

国外弹簧钢 生产技术

朱应波 等 编译 祖荣祥 审校

冶金工业出版社

76.2614

9401159

国外弹簧钢生产技术

朱应波等 编译
祖荣祥 审校

(京)新登字 036 号

内 容 提 要

本书介绍了世界主要发达国家的弹簧钢生产、应用、科研和开发的情况。全书共分综述、译文和附录三部分,附录包括:文献题录索引及美国、日本、前苏联等国家的弹簧钢标准。译文部分收入冶炼及浇铸、压力加工、热处理、组织及性能、钢种开发等方面的文章共 48 篇,全面反映了先进的弹簧钢生产工艺流程及弹簧钢钢种开发现状。本书可供冶金行业弹簧钢生产技术人员及汽车行业的设计人员阅读和参考。

国外弹簧钢生产技术

朱应波等 编译

祖荣祥 审校

*

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号)

新华书店总店科技发行所经销

河北省阜城县印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 33 字数 792 千字

1993 年 10 月第一版 1993 年 10 月第一次印刷

印数 1~1,000 册

ISBN 7-5024-1286-7

TG·172 定价 35.00 元

编译者的话

本书是根据对冶金工业部下达给我公司的课题——“国外弹簧钢生产技术发展动态”进行调研的要求，查阅了自 1980 年以来国外有关弹簧钢方面的各种文献资料，并结合编译者的实际工作经验编译而成的。

全书分为综合论述、译文和附录三部分，附录包括文献题录索引和美、日及前苏联等国的弹簧钢标准。本书内容比较全面，基本反映了当前世界主要发达国家的弹簧钢生产、应用、科研和发展的概况，可为我国有关部门和人员提供有益的参考。

由于编译者水平所限，本书中可能存在错误和不妥之处，诚恳欢迎各界读者给予指正。

1993. 4.

序

这是一部关于国外弹簧钢发展动态的译文集。它较全面、系统地介绍了国外弹簧钢生产技术的最新进展。

1956年我国第一批“解放”牌汽车上的悬挂钢板弹簧用弹簧钢是由我公司生产的。从那时起，我公司对我国的弹簧钢产品质量、新品种开发作了大量工作，80年代中期我国汽车弹簧检测仲裁单位——第一汽车制造厂辽阳汽车弹簧厂曾对我国各主要特殊钢厂生产的弹簧扁钢做了单片疲劳试验，结果表明我厂弹簧钢质量名列前茅。但国内产品与日本相比，在性能稳定性和可靠性上差距还很大。

30多年来，我国弹簧钢大多沿用电炉双渣法冶炼，近几年虽然有些厂家研究了真空精炼、稀土和钙处理弹簧钢，但也只是处于试验阶段，远没有实现在线生产，而国外工业化国家，特别是日本早在70年代就实现了炉外精炼+连铸在线生产纯洁弹簧钢。除此之外，我国特殊钢厂在弹簧钢的轧制技术、控冷技术以及拔丝技术等方面都远落后于国外工业化国家。

为了借鉴国外弹簧钢的先进生产技术，改变我国特殊钢厂装备、技术落后的局面，冶金工业部下达给我厂“国外弹簧钢发展动态”调研课题。我们组织了有关专业的技术人员对大量专业文献进行检索、选题、翻译并请国内有关专家对译文集进行了审校，最终编译成这部文集。希望本译文集能为有关领导、科技工作者在发展我国特殊钢事业中提供有益的帮助。

本钢特殊钢公司	经 理	吴茂清
	副 经 理	宋东亮
	兼总工程师	

1993年2月

审校者简介

祖荣祥（1937年7月~），1965年毕业于清华大学冶金系金属材料专业，现为冶金部钢铁研究总院高级工程师。先后从事模具钢、结构钢、弹簧钢等合金钢的研究开发工作。在《金属学报》、《钢铁》、《金属热处理》等杂志发表三十余篇论文。并负责《高新技术的今天与未来》、《钢的质量现代进展》、《中国材料科学技术百科全书》、《机械工程手册》、《材料辞典》等书籍、手册有关章节的编写工作。

