

16Ni3CrMoE钢输出齿轮的热处理工艺研究

李立群¹, 王联进¹, 王广超¹, 陈卫华²

1. 中国航发中传机械有限公司 湖南长沙 410200

2. 南昌航空大学材料科学与工程学院 江西南昌 330063

摘要: 航空发动机传动系统齿轮装配精度较高, 经热处理后装配尺寸变形控制难度大, 采用碱浴自由淬火后零件的变形不能有效控制, 严重影响了齿轮的装配及使用。以16Ni3CrMoE钢输出齿轮为研究对象, 通过模压油冷淬火替代碱浴自由淬火, 对零件关键尺寸进行限制, 以控制零件变形。对比分析两种方式淬火零件的组织、硬度、性能及尺寸变化规律, 结果表明: 采用模压油冷淬火工艺可有效控制零件的变形问题, 加工的零件符合技术指标要求。

关键词: 压力淬火; 淬火模具; 齿轮; 16Ni3CrMoE钢; 热处理变形

Study on the heat treatment process of 16Ni3CrMoE steel output gear

LI Liquan¹, WANG Lianjin¹, WANG Guangchao¹, CHEN Weihua²

1. AECC Zhongchuan Transmission Machinery Co., Ltd., Changsha 410200, Hunan, China

2. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China

Abstract: The assembly precision of gears in aero-engine transmission systems is relatively high, yet controlling the deformation of assembly dimensions after heat treatment presents significant challenges. The deformation of parts cannot be effectively controlled after alkali bath free quenching, which seriously affects the assembly and use of gears. This study focuses on the 16Ni3CrMoE steel output gear as the research object, and the key dimensions of the parts are limited to control the deformation of the parts by pressing oil cold quenching instead of alkali bath free quenching. The microstructure, hardness, properties and dimensions of the parts quenched by the two methods are compared and analyzed. The results show that the deformation of the parts can be effectively controlled by the cold-quenching process of the moulded oil, and the machining of the parts can meet the technical requirements.

Keywords: pressure quenching; quenching mold; gear; 16Ni3CrMoE steel; heat treatment distortion

1 序言

16Ni3CrMoE钢 (相当于法国牌号E16NCD13)

是我国引进国外机种后为国产化所研制的渗碳齿轮钢^[1]。该材料是一种综合性能优异的低碳合金结

基金项目: 中国航发航空齿轮制造技术创新中心基金项目 (AGMTIC-KFKT-202401); 江西省航空材料表面技术工程中心基金项目 (EB202301428)。

第一作者: 李立群, 高级工程师, 主要从事金属材料热处理和表面处理技术质量管理和工艺策划方面的工作, E-mail: 13975191328@126.com。

通信作者: 陈卫华, 讲师, 博士, 主要研究方向为热处理和表面, E-mail: chenweihua@nchu.edu.cn。

构钢，其淬透性好，经渗碳淬火后表面硬度可达60HRC以上，心部硬度40~45HRC，具有较高的抗拉强度及冲击韧度，特别适用于高载荷、低温与耐疲劳的复杂工况，适于制造转速高、负荷大及结构紧凑的齿轮、轴类零件，是航空发动机传动齿轮的常用钢^[2, 3]。

某发动机输出齿轮采用16Ni3CrMoE钢制造，零件结构为薄腹板斜齿与薄壁内花键结构，在服役过程中，外齿部与轴承配合外圆需承受较高的冲击、扭矩载荷，设计要求对齿部及轴承配合处进行渗碳淬火，内花键进行浅层碳氮共渗淬火。经淬火后表面形成碳化物+高碳马氏体组织，具有优异耐磨损、抗弯曲性能，心部为板条马氏体组织，具有良好的韧性^[4-6]。传统工艺为齿轮齿部渗碳、内花键碳氮共渗后，采用盐浴炉加热后进行碱浴等温淬火方式来改善热处理变形，采用该工艺淬火时零件处于自由状态，在热处理过程中因温度变化而在齿轮内形成应力集中现象，导致齿轮形状及尺寸发生变化，采用碱浴等温淬火时腹板及内花键畸变未得到有效控制^[7]，严重影响其后续的加工和装配质量及产品的使用性能。

