高压涡轮叶片表面起皮故障分析

杨帆[1]，孙红梅[1]，徐德才[1]，时靖[1]，王楚迪[2]
1.襄阳航泰动力机器厂　湖北襄阳　441002
2.沈阳航丰飞机技术有限责任公司　辽宁沈阳　110083

摘要：某型发动机高压涡轮叶片为镍基单晶高温合金制造，为提高其高温耐腐蚀能力，在叶片表面采用电弧离子镀技术镀覆有NiCrAlY＋AlNiY复合涂层。发动机试车后叶片叶身表面出现起皮现象，发动机分解后经过宏观、微观检测，对高压涡轮工作叶片叶身表面起皮故障进行了分析，故障原因为压气机工作环内侧封严涂层磨损，脱落的涂层经过高温氧化后附着在叶片叶盆上，形成灰黑色附着物。

关键词：单晶涡轮叶片；电弧离子镀涂层；复合涂层

Analysis of peeling failure on the surface of high-pressure turbine working blades of a certain engine type

YANG Fan[1], SUN Hongmei[1], XU Decai[1], SHI Jing[1], WANG Chudi[2]
1. Xiangyang Hangtai Power Machinery Factory, Xiangyang 441002, Hubei, China
2. Shenyang Hangfeng Aircraft Technology Co., Ltd., Shenyang 110083, Liaoning, China

Abstract: The working blades of a certain engine's high-pressure turbine are made of nickel-based single crystal superalloy. To enhance their high-temperature corrosion resistance, the blade surface is coated with a NiCrAlY＋AlNiY composite coating using arc ion plating technology. After the engine test run, peeling occurred on the surface of the blade body. Through macroscopic and microscopic inspections, combined with the engine disassembly, an analysis was conducted on the peeling failure of the high-pressure turbine working blade surface. The cause of the failure was found to be wear and tear of the sealing coating on the inner side of the compressor working ring. The peeled coating adhered to the blade's suction side after high-temperature oxidation, forming a grayish-black deposit.

Keywords: single-crystal turbine blade; arc ion plating coating; composite coating

1　序言

镍基高温合金具有优越的高温力学及抗蠕变性能，已被广泛应用于航空航天、舰船及动力发电等领域，用以制造先进航空发动机、地面燃气发动机涡轮叶片等高温部件。航空发动机高压涡轮是发动机中动力负荷和热负荷最大的部件[1]，涡轮转子叶片采用镍基高温合金制造，工作环境恶劣，面临高温、高压、高速气流（含未燃尽固体颗粒，气流一

第一作者：杨帆，金属及热处理主管技术员，主要从事金属及热处理技术工作，以及电弧离子镀高温防护涂层相关研究工作，E-mail：1424995034@qq.com。

般富含O、S、C、N和H等）的冲刷和烧蚀，叶片除承受冲刷和烧蚀外，往往还承受富含O、S、C、N及H等气体的氧化及化学腐蚀，实践证明，燃气对叶片产生的高温氧化和热腐蚀是引起叶片损伤的主要破坏形式之一[2]。因此，需在叶片表面制备高温防护涂层，防止叶片在服役过程中过早失效。真空多弧离子镀作为一种先进的表面强化技术，在国防工业领域应用广泛，已在航空航天工业的多类零部件如轴承、机加工刀具、涡轮叶片等上应用。采用多弧离子镀法得到的MCrAlY涂层（M代表Ni，Co或NiCo合金）[3-5]，其具有成分灵活可控、抗氧化和耐腐蚀性能良好等优点，是继扩散型涂层后发展起来的第二代高温防护涂层[6]，具有良好的高温抗氧化和耐腐蚀性能，广泛用于航空发动机热端部件的高温防护。

2　故障分析

2.1　故障情况

某型发动机高压涡轮工作叶片采用镍基单晶高温合金制造，材料牌号为ЖＣ26，是一种镍基沉淀硬化型单晶高温合金。为提高叶片抗高温氧化和耐热腐蚀性能，在高压涡轮工作叶片修理过程中，采用真空电弧离子镀技术在叶身部位镀覆NiCrAlY＋AlNiY复合涂层，涂层厚度要求为0.030～0.055mm。

