DOI: 10.3901/JME.2020.14.057

基于声发射技术的热障涂层拉伸失效模式研究*

李雪换^{1,2} 底月兰² 王海斗² 李国禄¹ 董丽虹²

(1. 河北工业大学材料科学与工程学院 天津 300130;

2. 陆军装甲兵学院装备再制造技术国防科技重点实验室 北京 100072)

摘要: 热障涂层是一种典型的脆性、非均质、多层结构的材料。服役过程中受热-力载荷的作用,将会导致涂层过早的剥落失效,其主要的失效形式为陶瓷层开裂和界面剥落失效。热障涂层的失效主要是微裂纹萌生、扩展及连通导致。利用声发射技术结合微观形貌观察,研究了拉伸载荷下热障涂层的失效过程,并识别热障涂层裂纹损伤模式。根据不同载荷下的微观形貌观察,研究拉伸载荷下热障涂层的失效过程;利用声发射特征参数分析法(如声发射事件数、幅值),将热障涂层的失效过程分为几个不同阶段,并结合形貌观察,建立声发射特征参数与裂纹损伤失效信息之间的联系;利用快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)识别热障涂层的损伤模式。结果表明:热障涂层拉伸失效过程为裂纹首先在陶瓷层表面萌生,随后向陶瓷层/粘结层的界面处扩展,到达界面后,裂纹将沿着界面生长与扩展,最终导致热障涂层分层剥落;将热障涂层的失效过程分为四个阶段;频谱分析结果表明基体频率成分大约在 0.020 MHz,表面裂纹的频率成分在 0.20~0.25 MHz,界面裂纹的频率成分在 0.15~0.20 MHz。

关键词: 热障涂层; 声发射技术; 快速傅里叶变换; 裂纹扩展; 损伤模式

中图分类号: TG115

Research on Crack Failure Modes of Thermal Barrier Coatings Based on Acoustic Emission Technique

LI Xuehuan^{1,2} DI Yuelan² WANG Haidou² LI Guolu¹ DONG Lihong²

(1. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130;

2. National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072)

Abstract: Thermal barrier coatings (TBCs) is a typical brittle, heterogeneous, multilayer structure material. The heat-loading effect during service will lead to premature peeling failure of the coating. The main failure modes are ceramic coating cracking and interface spalling failure. The failure of TBCs is mainly the accumulation of micro-cracks, the expansion and the accumulation of connectivity results. The failure process of TBCs under tensile load is studied by using acoustic emission (AE) technique combined with microscopic morphology observation, and the crack damage mode of TBCs is identified. According to the microscopic morphology observation under different loads, the failure process of the TBCs under tensile load is studied. The TBCs is applied by the AE characteristic parameter analysis method (such as AE events, AE amplitude). The failure process is divided into several stages, and the relationship between AE characteristic parameters and crack damage failure information is established based on the observation of morphology. The TBCs failure modes is identified by fast Fourier transform (FFT). The results show that the tensile failure process of the TBCs is that the crack firstly sprouts on the surface of the ceramic coating and then spreads to the interface of the ceramic coating/bond coating. After reaching the interface, the crack will grow and propagate along the interface, eventually leading to ceramic coating is peeled off. The failure process of the TBCs is divided into four steps; the spectrum analysis shows that the frequency component of the substrate is around 0.020 MHz, the frequency component of the surface crack is 0.20-0.25 MHz, and the interface crack is 0.15-0.20 MHz.

Key words: thermal barrier coatings; acoustic emission technique; fast Fourier transform; crack propagation; failure mode

* 国家自然科学基金(51775553, 51535011)和国家重点研发计划(61328304)
资助项目。20190625 收到初稿, 20191206 收到修改稿