通讯地址：

北京市西直门外钢铁
研究总院
邮政编码：100081

目 录

● 综合论述	1
国外弹簧钢钢种现状及发展趋势	1
国外纯洁弹簧钢的生产工艺	13
国外优质汽车悬挂弹簧钢材的加工技术	25
弹簧钢材的表面缺陷及脱碳	35
● 译 文	43
☆ 冶炼及浇铸	43
优质汽车悬挂弹簧用线材的开发	43
采用新型钢包精炼工艺开发高级阀门弹簧钢	53
阀门弹簧用超纯洁钢	62
阀门弹簧钢的生产工艺	68
超纯洁阀门弹簧钢	74
在 100 t 电炉中冶炼弹簧钢工艺的改进	80
弹簧钢丝用钢的生产	84
弹簧钢钢丝的生产可行性	86
☆ 压力加工	91
改善型钢轧制精度	91
在发展中国家小型钢厂中轧制硅锰弹簧钢	95
SKF 钢厂的阀门弹簧钢线材生产	105
特殊钢及高级合金的线材轧制	116
直接拉拔用控冷铬硅线材	118
用铬硅钢线材制造阀门弹簧	122
用 SPM 生产变截面钢板弹簧	125
螺旋弹簧用新型锥形棒材的成形工艺	133
弹簧钢丝的拉丝技术	141
硅铬弹簧钢的铁素体脱碳	149
冷却条件对硅锰弹簧钢脱碳的影响	151
加热条件对高硅弹簧钢脱碳的影响	153
重要弹簧用盘条生产工艺的研究	155
弹簧钢缺陷分析	159
☆ 热处理、组织及性能	161
50X Γ 弹簧钢轧制在线热处理制度的研究	161
轧制在线热处理时 50X Γ 弹簧钢的组织形成	165
汽车用弹簧钢的形变热处理	167

淬火及热机械处理 60C2 钢在炉中及直接电阻回火后力学性能的对比	171
预备热处理或热机械处理对高温热机械处理后 50XΦA 钢丝性能的影响	174
感应热处理高强度弹簧钢丝的性能	178
感应加热淬火及回火弹簧钢的显微组织和力学性能	192
奥氏体晶粒度对感应加热淬火及回火弹簧钢力学性能的影响	201
感应加热回火对弹簧钢强韧性的影响	212
感应加热回火弹簧钢的显微组织特征	221
SAE9254 钢制弹簧的性能	230
Si-Mo 和 Si-Cr 弹簧钢的抗弹减性	240
影响弹簧钢抗弹减性的因素	247
铬对硅锰弹簧钢物理力学性能的影响	258
非金属夹杂物对超纯弹簧钢疲劳性能的影响	261
☆ 钢种开发	270
化学成分对高应力弹簧钢强度的影响	270
悬挂螺旋弹簧用低铬及无铬钢的试验研究	283
松弛抗力优良的汽车螺旋弹簧用钢	296
汽车悬挂弹簧用沉淀强化弹簧钢	308
抗弹减性优良的新型悬挂弹簧钢(SRS60)	321
具有优良抗弹减性和淬透性的弹簧钢	325
汽车用弹簧钢	336
耐久性和抗弹减性优良的弹簧钢	344
抗弹减性优良的汽车悬挂弹簧用钢的处理方法	350
高强度弹簧钢	362
阀门弹簧用低合金钢	368
● 附 录	374
附录 I 题录索引	374
附录 I 国外弹簧钢标准	399
A. 美国 ASTM 弹簧钢材及钢丝标准	400
B. 日本 JIS 弹簧钢材及钢丝标准	439
C. 前苏联 ГОСТ 弹簧钢材及钢丝标准	476
D. 德国 DIN 弹簧钢材标准	499
E. 法国 NF 弹簧钢材标准	509

● 综合论述

国外弹簧钢钢种现状及发展趋势

朱应波 (本钢特殊钢公司)

1. 引言

弹簧钢钢材用量最大的是制造汽车弹簧。1988年日本热轧弹簧钢钢材产量622930t,占特殊钢热轧材总产量16354146t的近4%^[1]。同年,日本生产弹簧总量623368t,其中热成形387329t(大型钢板弹簧230089t,螺旋弹簧93555t,扭转弹簧63685t),冷成形弹簧236039t(细丝弹簧48257t,座弹簧63264t,薄板弹簧86145t,盘簧5975t,弹簧垫圈32398t),汽车、摩托车所占份额为64.9%^[2]。

弹簧是在周期性的弯曲、扭转等交变应力下工作,经受拉、压、扭、冲击、疲劳、腐蚀等多种作用,有时还要承受极高的短时突加载荷。由于工作条件恶劣,对弹簧钢的性能要求也十分严格,不仅要有高的淬透性,保证整个弹簧截面获得均匀的显微组织、良好的力学性能(包括疲劳性能),而且要求脱碳倾向小,组织均匀细密等。

近来能源紧张,为了减轻汽车重量以节能,对弹簧钢也提出了新的要求。减轻悬挂弹簧重量的最有效方法是提高弹簧设计应力,因为在计算上,弹簧的重量与设计应力的平方成反比。而影响提高弹簧设计应力的两个最主要因素是抗疲劳和抗弹减性能,因而这两个因素成为当今弹簧钢钢种研究及试制的主题。