某型发动机工试2h，分解后发现该发动机82片高压涡轮转子叶片叶身部位出现附着物、起皮现象，其中76片叶片叶盆部位出现灰黑色附着物（未剥落），剩余6片叶片疑似叶片叶盆外表面涂层剥落。高压涡轮转子叶片是发动机的核心部件之一，直接影响发动机的性能、安全性和寿命，涂层脱落后将导致防护失效，造成叶片表面损伤和氧化腐蚀，降低叶片寿命，严重影响发动机维修成本和飞行安全。因此，急需对附着物进行分析评估，明确故障产生的原因。

2.2　宏观检查

目视检查高压涡轮工作叶片起皮故障件，叶盆部位出现附着物，局部起皮，附着物呈灰黑色，起皮剥落部位均集中在叶盆中间靠榫头部位，呈深黑色，部分叶片叶冠内缘板有起皮。目视检查叶背无附着物，进气边、排气边有明显附着物过渡区。叶冠叶盆下缘板有白色放射状附着物，叶片叶盆部位表面起皮导致局部掉块，如图1所示。

a）起皮　　b）放射状分布的附着物

图1　叶盆附着物、起皮异常故障

2.3　微观检查

（1）叶片表面正常涂层成分　取涂层完好且未使用叶片，分别对1～7位置（见图2）进行SEM能谱涂层成分分析，结果见表1。从表1可看出，涂层中存在Co元素，原因是因为电弧镀底层NiCrAlY与面层AlNiY涂层分别经过高温扩散后，叶片基体中的Co元素由内向外扩散到涂层中。

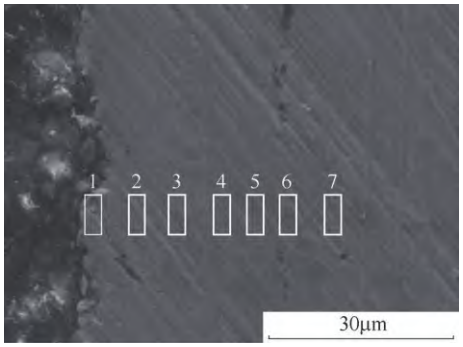


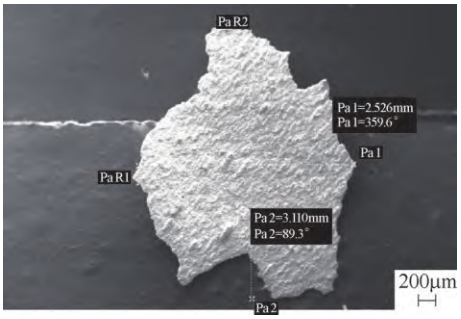
图2　正常NiCrAlY＋AlNiY涂层形貌

表1　正常NiCrAlY＋AlNiY涂层能谱成分（质量分数）（%）

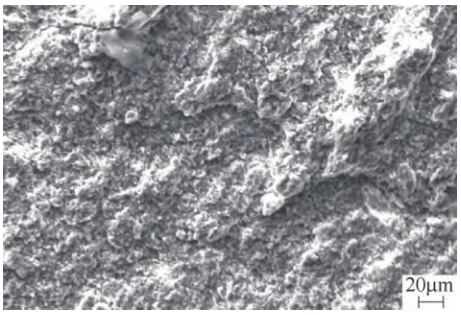
位置	Al	Cr	Y	Co	Ni
1	19.85	6.36	1.06	1.47	70.39
2	18.05	10.58	0.56	1.30	68.80
3	16.42	16.27	0	1.27	64.70
4	9.93	24.46	0	2.10	59.25
5	7.01	22.49	0	2.65	63.90
6	7.54	26.58	0	2.38	55.70
7	5.83	5.54	0	9.26	63.23

（2）脱落的附着物分析　取一小块脱落的附着物，用SEM观察附着物形貌，呈现颗粒状形态，如图3所示。

对附着物进行能谱分析，随机选取3个区域进行能谱分析，结果见表2。



a）尺寸测量（22×）



b）SEM表面形貌（300×）

图3　脱落的附着物形貌

表2　脱落的附着物能谱成分（质量分数）（%）

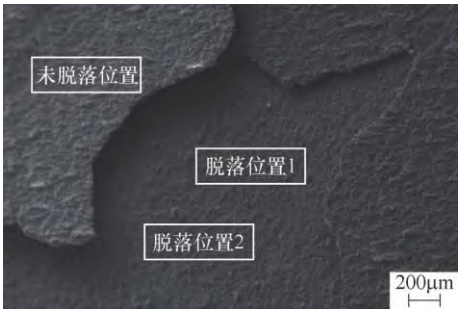
元素	O	Al	Si	S	Fe	Ni	C
区域1	37.00	45.59	1.63	0.80	0.40	0.69	13.89
区域2	39.45	41.34	1.14	0.42	—	2.01	14.81
区域3	35.18	47.18	1.53	0.72	—	0.80	13.21

