

渗碳轴承用钢 及其热处理

汪传稷 陆大启 编著
吴继贤 狄彪

SHEN TAN ZHOU CHENG YONG GANG JI QI RE CHU LI



兵器工业出版社



渗碳轴承用钢及其热处理

汪传稷 陆大启 编著
吴继贤 狄 彪

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书根据近年来从国外引进的先进技术和设备以及我国多年来的生产实践经验,以197726轴承为例,从理论和实践方面详尽系统地阐述了渗碳轴承的技术要求;新型镍铬钼系渗碳钢和高碳铬轴承钢的性能及冶金方法;先进的压力机—扩孔机锻造工艺;吸热型控制气氛渗碳、二次淬火、光亮淬火等先进的热处理设备及工艺;同时例举了各种损伤图例及其分析。

本书分四篇。第一篇:渗碳轴承用钢;第二篇:渗碳轴承套圈的成形和预先热处理;第三篇:渗碳轴承零件的最终热处理;第四篇:渗碳轴承零件损伤图例及其分析。

本书不仅为轴承、齿轮、汽车、机车等行业的设计工作者提供了宝贵资料,而且对于从事机械、航天、兵器等行业的材料、热处理工作者有借鉴之处,对于高等院校有关专业的师生也有一定的参考价值。

渗碳轴承用钢及其热处理

汪传稷 陆大启 吴继贤 狄 彪 编著

兵器工业出版社 出版发行

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店北京科技发行所经销

北京市农业科技情报所印刷厂印装

开本: 787×1092 1/16 印张: 9.50 字数: 230千字

1989年8月第1版 1989年8月第1次印装

印数: 1~2000 定价: 7.00元

ISBN 7-80038-109-9/TG·9

前 言

本书系根据近年来国外引进的先进技术和多年的生产实践经验，系统地阐述了镍铬钼系新型渗碳钢及控制气氛热处理工艺。随着现代化工业的迅速发展，对车辆、汽车等大中型轴承提出愈来愈高的要求，高碳铬轴承钢已远远不能满足其要求，为此，从国外引进了先进技术和设备，采用镍铬钼系新型渗碳钢生产车辆、汽车等大中型轴承。本书以197726轴承为例，从理论和实践详尽地阐述了渗碳轴承的技术要求；新型镍铬钼系渗碳钢和高碳铬轴承钢的性能及冶金方法；先进的压力机—扩孔机锻造工艺；吸热型控制气氛渗碳、二次淬火、光亮淬火等先进的热处理设备及工艺；同时例举了各种损伤图例及其分析。

本书不仅为轴承、齿轮等行业提供了宝贵资料，而且对于从事机械、航天、兵器等行业的材料、热处理工作者有借鉴之处，对于高等院校有关专业的师生也有一定的参考价值。

本书第一篇由陆大启同志编写；第二篇由狄彪同志编写；第三篇由汪传稷同志编写；第四篇由吴继贤同志编写。全书由汪传稷同志整理校审。由于我们的水平有限，错误之处在所难免，恳望读者提出批评指正。

目 录

第一篇 渗碳轴承用钢

第一章 渗碳轴承钢	(1)
第一节 概述.....	(1)
第二节 渗碳轴承钢的基本性能要求.....	(2)
第三节 合金元素对渗碳轴承钢性能的影响.....	(7)
第四节 冶金方法对渗碳轴承钢性能的影响.....	(14)
第五节 镍铬钼系渗碳轴承钢.....	(21)
第二章 滚动体用钢	(34)
第一节 GCr15钢材质量对轴承寿命的影响.....	(34)
第二节 GCr15轴承钢的主要性能数据.....	(38)
第三节 GCr15钢冷拔棒材的冶金工艺过程.....	(40)
第三章 轴承保持架用钢	(43)
第一节 钢板的冷冲压性能.....	(43)
第二节 保持架的使用性能.....	(46)

第二篇 渗碳轴承套圈的成形和预先热处理

第一章 轴承套圈的锻造过程	(50)
第一节 锻件的留量和公差.....	(51)
第二节 锻造的温度范围.....	(54)
第三节 锻件的技术条件.....	(55)
第二章 压力机—扩孔机锻造	(57)
第一节 双内锥形毛坯套圈挤压辗扩工艺——VRW40生产线.....	(57)
第二节 外梯形毛坯套圈挤压辗扩工艺——Pda630生产线.....	(64)
第三章 锻件的热处理和清理	(66)
第一节 渗碳轴承毛坯套圈的热处理.....	(66)
第二节 毛坯套圈的清理.....	(66)

第三篇 渗碳轴承零件的最终热处理

第一章 渗碳轴承零件热处理质量要求	(67)
第一节 轴承内、外圈的热处理技术要求.....	(67)
第二节 轴承滚动体的热处理技术要求.....	(79)

第二章 渗碳轴承零件的渗碳热处理	(81)
第一节 渗碳的化学过程及工艺参数.....	(81)
第二节 渗碳轴承零件的渗碳热处理.....	(86)
第三节 渗碳轴承零件渗碳后的质量检验及其标准.....	(94)
第四节 渗碳轴承零件渗碳热处理中常见的缺陷及其返修措施.....	(99)
第三章 渗碳轴承零件的二次淬火热处理	(101)
第一节 渗碳轴承零件二次加热淬火热处理工艺参数.....	(101)
第二节 渗碳轴承内、外圈二次淬火工艺.....	(108)
第三节 渗碳轴承内、外圈二次淬火后的质量检验及其标准.....	(109)
第四节 渗碳轴承内、外圈二次淬火出现的缺陷及返修措施.....	(112)
第四章 渗碳轴承零件的回火、附加回火热处理	(114)
第一节 渗碳轴承零件的回火热处理.....	(114)
第二节 渗碳轴承零件附加回火热处理.....	(115)
第五章 渗碳轴承滚动体的热处理	(117)
第一节 轴承滚动体的淬火热处理.....	(117)
第二节 轴承滚动体的回火热处理.....	(122)
第三节 轴承滚动体的热处理质量检验及其标准.....	(123)
第四节 轴承滚动体淬火热处理出现的缺陷及其返修.....	(125)

第四篇 渗碳轴承零件损伤图例及其分析

第一章 轴承零件使用前出现的损伤及其分析	(129)
第一节 渗碳轴承钢内、外圈.....	(129)
第二节 高碳铬钢滚动体.....	(131)
第三节 保持架.....	(133)
第二章 轴承零件使用后出现的损伤及其分析	(134)
第一节 机械损伤.....	(134)
第二节 化学损伤.....	(135)
第三节 电损伤.....	(135)
第四节 热损伤.....	(135)
第五节 裂纹与碎裂.....	(136)
第六节 疲劳剥落.....	(136)
参考文献.....	(147)

