

金 属 手 册

第九版 第四卷

热 处 理

〔美〕美国金属学会 主编

机 械 工 业 出 版 社

373

金属手册

第九版 第四卷

热处理

〔美〕 美国金属学会 主编
中国机械工程学会热处理专业学会 主译



美国金属学会主编的《金属手册》是一部大型综合性技术专著，自1924年出版以来已再版八次，目前正在陆续修订出版第九版。《热处理》是1981年出版的第九版第四卷。

本书包括钢的一般热处理、表面化学热处理、表面局部热处理工艺的论述，涉及铸铁、结构钢、工具钢、不锈钢和耐热合金、非铁金属及粉末冶金零件的热处理工艺，以及热处理设备。

本书不仅提供了大量技术数据，并有较深入的分析讨论，反映了美国当代的热处理技术水平与众多为本书撰稿专家学者多年积累的实践经验。

本书可供从事热处理生产的技术人员和科研、教学工作人员参考使用。

2094/10

METALS HANDBOOK

9th Edition Vol. 4

Heat Treating

AMERICAN SOCIETY FOR METALS

1981

金 属 手 册

第九版 第四卷

热 处 理

〔美〕美国金属学会 主编

中国机械工程学会热处理专业学会 主译

责任编辑：丁文华 韩会民

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一零)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张 49·插页 2·字数 1529千字

1988年12月北京第一版·1988年12月北京第一次印刷

印数 0,001—3,700·定价：26.70元

科技新书目：180-002

ISBN 7-111-00564-3/TG·148

译者序

美国金属学会1924年编辑出版了《金属手册》，已出版了八版，目前正在陆续修订出版第九版。1981年出版了第四卷《热处理》。第九版热处理部分篇幅扩展为一专卷，内容丰富，收进了近代热处理技术新内容，如流态床热处理、真空渗碳、激光与电子束热处理，以及热处理机在热处理中的应用等。本卷不仅提供了丰富的新的技术数据资料，并有比较深入的分析讨论，反映了为本卷撰稿的众多专家学者的宝贵经验。

本书反映了当代金属热处理技术水平，对于我国金属热处理工艺的科学研究、技术改造，和促进热处理生产、提高机械产品零件质量的工作，可作为有益的借鉴。

原书中计量单位主要采用国际计量局发表的国际单位制，并同时保留英制单位。在翻译中结合我国目前情况，译文中删去了英制单位。

本书由中国机械工程学会热处理专业学会编辑出版委员会组织翻译，参加翻译工作的有：孙大涌、朱沅浦、陈洵、陈蕴博、王家瑛、陆载厚、乔健、黄理统、王德文、丁文华、薛渡等同志。本书译稿经朱沅浦、陈洵同志全文校订审阅。

原 书 前 言

美国金属学会 (ASM) 创建的最初二十年, 单纯以热处理为中心, 1913 年在底特律作为“钢处理者俱乐部”开始于 1920 年与“美国钢热处理者学会”合并成为“美国钢处理者学会”, 1933 年最后定名为“美国金属学会”, 由一个主要是热处理的学会转变为一个范围广泛的、包括各种金属专题的金属学会。

自从这次重大改变之后, 虽然已经几乎过去了半个世纪, 但是, 对于 ASM 的成员, 热处理仍是大家深感兴趣的领域。事实上, 热处理是金属科学的基础之一, 因而也是学会的基础。

《金属手册》第九版第四卷的编辑出版, 表明 ASM 对于选定这个基础课题的连续领导作用。第八版的上一卷, 只是部分地论述热处理, 现在的第四卷反映了随着技术的发展所涉及的主题有很大扩展。

然而, 只有大量的数据, 绝不是唯一的判据, 作为领导的责任, 希望使之超过前一卷所确立的有效性和良好的技术判据。这方面, 新的第四卷对所提供数据的范围和广泛性有所改进。每一个专题都经过 ASM 热处理技术部成员, 以及在热处理技术许多领域具有实际经验的内行专家们的设计、组织、准备和评论。

《金属手册》的传统质量, 在很大程度上取决于很多人的努力和才干, 本卷中, 热处理技术部的成员起了很大作用。但是, 更高的荣誉应归于 ASM 手册编写委员会成员的不懈努力, 归于各专题的撰写人, 归于编辑部工作人员, 对于他们的宝贵贡献, 我们表示**感谢和敬意**。

金属手册部热处理分部 组织者

James R. Easterday

原 序

自从 ASM 前身组织“美国钢处理学会”和在1924年第一次编辑出版手册，在技术团体中，热处理已经起到非常重要的，从未有过的广泛作用。根据传统，ASM 已经成为收集和传播热处理情报，支持工程和制造工业需要的领导者。这本第九版第四卷手册的出版，是 ASM 继续履行自己责任的最新贡献。

