

热处理手册

第2版
第4卷

机械工业出版社

热 处 理 手 册

第 2 版

第4卷 热处理质量控制与检验方法

中国机械工程学会热处理专业学会
《热处理手册》编委会编



机械工业出版社

(京)新登字054号

《热处理手册》是一部综合性工具书。本版为第2版，共四卷。第1卷为工艺基础；第2卷为典型零件的热处理；第3卷为热处理设备；第4卷为热处理质量控制与检验方法。

本书为第4卷，共十章及一个附录。内容包括金属材料化学成分检验、宏观组织检验及断口分析、显微组织分析、力学性能试验、无损检验、内应力的测定、相分析及相变过程试验、金属腐蚀试验、热处理质量管理与控制、常用数据和法定计量单位及常用物理量的法定计量单位等。

本书可供热处理工程技术人员和车间班组使用，也可供高校和中专金属材料及热处理专业师生参考。

热 处 理 手 册

第2版

第4卷 热处理质量控制与检验方法

中国机械工程学会热处理专业学会

《热处理手册》编委会编

*

责任编辑：丁文华 韩会民 责任校对：刘志文

封面设计：刘 代 版式设计：冉晓华

责任印制：王国光

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

人民交通出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张40¹/₄·插页2·字数988千字

1978年10月北京第1版

1992年10月北京第2版·1992年10月北京第3次印刷

印数 70 701—75 600·定价30.00元

*

ISBN 7-111-03174-1/TG·699

顾问	周志宏	周惠久								
主任委员	孙大涌									
副主任委员	雷廷权	章守华	樊东黎							
委员	孙大涌	雷廷权	章守华	樊东黎	于恒	朱沅浦	袁汲	刘迨		
	邓洋	戚正凤	宋余九	侯增寿	徐佐仁	丁文华	卮振声	沈百全		
	许长生									
《热处理手册》	总主编									
	朱沅浦	侯增寿	邹康宏							
本卷主编	宋余九	苟毓闻								

序

热处理是机械制造业中关键工艺之一，对发挥材料潜力，节约用材，延长机器零件使用寿命起着重要的作用，为了促进技术交流，推广先进经验，指导正确的工艺操作，1972年由原一机部机械研究院组织国内有热处理专业的院校教师、研究院所和部分企业的有经验的技术人员，共同编写了《热处理手册》，出版后曾两次印刷，深受广大读者欢迎。

但是，第一版《热处理手册》从编写至今已逾十年，这十多年里国内外热处理技术发展很快，我国自改革、开放以后，又引进了许多先进技术及装备。在这种情况下，如不对《热处理手册》进行修订，将不能满足生产和技术发展的要求，起不到工具书的作用。有鉴于此，机械工业出版社会同中国机械工程学会热处理专业学会负责组织国内专家、学者按照实用性、可靠性、先进性、科学性的原则，从速改写、修订，达到能正确指导生产，促进技术进步的作用。

此次改写虽与第一版有一定的继承性，但在内容上根据近年来国内外在热处理技术上的发展状况，结合我国企业应用的现状，作了切合实际的介绍，增加了较多的新内容。一些参数大多来自工厂和科研单位的实用数据，是比较可靠的，对于一些过时的工艺则作了必要的删节，成为一本目前适用的热处理工具书，这必将对机械工业提高产品质量，发展新产品起到应有的作用。

陆燕萍

前 言

1972年受一机部的委托,由原一机部机械研究院组织了全国各地44个工厂、高校、科研单位的一百余位工程技术人员开始编写和审定我国自编的第一部综合性的热处理专业手册。出版后,深受广大读者欢迎。

手册第一版的编写与出版毕竟是在特殊历史条件下完成的。由于种种条件的限制和在编写思想上的束缚,有许多不尽如人意之处,加之近十余年来热处理技术的飞速发展,手册第一版的许多内容已使人感到过时和陈旧。因此,根据机械工业出版社的倡议,中国机械工程学会热处理专业学会第二届第三次理事会决定,组成手册编辑工作委员会开展对《热处理手册》重新编写和修订工作。由于参加第一版编写人员的工作性质和单位多有变化,只得重新组织手册第二版的编写工作班子。经过本行业多方面的专家五十余人,近四年的共同努力,完成了四卷书稿的编写和审定工作。

本版的主要读者对象明确规定为从事热处理生产的工程技术人员,编写的指导思想是以总结国内先进生产实践经验和科研成果为主,同时吸收国外先进技术,所列数据和选用资料必须具有实用性、可靠性、科学性和先进性。本版和第一版相比在以下方面作了一系列重要调整和改动。

