCr 的质量分数为 25%，涂层表面不能生成完整的 Cr 氧化膜，260 h 平均氧化质量增量约 0.18 mg/(cm^2·h)。上述四种材料的氧化质量增量曲线如图 5 所示。三种涂层在 650 ℃下热震结果见表 5，水淬热震性能良好，均无涂层剥落。热震性能良好一方面是由于三种涂层材料与基体结合强度较高，另一方面是因为热膨胀系数与基体材料匹配性较好。基体材料 GH625 的膨胀系数为 12.8×10^{-6}/℃，NiCrAlY 涂层为 13.8×10^{-6}/℃，CoMoCrSi 涂层为 12.3×10^{-6}/℃，NiCr-75Cr_3C_2 涂层的膨胀系数为 11.4×10^{-6}/℃[20-21]，最终都表现出良好的水淬热震性能。

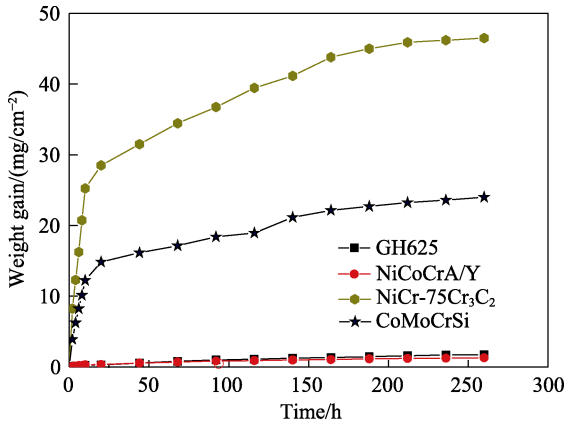


图 3　三种涂层及基体在 650 ℃的氧化曲线

Fig.3　Three kinds of coating and substrate in oxidation curve of 650 ℃

表 5　涂层水淬 50 次试验结果

Tab.5　Test results of coating water after being quenched for 50 times

涂层	试验温度/℃	水淬次数/次	试验结果
NiCr-75Cr_3C_2	650	50	无剥落
CoMoCrSi	650	50	无剥落
NiCrAlY	650	50	无剥落

2.4　高温摩擦磨损实验

GH625 材料在 400、650 ℃下的摩擦系数曲线如图 4 所示。400 ℃时曲线上没有明显的磨合期，100 s 后摩擦系数稳定在 0.7 左右。650 ℃时摩擦系数在初始阶段有较大波动，500 s 后开始稳定，有小幅度降低，稳定在 0.6 左右。

NiCr-75Cr_3C_2、NiCrAlY、CoMoCrSi 涂层与 SG37A 材料在 400 ℃下的摩擦系数曲线如图 5 所示。NiCr-75Cr_3C_2、NiCrAlY 涂层在初始阶段均有明显的磨合期，摩擦系数逐渐稳定在 0.5 附近。CoMoCrSi 涂层没有明显的磨合期，摩擦系数逐渐有升高趋势，高于 GH625 材料与 SG37A 材料的摩擦系数，NiCr-75Cr_3C_2 涂层在此温度下的摩擦系数更低。