近年来，在热处理领域里的兴趣和活力，无论在量和范围方面都已连续增长。很明显，与包括有关热处理主题有 100 页的1948年《金属手册》，到包括热处理资料有 309 页的1964年第 2 卷手册相比较，现在的第四卷是最庞大的，包括实用和便于使用的热处理主题资料达 800 页。

增加的部分是由于收进了新的主题内容，流态床处理工艺、真空渗碳、微处理机、激光和电子束热处理这些主题，是一些新的主题，反映了近代技术的发展。此外，气体渗碳、炉气氛、火焰淬火和铝的热处理已经显著扩展。这些新的和修订的资料，提供给读者对于近代热处理工艺和有关设备的广泛的、有用的和技术上可靠的参考资料。

在准备第四卷中，一个重要的改进是经过了内容设计、组织、准备和评论。在第一阶段，先在 ASM 热处理技术部开始并经过努力完成工作，热处理技术部的委员会成员，每一位都在他们所从事特定领域有专长，通过审阅并参与准备适当初稿承担责任。通过相应的同样小组——也是热处理部的成员，进行评论，并确认他们提供的初稿材料是可用的。这种共同努力的结果，第四卷反映了这些专家撰稿人的实践经验和技術上的特长。

如以前各版手册一样，ASM 对撰写人、评论者和顾问编辑人员，编辑出版这样一本高水平书所付出的集体经验、技术、知识和贡献表示感谢。他们已赢得整个冶金团体对他们无私的努力表示感谢。

《金属手册》编写组热处理部 协调人

James. R. Easterday

目 录

钢的热处理

钢的消除应力热处理	1
钢的正火	4
钢的退火	12
碳钢和低合金钢淬火的奥氏体 体化温度	26
钢的淬火	28
钢的回火	65
钢的马氏体分级淬火	79
钢的贝氏体等温淬火	98
钢的冷处理	111
超高强度钢的热处理	113
马氏体时效钢的热处理	123

钢的表面硬化

气体渗碳	125
碳氮共渗	165
气体渗氮	180
固体渗碳	209
液体渗碳和氰化	213
液体渗氮	235
铁素体气体氮碳共渗	247
真空渗碳	252
硬化层深度的测量方法	255

热处理工艺设备

热处理炉的类型	262
盐浴设备	269
流态床设备	275
真空炉中热处理及其附属设备	283
炉用构件、料盘和夹具用耐热 合金	301
节能操作	311

炉子控制仪表

温度控制	316
气氛控制	331
用于热处理的计算机系统	337
炉子的安全	350

炉内气氛和碳分的控制

炉气氛	358
钢在热处理时表面含碳量的控制	386
热处理零件碳控制的鉴定	400

表面热处理

感应淬火及回火	416
火焰淬火	447
激光表面相变硬化	471
电子束热处理	481

铸铁的热处理

铸铁热处理绪言	485
灰口铸铁的热处理	489
球墨铸铁热处理	503
可锻铸铁热处理	510
奥氏体铸铁的热处理	513

工具钢的热处理

工具钢热处理绪论	516
工具钢热处理工艺及炉子设备	528
专用工具钢	533
工具钢变形的控制	562

不锈钢和耐热合金的热处理

不锈钢的热处理	568
奥氏体不锈钢的消除应力处理	592
耐热合金的热处理	595

有色金属的热处理

铝合金的热处理	619
铜合金的热处理	660
铅和铅合金的热处理	680
镁合金的热处理	683
镍和镍合金的热处理	693
贵金属的退火	699
钛和钛合金的热处理	701
富锡合金的热处理	713

特殊用途合金的热处理	714
------------------	-----

粉末冶金零件的热加工

烧结	727
铁基粉末冶金零件的热处理	732

索 引

一、按数字、外文字母顺序排列	734
二、按汉语拼音字母顺序排列	735

钢的热处理

钢的消除应力热处理

Domenic A. Canonico

(燃烧工程公司燃烧动力系统冶金与材料试验室主任)

消除应力热处理通常用以消除构件在制造工程中残留的应力。这个含义与焊接后消除应力热处理的不同在于，焊后热处理的目的除了消除应力外，还提供某些优良的冶金组织或性能^[1,2]。例如，许多铁素体焊接件通过焊后热处理，以改进热影响区的断裂韧性。但是，奥氏体和非铁合金通常进行焊后热处理，以改善对环境破坏的抗力。

消除应力热处理是将一个构件或其一部分，均匀加热到相变点(对于铁素体钢是 A_{c1}) 以下一个合适的温度，并在此温度下保持一定时间，随后均匀冷却^[2,3]。要注意，必须保证均匀冷却，特别是对于一个由不同尺寸截面构成的零件。如果冷却速度不均匀，就要产生新的残余应力，它可等于或大于要求热处理消除的应力。