第一篇 渗碳轴承用钢

第一章 渗碳轴承钢

第一节 概 述

在轴承制造行业中被大量使用着的高碳铬轴承钢已经有八十年以上的使用历史了。这种钢虽然在工艺性能、耐接触疲劳和耐磨性等方面具有一系列的优点。然而在工程与运输机械中服役的重要轴承，如轧机轴承、飞机起落架轴承、坦克轴承、铁路货车轴承以及部分汽车轴承等，它们不仅在滚动表面上承受高达几千兆帕的压强，而且在滚动中还伴有滑动，此外还要承受冲击负荷，随着工业技术的发展，这些轴承的服役条件将变得越来越苛刻，在这种情况下，高碳铬轴承钢将不再适应。而以渗碳钢来制造这些承受冲击负荷的轴承则是最合适的。

渗碳轴承钢与高碳铬轴承钢相比概括起来有如下的优点

1. 渗碳钢由于可以对渗碳层深度、表面碳浓度以及其分布梯度进行自由调节，因此能够适应于各种不同服役条件下工作的轴承。

2. 由于渗碳钢表面渗碳层在淬火后与其心部相比具有较大的比容和较低的马氏体转变温度（ M_s 点），因此在热处理后，渗碳钢零件表面存有残余压应力（图1-1-1），从而提高了接触疲劳寿命（表1-1-1）和旋转疲劳强度（图1-1-2）。

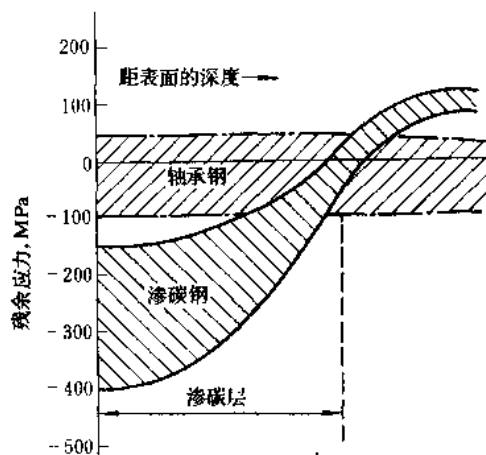


图1-1-1 渗碳钢及轴承钢的热处理残余应力

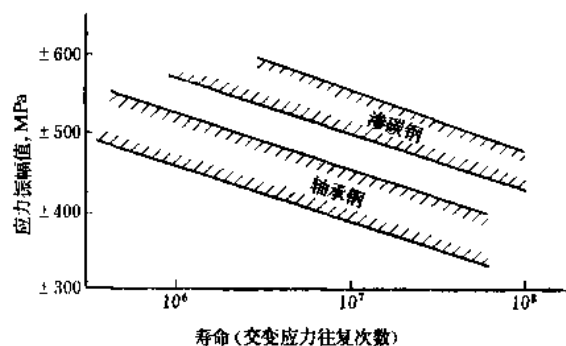


图1-1-2 轴承钢和渗碳钢环状试片旋转疲劳破裂强度

3. 由于渗碳钢经渗碳及淬火处理后，可获得高的表面硬度，从而保证了高的抗压性能和耐磨性。

表1-1-1 高碳铬轴承钢与真空脱气渗碳钢接触疲劳寿命对比

钢 种	$L_{10} (\times 10^4 \text{转})$	平均值 ($\times 10^4 \text{转}$)
SUJ ₂	1310~2930	2170
SCr 420 (直接淬火)	2930~4680	3470
SCM 420 (直接淬火)	2490~3940	2900
SNCM 420 (二次淬火)	2370~3720	3160

注：渗碳轴承钢的接触疲劳寿命约为高碳铬轴承钢的1.5倍，该数据于1977~1982年间测定。

4. 由于渗碳钢热处理后仍保留着低碳的心部，这将使冲击韧性值大大提高。例如 GCr15 钢经常规热处理后其 α_k 值约为 5.5 J/cm^2 ，而 G20CrNi2MoA 钢经 930°C 渗碳和两次淬火并回火后其 α_k 值约为 45 J/cm^2 。

5. 由于渗碳轴承表面存在着压应力，因而形成了抑制缺口敏感性的作用，避免了高碳铬轴承钢轴承容易产生的脆断失效现象，为轴承的安全创造了条件。

6. 渗碳轴承有较好的尺寸稳定性，而耐磨性能与高碳铬轴承基本相同。

由于渗碳轴承具有上述的优点，近二十年来在世界各国发展得很快。美国渗碳轴承钢的用量大约占轴承钢总用量的30%，TIMKEN公司有60%的轴承都采用渗碳钢。英国司贝发动机中也有60%的轴承规定采用渗碳钢制造。在日本近年来渗碳轴承钢生产量不断增加，约占轴承钢总用量的10%。目前我国轴承行业中渗碳轴承所占比例较小，但随着我国建设事业的迅速发展，渗碳轴承的产量将会大幅度的增加。

第二节 渗碳轴承钢的基本性能要求

一、抗压性能

一般渗碳轴承所承受的接触应力高达2000至4000MPa。承受这么高的应力，接触表面不仅要求具有高的硬度，而且还应根据剪切应力沿表面至心部的分布情况保持必要的硬度梯度分布。根据各种型号轴承的负荷状况还应调整渗碳层的深度值，一般渗碳层深度可在0.6~5.6mm内分为若干档次来掌握。

二、耐磨性能

轴承零件由于接触部分几何形状因素等方面的原因将有滑动产生，致使接触表面产生磨损。因此要求渗碳轴承的工作表面不仅硬度高(HRC60以上)，而且钢的成份中根据需要加入Cr, Mo, V等碳化物形成元素，以形成高硬度的粒状合金碳化物，改善和提高耐磨性。

三、抗断裂性能

轴承的抗断裂性能包含两个方面的要求。即：一方面是在经受一次性的大冲击负荷后的抗断裂能力(α_k 值)要大；另一方面是裂纹发生后，对裂纹失稳传播的阻抗(K_{IC} 值)要大。

资料指出：“除承受变向载荷外还承受冲击载荷的零件，其心部和渗碳层的韧性将是特别重要的”，“一般说来淬透性较高的钢比淬透性较低的钢其断裂抗力较高”，“低淬透性钢要得到高断裂抗力是不可能的。”^[1-11]许多种合金元素虽然有改善钢的抗断裂性能的作用，但在钢中只添加单一的合金元素往往仍然不能显著提高断裂抗力，只有合金元素得到最