本文以16Ni3CrMoE钢输出齿轮为研究对象，通过优化淬火工艺，采用模具支撑零件在压床上进行压力淬火，从而实现控制输出齿轮在淬火过程中的变形。

2 试验方法

2.1 试验材料及结构

试验材料为商用16Ni3CrMoE渗碳齿轮钢，化学成分见表1。输出齿轮结构如图1所示。零件要求齿部A及轴承配合外圆B、C渗碳，内花键碳氮共渗，其余表面不允许渗碳。非渗碳/碳氮共渗区域一般采用电镀铜防渗法；专用防渗涂料保护法；预留加工余量并在渗碳后将渗碳层车削去除法等进行防渗保护。此零件采用电镀铜防渗法的加工路线为：整体镀铜→滚齿→车轴承配合外圆→齿部渗碳→除铜→车腹板→整体镀铜→插内花键→内花键碳氮共渗→淬火→除铜→机械加工。零件腹板直径大，内孔为薄壁内花键，变形控制难度大。

2.2 试验工艺

优化前后的两组试样均在低压真空渗碳炉同炉

表1 16Ni3CrMoE钢化学成分（质量分数）（%）

C	Cr	Si	Mn	Mo	Ni	Fe
0.16	0.6	0.25	0.38	0.24	4.1	余量

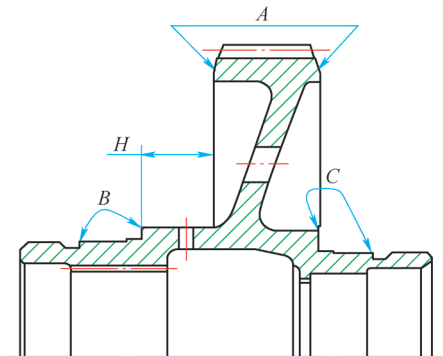


图1 输出齿轮结构

进行渗碳，渗碳温度为920℃，渗碳后需要进行高温回火以获得球状碳化物颗粒，降低其渗层硬度，从而有利于后续进行机械加工，同时可以减少再次加热淬火后的残留奥氏体含量。高温回火后按加工路线对零件进行整体镀铜保护，再插内花键，以满足设计要求（轮齿和轴承外圆渗碳、内花键碳氮共渗，其余部位不渗碳），然后在低压真空渗碳炉中进行碳氮共渗。两组试样经齿部渗碳、内花键碳氮共渗后，按以下工艺进行淬火，如图2所示。

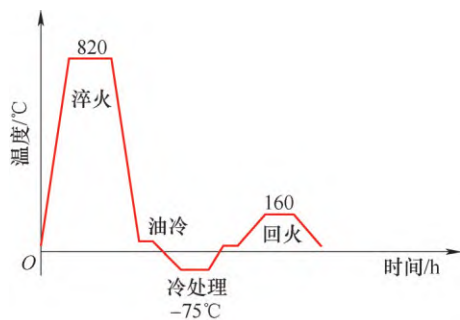


图2 16Ni3CrMoE钢热处理工艺

第一组试样采用传统淬火工艺，在盐浴炉升温至820℃、保温30min后，转碱槽在190℃保温15min后油冷淬火，淬火时零件处于自由状态。第二组试样采用优化后热处理工艺，在箱式电阻炉加热至820℃、保温90min后直接油冷，冷却时采用淬火模具控制零件变形，压力淬火模具如图3所示。淬火模具由上模、底模及芯模组成，上模将压力平均分配至零件各部位，底模起着支撑零件及固定外圆作用，芯模起着零件定位及限制内花键与内孔作用。两组试样

淬火后冷处理温度为 $-60\sim-80^{\circ}\text{C}$ ，冷处理后进行低温回火，回火温度为 160°C 。冷处理、回火可进一步消除残留奥氏体组织及淬火应力。