0 前言

热障涂层是一个典型的多层结构系统, 主要由陶瓷层、金属过渡粘结层和镍基高温合金基体三层材料构成^[1-3]。热障涂层各层具有明显不同的物理性能、热性能和力学性能, 且在实际使用过程中, 由于受外界载荷、热冲击作用、热应力、蠕变效应、氧化以及自身烧结效应等失效因素的影响, 导致热障涂层在无法预测的某个时刻、位置发生过早的剥落失效^[4-6]。引起热障涂层失效的因素有多种, 很难全面考虑各种因素来研究热障涂层的失效行为, 但总结起来, 热障涂层的失效往往由于涂层内裂纹萌生, 扩展和汇聚导致, 其主要的失效形式为表面开裂和界面分层失效^[7-9]。如果能对热障涂层失效的全过程进行实时监测, 则能为热障涂层破坏机理的理解以及寿命预测的建立提供依据。

由于材料产生变形或生成裂纹时会释放出应变能, 从而产生应力波也就是声发射信号, 采集并分析这些声发射信号从而对材料的失效程度进行评估的方法为声发射技术^[10-12]。声发射技术是一种实时动态的无损检测方法, 可直接检测热障涂层失效过程中的裂纹扩展行为^[13]。

本文采用声发射技术对热障涂层拉伸失效过程进行实时检测, 建立声发射信息与失效信息之间的关系。通过声发射信号特征参数分析, 结合扫描电镜观察, 确定热障涂层拉伸失效过程; 另外, 通过频谱分析, 识别热障涂层拉伸失效模式。

1 试验

1.1 试样制备

采用大气等离子喷涂(Air plasma spraying, APS)制备试验所需的热障涂层试样, 其中基体为镍基高温合金 GH3128, 厚度为 3 mm, 试验样品的尺寸如图 1 所示; 粘结层和陶瓷层均采用 APS 制备, 其中粘结层喷涂 NiCrAlY 粉末, 颗粒度 37.5~75 μm , 喷涂厚度 100 μm ; 陶瓷层喷涂粉末为氧化钇部分稳定氧化锆(8%wt.Y₂O₃-ZrO₂), 颗粒度 15~45 μm , 喷涂厚度 350 μm , 其具体工艺参数如表 1 所示。

1.2 拉伸-声发射试验

拉伸试验在常温下 MTS 809 型液压伺服试验机上进行, 所有样品均沿纵向加载, 加载速率为

图 1 热障涂层拉伸试样尺寸示意图

表 1 热障涂层喷涂工艺参数

工艺参数	陶瓷层	粘结层
主气 N ₂ 压力/MPa	0.76	0.76
主气 N ₂ 流量/(L/min)	40	40
辅气 H ₂ 压力/MPa	0.51	0.51
辅气 H ₂ 流量/(L/min)	4	4
送粉气 N ₂ 压力/MPa	0.7	0.7
送粉气 N ₂ 流量/(L/min)	4	4
电压/V	80	80
电流/A	500	500
喷涂线速度/(m/min)	45	45
送粉速率/(g/min)	50	45
喷涂枪距/mm	75	110
单层厚度/ μm	30	25
总喷涂厚度/ μm	350	100

0.3 mm/min。采用 PCI-2 型声发射设备监测热障涂层试样的拉伸失效过程, 声发射探头放置在试样表面, 采样频率 1 MHz, 门槛值设置为 45 dB。拉伸破坏过程的声发射动态检测装置如图 2 所示。

图 2 热障涂层拉伸试验及其声发射检测装置

1.3 性能检测

采用场发射扫描电镜观察卸载后试样的截面形貌, 采集声发射信号然后进行参数分析, 同时对声发射波形信号进行快速傅里叶变换, 确定不同损伤裂纹的频率特征, 从而建立声发射信号信息与热障涂层失效信息的关联机制, 以达到对热障涂层拉伸破坏过程的无损评价。

2 试验结果及分析

2.1 热障涂层拉伸失效过程分析

对不同应力下热障涂层的拉伸破坏过程进行了截面微观形貌观察, 如图 3 所示。从图 3a、3b 可以看出, 陶瓷层表面有微小裂纹的萌生。随着基体屈服以及塑性变形的开始, 陶瓷层表层形成与拉伸方向垂直的横向裂纹, 由于陶瓷层抵抗变形的能力较低, 使得表面裂纹迅速向陶瓷层/粘结层的界面处扩展, 裂纹数目逐渐增多达到饱和, 且裂纹也逐渐变宽, 这些裂纹称为表面裂纹, 如图 3c~3e 所示。当表面裂纹扩展至陶瓷层/粘结层的界面处时, 裂纹将沿着界面生长与扩展, 且表面裂纹的开裂宽度继续增加, 将沿着界面扩展的裂纹叫做界面裂纹。随着载荷增加, 热障涂层发生分层, 在这一阶段并没有看到陶瓷层的脱落, 如图 3f、3g 所示。继续加载,