佳配比时, 才能获得良好的抗断裂性能。此外, 断裂韧性 K_{Ic} 值的大小还要受渗碳后的浓度, 硬度梯度、残余应力, 残余奥氏体量以及其他显微结构特性的影响^[1-2]。

四、抗接触疲劳性能

滚动轴承的滚道面由于受脉冲接触压应力的作用(图1-1-3), 在表层下会产生反复剪切应力。根据最大切应力理论, 最大切应力处是疲劳裂纹的策源地, 其应力值为 $\tau_{45^\circ \max} = 0.3\sigma_{\max}$ 位于接触面下 $h=0.786b$ 的深度位置(b 为接触宽度的一半)^[1-3]。

A. palmgren^[1-3]则认为: 接触疲劳裂纹源是由距表面下 Z_0 位置的对称循环切应力 τ_0 所引起的。而 $Z_0=0.5b$; $\tau_0=0.25\sigma_{\max}$ 。

日本大越佐田^[1-3]测定了各种接触应力下疲劳裂纹产生的位置, 发现裂纹产生深度介于 $(0.5\sim 0.7)b$ 之间。

因此, 由于接触应力的反复作用, 首先在表面下剪切应力作用的某一深度处, 材料强度较弱的部分(如非金属夹杂物和晶体缺陷处)的周围引起应力集中, 从局部的塑性变形和滑移, 导致皮下裂纹的形成, 在随后继续运转过程中, 裂纹逐步扩展至接触表面, 从而产生表层金属剥落。图1-1-4是接触疲劳的产生、发展和最终引起断裂剥落各阶段的示意图。

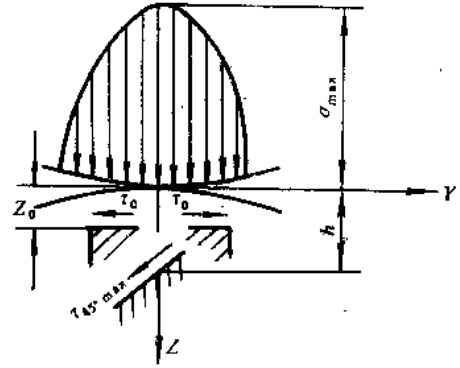


图1-1-3 接触应力与最大脉冲切应力 $\tau_{45^\circ \max}$ 和对称循环切应力 τ_0 的位置示意图

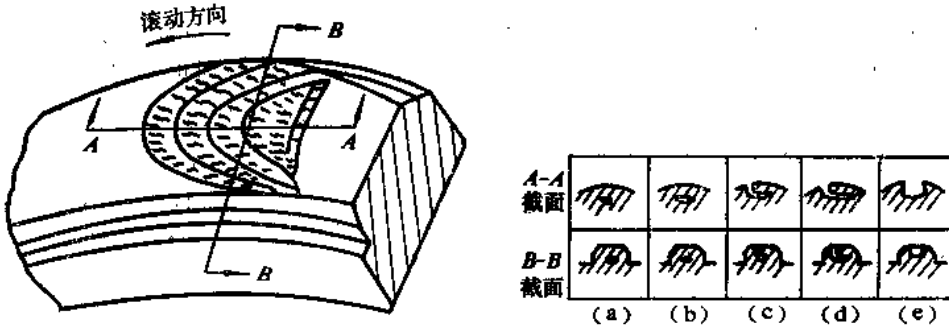


图1-1-4 接触疲劳剥落裂纹产生和发展过程示意图

- (a) 一疲劳源由最大切应力和材料中弱点处形成。
- (b) 一疲劳裂纹顺表面平行方向扩展。
- (c) 一疲劳裂纹向表面扩展。
- (d) 一疲劳裂纹在油压作用下继续向内部扩展。
- (e) 一最后折断, 金属表面剥落。

滚动接触疲劳剥落往往是滚动轴承的主要失效形式。一般情况下接触疲劳抗力的大小是用接触疲劳寿命来考核。然而大量的轴承寿命试验数据表明, 即使是一批尺寸结构、材料、热处理、加工方法相同的轴承, 在相同的条件下服役, 其疲劳寿命也是相当漫散的。一般呈韦布尔曲线分布, 人们往往用韦布尔分布斜率 e 来表示寿命的漫散程度, 即 e 值越小, 则表示该批轴承的寿命漫散度越大。

针对轴承疲劳寿命相当漫散的特征，一般是在韦布尔分布图中取两个特殊点的寿命值来表征一组轴承的寿命，即额定寿命 L_{10} 和中值寿命 L_{50} （表1-1-2）。

表1-1-2 G20CrNi2MoA渗碳轴承钢接触疲劳寿命

材 料	状 态	韦布尔图		L_{50}/L_{10}	韦布尔斜率 c
		$L_{10} \times 10^4$ 转	$L_{50} \times 10^4$ 转		
F厂真空脱气材	渗碳并两次淬火	1640	9280	5.66	1.09
J厂电渣重熔材	渗碳并两次淬火	4300	11000	2.56	2.0
日本SNCM 420 真空脱气材	渗碳并两次淬火	1600~3860	7800~11660	2.3~4.3	—

注： L_{10} ——同一批轴承中90%的轴承在疲劳剥落前（破损概率为10%）所能达到或超过的寿命（转数或小时数）。

L_{50} ——同一批轴承中50%的轴承在疲劳剥落前（破损概率为50%）所能达到或超过的寿命（转数或小时数）。

为了提高渗碳轴承的抗接触疲劳性能，要减少钢材中非金属夹杂物，特别是减少铝系氧化物的数量和控制夹杂物的大小及分布形态。此外还必须根据最大剪切应力的分布来调整碳浓度和硬度的分布梯度，选择合理的渗碳层深度以及表面硬度与心部硬度配比。才有可能获得理想的抗接触疲劳性能。

五、淬透性

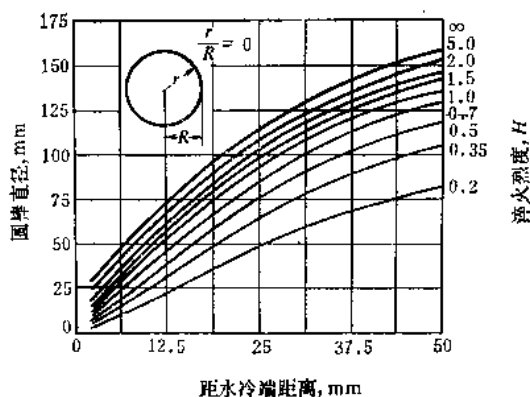
渗碳轴承的淬透性问题包括高碳表层与低碳心部两个方面。在选择渗碳钢种时，往往都是以心部和渗层的淬透性大小为依据的。而且心部的淬透性具有特别重要的意义。