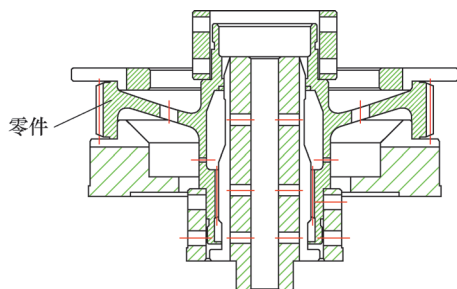


图3 压力淬火（2#试样）模具示意

2.3 组织及性能检测方法

热处理后将标准金相试块加工成 $15\text{mm}\times 15\text{mm}\times 10\text{mm}$ 的试样，并将试样打磨、抛光，用体积分数为4%的硝酸酒精对试样进行腐蚀，采用扫描电子显微镜观察淬火后试样表面渗层及心部组织，设备型号为SU3900。采用洛氏硬度计检测渗碳表面及心部硬度。有效硬化层深度采用硬度法评估，测至基体硬度550HV处（载荷为98N），检测设备为KB30S型显微硬度计。力学性能试验在万能试验机上进行，热处理前加工成方块状力学性能试样并镀铜保护，随零件同炉进行渗碳、内花键碳氮共渗及淬火、冷处理及回火后加工成标准试样进行检测，拉伸速率为 $2\text{mm}/\text{min}$ ，每种热处理工艺检测3个拉伸试样，并求平均值。拉伸试样为沿轧制方向加工标距直径3mm、标距长度15mm的圆柱形拉伸试样。

3 试验结果与讨论

3.1 硬度分析

目前，国内外现行标准中渗碳层测定方法有3种：化学分析法、显微金相检测法、有效硬化法^[7]。有效硬化法是最常用也是仲裁的一种测定方法。有效硬化层深度，一般是指在零件最终热处理状态下，从零件表面到硬度550HV处的垂直距离，测定硬度采用的试验力为9.807N。2组试样均采用有效硬化法进行渗层深度检测，以齿部渗碳层结果进行分析。为检测试样各工序后的显微硬度梯度及有效渗层深度，利用维氏硬度计和Origin软件得出了其硬度梯度图像，根据GB/T 1172—1999《黑色金属硬度及强度换算值》进行换算的洛氏硬度值。

2组试样热处理后的硬度检测结果见表2，齿

部渗碳层硬度梯度对比如图4所示。由表2可知，1#试样渗碳表面硬度为61HRC，内花键表面硬度为52HRC，心部硬度为40HRC。2#试样渗碳表面硬度为62HRC，内花键表面硬度为54HRC，心部硬度为44HRC，表面硬度及心部硬度均在技术要求范围内。

表2 两组试样热处理后的硬度检测结果

检查项目	技术要求	1#试样	2#试样
轮齿渗碳层深度/mm	0.8~1.0	0.87	0.92
内花键碳氮共渗层深度/mm	0.2~0.4	0.25	0.31
渗碳表面硬度HRC	≥ 60	61	62
内花键表面硬度HRC	≥ 51.5	52	54
心部硬度HRC	36~44	40	44

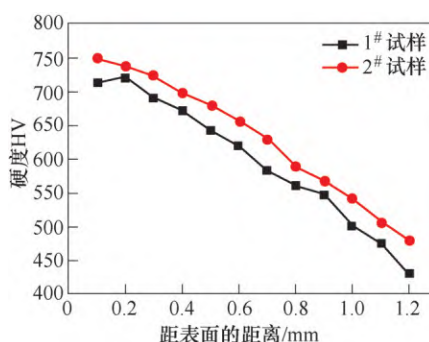


图4 热处理后齿部渗碳层硬度梯度对比

由表2和图4可知，1#试样硬度最大值出现在距表面0.2mm处，最大值为722HV，表面硬度为715HV，最终热处理后渗层有效硬化层深度为0.87mm，1#试样的硬度变化从表面到心部先升高后降低，并不是直接降低，“低头”现象的发生很有可能是由于采用碱浴等温淬火后的残留奥氏体软相的影响。2#试样硬度最大值出现在距表面0.1mm处，最大值为749HV，表面硬度为753HV，最终热处理渗层深度为0.92mm，采用压力淬火后渗层硬度梯度下降平缓，几乎无“低头”现象。采用优化工艺获得的零件渗层深度及硬度均符合技术要求。

3.2 力学性能试验

力学性能取样方向为弦向，室温拉伸性能试验依据GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第1部分：室温试验方法》进行，冲击试验按GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》进行，两组试样热处理后力学性能各项指标见表3，采用压力

淬火工艺加工试样与碱槽等温淬火试样力学性能结果基本一致，两组试样抗拉强度、屈服强度、伸长率及冲击韧度均符合技术要求。

表3 淬火热处理性能结果

项目	技术要求	1 [#] 试样	2 [#] 试样
抗拉强度/MPa	1180~1380	1300	1312
屈服强度/MPa	≥980	1020	1031
伸长率 (%)	≥8	14.5	15
冲击韧度/ (kJ/m ²)	≥800	1700	1837