消除应力热处理可减少影响服役性能的焊接变形和高应力。残余应力的存在导致焊缝附近和零件在加工时已被冷变形的区域产生应力腐蚀开裂。

铁素体钢中的残余应力显著降低脆性断裂抗力。在不易产生脆性断裂的材料中，例如奥氏体不锈钢，甚至在看来是良好的环境中，残余应力已足以产生促进应力腐蚀开裂所必需的应力^[4]。

残余应力有许多来源，它们可以存在于从铸锭到最终产品材料加工过程中^[4,5]。残余应力可在轧制、铸造或锻造过程中产生。在成形工艺如剪切、弯曲和机械加工过程中以及特别是焊接加工过程中产生。每当一个零件受到的应力超过其弹性极限时，就会存在残余应力并产生塑性流动。一根棒料在不能发生回复的温度(如冷成形)进行弯曲加工时将在某一表面部位产生残余拉应力，而在其180°相对位置产生残余压应力^[6]。厚截面淬火时，在材料表面产生高的残余压应力。这些高的压应力被

截面内部的残余拉应力所平衡^[6]。

磨削是残余应力的另一来源。根据磨削操作，它们可以是压应力或拉应力性质。虽然这些应力深度浅，但已能使薄件翘曲^[7]。

在公布的文献中，更多注意的残余应力来源是焊接。焊接件中陡的热梯度所带来的残余应力，可存在于比较长的宏观距离，或者可以高度集中(宏观尺寸)，见图1。焊接常产生局部残余应力，达到相当于室温下材料的屈服强度。

一些因素影响残余应力的消除，包括应力水平、允许的或实际的松弛时间、温度以及冶金的稳定性。

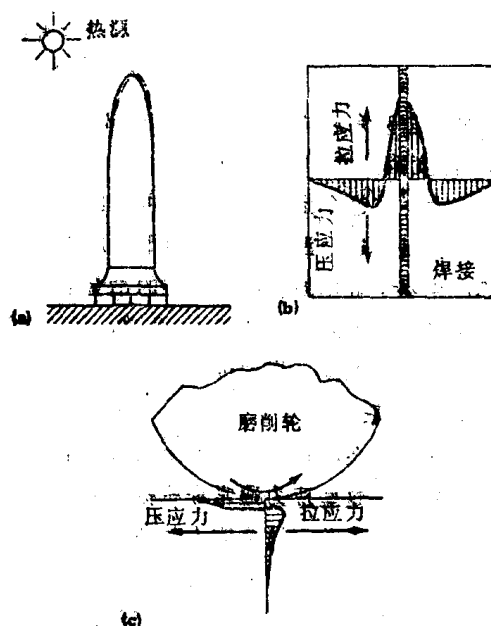


图1 产生残余应力原因示例

- (a) 由于太阳辐射加热造成构件热变形
- (b) 由焊接形成的残余应力
- (c) 由于磨削形成的残余应力

残余应力消除是一种时间-温度关系现象(图2),用Larson-Miller公式可表示其参数关系:

$$\text{热效应} = T(\log t + 20)(10^{-3})$$

式中, T 为温度(华氏绝对温度); t 为时间(h)。

由图2证实,一个构件在较低温度保持较长时间,可以达到同样消除应力程度。例如,一个零件在595°C保持6h,和在650°C加热1h,消除应力的程度一样。

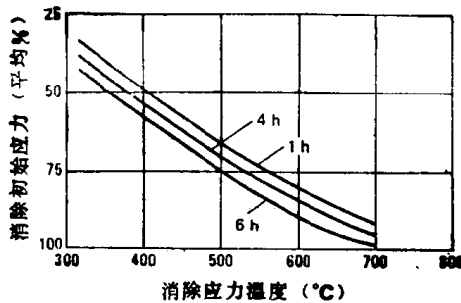


图2 钢中消除残余应力的时间与温度关系示意图^[10]

残余应力的消除代表一种典型的应力松弛行为。在这个过程中,材料在消除应力温度下经过微观(有时甚至是宏观)的蠕变。如含铬低合金钢和富铬高合金钢等抗蠕变材料,正常要求比通常低合金钢更高的消除应力温度,在595~625°C之间,高合金钢则在900~1065°C之间。

如奥氏体不锈钢等高合金钢,有时在温度低至400°C下进行消除应力。但是,在这样温度只能稍微降低一些残余应力。这些奥氏体材料在480~925°C温度范围进行消除应力热处理,可显著降低残余应力。在这个温度的上限,可以消除残余应力85%;但是在这个温度范围进行消除应力热处理,可能产生易于敏化的材料。这样的冶金效应可以在服役中导致应力腐蚀开裂^[8]。通常,在1065°C附近的固溶退火温度,用于进行减小残余应力达到可以接受的低值。