钢的淬透性表征钢奥氏体化后接受淬火的能力。它与钢的临界冷却速度具有相反的关系。我国标准（GB225-63）中规定，结构钢的淬透性用末端淬透性试验法来考核。众所周知，末端淬透性可借测定钢材奥氏体化后，在一定冷却条件下，距试样末端不同部位处的硬度值来表示。而每一钢种均可绘出一组淬透性曲线，从而组成该钢种的淬透性带，通称为 H 带。按淬透性供应的钢叫做 H 钢。

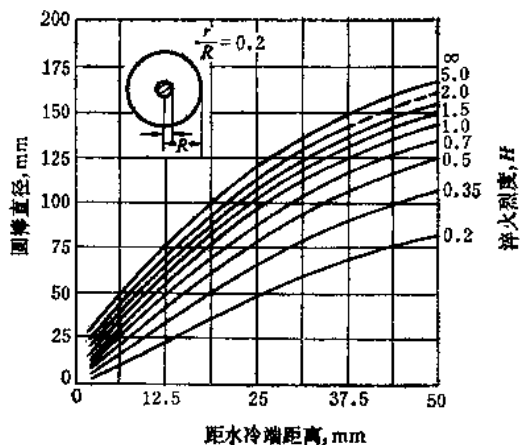
然而，即使是同一种钢，由于在标准范围内也存在着化学成份、晶粒度的差异，因此末端淬透性曲线必然在 $\bar{X} \pm 2\sigma$ 的范围内分散成一个淬透性带（ H 带）。在日本和美国已经把一些钢种的 H 带纳入了标准，一般 H 钢的化学成份的规定范围要比相应的“标准钢”宽一些，这是为了满足淬透性的严格要求而规定的^[1-4]。

末端淬透性曲线的 H 带，虽然只能对钢种之间的淬透性能进行比较，但它在选择合适钢种时却是很重要的。从事实际工作的人们往往希望用末端淬透性曲线来直接判断不同截面尺寸、在不同淬火介质中淬火的零件所能得到的心部硬度值。这里介绍一种被广泛采用的从末端淬透曲线推算出圆棒心部硬度的方法。

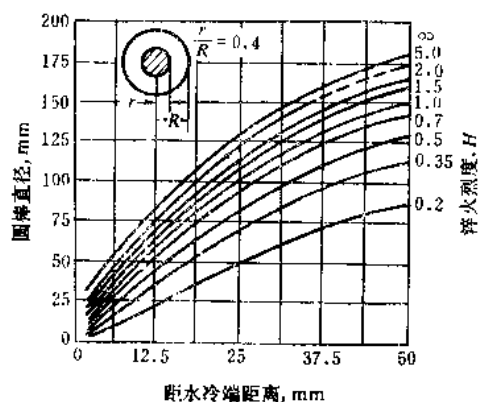
这种方法由七张图表组成（如图1-1-5）。从图中可以查出不同直径的圆棒在各种不同的冷却条件下淬火后，从中心到表面的几个特定部位所对应的末端淬透性曲线的位置，从而可以推定出硬度值。



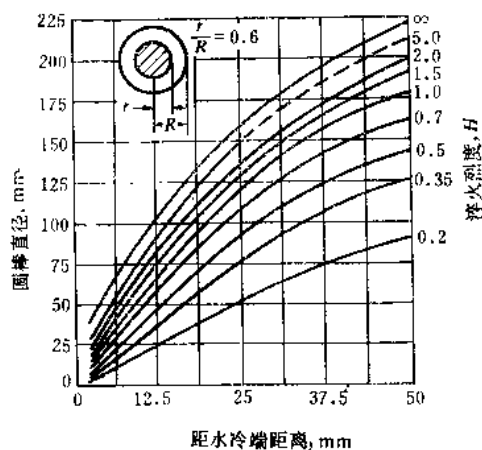
(a)



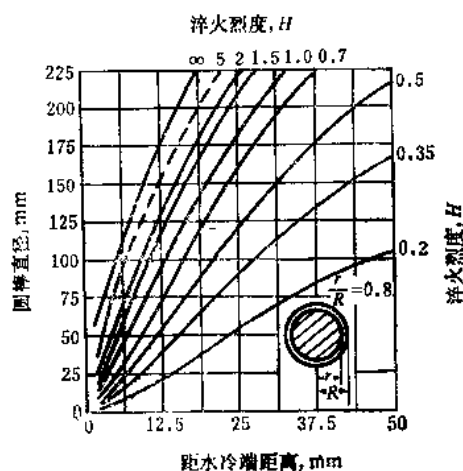
(b)



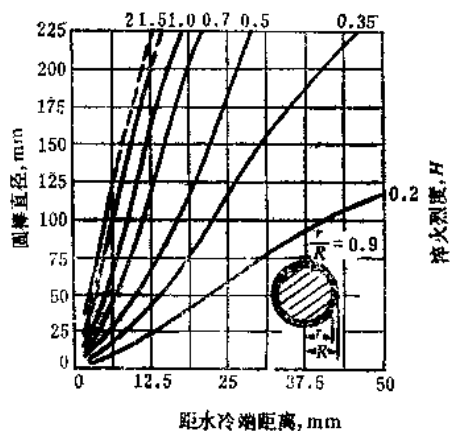
(c)



(d)



(e)



(f)