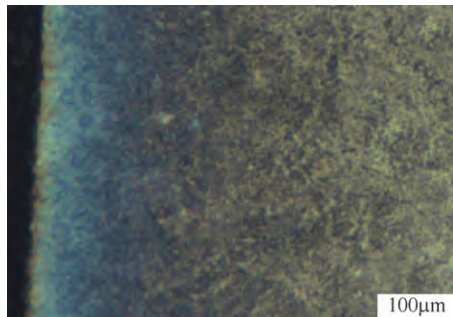
3.3 金相组织分析

根据HB 5493—1991《航空钢制件渗碳、碳氮共渗渗层深度测定方法》，高倍组织测定法为：渗碳后可以用空冷、淬火+回火、不完全退火或退火等状态的试样，抛光后一般在3%~5%硝酸酒精中腐蚀15~25s。钢中马氏体是碳在 α -Fe中的过饱和固溶体，马氏体转变过程中铁晶格改组是通过切变完成的，从面心立方晶格转变为体心立方晶格。在降温过程中，马氏体形核长大速度较快，片状马氏体长大速度为 $10^6 \sim 10^7$ mm/s，板条马氏体形核长大速度为 $10^2 \sim 10^3$ mm/s。随着钢碳含量的不同，马氏体有低碳板条马氏体，高碳含量 ($w_C \geq 1\%$) 片状马氏体，当 $w_C < 0.6\%$ 时，基本为板条马氏体；当 $w_C = 0.6\% \sim 1.0\%$ 时，钢的组织为针状或片状与板条马氏体的混合组织^[8]。

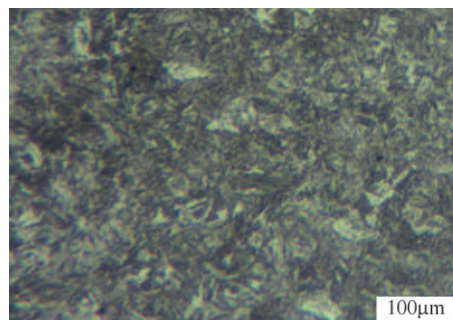
图5、图6所示分别为1[#]试样渗层及心部组织的金相和扫描电镜照片。结合图5和图6可知，碱浴自由淬火获得的样品回火后表面组织由高碳马氏体与细小粒状碳化物组成，按HB 5492—2011《航空钢制件渗碳、碳氮共渗金相组织分级与评定》进行评级，表面碳化物2~3级，残留奥氏体1级，无明显异常组织（见图5a）；心部组织为板条马氏体，无明显残留奥氏体、铁素体等异常组织，符合技术要求。图7、图8所示分别为2[#]试样渗层及心部组织的金相和扫描电镜照片。由图7和图8可知，模压淬火获得的样品回火后表面组织由高碳针状马氏体+粒状碳化物组成，按HB 5492—2011《航空钢制件渗碳、碳氮共渗金相组织分级与评定》进行评级，残留奥氏体1级，碳化物1~2级，无明显异常组织；非渗层（心部）组织由低碳板条状马氏体组成，采用