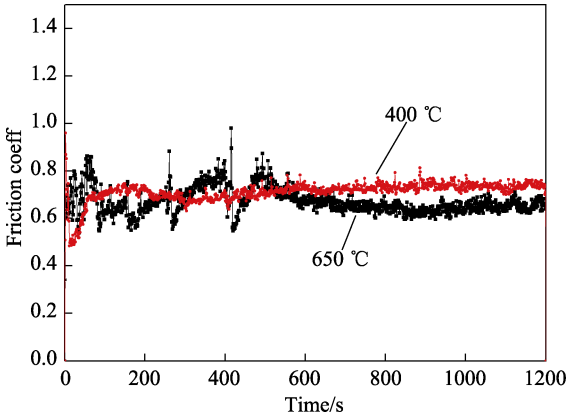


图 4　GH625 合金不同温度下的摩擦系数

Fig.4　Friction coefficient of GH625 alloy under different temperature

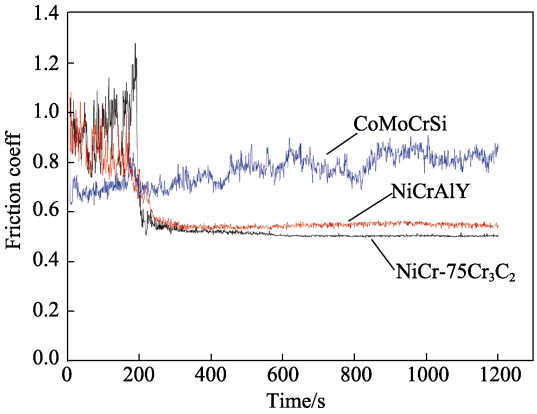


图 5　NiCr-75Cr_3C_2、NiCrAlY、CoMoCrSi 涂层 400 ℃下的摩擦系数

Fig.5　Friction coefficient of NiCr-75 Cr_3C_2, NiCrAlY, CoMoCrSi coating under 400 ℃

NiCr-75Cr_3C_2、NiCrAlY、CoMoCrSi 涂层与 SG37A 材料在 650 ℃下的摩擦系数曲线如图 6 所示。NiCr-75Cr_3C_2、NiCrAlY 涂层同样在初始阶段均有明显的磨合区，经过 200 s 后，摩擦系数逐渐稳定，分别稳定在 0.5 和 0.6 附近。相比 NiCr-75Cr_3C_2 涂层材料，NiCrAlY 涂层摩擦系数受到温度影响，650 ℃摩

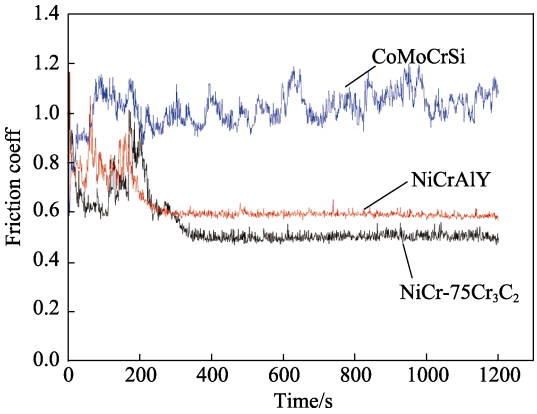


图 6　NiCr-75Cr_3C_2、NiCrAlY、CoMoCrSi 涂层 650 ℃下的摩擦系数

Fig.6　Friction coefficient of NiCr-75 Cr_3C_2, NiCrAlY, CoMoCrSi coating under 650 ℃

擦系数较 400 ℃时升高。CoMoCrSi 涂层在整个摩擦过程中，摩擦系数一直在发生较剧烈的变化。650 ℃时摩擦系数曲线在 1.0 附近，显著高于 400 ℃时的 0.8。

NiCr-75Cr_3C_2、NiCrAlY、CoMoCrSi 涂层在 650、400 ℃下摩擦系数的差值如图 7 所示。由于温度的变化，CoMoCrSi 涂层摩擦系数的变化显著，NiCr-75Cr_3C_2、NiCrAlY 涂层摩擦系数变化在零线附近，CoMoCrSi 涂层摩擦系数受到温度负面影响显著。在高温下，上述三种涂层的最外层氧化产物不同，NiCr-75Cr_3C_2、NiCrAlY 涂层氧化物以 Cr_2O_3 为主[22]，CoMoCrSi 涂层氧化物以 Co_3O_4 为主。随着进一步氧化，近表层为 $CoMoO_4$、MoO_3、$CoCr_2O_4$ 产物[23]。摩擦结果表明，Co_3O_4 与 Cr_2O_3 在高温下有显著不同的摩擦特性，前者使摩擦系数随温度的升高而增加，后者使摩擦系数稳定并趋于降低。