由表2可知，首先附着物主要含Al、O及C等元素，其中Al含量最高，是NiCrAlY＋AlNiY涂层最外层Al含量的两倍，其次是O、C氧化腐蚀元素，Ni含量较低，附着物具有氧化物特征。

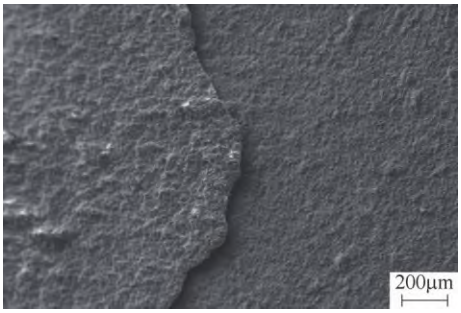
（3）叶片表面附着物分析　对高压涡轮工作叶片表面附着物脱落位置与未脱落位置（见图4）进行SEM能谱分析，结果见表3。

从表3可看出，未脱落区域元素含量与表2相符，表现出Al、O含量高，Ni含量低特征，脱落位置Al含量略有下降，Ni含量升高。正常且完好的电弧镀NiCrAlY涂层的Ni元素通常在55%～62.5%[7]，复合涂层外层采用同样的真空电弧镀工艺方法增加一层AlNiY（Ni基）涂层，因此Ni含量会有所增加，对比可知未脱落区域与脱落区域均与表1正常涂层元素含量不相符。

附着物全部集中在高压涡轮工作叶片叶盆部位，叶背完好，无附着物，为了对比分析，对高压



a）检测区域示意（39×）



b）脱落部位表面形貌（57×）

图4　叶片附着物脱落位置形貌

表3　附着物脱落位置能谱成分（质量分数）（%）

元素	O	Al	Si	S	Cr	Fe	Ni	C
脱落位置1	31.25	33.35	0.81	1.42	2.60	—	18.83	11.73
脱落位置2	31.00	33.39	0.77	1.35	2.58	—	18.73	11.64
未脱落位置	40.30	40.69	1.46	0.64	—	0.32	1.45	15.13

涡轮叶片叶背涂层成分进行分析，结果见表4。叶背涂层形貌如图5所示。

表4　叶背涂层能谱成分（质量分数）（%）

元素	Al	Cr	Co	Ni	Y
叶背涂层区域1	18.86	4.35	1.52	54.47	2.29
叶背涂层区域2	18.84	4.76	1.91	54.00	1.75

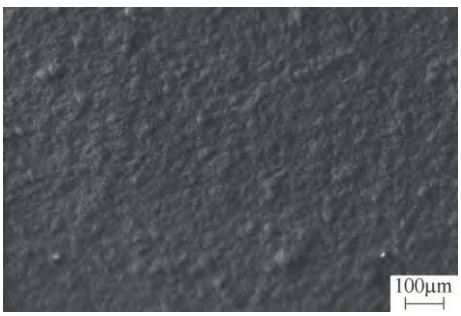


图5　叶背涂层形貌（95×）

从表4可看出，叶背涂层Ni含量最高，与涂层总Ni含量相当，Al元素含量次之，元素含量与附着物具有明显区别，成分与正常涂层相近。

（4）叶片NiCrAlY＋AlNiY涂层厚度分析　为进一步确认附着物成分及涂层厚度，沿叶片叶盆部位附着物掉块区线切割制备金相试样，取样部位如图6所示，对切割面进行涂层厚度及成分检测，结果见表5。