1. 第一卷为“工艺基础”,针对本版规定的读者对象,这一卷的提纲重新进行了编排,删去了一些不必要的原理内容,增添了“加热”一章;把钢的化学热处理分为“奥氏体状态”和“铁素体状态”化学热处理;增加了“表面热处理”和“其它热处理”的份量,把原来“磁性和弹性合金的热处理”扩大为“功能合金的热处理”,使手册内容更符合“实用性”和“先进性”的要求。

2. 在第二卷“典型零件的热处理”中,除合理调整原有各章内容外,增加了“飞机零件的热处理”和“手表、自行车、缝纫机和纺织机械零件的热处理”两章,在各章内容中对于零件的热处理畸变和控制给予了足够的重视。举出的例子不是照搬某厂的现行工艺,而是通过分析比较国内外先进工艺而优选出来的。

3. 在第三卷“热处理设备”中把电阻炉,尤其是真空热处理炉和可控气氛发生设备作为重点,增补了热处理质量的自动控制和检测的内容,对表面热处理、离子热处理、高密度能热处理和表面沉积设备也给予了必要的重视,增加了不少近代先进设备类型,在车间设计一章中增补了近代的设备设计思想和方法。

4. 第四卷为“热处理质量控制与检验方法”。从第一版的以质量检验方法为主,改为以质量控制为中心,增添了“热处理质量管理与控制”一章。把“钢的火花鉴别”一章扩大为“金属材料化学成分检验与鉴别”,把“宏观和微观组织检验”分为“宏观”和“微观”两章。在“力学性能试验”和“相变相分析方法”等章节中补充了大量近代的先进方法。把原附录中的部分有关数据在作了大量补充、编排与处理之后专门增列为一章,更便于读者查考。

由此可见,手册第二版实际上绝大部分内容是重新编写,而不是简单的修改补充,因而其内容将更为先进和实用,对生产、科研和教学一定会起到更大的作用。

《热处理手册》编辑工作委员会是一个常设机构。按照热处理专业学会第二届第三次理事扩大会议决议,手册将一版一版地修订下去,不断修改过时落后的内容,补充最新的实践经验和科研成果,使《热处理手册》永远保持为推动热处理生产技术不断进步的有力手段。

为了明确对所编写内容的责任和对编写者劳动的承认,编委会决定第二版在每卷各章署上编写者单位和作者姓名。第一版由于历史原因,未列出编写者姓名,只有编写单位名称,编写第二版时又大多易人,为了弥补这一缺陷,编委会决定将参加第一版编写的人员名单列出于下:

第一版全书主编 孙大涌 副主编 樊东黎 雷廷权

第四分册编写负责人 冉启方 樊东黎

编写人员 宋德生 舒文芬 桂立丰 李 晋 朱沅浦 罗启富 王琼礼 汤锡斌
樊东黎 朱森第 张洛辉 冉启方 陈祝年 华惠中 徐克薰 莫志雄
火树鹏

手册的编写得到了机电部科技司、机电部机械科学研究所、机电部北京机电所、机电部机械情报所和机械工业出版社各级领导和有关同志的大力支持,在此一并致谢。

一些为手册第一版尽过力的同志,因时隔过久难免漏记,编委会对这些同志诚挚地致歉并恳请鉴谅。

中国机械工程学会热处理专业学会
《热处理手册》第二版编委会

目 录

序

前言

常用符号名称对照表

第一章 金属材料化学成分检验..... 1

第一节 钢铁材料的火花鉴别..... 1

一、火花组成、形状及形成原因..... 1

二、火花检验用设备及操作注意事项..... 2

三、碳钢火花特征..... 3

四、合金元素对火花特征的影响..... 4

第二节 光谱分析..... 9

一、光谱分析原理及应用..... 9

二、荧光X-射线分析..... 11

三、激光显微光谱分析..... 12

第三节 微区化学成分分析..... 13

一、电子探针X-射线显微分析..... 14

二、俄歇电子能谱技术..... 19

三、离子探针显微分析..... 22

参考文献..... 25

第二章 宏观组织检验及断口分析..... 26

第一节 宏观检验..... 26

一、钢的酸蚀检验..... 26

二、印痕法检验..... 33

三、液体渗透着色法..... 33

第二节 断口分析..... 36

一、断口试样的选择..... 36

二、断口试样的清洗..... 39

三、断口试样的保存..... 42

第三节 宏观断口分析..... 42

一、断口分类..... 42

二、各类断口形貌特征..... 45

三、裂纹源位置及裂纹扩展方向的
判别..... 49

第四节 显微断口分析..... 50

一、显微断口分析方法..... 50

二、断口显微形貌特征..... 51

三、断口显微形貌与显微组织关系..... 53

四、断口的典型显微形貌特征举例..... 56

参考文献..... 59

第三章 显微组织分析..... 60

第一节 金相试样的制备和显示..... 60

一、取样..... 60

二、制样..... 60

三、显微组织的显示..... 65

第二节 金相显微镜..... 73

一、金相显微镜的主要构件..... 73

二、显微镜的鉴别率及有效放大倍数..... 75

三、显微镜的工作方式..... 76

四、高温和低温金相显微镜..... 82

第三节 定量金相方法..... 84

一、定量金相用的标准符号及其基本
公式..... 84

二、测量方法..... 85

三、常用显微组织特征参数测定举例..... 86

四、定量金相中的统计分析..... 93

五、图象分析仪..... 94

第四节 显微组织的分析与评定..... 95

一、钢热处理后的显微组织鉴别..... 95

二、钢的显微缺陷检验..... 106

三、钢中非金属夹杂物的检验..... 108

四、化学热处理的层深测定..... 111

五、灰铸铁的组织检验..... 112

六、常用有色金属的组织分析..... 115

七、粉末冶金材料的显微组织检验..... 118

第五节 电子金相显微分析..... 120

一、透射电子显微镜的结构原理及成
像原理..... 120

二、透射电子显微镜的样品制备..... 121

三、透射电子显微镜在显微检验中的
应用..... 122

四、扫描电子显微镜在显微检验中的
作用..... 126

参考文献..... 126

第四章 力学性能试验	128	三、常用结构钢、球铁及热处理的疲 劳性能	198
第一节 硬度试验	128	四、低周疲劳	201
一、硬度试验的意义及分类	128	五、多次冲击抗力试验	202
二、布氏硬度试验法	128	六、疲劳裂纹萌生和扩展的性能	204
三、洛氏硬度试验法	133	七、疲劳试验技术	206
四、维氏硬度、显微硬度和努氏硬度 试验	137	八、疲劳试验机	209
五、肖氏硬度试验法	144	第七节 磨损试验	212
六、莫氏硬度试验	145	一、磨损分类	212
七、理氏硬度试验	145	二、磨损试验机	216
八、硬度与强度及各种硬度之间的换 算关系	147	三、磨损量的测量及表示方法	217
第二节 静拉伸试验	152	第八节 高温力学性能试验	218
一、静拉伸试验的特点与意义	152	一、高温蠕变	218
二、试样	152	二、松弛稳定性	222
三、拉力试验机	153	三、其它高温力学性能	226
四、应力-应变曲线及其力学性能指 标	155	参考文献	229
五、真实应力-应变曲线	159	第五章 无损检测	231
六、缺口拉伸与缺口偏斜拉伸试验	160	第一节 内部缺陷检测	231
七、低温拉伸试验	162	一、射线探伤	231
八、拉伸试样断口分析	162	二、超声波探伤	242
九、几种常用钢材的静拉伸数据	164	第二节 表层缺陷检测	254
第三节 压缩、弯曲及扭转试验	164	一、磁粉探伤	254
一、压缩试验	165	二、渗透探伤	261
二、弯曲试验	166	三、涡流探伤	264
三、静扭转试验	167	第三节 无损检测缺陷新技术简介	269
第四节 冲击试验	169	第四节 零件热处理质量及材料的无损 检测	270
一、冲击试验的意义	169	一、硬度的无损检测	270
二、冲击试验与冲击试验机	169	二、表面硬化层深度的无损检测	276
三、冲击试验的应用	171	三、力学性能、显微组织的无损检测 以及过程的无损监控	280
四、几种接近实际服役条件 的冲击试验	175	参考文献	285
第五节 断裂韧性试验	179	第六章 内应力的测定	287
一、断裂过程和断裂力学的一般概念	179	第一节 内应力的产生及影响因素	287
二、应力强度因子 K 和平面应变断裂 韧性 K_{Ic}	179	一、宏观应力的产生	287
三、裂纹尖端张开位移 $CTOD$ 和 J 积分	188	二、热处理引起的宏观残余应力	288
四、断裂韧性测试技术	191	三、热处理残余应力对性能的影响	290
第六节 疲劳试验	195	第二节 宏观残余应力的测试方法	290
一、疲劳失效特点	195	一、宏观残余应力	290
二、疲劳曲线及疲劳极限	196	二、钻孔法	294
		三、X-射线法	305