图 3 拉伸载荷下热障涂层裂纹扩展过程

陶瓷层/粘结层界面上不连续的界面裂纹相互连接, 并最终导致陶瓷层的剥落, 如图 3h 所示。

2.2 热障涂层拉伸失效声发射特征分析

加载至涂层完全剥落时(750 MPa), 基体变形对声发射信号的影响可以根据图 4 纯基体的拉伸失效声发射信号分布来阐明。可以看出, 基体弹性变形阶段, 越过阈值的声发射事件数几乎为零, 基体塑性变形阶段, 声发射事件计数最大值约为 65, 声发射幅值最大约 70 dB; 总体上说, 在拉伸失效过程中即使基体发生弹性或弹塑性变形, 声发射信号数量少且较微弱。

图 4 基体拉伸失效过程中声发射信号

对热障涂层试样来说, 声发射信号代表了完全不同的裂纹萌生、扩展及分层的特征。热障涂层试样以 0.3 mm/min 的速率加载至涂层剥落后, 热障涂层试样拉伸破坏过程中幅值分布、声发射事件计数与应力-应变演变曲线如图 5、6 所示。与图 4 纯基体拉伸失效过程相比, 热障涂层试样拉伸过程中产生的声发射信号数量大量地增加。根据拉伸过程中声发射信号幅值与声发射事件计数的大小, 可以将热障涂层拉伸失效过程分为四个阶段。从图 5 和图 6 可以看出, 在 80 s 之前, 几乎没有声发射信号产生, 此时基体处于弹性变形状态。随着拉伸时间增长, 声发射信号在 80 s 时出现, 此时, 图 7 累积声发射事件计数曲线上出现第一个点 a, 对应图 6 拉伸应力-应变曲线上的 A 点(370 MPa)。在 80~

1 100 s 之间, 出现大量的声发射信号, 图 5 声发射信号的幅值绝大部分分布在阈值 45~65 dB, 所有声发射信号幅值均小于 80 dB; 图 6 中越过阈值的声发射事件均匀出现, 声发射事件计数绝大部分在 200 以下; 图 7 中累积声发射事件计数在此阶段呈线性增长至 1 100 s(直线 *a-b* 段), 此时累积声发射事件计数曲线上出现一个明显突增拐点 *b*, 对应图 6 拉伸应力-应变曲线上的 *B* 点(680 MPa); 结合图 3b~3e 中热障涂层微观形貌观察, 以及对热障涂层拉伸失效过程进行声发射定性分析的基础上, 可以判定 *A* 点即为表面裂纹的起始点, *A*~*B* 阶段, 为表面裂纹萌生和扩展阶段。在 1 100~1 700 s, 声发射信号数量突增, 声发射信号的幅值呈阶梯状突增至 100 dB, 如图 5 所示; 声发射事件计数呈抛物线状分布, 到达抛物线顶点时声发射事件计数约为 1 500; 对应图 6 中累积声发射事件计数先呈指数型增加至 1 350 s, 之后声由于发射事件计数减少, 在 1 350~1 700 s 时间段内, 图 7 中累积声发射事件计数增长速率减小, 1 700 s 时对应图 6 中拉伸应力-应变曲线上的 *C* 点(720 MPa); 结合图 3f、3g 中热障涂层微观形貌观察, 以及对热障涂层拉伸失效过程进行声发射定性分析的基础上, 可以判定 *B* 点为界面裂纹的起始点, *B*~*C* 阶段为界面裂纹扩展阶段。继续加载, 在 1 700~2 130 s, 相对于前一阶段声发射信号的最大幅值并没有明显变化, 如图 5 所示; 但在 1 750 s、1 950 s 和 2 100 s 时刻附近, 声发射事件计数急剧增加, 最大声发射事件计数可达 5 600; 根据图 7 可以看出, 在 1 750 s、1 950 s 和 2 100 s 时刻附近, 累积声发射事件计数分别有一小段突增; 在 2 130 s 拉伸结束时刻, 对应拉伸应力-应变曲线上 *D* 点(750 MPa); 根据前述章节定性分析结果, 可以判定 *C* 点为涂层开始剥落点, *C*~*D* 阶段为涂层大面积剥落阶段, 图 6 中 *C*~*D* 阶段声发射事件突增是由涂层剥落造成的。