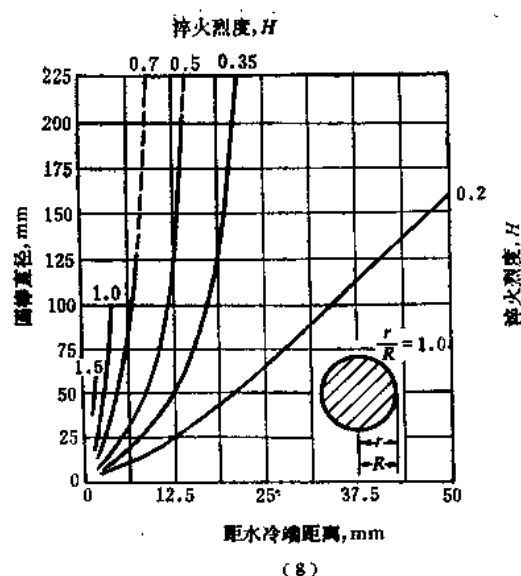


图1-1-5 圆棒和末端试验片的位置关系

- (a) $-\frac{r}{R} = 0$; 可用来推定圆棒中心部硬度。
- (b) $-\frac{r}{R} = 0.2$; 可用来推定距圆棒中心 $\frac{1}{5}$ 圆棒半径处的硬度。
- (c) $-\frac{r}{R} = 0.4$; 可用来推定距圆棒中心 0.4 圆棒半径处的硬度。
- (d) $-\frac{r}{R} = 0.6$; 可用来推定距圆棒中心 0.6 圆棒半径处的硬度。
- (e) $-\frac{r}{R} = 0.8$; 可用来推定距圆棒中心 0.8 圆棒半径处的硬度。
- (f) $-\frac{r}{R} = 0.9$; 可用来推定距圆棒表面 0.1 圆棒半径处的硬度。
- (g) $-\frac{r}{R} = 1.0$; 可用来推定圆棒表面的硬度。

显然这样就可以把标准的 H 带与实际工艺要求的硬度值结合起来。这对从事轴承等零件的设计和工艺人员将有很高的使用价值。

关于图1-1-5中的冷却介质的淬火烈度 (H 值) 列于表1-1-3。

举例说明图1-1-5的使用方法:

若有25mm直径的圆棒, 用 $H = 0.2 \text{ cm}^{-1}$ 的油淬火时其中心硬度 (使用 (a) 图) 应与某钢种末端淬透曲线的末端距离14mm处的硬度值相当。同时根据图 (d) $\frac{r}{R} = 0.6$, 则距中心7.5mm处的硬度与端淬曲线的12.5mm处的硬度相当。若求表面硬度可根据图 (g) 即与某钢种的端淬曲线的12mm处的硬度值相当。

表1-1-3 淬火介质的冷却条件及淬火烈度

H 值 (cm^{-1})	冷却条件
0.08	一般油淬 (无搅拌)
0.14	良好油淬 (适当搅拌)
0.20	非常好的油淬 (良好搅拌)
0.28	强烈的油淬 (激烈搅拌)
0.40	一般水淬 (无搅拌)
0.59	非常好的水淬 (强搅拌)
0.79	盐水淬 (无搅拌)
1.97	盐水淬 (激烈搅拌)
∞	理想的淬火

必须指出,由于低碳板条状马氏体组织具有良好的综合机械性能,因此渗碳轴承零件应以心部获得这种理想的显微组织为目标。对于强韧性要求高的渗碳轴承其心部的不完全淬火组织应严格控制在10~20%以下^[1-5]。这就等于对钢的淬透性提出了具体要求,同时也构成了渗碳轴承根据壁厚选择钢材的原则。

关于渗碳层的淬透性问题,如图1-1-6所示,从图中可以看出高碳的表层(1%C)和低碳的心部(亚共析钢)各种合金元素对淬透性的贡献大小是不同的。

此外还有利用理想临界直径(D_I)和临界直径(D_{I_0})的计算淬透性的方法,将在第三节中进行阐述。

六、渗碳性能

渗碳轴承零件的热处理过程较复杂,这就对钢材的渗碳工艺性能提出了一定的要求,概括起来有如下两个方面:

(一)为保证轴承零件在渗碳处理时,奥氏体晶粒长大倾向小,应采用本质细晶粒钢。尤其是对于那些允许采用渗碳后直接淬火的零件,为使心部获得良好的韧性,要求钢材的过热敏感性小。

(二)经渗碳处理后,在渗碳层应避免大块状碳化物的形成,特别是避免网状碳化物的形成。同时要求渗碳层的碳浓度从表面至心部具有平缓的分布形态。在保证这些渗碳性能的前提下,渗碳速度应该以较快为佳。

七、其它工艺性能

这些工艺性能一般应包括良好的锻造性能、切削性能、无带状组织以及最小的热处理变形等。

综上所述,为了提高渗碳轴承的使用寿命,渗碳轴承钢应该具有高的接触疲劳性能、抗压性能、耐磨性能、抗断裂性能以及良好的淬透性能和渗碳工艺性能等。

当然对于不同的服役条件和失效方式的渗碳轴承以及由于轴承零件的壁厚和结构特点的差别还有对于轴承成本方面的考虑,上述的各种性能要求的侧重点也将有所不同,这些因素就构成了渗碳轴承钢的不同系列和不同的化学成分设计以及采用不同冶炼和精炼方法的出发点。

第三节 合金元素对渗碳轴承钢性能的影响

为了满足渗碳轴承对钢材的基本性能要求,就必须在普通渗碳钢中加入一定数量的合金元素进行合金化。各种合金元素对奥氏体的溶解度以及它们与碳的亲合力互有差异,正确地利用这些特性,就可以起到改善钢材性能的作用。

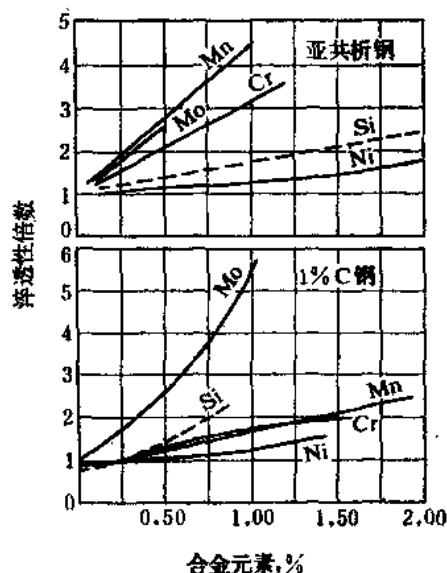


图1-1-6 因C%不同,各合金元素对淬透性影响的差异

一、碳含量的影响

渗碳轴承钢的原始含碳量一般均在0.25%以下，对于大截面或心部需要具有较高强度的渗碳轴承零件，有时含碳量提高到0.3%。

碳的含量对渗碳轴承零件的性能尤其是淬透性和淬硬性均有较大的影响。可以认为碳含量越高，渗碳轴承的心部强度也越高，整个轴承的强度也相应提高。但是，过高的碳含量将会导致淬火后的马氏体形态由低碳板条状马氏体向混有针状马氏体的显微组织过渡，从而增加了零件的脆性。所以，从提高韧性的角度考虑，不希望淬火后的渗碳轴承心部硬度过高，一般均控制在HRC25~45范围内^[1-8]。