第三节 微观和超微观应力的测定方法.....	317	八、材料及热处理与腐蚀的关系.....	361
一、微观应力的测定方法.....	317	九、金属腐蚀分类.....	362
二、超微观应力的测定方法.....	321	第二章 局部腐蚀.....	363
参考文献.....	323	一、小孔腐蚀.....	363
第七章 相分析及相变过程试验	324	二、晶间腐蚀.....	365
第一节 合金的相分析.....	324	三、缝隙腐蚀.....	366
一、X-射线相分析法.....	324	四、双金属腐蚀(或电偶腐蚀).....	367
二、电子衍射相分析法.....	327	第三节 应力作用下的腐蚀破坏.....	367
三、中子衍射.....	330	一、应力腐蚀破坏.....	367
四、样品制备.....	331	二、腐蚀疲劳.....	373
第二节 相变点及膨胀系数的测定.....	332	三、氢致损伤.....	375
一、膨胀系数和临界点的测定.....	332	第四节 不同环境中的腐蚀.....	379
二、马氏体相变Ms点的测定.....	335	一、大气腐蚀.....	379
第三节 奥氏体等温转变与连续冷却转		二、淡水中的腐蚀.....	382
变曲线的测定.....	336	三、熔盐腐蚀.....	383
一、奥氏体等温转变曲线的测定.....	336	第五节 高温氧化.....	383
二、用膨胀法测定钢的连续冷却转变		一、特点.....	383
曲线.....	340	二、钢铁材料的高温氧化.....	384
第四节 残余奥氏体及弱磁性相的测量.....	342	三、高温氧化试验.....	384
一、金相法和磁性金相法测残余奥氏		参考文献.....	385
体量.....	342	第九章 热处理质量管理与控制	386
二、磁性法测残余奥氏体量.....	342	一、热处理与质量管理的关系.....	386
三、X-射线衍射法测残余奥氏体量.....	343	二、热处理技术标准化与质量管理.....	386
四、用磁称法测弱磁性相的磁化率和		三、热处理质量保证体系.....	387
奥氏体钢中的铁素体相.....	345	第一节 产品设计中的热处理质量控制.....	390
第五节 其他物理方法在相分析及相变		一、材料选择.....	390
中的应用.....	346	二、热处理技术要求的确定.....	390
一、内耗法.....	346	第二节 热处理工艺设计中的质量控制.....	392
二、正电子湮没技术.....	347	一、热处理工艺流程及规范的优化设	
三、穆斯堡尔(Mössbauer)效应.....	348	计.....	392
四、核磁共振.....	350	二、热处理技术文件.....	394
参考文献.....	351	三、热处理工艺设计的经济分析.....	397
第八章 金属腐蚀试验	353	第三节 原材料质量管理.....	399
第一节 概述.....	353	第四节 热处理工艺过程中的质量管理.....	400
一、金属腐蚀定义.....	353	一、数理统计法在工序质量控制中的	
二、金属腐蚀的电极电位.....	353	应用.....	400
三、极化及极化曲线.....	354	二、建立工序管理点进行工序控制.....	404
四、钝化.....	355	三、车间设备管理.....	405
五、金属腐蚀图(E-pH图).....	356	四、车间节能管理.....	407
六、金属腐蚀速率评定方法.....	357	五、工艺材料的管理.....	407
七、影响腐蚀速率的因素.....	358	第五节 热处理质量检验.....	407
		一、质量检验工作的职能.....	408

二、质量检验方式.....	408	度(°C)	451
三、常用热处理质量检验方法.....	408	第三节 常用钢牌号、化学成分及性能.....	451
四、质量检验与失效分析.....	410	一、我国钢号表示法、分类、标记.....	451
第六节 计算机在质量管理中的应用.....	414	二、国产常用钢种化学成分.....	456
一、热处理工艺过程的控制.....	414	三、常用钢种力学性能技术要求.....	471
二、质量检验.....	415	第四节 中外钢铁标准、钢号对照.....	474
三、质量档案及质量信息检索.....	416	一、国家名称、代号.....	474
四、质量分析.....	416	二、拉丁字母与俄文标准钢号字母对 照.....	475
五、数据库的应用.....	416	三、世界各国标准级别名称、代号.....	475
参考文献.....	418	四、常用钢号对照表.....	476
第十章 常用数据	419	五、世界各国主要钢铁企业名称、代 号.....	486
第一节 基本常数及常用物理量单位换 算.....	419	第五节 常用钢热处理工艺参考数据.....	487
一、基本常数及其单位换算.....	419	一、常用钢临界温度、锻造温度、热 处理工艺参数.....	487
二、常用物理量单位换算.....	420	二、常用钢奥氏体等温转变曲线.....	492
第二节 常用物理化学数据.....	428	三、常用钢奥氏体连续冷却转变曲线.....	514
一、元素周期表.....	428	四、常用钢改型连续冷却曲线.....	528
二、钢铁冶金工作者用周期表.....	430	五、常用钢淬透性曲线.....	552
三、常见碳化物和金属间化合物点阵 结构.....	430	六、常用钢在各种介质中淬火的临界 直径.....	576
四、某些简单金属晶体原子位置、原 型、结构符号、空间群标记和点 阵参数.....	430	七、淬火钢在不同温度回火后的力学 性能曲线.....	577
五、元素的物理化学性质.....	438	第六节 各国常用热处理标准索引.....	612
六、常用无机化合物物理化学性质.....	441	参考文献.....	615
七、常用有机化合物物理化学性质.....	444	附录 法定计量单位及常用物理量的 法定计量单位	617
八、某些国产钢铁材料物理化学性质.....	445	一、法定计量单位.....	617
九、非铁金属、合金热物理性质.....	446	二、常用物理量的法定计量单位.....	618
十、特殊用途金属、合金热物理性质.....	448	索引	623
十一、元素的饱和蒸汽压对应的温度 (°C)	449		
十二、氧化物饱和蒸汽压所对应的温 度.....	449		