图5 热障涂层拉伸失效过程中声发射幅值分布

根据上述分析, 将热障涂层拉伸损伤失效过程

分为四个阶段: ① 在加载的初始阶段, 即 0~80 s 时间段内, 基体处于弹性变形状态, 几乎没有声发射信号产生; ② 在 80~1 100 s 时间段内为拉伸失效的第二阶段, 为表面裂纹扩展阶段; ③ 在 1 100~1 700 s 时间段内为拉伸失效的第三阶段, 为界面裂纹扩展阶段; ④ 在 1 700~2 130 s 时间段内为涂层大面积剥落阶段, 在这一阶段结束的时刻, 陶瓷层完全剥落。

图6 热障涂层拉伸失效过程中声发射事件计数与应力-应变演化曲线

图7 热障涂层拉伸损伤的声发射累积事件计数与应力-应变曲线

2.3 热障涂层拉伸失效模式识别

由于热障涂层试样屈服后, 涂层中各类裂纹产生的声发射信号和基体塑性变形声发射信号混合在一起, 如何区分涂层的损伤失效模式是一个难点。声发射信号的频谱特征与裂纹的尺寸和加载大小无关, 而只与被检测材料的裂纹类型有关^[14-15]。频谱分析利用快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)把声发射波形信号从时域变换到频域, 然后对比不同波形的波峰个数以及各波峰的频率值,

再辅以理论分析或其他检测手段识别涂层损伤模式^[16-20]。热障涂层拉伸过程中的声发射信号主要来自涂层中的裂纹扩展, 如何区分热障涂层的裂纹损伤失效模式是用声发射方法无损评价热障涂层拉伸失效的关键内容。本节采用 FFT 对声发射信号进行频谱分析, 进而识别热障涂层的损伤失效模式。

图 8a 是从图 4 纯基体拉伸失效过程中采集的较为典型的基体塑性变形声发射信号(400 s), 其频谱分布如图 8b 所示, 可以看出快速傅里叶变换后原始信号的特征频谱在 0.020 MHz 附近频率幅值最强, 此类信号对应基体塑性变形信号。试验中也采集了纯基体拉伸塑性变形阶段的其他一些声发射信号, 进行快速傅里叶变换后发现其频谱分布相同, 都在 0.020 MHz 附近。

图 8 基体拉伸失效过程中声发射波形及频谱分析

热障涂层拉伸失效第一阶段为基体弹性变形阶段, 此阶段几乎没有声发射信号产生。热障涂层拉伸失效的第二阶段, 此阶段基体塑性变形信号和陶瓷层中的表面裂纹信号共同存在。图 9a 是从图 5 热障涂层拉伸失效第二阶段采集的 800 s 时刻的声发

射信号, 图 9b 为 800 s 时刻对应的特征频谱。可以看出, 除了基体变形的主频率 0.020 MHz 之外, 在频段 0.20~0.25 MHz 出现新的频率成分。既然声发射信号的频谱特征与裂纹的尺寸和加载大小无关, 而只与被检测材料的裂纹类型有关, 因而作者认为新出现的频率成分是由热障涂层表面裂纹的扩展引起的, 故表面裂纹对应的频率成分为 0.20~0.25 MHz。