有些心部含碳量较低的高合金渗碳钢，例如SAE9310钢就是高合金含量与低碳量相结合的典型渗碳钢，它具有很高的抗冲击断裂性能。

另外，关于渗碳处理后的表面含碳量对性能的影响，将在本书第三篇渗碳轴承零件的最终热处理有关章节中叙述。

二、铬含量的影响

在渗碳轴承钢中添加铬元素的目的，主要是为了使钢材获得必要的淬透性，推迟贝氏体转变并改善机械性能。同时由于铬可以大大增加渗层的碳浓度、增加共析层厚度和提高渗碳层淬透性，从而改善渗碳性能并使渗碳、淬火、回火等热处理工序便于进行。另一方面，由于铬的作用，渗碳后可以形成高硬度的碳化物，使渗碳层具有较高的耐磨性；但是，铬的含量太多时，由于会形成特殊碳化物而较难固溶于奥氏体中，反而会使表层淬透性变坏，所以，一般渗碳轴承钢中铬的含量规定在2%以下。

三、锰含量的影响

日本某轴承公司研究了合金渗碳钢中锰的含量对接触疲劳寿命的影响。当锰的含量为0.5%时， $L_{10}=2890 \times 10^4$ 转；当锰的含量提高到0.8%时， $L_{10}=3190 \times 10^4$ 转。该公司的另一试验结果是：在SCr420合金渗碳钢中把锰的含量由0.5%提高到1.25%，接触疲劳寿命 L_{10} 值获得了明显的提高。当锰与铬共存，而铬的含量大于0.8%时，锰含量对接触疲劳寿命的提高要明显得多。

四、镍含量的影响

钢中镍元素的加入，最主要的作用是提高淬、回火后钢的冲击韧性。特别是轴承零件心部在淬火后不能形成100%马氏体时，由于镍的存在，仍然可以保证具有较高的冲击韧性。此外，镍还可以降低渗碳层中的含碳量，并使渗碳层厚度略有减小，但是，可以增加渗层的淬透性。然而，镍含量过高将会使 M_s 温度显著降低，导致残余奥氏体量增多和硬度值降低。

五、钼含量的影响

钢中加入钼，无论对心部或渗层的淬透性都有强烈的促进作用。此外，钼还可以细化晶粒，降低过热敏感性和提高冲击韧性。但钼的含量在1%以上时，改善机械性能的效果就不明显了^[1-7]。与铬元素一样，若钼含量太高，也会形成特殊碳化物而较难固溶于奥氏体中，反而使淬透性变坏。

六、铬镍钼元素的综合影响

一般说来，在钢中加入单一的合金元素，不可能使钢材获得理想的性能。只有进行综合合金化，将各种合金元素进行最佳配比时，才能获得良好的综合性能。

从提高渗碳轴承抗断裂性能考虑, 钼和铬的作用均受镍量的强烈影响^[1-2], 若镍铬钼两种以上的合金元素加入钢中时, 合金元素总含量达6%左右, 则末端淬透性曲线基本上与横坐标平行了, 要求再高的淬透性, 显然就不必要了^[1-7]。这些观点与我们前面阐述的淬透性较高的钢比淬透性较低的钢, 其抗断裂性能较高的观点是一致的。

为了进一步弄清楚各种合金元素对钢材淬透性的影响, 下面介绍一种理想临界直径和临界直径的计算方法。这种方法把各种合金元素的添加量对淬透性的作用, 用加算值的形式定量地表示出来。

(一) 理想临界直径 (D_I) 的计算:

当淬火烈度 $H = \infty$ 时, 中心可以淬成50%马氏体状态的钢材试棒的直径即称为理想临界直径 (D_I)。

1. 首先根据钢材的化学成分和晶粒度大小, 从表1-1-4中可以查出淬透性的加算值。
2. 求出各项加算值的合计值后, 再根据表1-1-5查出理想临界直径 (D_I) 值。

(二) 临界直径 (D_{I_0}) 的计算:

由于钢材实际上不可能在 $H = \infty$ 的理想淬火介质中冷却。我们可以利用图1-1-7以及上面求得理想临界直径 (D_I), 直接查出任意 H 值时的临界直径 (D_{I_0})。

用理想临界直径和临界直径来表征或比较钢材的淬透性是一种既有效又直观的方法。

举例: G20CrNi2MoA钢, 晶粒度No.6级, 求理想临界直径 (D_I) 值和临界直径 (D_{I_0})。

1. 按G20CrNi2MoA钢的中值化学成分, 从表1-1-4中查出淬透性加算数列在表1-1-6。
2. 根据表1-1-5, 利用插入法查出理想临界直径 $D_I = 96.76\text{mm}$ 。
3. 根据图1-1-7, 若在 $H = 0.6\text{cm}^{-1}$ 的介质中淬火, 则 $D_{I_0} = 60\text{mm}$ 。

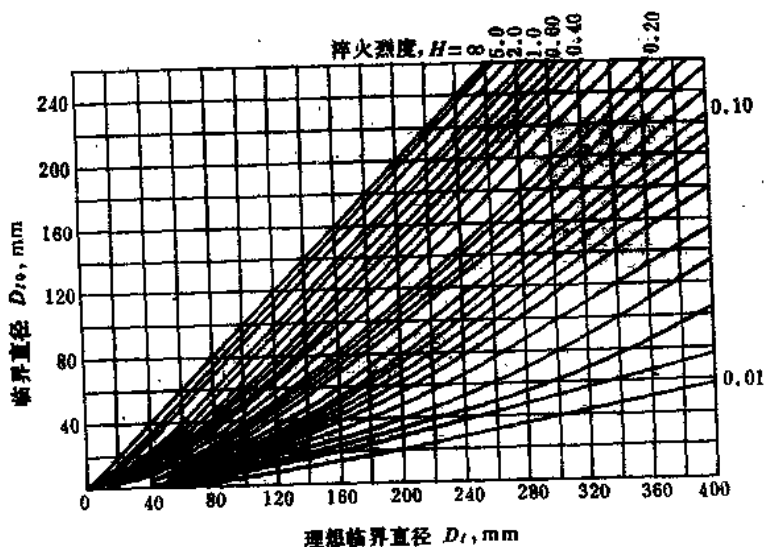


图1-1-7 任意 H 值的理想临界直径 (D_I) 与临界直径 (D_{I_0}) 的关系

图1-1-8是日本JIS标准中的几种铬镍钼系渗碳钢的理想临界直径 (D_I) 值的比较。从图1-1-8可以清楚看出Cr, Ni, Mo元素对钢材淬透性影响的差异。

表1-1-4 根据化学成分和晶粒度求 D_T 值的计算表(加算法)