该工艺淬火后金相组织符合技术要求。

用AREXL残留奥氏体分析仪对两组试样进行检测对比发现，1[#]试样的残留奥氏体含量为11%，满

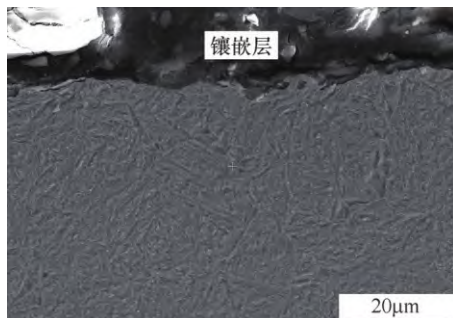


a) 渗层

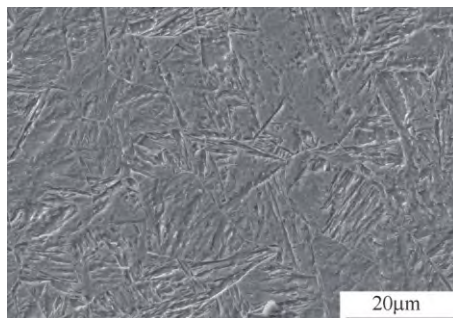


b) 心部

图5 1[#]试样碱浴自由淬火+回火后金相组织

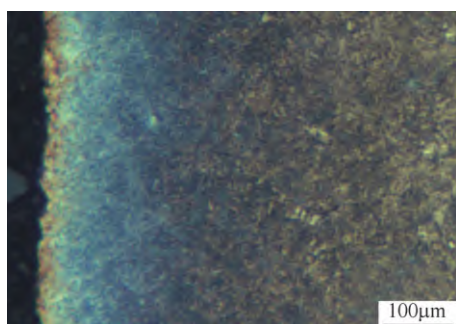


a) 渗层

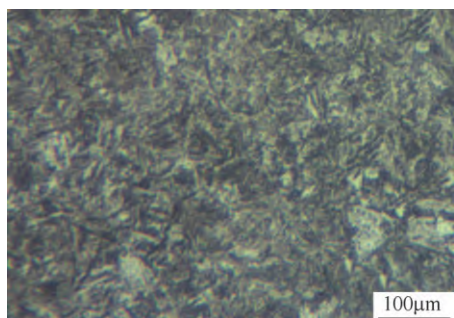


b) 心部

图6 1[#]试样碱浴自由淬火+回火后组织扫描电镜照片

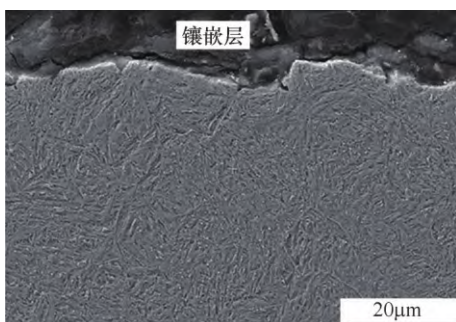


a) 渗层

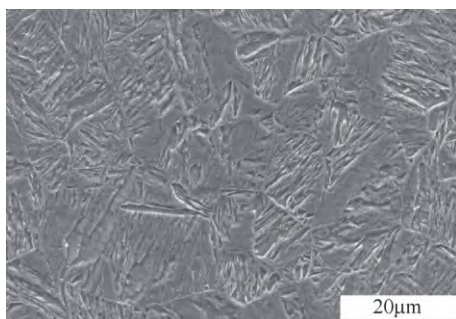


b) 心部

图7 2#试样模压淬火+回火后金相组织



a) 渗层



b) 心部

图8 2#试样模压淬火+回火后组织扫描电镜照片

足残留奥氏体含量 $<20\%$ 的技术要求。2#试样的残留奥氏体含量为8%，虽然两组试样的金相组织中残留

奥氏体含量均符合技术要求，但是1#试样的残留奥氏体含量明显高于2#试样，这也是图4中1#试样出现“低头”现象的主要原因。

3.4 变形结果分析

齿轮在淬火时，温度在剧烈变化的同时伴随组织发生变化，不仅产生弹性变形，而且引起塑性变形，因此齿轮的淬火过程是一种热弹塑性问题^[9]。淬火过程包含复杂的物理过程和化学过程，生产过程中无法实现对尺寸变化情况进行实时监测记录，过程中通过记录热处理前后尺寸的变化，摸索热处理过程中尺寸变化规律，通过优化工艺及模具设计等方法来控制变形。

1#碱浴自由淬火与2#模具压力淬火两组试样分别加工3个工件，热处理后尺寸检查结果见表4。从表1可看出，1#试样自由淬火后高度尺寸 H 及内花键齿根圆尺寸稳定性较差，结果严重偏离技术要求，超过热处理后加工余量，不符合设计要求。

表4 淬火后尺寸检查结果 (mm)

项目	技术要求	1#试验组3工件	2#试验组3工件
H 处高度	26.1 ± 0.1	26.17、26.21、26.24	26.08、26.12、26.15
花键齿根直径	$\phi 55 \pm 0.08$	$\phi 55.06$ 、 $\phi 55.15$ 、 $\phi 55.18$	$\phi 54.97$ 、 $\phi 55.01$ 、 $\phi 55.04$
是否合格	—	不合格	合格

1#试样变形严重的原因如下。

1) 工件采用盐浴炉加热，工件的加热速度过快，导致工件表面升温快，心部升温慢，表面和心部因热膨胀程度不同而形成很大的热应力，工件在热应力的作用下发生不均匀塑性变形，从而产生形状畸变^[10, 11]。