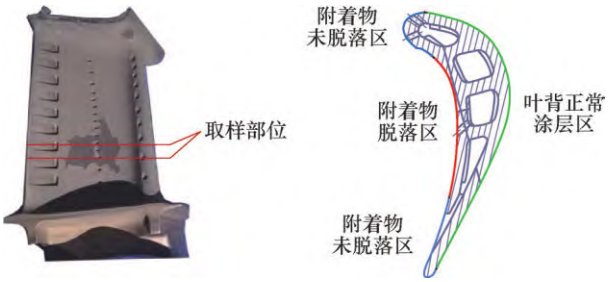


图6　叶片取样部位、检测区示意

表5　涂层厚度检测结果

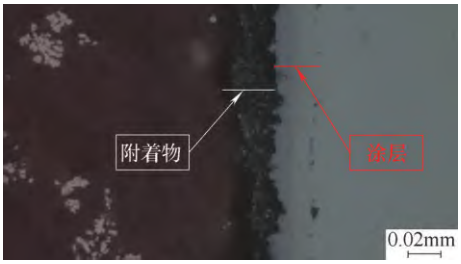
测试区域	涂层厚度/mm	图示
附着物未脱落区涂层总深度（含附着物）	0.047～0.058	图7b
附着物未脱落区涂层总深度（不含附着物）	0.030～0.032	图7b
附着物未脱落区附着物深度	0.016～0.026	图7b
附着物脱落区涂层总深度	0.030～0.036	图7c

涂层金相照片如图7所示，其中图7a为未经过腐蚀直接用金相显微镜检测的结果，能够更加直观的看出外表面的附着物；图7b～d分别为腐蚀后检测结果，涂层存在扩散层，因此涂层与基体的分界不明显。

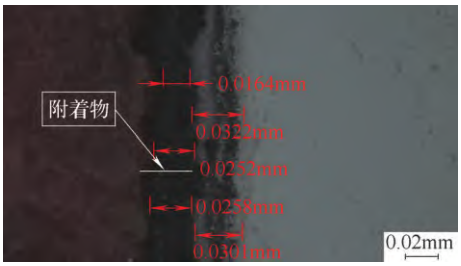
结合上述检测结果可知，有附着物区域，涂层总厚度为0.047～0.058mm，厚度明显高于正常涂层，在500倍金相显微镜下观察，涂层最外层附着有厚厚一层附着物，附着物厚度0.016～0.026mm（见图7a）。

涂层受到附着物影响，局部面层AlNiY涂层呈锯齿状，涂层厚度满足要求，底层NiCrAlY涂层未受影响，附着物未掉块区涂层总厚度为0.030～0.032mm，附着物掉块区涂层总厚度为0.030～0.036mm，均满足规定要求（见图7b、7c）。

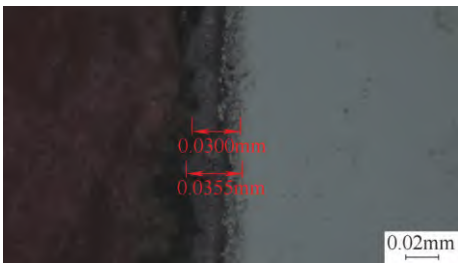
同时，检测附着物脱落部位涂层完整性，AlNiY涂层外层无附着物，涂层金相检测结果与叶背正常涂层相同（见图7c、7d）。



a）叶盆附着物部位



b）叶盆附着物未脱落部位涂层厚度检测



c）叶盆附着物脱落部位

d）叶背无附着物区域

图7　叶片涂层金相照片（500×）

（5）叶片NiCrAlY＋AlNiY涂层成分分析

1）叶盆附着物掉块区涂层分析：SEM检测叶盆附着物掉块区涂层元素含量，从最外层到基体的元素梯度，如图8所示，区域1为涂层外层，区域5为叶片基体，检测结果见表6。

由表6可知，附着物掉块区Ni元素从最外层到基体逐渐升高，Al元素逐渐降低，最外层生成了Al_2O_3氧化膜，具备抗高温氧化腐蚀涂层特征，复合涂层形成了外部富Al、内部富Cr的梯度分布[8]，涂层具有很好的抗高温氧化性能。

表6　叶盆附着物掉块区元素含量（质量分数）（%）

元素	O	Al	Cr	Ni	C
位置1	13.08	38.85	3.85	37.15	4.91
位置2	—	36.92	3.93	57.41	—
位置3	—	36.33	4.00	57.69	—
位置4	—	10.69	16.49	66.94	—
位置5	—	5.88	4.99	65.85	—