有些铜合金,由于存在残余应力可能因应力腐蚀开裂失效。这些应力通常经机械的或热的消除应力热处理予以消除。消除应力热处理受到欢迎是由于更容易控制,成本低,并且还可提供一定的尺寸稳定性。铜合金消除应力热处理常在较低温度下(200~400°C)进行^[9]。

材料对于用热处理减小残余应力的抗力,可利用温度对屈服强度影响的知识予以估计。图3总结了三种普通级别钢的屈服强度,可供估计在构件中

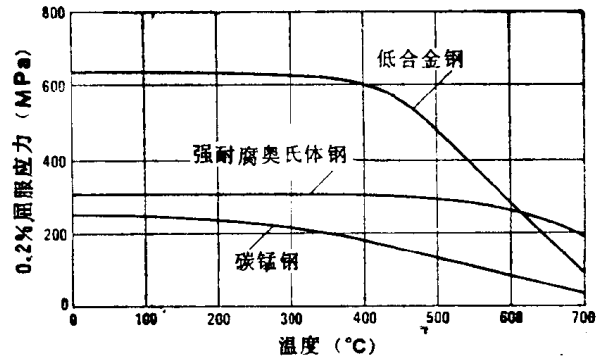


图3 三种普通级别钢的屈服强度随温度的变化^[10]

存在局部残余应力的水平。为了消除残余应力,要求部件加热到它的屈服强度接近于相应的可接受的残余应力水平的温度。在这个温度下保持,通过蠕变,可进一步减小残余应力。如果要保持残余应力在这个水平,则消除残余应力热处理后必须均匀冷却。

参考文献

1. The Metallurgical Effects of Residual Stresses, by N. Bailey; in *Residual Stresses*, The Welding Institute, 1981, p28-33
2. *Metallurgy and Weldability of Steels*, by C. E. Jackson *et al.*; Welding Research Council, 1978
3. *Fundamentals of Welding; Welding Handbook*, 7th Ed., Vol 1, American Welding Society, 1976
4. *Defects and Failures in Pressure Vessels and Piping*, by Helmut Thielsch; Reinhold Publishing Corporation, NY, 1965, p311
5. *Mechanical Metallurgy*, 2nd Ed., by G. E. Dieter; McGraw-Hill, Inc., 1976
6. *Residual Stresses and Fatigue in Metals*, by J. O. Ailmen and P. H. Black; McGraw-Hill Book Company, 1963
7. *Machining; Metals Handbook*, 8th Ed., Vol 3, American Society for Metals, 1967, p260
8. *Properties and Selection; Stainless Steels, Tool Materials and Special Purpose Metals; Metals Handbook*, 9th Ed., Vol3, ASM, 1980, p47-48
9. *Properties and Selection; Nonferrous*

Alloys and Pure Metals, *Metals Handbook*, 9th Ed., Vol 2, ASM, 1979, p255-256

10. Thermal Stress Relief and Associated Metallurgical Phenomena, by C. G. Saunders, in *The Welding Institute Research Bulletin*, Vol 9, No. 7, Part 3, 1968

参 阅 文 献

1. Welding and Brazing, *Metals Handbook*, 8th Ed., Vol 6, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1971, p213

2. Classification and Nomenclature of Internal Stresses, by E. Grown, in *Symposium on Internal Stresses in Metals and Alloys*,

The Institute of Metals, London, 1948, p47-59

3. Stress Relieving of Weldments, by E. R. Parker, *Welding Journal*, Vol 136, No. 10, Oct 1957, p433-S

4. The Effect of Residual Stresses on Fracture, by J. D. Harrison and R. H. Leggatt, in *Residual Stresses*, The Welding Institute, 1981, p17-20

5. Residual Stresses in Welded Plates, by N. R. Nagaraja and L. Tall, *Welding Journal*, Vol 40, No10, 1961, p468-S

[孙大涌译]

钢的正火

Samuel L. Williams

(Rock Island 兵工厂总工程师)

钢的正火是一种热处理工艺，通常是从热和显微组织两方面考虑。根据热的观点，正火是进行奥氏体化加热，随之在静止和微搅动空气中冷却。典型的工艺是工件加热到图 1 所示的铁-碳化铁相图中上临界点上，即亚共析钢 A_{c3} 以上和过共析钢 A_{cm} 以上约 55°C 。为了合适地区分正火处理，这个工艺的加热阶段，必须在冷却前产生奥氏体相（面心立方晶体组织）。许多标准钢的典型正火温度列于表 1。