汽车弹簧要求指标最严格的是发动机阀门弹簧,要求工作时稳定可靠,具有良好的抗弹减性及高的疲劳强度。

本文首先介绍国外典型国家(美、日、德、前苏联)的弹簧钢钢种现状(所参阅标准为截止1991年12月31日正在使用的标准),并在淬透性、脱碳敏感性、抗弹减性、显微组织及力学性能等方面评价了现有弹簧钢。然后,阐述了最近国外弹簧钢钢种的开发情况。最后,简略指出了国外弹簧钢钢种的发展趋势。

2. 国外弹簧钢钢种现状

2.1 热轧弹簧钢现状

热轧弹簧钢主要用做制造钢板弹簧、及较大螺旋弹簧、扭转弹簧等。钢材主要有扁钢、

圆钢和线材。

2.1.1 美国

ASTM A689—81a (1988) 弹簧用碳素钢及合金钢棒材按化学成分进行钢的分类时, 其标准钢号为 AISI 系列的 1000, 4100, 5100, 6100, 8600 和 9200, 并包括 AISI 硼钢系列的 10B00, 15B00, 50B00 和 51B00。规定的钢号见标准 ASTM A322 和 A576, 而且可对标准的 AISI 钢号的化学成分进行调整, 以适合特殊钢材尺寸、弹簧形状和其他特殊需要所要求的淬透性。对按端淬淬透性要求交货时 (合金钢), 应在钢号后面加上大写字母 “H”。标准的合金钢号是 AISI 系列的 4100H、5100H、6100H、8600H 和 9200H, 以及包括 AISI 硼系列的 50B00H 和 51B00H。规定的钢号见标准 A304。

从上可知, 美国弹簧钢无论是种类还是数量都比较多。但经常使用的钢号是 9260、9254、6150、5160 和改进型 5160 等, 尤以 5160 (H) 和 9260 应用最广, 产量最大。目前, 美国弹簧钢之王是 5160 (H), 占弹簧钢产量的首位, 这大概是由于 Cr-Mn 钢比 Si-Mn 钢淬透性好和脱碳倾向小的缘故。

2.1.2 日本

日本弹簧钢标准 JIS G4801—84 中收入 9 个钢号。1984 年修订 JIS G4801 时, 由于弹簧钢 SUP4 没有什么实用价值而被删掉, SUP3 也只是做为铁道车辆板弹簧的补充使用。8 个合金弹簧钢号中, SUP6、SUP7 是 Si-Mn 钢, 特别是高硅的 SUP7 主要用于高应力的悬挂弹簧。SUP9、SUP9A 是 Mn-Cr 钢。和 SUP9 相比, 1977 年修订标准时取自美国钢号 SAE5160 的 SUP9A, 有较高的碳、锰、铬含量, 淬透性也更好, 适合用于较粗的悬挂弹簧。SUP10 是 Cr-V 钢, 钢的韧性好, 是适用于使用条件恶劣的弹簧钢。SUP11A 是对 SUP9 进行硼处理的弹簧钢, 具有更好的淬透性, 可用于 35mm (扁钢 24mm 厚) 的粗弹簧。1984 年新订标准中引进了两个新牌号: SUP12 (SAE9254) 是 Si-Cr 钢, 抗回火性和抗脱碳性好, 用于高应力悬挂弹簧。SUP13 (SAE4161) 是 Cr-Mo 钢, 淬透性非常好, 可用于直径超过 60mm 的超大型弹簧。由上述情况可看出弹簧钢的一种发展趋势, 即提高淬透性, 通过更完全的淬火回火处理效果获得更高的硬度。各钢号的淬透性列于表 1^[3]。

表 1 各种弹簧钢的淬透性

钢 号	中心可获大约 80% 马氏体时钢材淬火的最大尺寸 mm	
	板 厚	直 径
SUP3	8	12
SUP6	8	12
SUP7	14	20
SUP9	18	28
SUP9A	22	33
SUP10	27	40
SUP11A	24	35
SUP12	24	35
SUP13	47	70

另外,为适应汽车减轻重量的要求,日本汽车工业技术协会标准(JASO)在1984年也增加了SUP7、SUP12。这两种钢均含有较高的硅,而硅能显著提高弹簧钢的弹性减退抗力。日本过去大量使用的SUP6在882MPa(90kgf/mm²)下使用已是极限应力值了。而最近采用高硅的SUP7(相当于SAE9260)改善了耐疲劳性,可在980MPa(100kgf/mm²)应力值下使用。大原三男等⁽⁴⁾在SUP9A(SAE5160)基础上加入硅进行材料的各项试验。结果表明:从抗弹减性、脱碳性能两个方面来看,硅含量1.5%的SAE9254钢是抗弹减性最佳的高应力弹簧钢。

2.1.3·德国

1988年修订的DIN17221标准中,将原DIN17221—72中的51Si7删掉,增加了54SiCr6,其他钢号未变,成分最明显的变化是磷、硫限制加严,分别为0.030%和0.030%。