第一章 金属材料化学成分检验

机电部上海材料研究所 唐汝钧[⊙]

金属热处理时，首先应当知道材料的化学成分。测定化学成分的方法很多，其中钢的火花鉴别及光谱分析是钢材成分检验过程中常用的方法。这两种方法都很简便，分析速度快，适合于热处理车间现场使用。

火花鉴别虽然是一种古老的方法，然而由于方法简便易行，火花特征不受热处理工艺影响，所以在热处理车间长期、广泛应用。

光谱分析方法速度快，灵敏度高，但是测定钢中轻元素(例如H、N、O、C等)比较困难。光谱分析仪有两种，大型光谱分析仪在中心实验室使用，手提式小型光谱分析仪在热处理车间使用。

零件的表面，局部或微区化学成分的测定可以用现代的俄歇电子能谱仪，离子探针，电子探针等方法。用剥层分析法可测定表层成分。

第一节 钢铁材料的火花鉴别

一、火花组成、形状及形成原因

火花检验适用于碳钢，合金钢及铸铁，能鉴别出钢中常见的合金元素，但是对S、P、Cu、Al、Ti等元素则无法看出火花特征。

火花束由流线，节点与苞花、爆花和尾花等组成。

流线：磨削颗粒在高温下运行的轨迹就是人们看到的流线。流线分为：直线型，断续型，波纹型和断续波纹型。其中波纹型不常见，铬钢，钨钢，高合金钢和灰铸铁的火花流线均呈断续型。图4-1-1是流线特征。

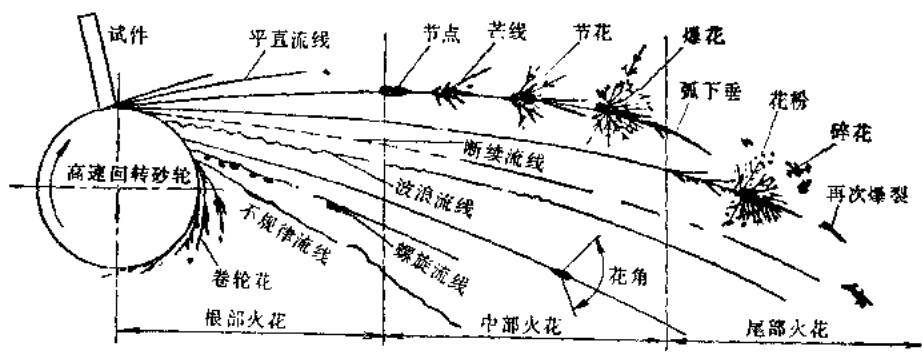


图4-1-1 各种火花流线形状

[⊙] 本章第二节由李晋同志编写。

节点与苞花：流线上明亮而又较粗的点称为节点和苞花。节点是钢中含Si的特征，苞花是钢中含Ni的特征。

爆花：爆花分布在流线上，是钢中含碳元素所特有的火花特征。爆花形象随钢中含碳量而变化，在火花鉴别中占有重要地位。

爆花的形成，钢样磨削颗粒沿砂轮旋转的切线方向被抛射，磨削颗粒处于高温状态，表面被强烈氧化，形成一层FeO薄膜。钢中的碳在高温下极易与氧发生反应， $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$ ，使FeO还原；被还原的Fe将再次被氧化，然后再次还原；这种氧化-还原的循环进行，当颗粒表面的氧化铁薄膜不能约束反应生成的CO气体时，就有爆裂现象发生，粉碎的微粒外逸时的火花称为“爆花”。钢粒经一次爆裂后，在碎粒中若仍残留有未参加反应的Fe和C时，将继续发生反应，则出现二次，三次等多次爆花，如图4-1-2。