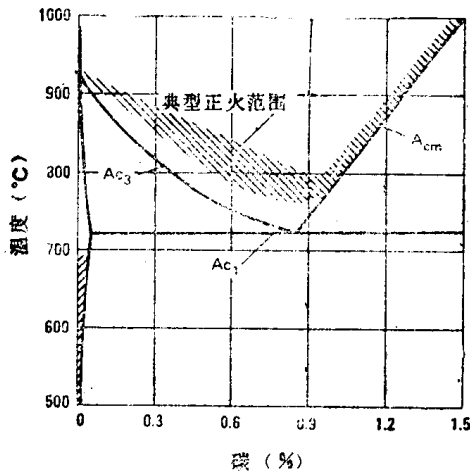


图 1 部分铁-碳化铁相图示出普通碳钢的典型正火范围

表 1 标准碳钢和合金钢的典型正火温度

根据生产经验，正火温度可以在所示温度以上 27°C 到低于 55°C 范围内变动。钢应从所示温度在静止空气中冷却。

钢种	温度(°C)	钢种	温度(°C)
普通碳钢		1050	860
1015	915	1060	830
1020	915	1080	830
1022	915	1090	830
1025	900	1095	845
1030	900	1117	900
1035	885	1137	885
1040	860	1141	860
1045	860	1144	860

(续)

钢种	温度(°C)	钢种	温度(°C)
标准合金钢		5147	870
1330	900	5150	870
1335	870	5155	870
1340	870	5160	870
3135	870	6118	925
3140	870	6120	925
3310	925	6150	900
4027	900	8617	925
4028	900	8620	925
4032	900	8622	925
4037	870	8625	900
4042	870	8627	900
4047	870	8630	900
4063	870	8637	870
4118	925	8640	870
4130	900	8642	870
4135	870	8645	870
4137	870	8650	870
4140	870	8655	870
4142	870	8660	870
4145	870	8720	925
4147	870	8740	925
4150	870	8742	870
4320	925	8822	925
4337	870	9255	900
4340	870	9260	900
4520	925	9262	900
4620	925	9310	925
4621	925	9840	870
4718	925	9850	870
4720	925	50 B 40	870
4815	925	50 B 44	870
4817	925	50 B 46	870
4820	925	50 B 50	870
5046	870	60 B 60	870
5120	925	81 B 45	870
5130	900	86 B 45	870
5132	900	94 B 15	925
5135	870	94 B 17	925
5140	870	94 B 30	900
5145	870	94 B 40	900

正火也常常根据显微组织考虑。含碳0.8%的显微组织区域是珠光体（片状铁素体和碳化铁）低碳区域是铁素体（体心立方原子结构）。在过共析钢中显微组织出现先共析碳化铁（超过珠光体组织中的碳化铁量）。空淬钢不在正火钢之列，因为它们不出现正火钢“正常”珠光体显微组织的特征。

用途 广泛范围的钢铁产品能进行正火。所有标准低碳、中碳和高碳锻钢和许多铸件都可以进行正火。奥氏体钢、不锈钢和马氏体时效钢不能正火，或者通常不进行正火。

正火的目的各有不同。正火可以增加或减少一定形状产品的给定钢的强度和硬度，取决于产品热加工和机械加工的历史。实际上，正火的作用可能和退火、淬火和消除应力的作用重叠或混淆。改善机械加工性能、细化晶粒、均匀化和改变残余应力状态，都是进行正火的理由。利用正火进行铸件均匀化，使之破碎或细化枝晶组织以及更好地促进最终淬火获得更均匀的效果。同样，对于锻轧产品，正火可以消除由热轧形成的带状组织，以及由于锻造操作形成尺寸大的晶粒或大、小尺寸晶粒的混晶。表2列出应属于三种典型生产零件的正火处理细则。表中也列出了正火的理由，并给出正火和回火状态下所获得的一些机械性能。表3示出典型的热轧或退火的机械性能和典型的正火性能的比较。根据所要求的机械性能，当零件的尺寸或形状在液体淬火时可能形成开裂、变形或尺寸变化过大，则正火可以代替常规淬火。如果所获得的性能可以接受，则复杂形状或加上截面急剧变化的零件可以进行正火和回火。

加热速率通常对于正火不是关键的，在原子尺度内，它是不重要的。但是，在截面尺寸有巨大变化的零件中，热应力可以导致变形。

在正火温度保持时间，只是在必须充分达到均匀化的情况下才是关键的。如果有碳化物，必须要有足够的时间以溶解碳化物，和（或）移动合金原子，以获得要求的最终组织。通常总的时间要求是足以完全奥氏体化。炉温恢复后，按零件厚度以每25mm 1h来计算保温时间，就足够了。零件常在较短时间内就能够适当地进行奥氏体化（可以节能）。

冷却速度显著影响珠光体量和珠光体片层的大小和间距。在较高冷速下，形成较多的珠光体，同时片层较细，且间距更小，增加珠光体量以及珠光体更细都导致较高强度和硬度。相反，较低冷速形成较软的零件。零件大小对硬度的影响（通过冷速的影响）用列于表4的数据加以说明。在任何一个具有厚度不同的零件中，存在不同的冷速，因而具有不同的强度和硬度，以及增加变形的几率，甚至开裂。有时有意地用风扇增加冷却速度以提高零件的强度和硬度，或减小所需时间，随炉子的操作，零件可以充分冷却便于装卸。