表2是除低碳的38Si7之外的弹簧钢的端淬数据。表3是钢的淬透性的极限尺寸。可知,德国标准中弹簧钢号虽少,但淬透性组距分布合理,完全满足现有汽车弹簧的生产要求。

表2 顶端淬火试验淬透性测试硬度的极限值(在850℃淬火),HRC

钢 种		范 围	距 淬 火 端 距 离															
钢 号	材 料 号		1.5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50	
54SiCr6 ^①	1.7102 ^①	最 高 最 低	67 57	66 56	65 55	63 50	62 44	60 40	57 37	55 35	47 32	43 30	40 28	38 26	37 25	36 24	35 24	
60SiCr7 ^①	1.7108 ^①	最 高 最 低	68 60	68 59	67 57	65 54	63 48	61 45	60 42	58 39	51 35	46 32	43 31	41 30	39 29	39 28	38 28	
55Cr3 ^①	1.7176 ^①	最 高 最 低	67 59	67 58	66 56	65 55	64 55	63 53	62 49	61 44	56 39	53 32	49 30	46 28	43 26	41 24	40 23	
50CrV4	1.8159	最 高 最 低	65 57	65 56	64 56	64 55	63 53	63 52	63 50	62 48	62 44	62 41	61 37	60 35	60 34	59 33	58 32	
51CrMoV4 ^①	1.7701 ^①	最 高 最 低	67 58	67 58	67 58	67 58	67 58	67 58	67 58	67 58	66 56	66 56	66 56	65 55	65 54	65 53	64 52	

① 这些钢的洛氏硬度C的极限值是暂定的。

表3 钢的淬透性的极限尺寸^①

钢 种		淬 火		淬火后芯部最低硬度值	最大 规格	
					扁钢(厚度)	圆钢(直径)
钢 号	材料号	温 度	介 质	HRC	mm	
38Si7	1.5023	830~860	水	56		
54SiCr6	1.7102	830~860	油 ^②	56	12 ^③	18 ^③
60SiCr7	1.7108	830~860	油	56	14 ^③	22 ^③
55Cr3	1.7176	830~860	油	56	14 ^③	22 ^③
50CrV4	1.8159	830~860	油	56	20 ^③	30 ^③
51CrMoV4	1.7701	830~860	油	56	35 ^③	60 ^③

① 摘自DIN17221—88表5。

② 淬火时使用高效淬火油。

③ 如果限定化学成分能使端淬曲线在表2分散带上部2/3内,即可获得本表中所给出的最大规格。

2.1.4 前苏联

前苏联钢铁标准 ГОСТ14959 中罗列出 25 个钢号, 其中碳素弹簧钢 5 个, 合金弹簧钢 20 个。主要钢号有 65Г, 55С2, 55СТ, 60С2 (А), 60С2Г, 50ХТФ, 60С2ХА 等。多数为 Si-Mn 钢系列。

2.2 弹簧钢丝现状

2.2.1 美国

美国弹簧钢丝标准 (ASTM 标准) 包括碳素与合金两大类及冷拉与油淬火两部分, 主要有 10 个标准。合金弹簧钢丝可退火和冷拔状态, 或为油淬火状态, 其中以油淬火部分为主, 规定明确、严格, 而对冷拉部分要求较松, 表明了合金弹簧钢丝方面以油淬火状态供货为主的趋势。由于硅锰合金弹簧钢对脱碳敏感, 并易产生石墨碳, 所以美国没有采用这种钢。

2.2.2 日本

日本 JIS 标准中钢丝分类见表 4。其中, 琴钢丝及硬钢丝经过铅浴淬火处理得到细珠光体组织, 冷加工成形达到弹簧所需的强度和韧性。油淬火钢丝是在钢丝生产的最后阶段作连续淬火回火处理, 获得规定的力学性能。

表 4 弹簧钢丝分类

冷加工钢丝	JIS G3522 琴钢丝 (SWP-A, SWP-B, SWP-V)
	JIS G3521 硬钢丝 (SW-A, SW-B, SW-C)
	JIS G4314 不锈钢丝
	(SUS302-WPA, WPB, SUS304-WPA, WPB, SUS316-WPA, SUS631J I-WPC)
热处理钢丝	JIS G3560 弹簧用碳素钢油淬火钢丝 (SWO-A, SWO-B)
	JIS G3561 阀簧用碳素钢油淬火钢丝 (SWO-V)
	JIS G3565 阀簧用 Cr-V 钢油淬火钢丝 (SWOCV-V)
	JIS G3566 阀簧用 Si-Cr 钢油淬火钢丝 (SWOSC-V)
	JIS G3567 弹簧用 Si-Mn 钢油淬火钢丝 (SWOSM-A, SWOSM B, SWOSM C)
	JIS G3568 弹簧用 Si-Cr 钢油淬火钢丝 (SWOSC)