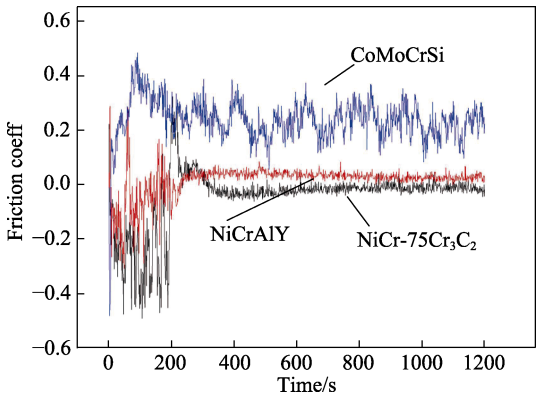


图 7　NiCr-75Cr_3C_2、NiCrAlY、CoMoCrSi 涂层 650 ℃与 400 ℃的摩擦系数变化

Fig.7　Friction coefficient change of NiCr-75 Cr_3C_2, NiCrAlY, CoMoCrSi coating at the 650 ℃ and 400 ℃

在 400、650 ℃下，基体材料以及三种涂层的磨损质量损失对比如图 8 所示。400 ℃时，GH625 与 SG37A 摩擦配副时，对 SG37A 材料的磨损最为严重，三种涂层对 SG37A 造成的质量损失相当。其中 CoMoCrSi 涂层损失超过了其他两种涂层，并且超过了对磨副 SG37A 的质量损失。由 650 ℃的磨损质量损失可见，CoMoCrSi 涂层对 SG37A 材料的磨损最为严重，超过了 GH625 对 SG37A 的磨损量，CoMo- CrSi 涂层自身的磨损质量损失也最大。NiCr-75Cr_3C_2 涂层与 SG37A 的摩擦配副双方磨损均为最小。结合氧化质量增量、摩擦系数、磨损质量损失结果，NiCr-75Cr_3C_2、NiCrAlY 涂层经过与 SG37A 的磨合后，摩擦较为稳定，CoMoCrSi 涂层由于表面的氧化、摩擦造成的表面材料剥落—再氧化—再剥落过程，使得磨损量较大。由于 NiCr-75Cr_3C_2、NiCrAlY 涂层的质量损失数据中，包括了磨损和氧化质量增量两者的非线性复合结果，因此还不能确定哪一种涂层的真实磨损质量更小，需要进一步通过体积法比较。