在零件已均匀冷却到 A_{r1} 以下呈“黑色”后（即零件出炉后不再呈红色），可以水冷或油冷，以缩短总的冷却时间。在大型截面，心部材料冷到“黑色”可能需要较长时间，应考虑热震、残余热诱发应力和总的变形。如果整体已达下临界温度 A_{r1} 以下，虽然可能存在沉淀物的变化，显微组织基本上不受增加冷却速度的影响。

碳钢 表1列出几种标准碳钢的典型正火温度。可以用内插法从这些温度区间获得未列入表中碳钢的正火温度值。

含0.20% C或更低的钢，通常正火后不进行处理。但是，中碳或高碳钢常常在正火后进行回火，以获得特定的性能，如校直、冷作或机械加工所需要的较低的硬度。是否要求回火主要取决于含碳量

表2 正火与回火的典型用途

零件	钢种	热处理	处理后性能	正火理由
铸造50mm圆棒， 截面厚度19~25mm	Ni-Cr-Mo	在955°C完全退火。在870°C正火，665°C回火	抗拉强度620MPa，0.2%屈服强度415MPa伸长率在50mm范围内为20%，断面收缩率40%	满足机械性能要求
锻造凸缘	4137	870°C正火，570°C回火	硬度HB200~225	细化晶粒并获得要求的硬度
圆钢锻件	4140	870°C正火并回火	硬度HB220~240	获得均匀组织，改善机械加工性能和要求硬度

表3 部分碳钢和合金钢在热轧、正火和退火条件下的性能

AISI 钢号 (a)	处理状态	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	延伸率 (b) (%)	断面收缩率 (%)	硬 度 (HB)	V型缺口 冲击强度 (J)
1015	轧态	420	315	39.0	61	126	111
	正火 (925°C)	425	325	37.0	70	121	116
	退火 (870°C)	385	285	37.0	70	111	115
1020	轧态	450	330	36.0	59	143	87
	正火 (870°C)	440	345	35.8	68	131	118
	退火 (870°C)	395	295	36.5	66	111	123
1022	轧态	505	360	35.0	67	149	81
	正火 (925°C)	485	360	34.0	68	143	117
	退火 (870°C)	450	315	35.0	64	137	121
1030	轧态	550	345	32.0	57	179	75
	正火 (925°C)	520	345	32.0	61	149	94
	退火 (845°C)	465	340	31.2	58	126	69
1040	轧态	620	415	25.0	50	201	49
	正火 (900°C)	590	375	28.0	55	170	65
	退火 (790°C)	520	355	30.2	57	149	44
1050	轧态	725	415	20.0	40	229	31
	正火 (900°C)	750	425	20.0	39	217	27
	退火 (790°C)	635	365	23.7	40	187	17
1060	轧态	815	485	17.0	34	241	18
	正火 (900°C)	775	420	18.0	37	229	13
	退火 (790°C)	625	370	22.5	38	179	11
1080	轧态	965	585	12.0	17	293	7
	正火 (900°C)	1010	525	11.0	21	293	7
	退火 (790°C)	615	375	24.7	45	174	6
1095	轧态	965	570	9.0	18	293	4
	正火 (900°C)	1015	500	9.5	14	293	5
	退火 (790°C)	655	380	13.0	21	192	9
1117	轧态	485	305	33.0	63	143	81
	正火 (900°C)	465	305	33.5	54	137	85
	退火 (860°C)	430	280	32.8	58	121	94
1118	轧态	520	315	32.0	70	149	109
	正火 (925°C)	480	320	33.5	66	143	104
	退火 (790°C)	450	285	34.5	67	131	106
1137	轧态	625	380	28.0	61	192	83
	正火 (900°C)	670	395	22.5	49	197	64
	退火 (790°C)	585	345	26.8	54	174	50
1141	轧态	675	360	22.0	38	192	11
	正火 (900°C)	705	405	22.7	56	201	53
	退火 (815°C)	600	355	25.5	49	163	34
1144	轧态	705	420	21.0	41	212	53
	正火 (900°C)	665	400	21.0	40	197	43
	退火 (790°C)	585	345	24.8	41	167	65
1340	正火 (870°C)	835	560	22.0	63	248	93
	退火 (800°C)	705	435	25.5	57	207	71
3140	正火 (870°C)	890	600	19.7	57	262	54
	退火 (815°C)	690	425	24.5	51	197	46

(续)