按晶粒度和C%的淬透性加算倍数				合金元素 (%)		按合金元素的淬透性加算值								
No.5	No.6	No.7	No.8	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	P	S	Al	Ti	
0.021				0.01	0.003	0.002	0.009	0.013	0.061	0.011	-0.003	0.006	-0.008	
0.050				0.02	0.006	0.003	0.018	0.025	0.087	0.022	-0.006	0.012	-0.018	
0.076				0.03	0.009	0.005	0.027	0.037	0.137	0.033	-0.009	0.017	-0.025	
0.101				0.04	0.012	0.006	0.036	0.049	0.146	0.044	-0.011	0.022	-0.034	
0.120				0.05	0.015	0.008	0.045	0.061	0.146	0.054	-0.014	0.028	-0.043	
0.138				0.06	0.018	0.009	0.053	0.072	0.140	0.064	-0.018	0.033	-0.053	
0.155				0.07	0.021	0.011	0.061	0.083	0.137	0.073	-0.020	0.039	-0.062	
0.170				0.08	0.024	0.012	0.069	0.094	0.124	0.083	-0.024	0.044	-0.072	
0.184				0.09	0.027	0.014	0.077	0.104	0.111	0.092	-0.027	0.049	-0.081	
0.198				0.10	0.029	0.015	0.085	0.114	0.097	0.101	-0.032	0.054	-0.092	
0.211				0.11	0.032	0.017	0.093	0.124	0.086			0.059	-0.099	
0.224			0.017	0.12	0.035	0.019	0.101	0.134	0.072			0.064	-0.112	
0.236			0.037	0.13	0.038	0.020	0.108	0.143	0.061			0.069	-0.123	
0.247			0.056	0.14	0.041	0.022	0.115	0.152	0.037			0.074	-0.134	
0.258			0.070	0.15	0.043	0.023	0.122	0.161	0.025			0.079	-0.146	
0.268			0.084	0.16	0.046	0.024	0.129	0.170						
0.278			0.097	0.17	0.049	0.026	0.136	0.178						
0.288			0.110	0.18	0.052	0.028	0.143	0.188						
0.297			0.122	0.19	0.054	0.029	0.149	0.196						
0.306			0.134	0.20	0.057	0.030	0.156	0.204						
0.314			0.146	0.21	0.060	0.032	0.163	0.212						
0.322			0.156	0.22	0.062	0.033	0.169	0.220						
0.330			0.166	0.23	0.064	0.035	0.175	0.228						
0.337			0.176	0.24	0.067	0.037	0.181	0.236						
0.343			0.184	0.25	0.070	0.038	0.187	0.244						
0.350			0.193	0.26	0.073	0.040	0.193	0.251						
0.356			0.201	0.27	0.075	0.041	0.199	0.258						
0.362			0.209	0.28	0.078	0.042	0.205	0.265						
0.368			0.216	0.29	0.080	0.044	0.211	0.272						
0.374			0.223	0.30	0.083	0.045	0.217	0.279						
0.380			0.230	0.31	0.085	0.047	0.222	0.286						
0.386			0.238	0.32	0.088	0.048	0.228	0.293						
0.392			0.246	0.33	0.090	0.049	0.234	0.299						
0.398			0.253	0.34	0.093	0.051	0.239	0.306						
0.403			0.260	0.35	0.095	0.052	0.244	0.312						
			0.266	0.36	0.098	0.053	0.249	0.318						
			0.272	0.37	0.100	0.055	0.255	0.324						
			0.278	0.38	0.102	0.057	0.260	0.330						
			0.284	0.39	0.105	0.058	0.265	0.336						
			0.290	0.40	0.107	0.059	0.270	0.342						
			0.296	0.41	0.110	0.061	0.275	0.348						
			0.301											

加 算 值 (续)					
%		Mn	Si	Ni	Cr
0.91	0.506	0.214	0.124	0.472	0.472
0.92	0.609	0.216	0.125	0.475	0.475
0.93	0.613	0.218	0.126	0.478	0.478
0.94	0.616	0.220	0.128	0.481	0.481
0.95	0.620	0.221	0.129	0.483	0.483
0.96	0.623	0.223	0.130	0.488	0.488
0.97	0.627	0.225	0.131	0.491	0.491
0.98	0.630	0.227	0.132	0.494	0.494
0.99	0.633	0.229	0.134	0.497	0.497
1.00	0.637	0.230	0.135	0.500	0.500
1.02	0.643	0.234	0.137	0.506	0.506
1.04	0.650	0.238	0.139	0.511	0.511
1.06	0.656	0.241	0.142	0.517	0.517
1.08	0.662	0.245	0.144	0.522	0.522
1.10	0.669	0.248	0.146	0.528	0.528
1.12	0.675	0.251	0.148	0.534	0.534
1.14	0.681	0.255	0.150	0.539	0.539
1.16	0.687	0.258	0.153	0.543	0.543
1.18	0.694	0.262	0.155	0.550	0.550
1.20	0.702	0.265	0.157	0.557	0.557
1.22	0.710	0.268	0.159	0.561	0.561

加 算 值 (按)

%	Mn	Si	Ni	Cr
0.91	0.606	0.214	0.124	0.472
0.92	0.609	0.216	0.125	0.475
0.93	0.613	0.218	0.126	0.478
0.94	0.616	0.220	0.128	0.481
0.95	0.620	0.221	0.129	0.485
0.96	0.623	0.223	0.130	0.488
0.97	0.627	0.225	0.131	0.491
0.98	0.630	0.227	0.132	0.494
0.99	0.633	0.229	0.134	0.497
1.00	0.637	0.230	0.135	0.500
1.02	0.643	0.234	0.137	0.506
1.04	0.650	0.238	0.139	0.511
1.06	0.656	0.241	0.142	0.517
1.08	0.662	0.245	0.144	0.521
1.10	0.669	0.248	0.146	0.528
1.12	0.675	0.251	0.148	0.534
1.14	0.681	0.255	0.150	0.539
1.16	0.687	0.258	0.153	0.545
1.18	0.694	0.262	0.155	0.551
1.20	0.702	0.265	0.157	0.556
1.22	0.710	0.268	0.159	0.561