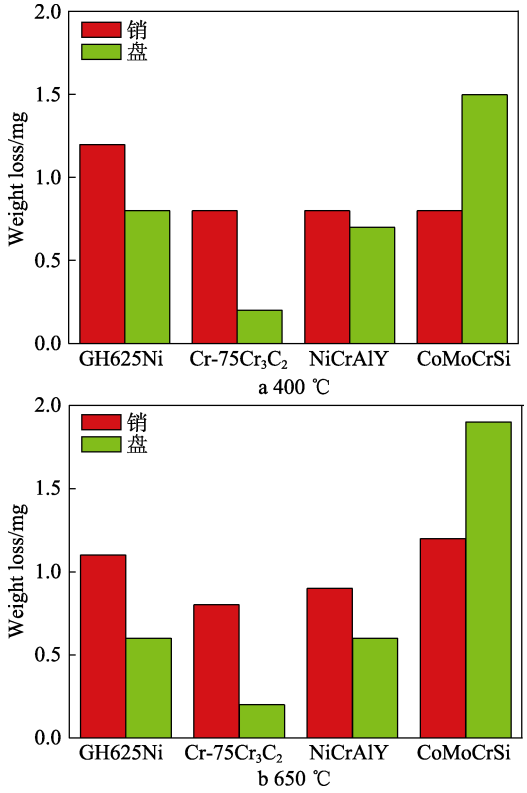


图 8　试样在不同温度下的磨损质量损失

Fig.8　Wear mass loss of specimens under different temperature

3　结论

1）超级爆炸喷涂工艺制备的 NiCr-75Cr_3C_2、NiCrAlY、CoMoCrSi 涂层组织、结合强度均优于等离子喷涂制备的涂层性能。

2）CoMoCrSi 涂层在高温下的氧化产物氧化钴增加了高温下摩擦系数。

3）NiCr-75Cr_3C_2 涂层在 400、650 ℃与 SG37A 材料具有较低的摩擦系数和磨损速率，氧化产物 Cr_2O_3 起到有益作用，NiCrAlY 涂层具有优异的高温抗氧化性能。综合磨损和抗氧化性能，上述两种涂层均可作为 SG37A 材料在 650 ℃以下时的对磨副用材料。

4）提高高温合金摩擦副的耐磨性能，还需要在高温耐磨或高温抗氧化涂层基相中增加润滑成分，降低摩擦系数和磨损量。

参考文献：

[1]　刘德林, 牟仁德, 陆峰. 涡轮叶片 NiCrAlYTa 涂层抗高温氧化和腐蚀性能测试研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(11): 54-59.
LIU De-lin, MU Ren-de, LU Feng. High Temperature Oxidation and Corrosion Property Test of NiCoCrAlYTa Coating on Turbine Blade[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(11): 54-59.

[2]　王占考, 许振华, 戴建伟, 等. 铂改性铝化物涂层的高

温防护性能研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(3): 76-81.
WANG Zhan-kao, XU Zhen-hua, DAI Jian-wei, et al. High-temperature Anti-oxidation Behavior of Pt Modified Aluminide Coating[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(3): 76-81.

[3] TAVAKOLI A, LIU R, WU X J. Improved Mechanical and Tribological Properties of Tin-bronze Journal Bearing Materials with Newly Developed Tribaloy Alloy Additive[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 489(12): 389-402.

[4] VASHISHTHA N, SAPATE S G. Abrasive Wear Maps for High Velocity Oxy Fuel (HVOF) sprayed WC-12Co and Cr_3C_2-25NiCr Coatings[J]. Tribology International, 2017, 114: 290-305.

[5] SRINIVAS V, PATHEM U, VENKATARAMANA V S N. Mechanical, Anticorrosion, and Tribological Properties of Nanostructured WC-Co/Cr_3C_2-NiCr Multilayered Graded Coating on Aluminum Substrate[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50A: 1985-1993.

[6] JI G C, LI C J, WANG Y Y. Microstructural Characterization and Abrasive Wear Performance of HVOF Sprayed Cr_3C_2-NiCr Coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200(24): 6749-6757.

[7] WANG Q, LUO S S, WANG S Y, et al. Wear, Erosion and Corrosion Resistance of HVOF-Sprayed WC and Cr_3C_2 based Coatings for Electrolytic Hard Chrome Replacement[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 81: 242-252.

[8] LIU R, YAO M X, PATNAIK P C, et al. Effects of Heat Treatment on Mechanical and Tribological Properties of Cobalt-Base Tribaloy Alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(5): 634-637.

[9] 陈雄伟, 牟治国, 陈利刚. HVOF 和 APS 喷涂 T800 涂层性能研究[J]. 材料研究与应用, 2019, 13(2): 119-121.
CHEN Xiong-wei, MU Zhi-guo, CHEN Li-gang. Investigation on the Properties of HVOF and APS Spraying T800 Coatings[J]. Materials Research and Application, 2019, 13(2): 119-121.

[10] 王维夫, 孙凤久, 王茂才. TA2 钛合金表面激光熔覆 Ni 基 Tribaloy 700 涂层[J]. 中国激光, 2007, 34(12): 1710-1715.
WANG Wei-fu, SUN Feng-jiu, WANG Mao-cai. Laser Cladding Ni-Based Tribaloy 700 Coatings on TA2 Titanium Alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(12): 1710-1715.