2.2.2.1 阀门弹簧钢丝

汽车和摩托车用阀门弹簧钢丝有 SWP-V, SWO-V, SWOCV-V 及 SWOSC-V, 随着发动机转数增加, 以及伴之的工作温度升高, 耐疲劳、耐热性优良的 SWOSC-V 用量不断增加。

2.2.2.2 悬挂弹簧用钢丝

汽车和摩托车的悬挂弹簧逐渐由热成形改为冷成形, 所用钢种原为 SUP6, 现在则多用 SUP7 或 SUP12, 钢丝的强度极限达 1764~1960MPa (180~200kgf/mm²)。

2.2.3 前苏联

前苏联虽主要有四个弹簧钢丝标准 (ГОСТ 9389, 15598, 1071, 14963), 但包括的品种较多; 仅一个合金弹簧钢丝标准 ГОСТ 14963—78 就包括了铬钒、硅锰两钢种四个钢号、三种分类十个类别, 标准很繁琐、内容杂乱。前苏联 ГОСТ 1071—81 油淬火弹簧钢丝品种

很不齐全,仅有 65ГA, 68ГA, 68A 和 51XΦA 几个钢号,1988 年修订后也只增加了 70XГΦA 一个钢号,标准水平也不高,这也反映了前苏联油淬火弹簧钢丝的生产、使用与世界先进水平尚有较大差距。

3. 现有弹簧钢钢种的评价

3.1 淬透性(带)

钢材淬透性的高低决定了能够制造弹簧的最大直径或厚度。现有弹簧钢的淬透性高低不等,形成了较完整的淬透性系列,这对悬挂弹簧尤为重要,可以满足各种规格弹簧的不同要求。

以日本的弹簧钢为例,淬透性由低至高的次序为: SUP3、SUP6、SUP7、SUP9、SUP9A、SUP11A、SUP12、SUP10、SUP13。淬火中心得到 80% 以上马氏体组织的钢材直径(厚度), SUP6 为 12 (8) mm, SUP7 为 20 (14), SUP9 28 (18), SUP9A 33 (22), SUP10 40 (27), SUP11A 35 (24), SUP12 35 (24), SUP B70 (47)。含铬系钢的淬透性一般都高于 Si-Mn 钢,这主要是由于铬提高淬透性作用比硅强,如含量约为 1% 时,硅的淬透性系数约为 1.7,铬却高达 3.1,几乎相当于硅的两倍。以 Si-Mn 系的 SUP7 和 Cr-Mn 系的 SUP9A 为例,它们的 C-Mn 含量实际上是一样的 (0.55~0.65% C, 0.70~1.00% Mn),只是硅、铬含量不同, SUP7 高出 SUP9A 的硅含量几乎是 SUP9A 铬含量的两倍,但 SUP9A 淬透性仍高于 SUP7,说明铬、锰联合的优点。因此,日本热成形弹簧中,细簧使用 SUP6 或 SUP7,而 SUP9 或 SUP9A 一般用来制造直径或厚度较大的弹簧,保证弹簧截面上组织和性能的均匀稳定。

微量硼可极大地提高淬透性,取代大量的合金元素,微量硼处理的 SUP11A 可制造超大型弹簧,推荐的最大直径约 60mm。如果制造直径大于 60mm 的弹簧,需要淬透性更高的材料,可用相当于 SAE4161 的 SUP13 钢。研究及使用结果表明用 SUP13、SAE4161 钢制造直径 70mm 的螺旋弹簧和厚度 47mm 的板簧,在淬透性上完全没有问题。目前尚未提出对弹簧钢更高的淬透性要求。

实际上,由于化学成分波动,生产及处理方法的不同,同一钢号的弹簧钢的淬透性会在一定范围内波动,形成淬透带。美、欧各国弹簧钢标准规定了可按淬透带供货,并明确给出了淬透带曲线或数据。

3.2 脱碳倾向

脱碳使钢的表面硬度下降,影响弹簧的疲劳寿命和弹性减退抗力等,所以希望弹簧钢脱碳敏感性愈小愈好。

碳和锰含量相同的 Si-Mn 和 Cr-Mn 钢,在不同温度下加热 30min 后测定脱碳层深度,证明 Si-Mn 钢比 Cr-Mn 钢更容易脱碳(图 1)^[6]。经 1200℃ 加热后, Cr-Mn 钢脱碳层深度 0.5mm 左右, Si-Mn 钢深为 0.7mm 左右。这主要是由于硅提高钢中碳活度,增加钢的脱碳倾向;而铬可降低钢中碳活度,另外,铬又是碳化物形成元素,提高了钢中碳扩散的激活能,减轻了钢的脱碳倾向。