AlSI钢号(a)	处理状态	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	延伸率(b) (%)	断面收缩率 (%)	硬 度 (HB)	V型缺口 冲击强度 (J)
4130正火	(870°C)	670	435	25.5	60	197	86
退火	(865°C)	560	360	28.2	56	156	62
4140正火	(870°C)	1020	655	17.7	47	302	23
退火	(815°C)	655	415	25.7	57	197	55
4150正火	(870°C)	1155	735	11.7	31	321	12
退火	(815°C)	730	380	20.2	40	197	25
4320正火	(895°C)	795	465	26.8	51	235	73
退火	(850°C)	580	425	29.0	58	163	110
4340正火	(870°C)	1280	860	12.2	36	363	16
退火	(810°C)	745	470	22.0	50	217	51
4620正火	(900°C)	575	365	29.0	67	174	133
退火	(860°C)	510	370	31.3	60	149	94
4820正火	(860°C)	755	485	24.0	59	229	110
退火	(815°C)	680	465	22.3	59	197	93
5140正火	(870°C)	795	470	22.7	59	229	38
退火	(830°C)	570	295	28.6	57	167	41
5150正火	(870°C)	870	530	20.7	59	255	32
退火	(825°C)	655	355	22.0	44	197	25
5160正火	(860°C)	955	530	17.5	45	269	11
退火	(810°C)	725	275	17.2	31	197	10
6150正火	(870°C)	940	615	21.8	61	269	36
退火	(815°C)	665	410	23.0	48	197	27
8620正火	(910°C)	535	355	26.3	60	183	100
退火	(870°C)	535	385	31.3	62	149	112
8630正火	(870°C)	650	430	23.5	54	187	95
退火	(845°C)	565	370	29.0	59	156	95
8650正火	(870°C)	1025	690	14.0	45	302	14
退火	(795°C)	715	385	22.5	46	212	29
8740正火	(870°C)	930	605	16.0	48	269	18
退火	(815°C)	695	415	22.2	46	201	40
9255正火	(900°C)	935	580	19.7	43	269	14
退火	(845°C)	775	485	21.7	41	229	9
9310正火	(890°C)	905	570	18.8	58	269	119
退火	(845°C)	820	440	17.3	42	241	79

(a) 除1100系列是粗晶粒外, 各种钢都是细晶粒, (b) 标距50mm。

和截面尺寸。表3示出部分碳钢和合金钢在热轧、正火和退火条件下的典型机械性能。小截面低碳或中碳钢正火后, 可能比经同样处理大截面高碳钢更硬些。

合金钢 对于合金钢锻件、轧制产品和铸件, 正火通常作为最终热处理前的预备热处理。正火也细化经高温不均匀冷却下来的锻件、轧制产品和铸件的组织。表1列出一些标准合金钢的典型正火温

度。

如3310和4320这些合金渗碳钢, 通常在高于渗碳温度正火, 以减少渗碳时变形, 并改善机械加工特性。3300系列渗碳钢有时进行两次正火, 希望减少变形。为了这些钢的机械加工性, 在约650°C回火高达15h, 以降低硬度到HB223以下。4300和4600系列渗碳钢通常正火到硬度不超过HB207, 所以不需要为了机械加工性而回火。

表4 零件大小对正火碳钢和合金钢硬度的影响

所有数据是从一炉钢获得的。来源：3310、3140和4063的数据来自《Modern Steel and Their Properties》6版，Bethlehem Steel Corp, 1966；所有其他数据来自《Modern Steels and Their Properties》（手册3310），Bethlehem Steel Corp Sept. 1978

钢号	正火温度 (°C)	不同直径(mm)钢条的硬度(HB)			
		13	25	50	100
碳钢，渗碳钢种					
1015	925	126	121	116	116
1020	925	131	131	126	121
1022	925	143	143	137	131
1117	900	143	137	137	126
1118	925	156	143	137	131
碳钢，直接淬火锅种					
1030	925	156	149	137	137
1040	900	183	170	167	167
1050	900	223	217	212	201
1060	900	229	229	223	223
1080	900	293	293	285	269
1095	900	302	293	269	255
1137	900	201	197	197	192
1141	900	207	201	201	201
1144	900	201	187	192	192
合金钢，渗碳钢种					
3310	890	269	262	262	248
4118	910	170	156	143	137
4320	895	248	235	212	201
4419	955	149	143	143	143
4620	900	192	174	167	163
4820	860	235	229	223	212
8620	915	197	183	179	163
9310	890	285	269	262	255
合金钢，直接淬火锅种					
1340	870	269	248	235	235
3140	870	302	262	248	241
4027	905	179	179	163	156
4063	870	285	285	285	277
4130	870	217	197	167	163
4140	870	302	302	285	241
4150	870	375	321	311	293
4340	870	388	363	341	321
5140	870	235	229	223	217
5150	870	262	255	248	241
5160	860	285	269	262	255
6150	870	285	269	262	255
8630	870	201	187	187	187
8650	870	363	302	293	285
8740	870	269	269	262	255
9255	900	277	269	269	269