[11] 朱朝刚, 张建新, 燕翔江, 等. 等离子喷涂 T800 钴基合金涂层的研究[J]. 河北工业大学学报, 2017, 46(1): 77-82.
ZHU Chao-gang, ZHANG Jian-xin, YAN Hui-jiang, et al. Study of Plasma Sprayed T800 Co-based Alloy Coating[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2017, 46(1): 77-82.

[12] 田季林, 杨晓飞, 张勇, 等. 精密铸造 Tribaloy T-800 合金轴套[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(7): 754-755.
TIAN Ji-lin, YANG Xiao-fei, ZHANG Yong, et al. Production of Tribaloy T-800 Shaft Sleeve by Investment Casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(7): 754-755.

[13] 李尚平, 骆合力, 曹栩, 等. 铸态T800合金及其焊层的组织和高温而磨性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(3): 603-606.
LI Shang-ping, LUO He-li, CAO Xu, et al. Microstructure and High-Temperature Fretting Wear Behavior of T800 Alloy in Casting and Cladding State[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(3): 603-606.

[14] 张燕, 张行, 刘朝辉, 等. 热喷涂技术与热喷涂材料的发展现状[J]. 装备环境工程, 2013, (3): 59-62.

[15] LIN Chun-ming, YEN Shih-hung, SU Cherng-yuh. Measurement and Optimization of Atmospheric Plasma Sprayed CoMoCrSi Coatings Parameters on Ti-6Al-4V Substrates Affecting Microstructural and Properties Using Hybrid Abductor Induction Mechanism[J]. Measurement, 2016, 94: 157-167.

[16] GAO Feng, YANG Qi, HUANG Xiao, et al. Development of the Process Index for NiCrAlY Coatings with the Mettech Axial III™ System[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2013, 22(3): 326-334.

[17] 赵子鹏, 司洪利, 李忠盛, 等. 等离子喷涂与超音速火焰喷涂 NiCr-Cr_3C_2 涂层组织与摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术, 2019, 48(08): 225-230.
ZHAO Zi-peng, SI Hong-li, LI Zhong-sheng, et al. Microstructrure and Friction and Wear Properties of NiCr-Cr3C2 Coating by APS and HVOF[J]. Surface Technology, 2019, 48(08): 225-230.

[18] 王枫, 曾威, 陈志坤, 等. 拉瓦尔喷嘴与直喷嘴对等离子喷涂 NiCrAlY 涂层组织及性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2012, 6(01): 50-53.
WANG Feng, ZENG Wei, CHEN Zhi-kun, et al. Microstructure and Property Characterization of the APS NiCrAlY Coatings Prepared by Laval Nozzle and Straight Nozzle[J]. Materials Research and Application, 2012, 6(01): 50-53.

[19] ZHANG Y D, YANG Z G, ZHANG C, et al. Oxidation Behavior of Tribaloy T-800 Alloy at 800 and 1000 ℃[J]. Oxid Met, 2008, 70: 229-239.

[20] Taylor T A, Walsh P N. Thermal Expansion of MCrAlY Alloys[J]. Surface & Coatings Technology, 2004, 177: 24-31.

[21] 曹玉霞, 孙景卫, 郝斌, 等. 空气等离子喷涂 NiCr/Cr_2C_3 涂层的制备及抗热震性能[J]. 化学工程与技术, 2018, 8(5): 336-341.
CAO Yu-xia, SUN Jing-wei, HAO Bin, et al. Preparation and Thermal Shock Resistance Properties of the APS Sprayed NiCr/Cr_2C_3 Coatings[J]. Journal of Chemical Engineering and Technology, 2018, 8(5): 336-341.

[22] X GONG ue, ZHANG Nan-nan, ZHANG Zhong-li, et al. Microstructure and Oxidation Behavior of Al and Al/NiCrAlY Coatings on Pure Titanium Alloy[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2017, 26(5): 562-566.

[23] ZHANG Yu-duo, YANG Zhi-gang, ZHANG Chi, et al. Effect of Rhenium Addition on Isothermal Oxidation Behavior of Tribaloy T-800 Alloy[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(3): 370-376.