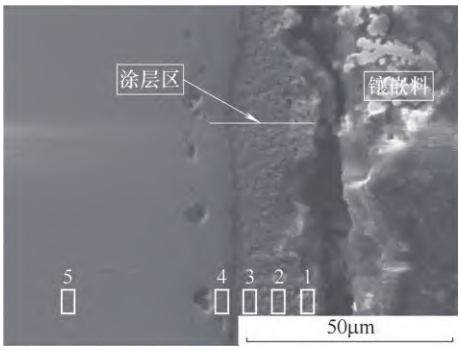


图8　叶盆附着物掉块区涂层情况及元素检测位置

2）叶盆附着物未掉块区涂层分析：采用SEM检测叶盆附着物未脱落区涂层元素含量，从最外层到基体的元素浓度梯度，检测位置如图9所示，检测结果见表7。

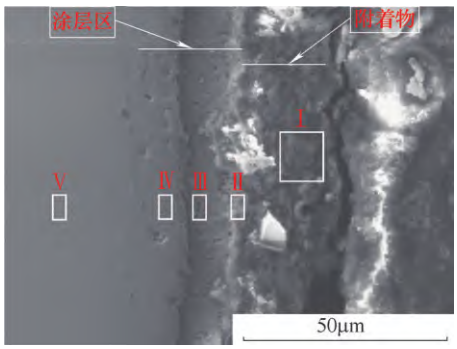


图9　叶盆附着物未脱落区涂层情况及元素检测位置

表7　叶盆附着物未脱落区元素含量（质量分数）（%）

元素	O	Al	Si	Cr	Co	Ni	C
位置Ⅰ	36.29	46.71	1.21	0.48	—	1.68	13.62
位置Ⅱ	29.55	32.57	0.64	4.15	0.46	19.59	11.09
位置Ⅲ	—	36.44	—	4.96	1.91	56.69	—
位置Ⅳ	—	9.07	—	17.12	3.02	68.77	—
位置Ⅴ	—	5.31	—	5.32	9.22	66.20	—

检测附着物未脱落区元素含量，最外层主要为Al、O元素，Ni元素仅含1.68%，与表1正常涂层最外层不一致。区域Ⅱ为附着物与涂层的分界，Ni元素有所增加，Al元素有所降低。区域Ⅲ为正常外层AlNiY涂层，Ni元素接近涂层及基体元素含量。综合以上结果可知，高压涡轮叶片NiCrAlY＋AlNiY涂层并未被破坏，外层AlNiY涂层并未脱落，最外层为外来附着物，附着物主要成分为Al及氧化物。

3）叶背涂层分析：宏观检测叶片叶背无附着物，涂层正常，为进一步验证，检测叶背涂层元素含量，从最外层到基体的元素梯度，检测位置如图10所示，检测结果见表8。

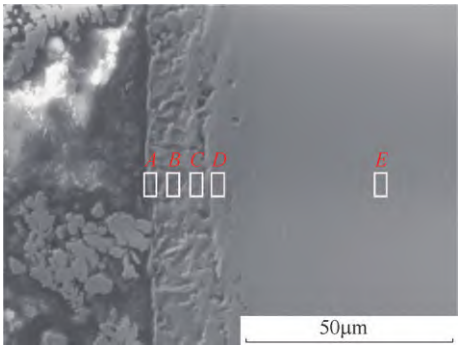


图10　叶背涂层元素测试位置

表8　叶背涂层元素含量（质量分数）（%）

元素	O	Al	Cr	Co	Ni	C
位置*A*	13.22	18.76	5.02	1.40	56.07	4.96
位置*B*	—	19.72	8.82	2.08	69.39	—
位置*C*	—	13.28	14.50	2.14	67.70	—
位置*D*	—	10.30	22.42	2.82	60.21	—
位置*E*	—	6.00	5.07	9.69	64.33	—

由表8可知，叶背涂层元素含量与正常涂层相近，且金相观察未发现附着物，叶背 NiCrAlY＋AlNiY涂层完整，无外来附着物。

2.4　发动机分解检查

分解发动机，检查高低压涡轮导向叶片和低压涡轮工作叶片表面，发现存在少部分相同形貌的附着物，由此进一步证明高压涡轮工作叶片叶盆起皮为外来附着物，叶片自身NiCrAlY＋AlNiY涂层未脱落。