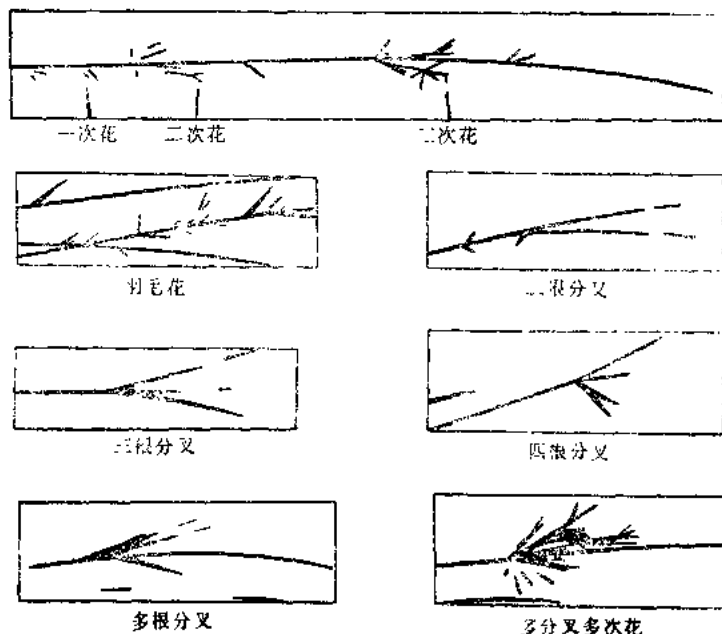


图4-1-2 爆花的各种形式

爆花爆裂而产生的若干聚集的短流线称为“芒线”。随钢中碳量增加，芒线又有二根分叉，三根分叉，四根分叉及多根分叉的不同。

尾花：尾花是流线末端特征，有“狐尾尾花”和“枪尖尾花”两种。狐尾尾花常认为是钢中含钨的特征，其亮度与粗细程度较流线其它部位明亮和粗。狐尾尾花的数量及长度与钢中含钨量成反比关系。

枪尖尾花，一些资料介绍是含钼钢的火花特征，实践证明，枪尖尾花不是钼钢火花的专有特征，许多不含钼的钢有时也有枪尖尾花，而有些含钼钢火花中却看不到枪尖尾花。所以只是在一部分含钼钢中出现枪尖尾花。

流线与爆花的色泽（颜色的明暗）表明钢粒运行时的温度。温度越高，火花越明亮（呈黄白及亮白色），反之火花深暗（呈暗红色）。钢粒热量不仅与CO形成有关，还与钢中合金元素含量，钢粒氧化性能及氧化程度有关。

二、火花检验用设备及操作注意事项

（一）砂轮及标样

可选用手提式电动砂轮，也可用台式砂轮，手提砂轮携带方便，且可以使火花的花束散开，以观察单条火花形象。台式砂轮出来的火花与人的视角不相适应，较不方便。

砂轮功率手提式为0.1~0.3kW，台式为0.5~1.0kW，转速3000r/min，砂轮片为普通

氧化铝质，不宜使用碳化硅或白色氧化铝。手提式砂轮直径100~150mm，厚度15~20mm；台式砂轮直径200~250mm，厚度20~25mm。粒度46~60，中等硬度。

可备有系列碳钢及典型合金钢标样，作为校核之用。

(二) 操作注意事项

1) 工作场地应有一定亮度，但又不能太亮，也不能太暗。白天可在室内光线不太明亮处，夜晚应在稍暗的灯光下工作。这样能减少火花对眼睛的刺激，又能清晰辨别火花形状与色泽。

2) 工作压力要适中，注意手感力并与火花结合。

3) 检验含碳量较高的钢火花时应利用单一流线火花形象，以观察多次火花爆裂特征，可较准确地判断钢的含碳量。

三、碳钢火花特征

钢的火花检验是以碳钢为基础，再考虑加入合金元素的影响。碳钢火花特征如表4-1-1，主要考虑流线长短，粗细及色泽；爆花数量多少等。纯铁火花流线短而粗，量较少，无爆花。随纯度的不同，纯铁花束中有时也杂有二、三分叉，但强度较弱，角度较小，爆花芒线较细，如图4-1-3。

表4-1-1 碳钢火花特征

C%	流 线					爆 花				磨砂轮时 手的感觉
	颜色	亮度	长度	粗细	数量	形状	大小	花形	数量	
0	亮黄	暗	长	粗	少	无	爆 花			软
0.05						二根分叉	小	无	少	
0.1						三根分叉		无		
0.2						多根分叉		无		
0.3						二次花多分叉		微量		
0.4						三次花多分叉		稍多		
0.5		亮	长	粗			大			
0.6										
0.7										
0.8										
0.9										
1.0	黄橙	暗	短	细	多	反花	小	多量	多	硬

含碳量0.05%~0.10%的碳钢，其流线较粗，呈弧形，长度中等，数量较少，具有草黄带红的色泽；爆花数量少，呈现三、四分叉的一次花形式，爆裂强度较弱，爆花位于流线的中尾部之间，流线与爆花清晰无杂乱现象。芒线粗且长，如图4-1-4、图4-1-5。