弹减抗力好的高硅含量的 Si-Mn 弹簧钢脱碳敏感性较大,国外有向这个系列钢中添加低量铬,或者少量钒、铌、钼的倾向,以改善现有弹簧钢的脱碳敏感性。意大利的 H. Berns 等^[6]的研究结果表明:弹簧钢 (60SiCr7) 寿命与由硅引起的脱碳成反比,增加合金元素铬

可以降低硅对脱碳的不良作用。印度 V. Prakash^[7]向 Si-Mn 钢中加入 0.5%Cr, 结果提高屈服强度 16%, 淬透性和脱碳敏感性明显改善。

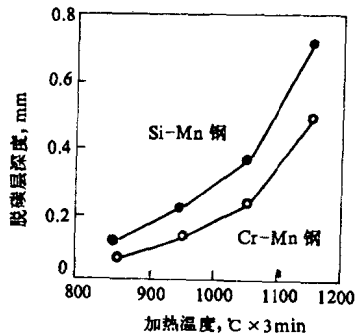


图 1 Si-Mn 钢和 Cr-Mn 钢脱碳倾向试验结果^[5]

3.3 抗弹减性

所谓弹性减退是指弹簧在静载荷或动载荷的作用下, 在室温发生塑性变形和弹性模量降低的一种现象。为了保证弹簧的正常工作, 特别是在提高弹簧的设计应力时, 弹簧钢必须有良好的抗弹减性。H. J. Tata 等^[8]用电子显微镜研究了 9260 和 5160、15B62 钢的抗弹减性, 发现 9260 钢的碳化物比其余两种钢的碳化物更细, 间距更小, 因而抗弹减性提高。硅可最有效地固溶强化基体, 而且提高钢中硅含量可使碳化物细化, 间距缩小, 因而提高抗弹减性。铬没有这种作用, 相反却恶化抗弹减性。故 Si-Mn 钢的抗弹减性优于 Cr-Mn 钢。S. T. Furr 等^[9]用扭转试验测出的 SAE9260 和 5160 钢的动态抗弹减性可充分证明这一点(图 2)。

关于提高抗弹减性作用最大的含硅量, 各研究者报导的数值并不完全相同。H. Kawakami 等^[10]研究了化学成分对抗弹减性的影响, 结果证明, 硅有利于抗弹减性的提高, 而且有一个最佳含量, 在 Si-Cr、Si-Cr-V 钢中硅为 1.5% 时作用最大。新仓等^[11]认为 Si-Mn 钢中硅含量为 2.2% 时作用最大(说明 SUP7 是现有弹簧钢中抗弹减性最高的)。F. Borik 等^[12]发现在 0.29~2.26%Si 范围内硅的作用随其含量增加而提高, 这与新仓等的结果基本相同。

由于 Cr-Mn 钢抗弹减性能较低, 可以从成分上加以改进, 如在 SUP9A 中加入适量硅(1.5%Si)后, 弹性减退抗力提高, 可在高应力状态下使用^[4]。因此, 日本 1984 年修订 JIS 弹簧钢标准时, 增加了相当于 SAE9254 的 SUP12。日本汽车工业技术协会标准(JASO)也在 1984 年增加了 SUP7、SUP12。值得注意, Si-Cr 钢 SUP12 (SAE9254) 既吸收了 Si-Mn 钢的良好抗弹减性能, Cr-Mn 钢的高淬透性, 又克服了 Si-Mn 钢的易脱碳倾向, 是一种极有发展前途的弹簧钢。联邦德国 1988 年修订弹簧钢标准时去掉了一个 Si-Mn 钢, 增加了一个 Si-Cr 钢 54SiCr6 也客观反映了这种趋势。

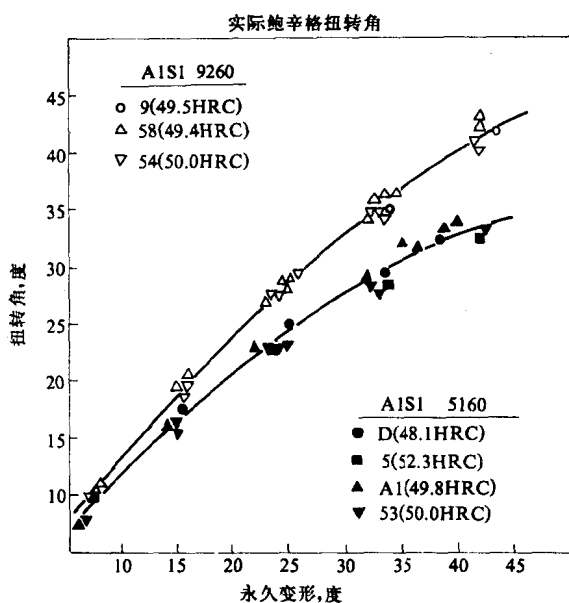


图2 扭转试验测定的抗弹减性^[9]