2.5　附着物故障原因分析

由以上检测结果可知，高压涡轮工作叶片叶盆

起皮的附着物主要含Al、O、C及Si等元素，其中Al元素含量最高，对发动机涡轮转子前零件进行检查，发现第3～7级压气机工作环内侧等离子喷涂的封严涂层均存在不同程度的磨损，呈现凹槽状。封严涂层的主要成分为Al、BN，见表9。

表9　工作环封严涂层化学成分（质量分数）（%）

涂层	Al	BN	SiO_2
封严涂层	余量	18.0～23.0	4.0～8.0

综上所述，某型航空发动机高压涡轮工作叶片附着物形成原因为：发动机压气机叶片工作过程中与工作环涂层碰磨形成封严涂层粉末，主要成分为Al，随气流至燃烧室，在高温中形成氧化物，在燃气冲刷高压涡轮工作叶片时附着在叶片表面，形成灰黑色附着物。

2.6　故障跟踪情况

根据附着物形成原因，通过增加涂层厚度检测要求，在制备工作环封严涂层时控制其厚度，控制工作环与压气机叶片的装配间隙等措施，避免封严涂层异常磨损。跟踪后续发动机试车分解情况，高压涡轮工作叶片未出现类似附着物。

3　结束语

1）某型发动机高压涡轮工作叶片叶盆表面灰黑色起皮为外来附着物，首先主要含Al、O、C及Si等元素，其中Al元素含量最高，是NiCrAlY＋AlNiY涂层最外层Al元素含量的两倍，其次是O、C氧化腐蚀元素，Ni含量较低，附着物具有氧化物特征。

2）附着物未脱落区域具有Al、O含量高以及Ni含量低特征，脱落位置Al含量略有下降，Ni含量升高，但仍然与涂层元素含量不相符。结合涂层金相照片可以判定，NiCrAlY＋AlNiY涂层未被破坏，叶盆附着物区与附着物脱落区涂层厚度符合规定要求。

3）发动机分解后发现第3～7级压气机工作环内侧等离子喷涂的封严涂层被磨损，该封严涂层主要成分为Al，磨损脱落的涂层经过高温氧化后附着在叶片叶盆上，形成灰黑色附着物，不是叶片涂层脱落导致的。

参考文献：

[1] 赵明，邓明，刘长福. 航空发动机结构分析[M]. 西安：西安工业大学出版社，2016.

[2] 潘钢，王轶，古文学，等. 发动机涡轮叶片真空电弧镀Al-Si-Y涂层性能[J]. 金属热处理，2007，32（8）：12-14.

[3] 王心悦，辛丽，韦华，等. 高温防护涂层研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术，2013，25（3）：175-183.

[4] 运广涛，李其连，程旭东. MCrAlY涂层在航空发动机热端部件上的应用[J]. 热喷涂技术，2015，7（2）：6-11.

[5] 郭洪波，宫声凯，徐慧彬. 先进航空发动机热障涂层技术研究进展[J]，中国材料进展，2009，28（Z2）：18-26.

[6] 彭小敏，夏长清，吴安如，等. 真空热处理对NiCrAlY涂层组织与性能的影响[J]. 中国有色金属学报，2013，23（11）：3147-3153.

[7] 王冰，宫骏，黄美东，等. 合金元素再MCrAlY涂层中的行为[J]. 材料保护，2001，34（4）：7-9.

[8] 彭新，姜肃猛，段绪海，等.（MCrAlY＋AlNiY）复合涂层的高温氧化行为[J]. 金属学报，2009，45（4）：379-384.

（收稿日期：20250423）

（上接第104页）

参考文献：

[1] 耿学明，黎定旺. 大型锻件的调质热处理实践[J].金属加工（热加工），2010（5）：40-41，45.

[2] 李晓宏，杨迪，黄守已. 大型环类锻件调质处理[J]. 大型铸锻件，2018（2）：26-27，35.

[3] 沈黄富. 关于大型锻件调质热工艺的探讨[J]. 金属热处理，1982（8）：27-33.

[4] 齐加胜. 淬回火对30CrMnSiA高强钢组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺，2022，51（24）：125-128.

[5] 吴子恺，陈伟，周海铭，等. 回火温度对30CrMnSiA钢力学性能的影响[J]. 金属热处理，2019，44（4）：163-167.

（收稿日期：20241230）