含碳量0.15%~0.20%的碳钢，火花流线仍较粗，量多而稍长，略带弧形，整个火花束为草黄且带有微红色。在爆花的芒线上有明显的呈直线脱离的枪尖尾花，呈现一次多分叉单花形式，爆花角度较大，芒线粗长并有明亮的节点，不时地出现一、二枝二次爆裂的芒线，如图

4-1-6。

含碳量0.4%~0.5%的碳钢，火花流线比较细长且多，色黄较明亮。爆花多为分叉二次爆花，在流线尾部及中尾部有节点，爆裂劲强。大型爆花甚多，伴随有二、三层枝状爆花，爆花量较多且密集，附有少量花粉，根部有小型爆花与稍暗的流线交织，芒线较细且长，如图4-1-7。

含碳量0.6%的碳钢，火花流线细长而量多，挺直而强劲，尖端分叉。大型爆花多位于流线末端，其后有较强的枝状爆花，芒线细长有较多花粉。火花束呈明黄色，如图4-1-8。

含碳量0.7%~0.8%的碳钢，流线可分成明显的三部分，总的来看是短、细、直、量多，爆花为多分叉、多次花形式，量多且密集，大型爆花减少，枝状爆花增多，芒线间花粉较多，但细而疏。火花束呈黄亮色，如图4-1-9。

含碳量超过0.8%以后，随着含碳量增加而流线数量增多的趋势减缓，流线逐渐细化，长度还逐渐缩短，爆花和花粉缓慢增多，花形逐渐变小。整个火花束的色泽由橙黄变成暗橙色如图4-1-10。

四、合金元素对火花特征的影响

钢中加入合金元素后，火花特征将发生变化。部分合金元素在火花中的特征及其对碳钢火花特征的影响见表4-1-2由表可见，合金元素对火花的影响可分为抑制爆花爆裂（如Ni，Si，Mo，W等）和助长爆花爆裂（如Mn，V等）两类。

表4-1-2 部分合金元素对火花特征的影响

合金元素	对爆裂的影响	流 线					爆 花			特 征	触感抗力
		根部色泽	色泽	长度	粗细	多少	多少	芒线	花粉		
Mn	助 长	黄	白亮(低C) 黄亮	低Mn长 高Mn短	粗	低Mn多 高Mn少	多整齐	白色细长	(高C)多		
低Cr			白亮(低C) 明亮(高C)	低C长 高C短		低C多 高C少	较大		(高C)有		
V			黄亮				多	细			
W	抑 制	暗红	橙红	中	细	少	少	红色秃尾	没有	断续流线弧尾	硬
Mo		深橙红		长	细		少	橙红色细	没有	枪尖(Mo约 1.0%低C)	硬
Si			橙黄 (高Si)	短	粗		少	白色短	没有	流线尖端白亮点 (低C) 钩状尾花 (高Si低C)	不太硬
Ni			黄	短	细		少	黄色细	没有	流线上出现鼓泡 (低Ni, 低C)	硬
高Cr			黄	短		较少	少				硬

钨：对抑制爆花爆裂作用最为强烈。因为钨在钢中形成的碳化物熔点高、导热性差，磨削钢粒在离开砂轮的瞬时运行过程中生成。CO的反应受到阻碍所致。钨含量达到1%时，爆花显著减少，钨含量大于2.5%时，爆花呈秃尾状。从火花颜色上看，钨使色泽变暗，当钨

超过5%时,火花束呈暗红色。

钨抑制爆花爆裂作用的大小,与钢中含碳量有关,低碳钢中含钨4%~5%时,钨可完全抑制爆花的爆裂。从火花色泽上看,钨钢中含碳量越高,越是呈暗红色火花。

钼:钼具有较强烈的抑制爆花爆裂、细化芒线和加深火花色泽作用。钼钢的火花色泽是不明亮的,当钼含量较高时,火花呈深橙色。钼钢有没有枪尖尾花,与含钼量和含碳量有关,含碳量越低,枪尖越明显。钼钢中含碳量在0.5%左右时,就不易出现枪尖。

硅:硅亦有抑制爆花爆裂作用。当硅含量达2%~3%时,这种抑制作用就较明显,它能使爆裂芒线缩短。如观察硅钢片(S:4%~5%;C0.1%)的火花,只能在火花束间发现1~2根单芒线爆花,并出现白色明亮的闪点。硅锰弹簧钢的火花呈橙红色,流线粗而短,芒线短粗而少,火花试验时手感抗力较小。