0.408	0.373	0.339	0.306	0.42	0.380	0.112	0.082	0.280	0.354	1.24	0.718	0.271	0.161	0.566
0.413	0.378	0.344	0.310	0.43	0.386	0.114	0.083	0.285	0.360	1.26	0.725	0.275	0.164	0.571
0.418	0.383	0.349	0.315	0.44	0.392	0.117	0.084	0.290	0.365	1.28	0.733	0.278	0.166	0.576
0.423	0.387	0.354	0.320	0.45	0.398	0.119	0.086	0.295	0.371	1.30	0.741	0.281	0.168	0.581
0.428	0.392	0.358	0.325	0.46	0.404	0.121	0.087	0.300	0.377	1.32	0.749	0.284	0.170	0.586
0.433	0.397	0.362	0.330	0.47	0.409	0.124	0.089	0.304	0.382	1.34	0.757	0.287	0.172	0.590
0.438	0.402	0.366	0.334	0.48	0.415	0.126	0.090	0.308	0.387	1.36	0.765	0.290	0.175	0.595
0.443	0.407	0.372	0.338	0.49	0.420	0.128	0.092	0.313	0.393	1.38	0.772	0.294	0.177	0.600
0.448	0.412	0.377	0.343	0.50	0.426	0.130	0.093	0.318	0.398	1.40	0.780	0.297	0.179	0.605
0.452	0.417	0.382	0.348	0.51	0.431	0.133	0.094	0.323	0.403	1.42	0.787	0.300	0.181	0.609
0.456	0.422	0.387	0.352	0.52	0.437	0.135	0.096	0.327	0.408	1.44	0.794	0.303	0.183	0.614
0.461	0.427	0.391	0.356	0.53	0.442	0.137	0.097	0.331	0.413	1.46	0.801	0.306	0.185	0.618
0.465	0.431	0.396	0.360	0.54	0.447	0.139	0.098	0.336	0.418	1.48	0.808	0.309	0.187	0.623
0.469	0.435	0.400	0.364	0.55	0.452	0.141	0.099	0.340	0.423	1.50	0.815	0.312	0.190	0.627
0.473	0.439	0.404	0.367	0.56	0.457	0.144	0.091	0.344	0.428	1.52	0.822	0.315	0.193	0.632
0.477	0.443	0.408	0.371	0.57	0.462	0.146	0.092	0.349	0.433	1.54	0.828	0.318	0.196	0.636
0.481	0.447	0.412	0.375	0.58	0.467	0.148	0.094	0.353	0.438	1.56	0.835	0.321	0.198	0.641
0.485	0.450	0.416	0.378	0.59	0.472	0.150	0.095	0.357	0.442	1.58	0.841	0.323	0.200	0.645
0.489	0.454	0.419	0.382	0.60	0.477	0.152	0.096	0.361	0.447	1.60	0.848	0.326	0.203	0.650
0.493	0.458	0.423	0.386	0.61	0.482	0.154	0.097	0.365	0.452	1.62	0.854	0.329	0.205	0.653
0.497	0.461	0.427	0.389	0.62	0.487	0.157	0.098	0.369	0.456	1.64	0.860	0.332	0.208	0.657
0.500	0.464	0.430	0.393	0.63	0.492	0.159	0.090	0.373	0.461	1.66	0.866	0.335	0.210	0.661
0.504	0.467	0.433	0.396	0.64	0.496	0.161	0.091	0.377	0.465	1.68	0.872	0.338	0.212	0.665
0.507	0.470	0.436	0.400	0.65	0.501	0.163	0.092	0.381	0.470	1.70	0.878	0.340	0.215	0.670
0.510	0.473	0.439	0.403	0.66	0.505	0.165	0.094	0.385	0.474	1.72	0.884	0.343	0.217	0.673
0.513	0.476	0.442	0.407	0.67	0.510	0.167	0.095	0.389	0.479	1.74	0.890	0.346	0.219	
0.517	0.478	0.446	0.410	0.68	0.514	0.169	0.096	0.393	0.483	1.76	0.896	0.349	0.222	
0.520	0.481	0.449	0.413	0.69	0.519	0.171	0.097	0.396	0.487	1.78	0.902	0.351	0.225	
0.523	0.485	0.452	0.415	0.70	0.523	0.173	0.099	0.400	0.491	1.80	0.908	0.354	0.228	
0.526	0.488	0.455	0.418	0.71	0.527	0.175	0.100	0.404	0.496	1.82	0.914	0.357	0.231	
0.530	0.491	0.458	0.422	0.72	0.531	0.177	0.101	0.407	0.500	1.84	0.920	0.359	0.234	
0.533	0.494	0.461	0.425	0.73	0.536	0.179	0.102	0.411	0.504	1.86	0.925	0.362	0.237	
0.536	0.497	0.464	0.428	0.74	0.540	0.181	0.104	0.415	0.508	1.88	0.930	0.365	0.240	
0.539	0.500	0.467	0.431	0.75	0.544	0.183	0.105	0.418	0.512	1.90	0.936	0.367	0.243	
0.542	0.502	0.470	0.433	0.76	0.548	0.185	0.106	0.422	0.516	1.92	0.941	0.370	0.245	
0.544	0.505	0.473	0.436	0.77	0.552	0.187	0.107	0.425	0.520	1.94	0.946	0.373	0.246	
0.547	0.508	0.476	0.439	0.78	0.556	0.189	0.109	0.429	0.524	1.96	0.951	0.375	0.247	
0.549	0.511	0.479	0.441	0.79	0.560	0.191	0.110	0.432	0.528	1.98	0.955	0.378	0.249	
0.551	0.513	0.481	0.444	0.80	0.564	0.193	0.111	0.436	0.531	2.00	0.960	0.381	0.250	
0.554	0.516	0.484	0.447	0.81	0.568	0.195	0.112	0.439	0.535	2.10			0.262	
0.556	0.519	0.487	0.450	0.82	0.572	0.197	0.113	0.443	0.539	2.20			0.275	
0.559	0.521	0.490	0.453	0.83	0.576	0.199	0.114	0.446	0.543	2.30			0.288	
0.561	0.524	0.492	0.456	0.84	0.580	0.201	0.116	0.449	0.547	2.40			0.303	
0.563	0.526	0.494	0.458	0.85	0.584	0.203	0.117	0.453	0.550	2.50			0.318	
0.566	0.529	0.497	0.461	0.86	0.588	0.205	0.118	0.456	0.554	2.60			0.333	
0.568	0.531	0.500	0.464	0.87	0.592	0.207	0.120	0.459	0.558	2.70			0.351	
0.571	0.534	0.502	0.467	0.88	0.596	0.208	0.121	0.462	0.561	2.80			0.369	
0.572	0.537	0.504	0.469	0.89	0.599	0.210	0.122	0.466	0.565	2.90			0.387	
0.574	0.539	0.507	0.471	0.90	0.602	0.212	0.123	0.469	0.568	3.00			0.405	