3.4 显微组织和力学性能

Si-Mn 钢，特别是硅含量较高时，高温加热易使奥氏体晶粒长大，淬火组织也较粗大，对塑性、韧性是不利的。硅还促进石墨化，当硅量较高且不含强碳化物生成元素时，在退火和回火中都极易石墨化。但硅能大大提高弹性极限、屈服强度、屈强比、疲劳强度和疲劳强比 (σ_{-1}/σ_b)。一般说强度上升则冲击值降低，但硅却能抑制这种现象。如 SAE9254 在 HBD2.70 时的夏比冲击值可达到 SUP9 在 HBD2.80 时的水平。

Cr-Mn 钢的组织较细，综合力学性能较好，耐蚀性也好，但在高硬度下韧性下降的趋势较明显，这是值得注意的。另外，铬促进回火脆化的作用远比硅强，故 Cr-Mn 钢的回火脆性比较大。

4. 国外弹簧钢钢种发展动向

4.1 悬挂弹簧用钢

4.1.1 钢板弹簧用钢

对于钢板弹簧用钢，近年来在增加设计应力，提高弹簧寿命的可靠性方面的要求有所加强，但没有推出新的钢种。由于炉外精炼的飞速发展，国外目前的超纯净钢已能满足这方面的要求。

4.1.2 螺旋弹簧用钢

国外汽车悬挂弹簧钢中的螺旋弹簧用钢，为了适应高应力的要求，较好地采用了控制位错移动、固溶强化、沉淀强化、晶粒细化技术。添加硅对固溶强化最有效，抗弹减性随

硅含量的增加而提高。高硅的 SUP7、SAE9260, SUP12、SAE9254 等钢种已大量生产。

汽车减轻重量, 相应要求悬挂弹簧在不断提高的应力条件下使用。现有弹簧钢在这种高应力下会出现疲劳寿命降低和弹性减退两个问题, 因此, 开发高性能弹簧钢迫在眉睫。试验证明, 像 SUP7、SAE9260 这类钢的含硅量已达到最高值, 再靠提高硅含量来增加抗弹减性是很困难的。要开发抗弹减性超过上述钢, 而且综合性能优良的新材料, 必须寻找新的途径。

神户制钢的研究人员^[10,13,14]在对 Si-Cr、Si-Cr-Mo、Si-Cr-V 系钢全面性能进行了试验后发现, Si-Cr-V 系的抗弹减性最高。同时考虑到淬透性、脱碳敏感性等方面的要求, 最后定出一种新弹簧钢 SRS60 (0.60% C、1.50% Si、0.50% Mn、0.50% Cr、0.2% V)。其主要特点是:

(1) 抗弹减性优于 SUP7, 在 1078MPa (110kgf/mm²) 应力时弹减量相当于 SUP7 在 980MPa (100kgf/mm²) 应力下的弹减量, 故可制造应力大于 SUP7 的弹簧。

(2) 抗脱碳性能比 SUP7 更好。

(3) 用现有钢中疲劳性能最好的 SAE9254 和 SRS60 制成弹簧的疲劳试验对比结果表明, 后者更好, 可以提高弹簧设计应力。

(4) 淬透性与 SUP7 大致相当, 制造悬挂弹簧是没有问题的。

(5) 与 SUP7 相比, 热轧后延性很好, 故拉拔等二次加工性能良好。

SRS60 从 1983 年开始生产, 代替现有弹簧钢, 可使悬挂弹簧减轻重量 15~30% 左右。

神户制钢还在美国申请了一项专利^[15], 发明了一种由 0.5~0.7% C, 1.0~1.8% Si, 0.1~1.0% Mn, <0.7% Cr, 0.03~0.5% V, 以及每种含量 0.02~0.1% 的 Al、Zr、Nb 及 Ti 中至少一种组成的弹簧钢钢丝, 用来制造汽车悬挂螺旋弹簧。这种钢的抗弹减性及耐腐蚀疲劳性能优良。

爱知钢厂也在美国及英国申请了几项专利^[16,17,18]开发出一种抗弹减性和淬透性良好的弹簧钢。主要含有 0.50~0.80% C, 1.50~2.50% Si, 0.50~1.50% Mn, 以及 0.05~0.5% V、0.05~0.5% Nb 和 0.05~0.5% Mo 中的一种或数种。这种钢还可含有 0.0001~0.001% B, 0.20~1.00% Cr 及不大于 0.008% N 的一种或几种。其中, 相当于在 AISI9260 或 JIS SUP7 钢中加入铌和钒的新型弹簧钢^[19,20,21,22]的淬透性、抗弹减性和疲劳性能都好于 SUP7, 可减轻悬挂弹簧重量 15%, 自 1982 年该钢用于一些日本新车型中, 用量逐年上升。