图9 热障涂层拉伸失效过程中声发射波形及特征频谱分析

热障涂层拉伸失效的第三阶段,基体塑性变形、表面裂纹和界面裂纹信号共同存在。图9c是从图5热障涂层拉伸失效第三阶段采集的1400 s时刻的声发射信号,FFT分析后相应的特征频谱如图9d所示。可以看出图中除了表面裂纹频率成分0.20~0.25 MHz之外,在0.15~0.20 MHz新出现了两个主频率,大约在0.15 MHz和0.19 MHz附近,可以推测新出现的两个主频率是由界面裂纹扩展引生

的,SEM结果表明这一阶段有涂层界面开裂和涂层分层现象。

加载的第四阶段是涂层大面积剥落阶段。图9e是从图5热障涂层拉伸失效第四阶段采集的2000 s时刻的声发射信号,图9f为2000 s时刻对应的特征频谱。可以看出快速傅里叶变换后出现两个主频,大约在0.15 MHz和0.18 MHz附近,其中在0.15 MHz处频率幅值最强。可推测涂层剥落时,主要是界面分层导致热障涂层的剥落。

声发射信号的频谱分析说明了在拉伸破坏过程中,热障涂层的声发射信号通常可能是所有失效形式的共同作用,只是在某一个瞬间,某一失效形式占主导作用。涂层的失效能够很容易地检测,而且要判断出是何种失效形式只需分析其主频率表现为何种形式的损伤源即可^[21]。其他试验也表明,对于脆性涂层/韧性基体系统,表面裂纹首先出现在涂层中并向陶瓷层/粘结层界面扩展,到达界面后,将沿着陶瓷层/粘结层界面扩展,产生界面裂纹或分层^[22-23]。因此,经过一系列FFT分析后,可以获得声发射信号的特征频谱和相应的主频率。根据不同变形阶段特征频谱分布,可以评估热障涂层的失效类型^[24-25]。

3 结论

(1) 裂纹首先在陶瓷层表面萌生,随着基体变形,表面裂纹迅速向陶瓷层/粘结层的界面处扩展,裂纹数目逐渐增多并达到饱和,当表面裂纹扩展至陶瓷层/粘结层的界面处时,裂纹将沿着界面生长与扩展,导致热障涂层发生分层,并最终导致陶瓷层的剥落。

(2) 热障涂层拉伸失效第一阶段为基体弹性变形阶段,第二阶段为表面裂纹扩展阶段,第三阶段为界面裂纹扩展阶段,第四阶段为涂层大面积剥落阶段。

(3) 基体频率成分在0.020 MHz附近,表面裂纹的频率成分在0.20~0.25 MHz之间,界面裂纹的频率成分在0.15~0.20 MHz之间。

参考文献

- [1] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications[J]. Science, 2002, 296(5566): 280-284.
- [2] MARINO K A, HINNEBANN B, CARTER E A. Atomic-scale insight and design principles for turbine engine thermal barrier coatings from theory[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the