表5 正火合金钢薄板的典型机械性能

钢号	厚度 (mm)	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (a) (MPa)	延伸率 (b) (%)	硬度 (HRC)
4130	4.9	835	585	14	25
4335(c)	4.6	1725	1240	8	48
4340(c)	2.0	1860	1345	7	50

(a)残余变形0.2%; (b)标距50mm; (c)改进型; 0.4%Mo, 0.20%V。

如 52100 这样的过共析钢，为了部分或全部消除碳化物网进行正火，这样就产生一种在以后的球化退火处理中更易于 100% 球化的组织。球化组织可改进机械加工性以及为淬火提供更均匀的组织。

锻件

锻件在渗碳或淬火前进行正火时，采用正火温度的上限。然而，最终热处理是正火时，采用正火温度的下限。

加热炉 周期式或连续式炉都可以用于钢锻件的正火。在连续式炉中，正火的锻件常放在浅盘中，经炉子装料端的推杆机构传输通过炉子。位于炉子两侧的烧嘴在炉底下点火，燃烧产物沿工作区马弗壁上升，并放散到炉顶，不采用气氛控制，燃烧产物通过整个炉底两边加炉衬的排烟口进入整个炉膛。如一种典型的炉子，9 m 长，每边有 18 个燃气烧嘴（或 9 个燃油烧嘴）。为了温度控制，这样炉子分成三个 3 m 区，每区有一根垂直热电偶通过炉顶伸入炉内。

处理工艺 小锻件从锻造厂接收时通常已经正火。它们是放在或松散堆放在最深达 75 mm 的料盘中。典型的炉子如，在三个加热区每区有五个料盘。加热调整到最后一区工件达到正火温度。通过最后一区后，料盘出炉到冷却输送带，仍在料盘中的工件在静止空气中冷却到 480℃ 以下，然后卸料于搬运箱中，零件在箱中冷至室温。整个在炉中的时间约为 3.5 h，但在这段时间工件保持在正火温度仅有 1 h。

大型自由锻件的正火，是在周期式炉中完成，炉温用热电偶控制在一个窄的温度范围内。锻件在正火温度保持足够长，使其完全奥氏体化，以及碳化物完全溶解，然后在静止空气中冷却。

半轴锻件 在锻造一个细晶粒 1049 钢半轴锻件时，只有锻造坯棒的一端加热并锻粗为凸缘部分。

这个零件从凸缘端到冷端检查横截面时，揭示了下列的冶金情况：

轴的热加工凸缘部分呈现在锻造温度（约 1100℃），锻造形成细晶粒组织。然而，同时加热到锻造温度，但未进行热加工的邻近凸缘部分呈现出粗晶粒组织，靠近轴的冷端，在温度约 700℃ 的区域呈现为球化组织。轴的冷端在整个锻造操作中保留它的原始细晶粒。

随后操作中，轴被机械校直、机械加工并感应淬火。因为是混晶组织，这些操作造成几个问题。邻近凸缘的粗晶部分，在横向特别弱，如果这部分承受严重的校直操作，就有可能断裂。球化的区域不适于感应淬火，因为这种碳化物形成的溶解率，对较快的感应加热速率来说太慢了。而且混合的冶金组织难以机械加工。因而需要正火使在校直、机械加工和感应淬火前整个轴都形成均匀细晶粒组织。

低碳钢锻件 与前节所述中碳钢半轴相反，含碳 0.25% 或更低的碳钢很少进行正火。只是从高于奥氏体化温度急冷，才能对组织和硬度有一些明显的影响。

组织稳定性 正火和回火对提高低碳耐热钢的组织稳定性也是一种良好的处理方法。如 AMS6304 (0.45C、1Cr、0.5Mo、0.3V) 在 540℃ 以上组织还是稳定的。用于飞机燃气轮压缩机“冷”端的轮与间隔圈是进行这种处理以提高组织稳定性的典型零件。

对机械性能的影响 正火回火与淬火回火所获得的机械性能的差异，是由于从奥氏体化温度冷却下来的速度不同，因而与钢的淬透性和零件截面大小有关。对于空冷，正如液体冷却一样，如果要维持给定的硬度，较大零件就要求较高的合金含量。正火零件要达到液体淬火零件同样的硬度也要求较高的合金含量，以补偿空冷比液体淬火可达到的较小的淬硬效果。

硬度不是因冷却速度差异所影响的唯一性能。正火回火态和淬火回火态的表面硬度即使大致相同，其它机械性能也可能不同。例如，虽然抗拉强度大致相同，而正火回火态的屈服强度、延伸率和断面收缩率将比淬火回火态的低。

多次正火处理 用于：(a) 采用高的首次正火温度（例如 925℃），使低温组元完全溶解于奥氏体中；(b) 采用接近 A_{c3} 温度（例如 815℃）进行第