镍:镍对爆花有较弱的抑制作用,使花形不整齐和缩小,流线较碳钢细。随着镍含量的增高,流线的数量及长度变短,色泽变暗。

铬:铬对火花的影响比较复杂。对于低铬低碳钢,铬助长了火花爆裂作用,增加流线的长度和数量,火花束呈亮白色,爆花为一、二次花,花型较大。对于含碳量较高的低铬钢,铬助长爆裂的作用不明显,有时观察不到枝状爆花,虽然火花束仍然显得很明亮,但流线短而少。随着铬含量的增加,火花的爆裂强度、流线长度、流线数量等均有所减少,色泽也将变暗。铬钢中若含有抑制爆裂和助长爆裂的合金元素存在,则钢的火花现象表现复杂,为判断钢中铬含量,需较丰富的经验和配合其他试验方法。

锰和钒等元素有助长爆花爆裂作用。锰钢的火花爆裂强度比碳钢强,爆花位置比碳钢离砂轮远。当钢中含锰量稍高时,钢的火花比较“整齐”,色泽也比碳钢黄亮,含碳量较低的锰钢呈白亮色,爆花核心有大而白亮的节点,花型较大,芒线稀少且细长。含碳量较高的锰钢,爆花有较多的花粉。低锰钢的流线粗而长,量较多。高锰钢流线短粗且量少,由于锰是助长爆裂的元素,因此有时会把钢的含碳量估计过高,试验时应仔细观察。

一些钢的典型火花图如图4-1-3~图4-1-21所示。

镇静钢与沸腾钢的火花特点如表4-1-3。

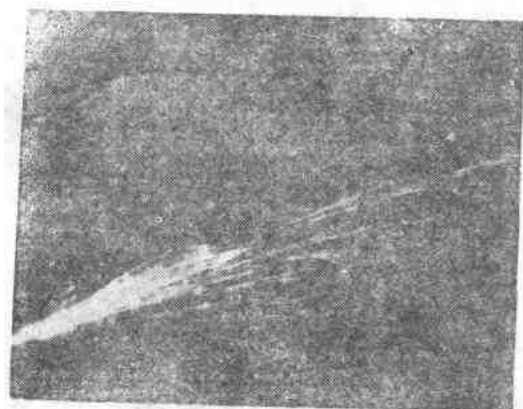


图4-1-3 纯铁火花

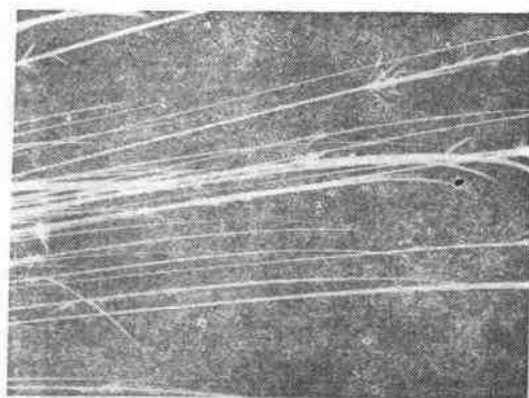


图4-1-4 沸腾钢火花

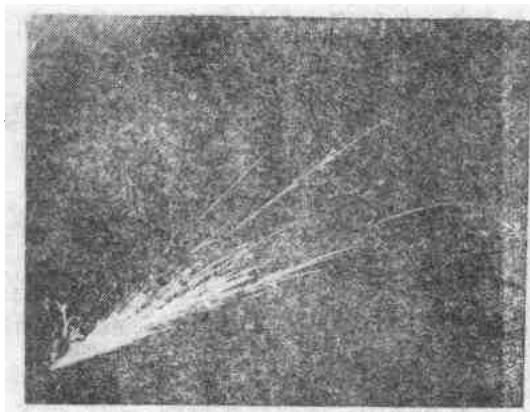


图4-1-5 10钢火花



图4-1-6 15钢火花



图4-1-7 45钢火花

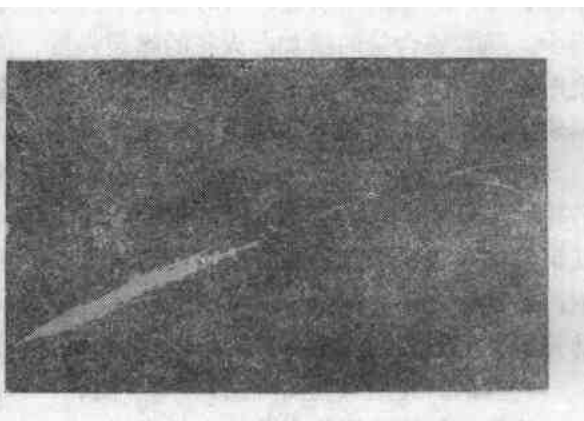


图4-1-8 60钢火花



图4-1-9 0.7%C钢(T7)火花



图4-1-10 1.3%C钢(T13)火花