- United States of America, 2011, 108(14): 5480-5487.
- [3] BÄKER M, SEILER P. A guide to finite element simulations of thermal barrier coatings[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26(6): 1146-1160.
- [4] CLARKE D R, LEVI C G. Materials design for the next generation thermal barrier coatings[J]. *Annual Review of Materials Science*, 2003, 33(33): 383-417.
- [5] AKTAA J, SFAR K, MUNZ D. Assessment of TBC systems failure mechanisms using a fracture mechanics approach[J]. *Acta Materialia*, 2005, 53(16): 4399-4413.
- [6] CHEN Z B, WANG Z G, ZHU S J. Tensile fracture behavior of thermal barrier coatings on superalloy[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2011, 205(15): 3931-3938.
- [7] 周益春, 刘奇星, 杨丽, 等. 热障涂层的破坏机理与寿命预测[J]. *固体力学学报*, 2010, 31(5): 504-531.
ZHOU Yichun, LIU Qixing, YANG Li, et al. Failure mechanism and life prediction of thermal barrier coatings[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2010, 31(5): 504-531.
- [8] 王铁军, 范学领, 孙永乐, 等. 重型燃气轮机高温透平叶片热障涂层系统中的应力和裂纹问题研究进展[J]. *固体力学学报*, 2016, 37(6): 477-517.
WANG Tiejun, FAN Xueling, SUN Yongle, et al. Research progress on stress and crack in high temperature turbine blade thermal barrier coating system for heavy gas turbines[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2016, 37(6): 477-517.
- [9] 李雪换, 底月兰, 王海斗, 等. 基于声发射技术的热障涂层损伤行为[J]. *材料导报*, 2018, 32(19): 91-97.
LI Xuehuan, DI Yuelan, WANG Haidou, et al. Failure behavior of thermal barrier coatings based on acoustic emission technique[J]. *Materials Reports*, 2018, 32(19): 91-97.
- [10] YANG L, ZHONG Z C, YOU J, et al. Acoustic emission evaluation of fracture characteristics in thermal barrier coatings under bending[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2013, 232(10): 710-718.
- [11] YANG L, ZHOU Y C, LU C. Damage evolution and rupture time prediction in thermal barrier coatings subjected to cyclic heating and cooling: An acoustic emission method[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(17): 6519-6529.
- [12] WANG L, NI J X, SHAO F, et al. Failure behavior of plasma-sprayed yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings under three-point bending test via acoustic emission technique[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, 26(1-2): 116-131.
- [13] 刘国华. 声发射信号处理关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
LIU Guohua. The research on the key technologies in acoustic emission signal processing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [14] SEONG S H, HUR S, KIM J S, et al. Development of diagnosis algorithm for the check valve with spectral estimations and neural network models using acoustic signals[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2005, 32(5): 479-492.
- [15] PATAPY C, PROUST A, MARLOT D, et al. Characterization by acoustic emission pattern recognition of microstructure evolution in a fused-cast refractory during high temperature cycling[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2010, 30(15): 3093-3101.
- [16] PEARSON T C, CETIN A E, TEWFIK A H, et al. Feasibility of impact-acoustic emissions for detection of damaged wheat kernels[J]. *Digital Signal Processing*, 2007, 17(3): 617-633.
- [17] CHUNG K H, OH J K, MOON J T, et al. Particle monitoring method using acoustic emission signal for analysis of slider/disk/particle interaction[J]. *Tribology International*, 2004, 37(10): 849-857.
- [18] YU Y H, CHOI J H, KWEON J H, et al. A study on the failure detection of composite materials using an acoustic emission[J]. *Composite Structures*, 2006, 75(1): 163-169.
- [19] LEE J B, JUNG J P, LEE M H, et al. Effects of bottom electrodes on the orientation of AlN films and the frequency responses of resonators in AlN-based FBARs[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 447: 610-614.
- [20] 钟志春. 热障涂层表面开裂与界面剥离失效的声发射定量评价[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
ZHONG Zhichun. Quantitative failure assessment for surface cracking and interface delamination of thermal barrier coatings by acoustic emission[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2013.
- [21] 杨丽. 热障涂层氧化、损伤与断裂的无损评价研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2007.
YANG Li. Nondestructive evaluation of oxidation, damage and fracture of thermal barrier coatings[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2007.
- [22] YAO W B, DAI C Y, MAO W G, et al. Acoustic emission analysis on tensile failure of air plasma-sprayed

- thermal barrier coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(18): 3803-3807.
- [23] YANG L, ZHOU Y C, MAO W G, et al. Real-time acoustic emission testing based on wavelet transform for the failure process of thermal barrier coatings[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(23): 299.
- [24] YANG L, ZHONG Z C, ZHOU Y C, et al. Acoustic emission assessment of interface cracking in thermal barrier coatings[J]. Acta Mechanica Sinica, 2016, 32(2): 342-348.
- [25] ZHU W, YANG L, GUO J W, et al. Determination of interfacial adhesion energies of thermal barrier coatings by compression test combined with a cohesive zone finite element model[J]. International Journal of Plasticity, 2015, 64(7): 76.
-
- 作者简介:** 李雪换, 女, 1991 年出生。主要研究方向为再制造表面工程。
E-mail: xuehuan1101@163.com
- 底月兰(通信作者), 女, 1986 年出生, 博士。主要研究方向为表面工程, 再制造和摩擦学。
E-mail: dylxinjic031@163.com