另一种淬透性和弹减抗力皆佳的弹簧钢^[23,24]是由 0.5~0.8% C, 1.5~1.8% Si, 1.6~2.5% Mn, 以及一种或多种 0.05~0.50% V, 0.05~0.50% Nb 和 0.05~0.50% Mo 合金元素组成的。这种钢还可含一种或多种 0.0005~0.01% B, 0.2~1.0% Cr, 0.2~2.0% Ni, 及不大于 0.3% 的稀土元素, 以及(或者)一种或多种 0.03~0.1% Al, 0.02~0.1% Ti 及 0.02~0.1% Zr, 以进一步提高淬透性, 改善韧性和细化奥氏体晶粒。

大同特殊钢的饭久保知人等通过控制合金元素碳、硅、镍、钼和钒完成了一项有关用 4340 型超高强度钢制做螺旋弹簧的重点研究^[25], 开发出了一种抗弹减性、断裂韧性和疲劳性能比常规弹簧钢更好的 RK360 (0.4% C-2.5% Si-0.8% Mn-2% Ni-0.85% Cr-0.4% Mo-0.2% V), 可用于设计应力超过 1176MPa (120kgf/mm²) 的螺旋弹簧。

最近, 文献〔26〕对这种成分弹簧钢的各种性能特点做了进一步研究。文献〔26〕将其牌号改写为 ND250S, 成分与 RK360 大致相同。为了保证钢的韧性, 将碳含量限制在

0.4%以下，并添加镍、铝，加入钒可细化晶粒，改善抗弹减性，加入硅和铝也是为了改善抗弹减性。性能试验结果表明：

- (1) ND250S 钢的抗弹减性优于 SUP7；
- (2) ND250S 钢的临界应力强度因子范围大于 SUP7，表明有更高的缺口韧性；
- (3) 在大气中的疲劳寿命和腐蚀疲劳寿命都好；
- (4) 出现腐蚀坑和腐蚀坑的扩展均小于 SUP7；
- (5) 抗延迟断裂能力优于 SUP7，喷丸处理后，在夹紧应力为 1247MPa (130kgf/mm²) 的作用下，2000h 也未折断。

证明 ND250S 有很好的性能，可做为 1274MPa (130kgf/mm²) 级高强度弹簧钢使用。

美国专利 5009843^[27] 也介绍了一种抗疲劳性能和抗弹减性优良的低碳弹簧钢：0.35~0.55%C，1.80~3.00%Si，0.50~1.50%Mn，0.50~3.00%Ni，0.10~1.50%Cr，0.01~0.05%Al 和 0.010~0.025%N。

和其他钢类一样，降低钢中的铬、铝等重要元素的含量是弹簧钢的主要发展方向之一。

伯利恒钢厂的 S. T. Furr^[28] 实验研究了悬挂螺旋弹簧用低铬和无铬钢，来代替汽车悬挂螺旋弹簧最普通用钢 AISI5160 和其改进型的 5160 钢。如果立即代替，5160 最合理的代用品为 15B62，改进型 5160 和 5160 代用钢为一种 F₁ 钢，化学成分见表 5。15B62 的优点是经过汽车悬挂螺旋弹簧的使用验证，具有和 5160 相同的抗弹减性及大致相同的淬透性。代号 F₁ 钢的成分和改进型 5160 钢的相近，因此，使用风险小，具有和改进型 5160 相同的抗弹减性和略低于改进型 5160 的淬透性。

表 5 现有代用钢的化学成分

代 号	C	Mn	Si	Cr	B _{最小}
15B62	0.55~0.66	1.10~1.40	0.40~0.60		0.0005
F ₁ 型	0.56~0.64	0.75~1.00	0.70~1.10	0.25~0.40	

如果要求代用钢具有满意的抗弹减性，可选用碳钢（成分大致范围是 0.57~0.66%C，1.5%Mn，0.40~0.70%Si）和含 1%Si 钢（成分大致是 0.65%C，1.50%Mn，1.0%Si）。前者的抗弹减性与 5160 大致相当或稍好，而后者则高于 5160 钢。考虑到淬透性要求，可把化学成分范围规定为如表 6 所示的范围。

表 6 设计代用钢的化学成分

代 号	C	Mn	Si	Cu
碳 素	0.57~0.67	1.35~1.65	0.40~0.60	0.20~0.40
合 金	0.56~0.64	1.30~1.60	0.70~1.10	

美国钢公司也开发出一种价格低于 9260，抗弹减性优于 5160 的新弹簧钢 GM1.0Si（成分大致为 0.6%C-0.9%Mn-1.0%Si-0.55%Cr^[29]）。自 1977 年，这种钢用于通用汽车公司生产的几种轿车的前螺旋弹簧，而且还少量用做后悬挂螺旋弹簧。