2) 经过热处理后，内花键渗层部位的组织与杆部组织存在一定差别，渗层组织会引起内花键尺寸胀大。当热应力超过金属的屈服极限时，会产生内花键胀大的塑性变形，从而导致零件外径与内径间的膨胀值相差较大，零件结构产生畸变^[12]。

3) H 处尺寸变大，零件自由淬火时吊挂装炉，腹板较大，在淬火过程中受到重力及内部组织应力影响下，腹板出现“下塌”，带动杆部变形，导致

内花键齿根圆直径变大。

2#试样基于自由淬火零件变形规律设计了模具对零件进行限制（见图3）。采用芯轴对零件进行定位，支撑薄壁内孔，防止产生收缩，通过带孔套筒控制来防止外圆胀大，经淬火后花键内孔的齿根圆直径得到有效控制。腹板下端采用支撑垫进行支撑，上端面用盖板限制。淬火时采用模具限制零件变形，在压力环境下零件的变形趋势得到有效控制。

4 结束语

本文对16Ni3CrMoE钢输出齿轮碱浴淬火工艺进行改进，从零件变形规律、渗层质量、金相组织及力学性能等方面进行对比分析，结论如下。

1) 16Ni3CrMoE钢齿轮加热至奥氏体化温度后直接油冷后，渗层组织由高碳马氏体与细小碳化物组成，无明显残留奥氏体等异常组织，硬度、性能与传统碱浴淬火后结果相当，采用直接油冷淬火工艺后产品质量稳定，符合技术要求。

2) 根据16Ni3CrMoE钢输出齿轮自由淬火时变形规律，设计套筒、支撑垫及芯棒等对零件进行定位、限制，有效控制了热处理后零件关键尺寸的变形。

参考文献：

- [1] 刘伯操，李金桂. 中国航空材料手册[M]. 北京：中国标准出版社，2001.
- [2] 卢锐，柯文敏，况侨，等. 航空发动机16Ni3CrMoE钢制输出轴的热处理畸变控制[J]. 金属热处理，

2022，47（2）：168-172.

- [3] 钟斌，何玉怀，苏彬. 1Cr11Ni2W2MoV和16Ni3CrMoE两种钢的高温扭转疲劳性能研究[J]. 机械强度，2004，26（S）：169-171.
- [4] 郑医，何培刚，李宁，等. 航空渗碳齿轮钢的迭代发展[J]. 航空材料学报，2023，43（1）：60-69.
- [5] 王斌，何燕萍，王昊杰，等. 航空齿轮钢16Cr3NiWMoVNbE的低压真空渗碳[J]. 材料研究学报，2020（1）：35-42.
- [6] WU J, WEI P, ZHU C, et al. Development and application of high strength gears[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology，2024，132（7）：3123-3148.
- [7] 杨凯，王鹏坡，张玉梅，等. 航天器齿轮渗碳淬火分析与畸变控制优化[J]. 金属热处理，2024，49（7）：22-28.
- [8] 李雪峰，王春芬，王嘉敏. 回火马氏体与回火索氏体辨析[J]. 热处理，2012，27（4）：12-16.
- [9] 尚建军. 变速箱齿轮热处理的变形与控制研究[D]. 吉林：吉林大学，2011.
- [10] 张宇庆. 采用淬火压模控制薄壁齿轮的淬火变形[J]. 金属加工（热加工），2021（3）：66-69.
- [11] 蔡君康. 17CrNiMo6内齿圈渗碳淬火变形的控制[J]. 金属加工（热加工），2019（5）：34-36.
- [12] 崔雪莹，徐锋. 航空齿轮内花键热处理精度控制技术[J]. 现代制造技术与装备，2024（3）：180-182.

（收稿日期：20250212）

《金属加工（热加工）》2025年第5期广告目次

单位名称	查询编号	位置
伊达新技术电源（昆山）有限公司	1925	封面
昆山京群焊材科技有限公司	5123	封二
盐城高周波热炼有限公司	5326	封三
北京金威焊材有限公司	1161	封底

单位名称	查询编号	位置
应达工业（上海）有限公司	1262	前彩1
中国国际金属成形展览会	5699	前彩2
第二十八届北京·埃森焊接与切割展览会	1380	V