

钒硅锰系弹簧钢 35SiMnVB 的疲劳性能

邓通武

(攀钢集团研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 攀枝花 617000)

摘要 研究测试了 35SiMnVB 钢含钒硅锰系弹簧钢和常用的 60CrMn 钢的组织、性能、高频疲劳性能, 以及用于给定车型钢板弹簧总成的工艺性能和台架疲劳寿命, 结果表明, 35SiMnVB 钢具有良好的强韧性匹配, 比 60CrMn 钢的具有更高的高频疲劳寿命、更优的工艺性能, 台架疲劳寿命全部在 15 万次以上, 各项指标均达到该车型钢板弹簧总成的技术要求。

关键词 钒 弹簧钢 疲劳性能

Fatigue Properties of Vanadium-Silicon-Manganese Spring Steel 35SiMnVB

Deng Tongwu

(PanGang Group Research Institute Co Ltd, State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000)

Abstract The microstructure, mechanical properties, high-frequency fatigue properties of vanadium-containing silicon-manganese 35SiMnVB spring steel, as well as the process performance and fatigue life of the plate spring assembly for a certain auto model and the commonly used 60CrMn steel were studied and tested. The comparison shows that 35SiMnVB steel has good strength-toughness matching, higher high frequency fatigue life and better process performance than that of 60CrMn steel, and the fatigue life of the bench is more than 150 000 times to meet the technical requirements of rear leaf spring assembly of a auto model.

Material Index Vanadium, Spring Steel, Fatigue Performance

钢板弹簧是一种常见的弹性元件, 主要用于汽车的非独立悬架中, 它传递垂直载荷和其他的作用力及力矩, 并抑制、缓和由冲击载荷引起的振动, 保证车辆正常行驶^[1]。钢板弹簧主要分为等厚度、宽度不变的传统多片钢板弹簧和等宽度、厚度呈现两端薄、中间厚的变截面钢板弹簧。而变截面少片钢板弹簧是指少片(1~4片), 并且在片的长度方面上中心较厚两端逐渐减薄, 即厚度沿其全长是变化的, 接近等强度梁的钢板弹簧^[2]。为减轻汽车钢板弹簧的自重和改善汽车的平顺性, 在汽车上越来越多地采用变截面少片钢板弹簧^[3]。与传统多片钢板弹簧相比, 所承受的应力更大, 弯曲应力可高达 1 100 MPa 以上, 对弹簧用钢的性能要求也更高, 尤其要求具有良好的强韧性配合和高的疲劳寿命。在《钢板弹簧》标准(GB/T19844-2005)中要求在应力幅为 323.62 MPa, 最大应力为 833.57 MPa 的试验条件下, 钢板弹簧总成的疲劳寿命应不小于 8 万次, 而国内新设计的某车型的变截面少片钢板弹簧总成的疲劳寿命要求不小于 15 万次。为此, 本研究测试了一种低碳含钒硅锰系弹簧钢的组织 and 性能特点,

尤其是高频疲劳性能和实物台架疲劳寿命, 以寻求一种综合性能优良的变截面少片弹簧用材料, 满足汽车用弹簧的需求。

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

试验材料为 35SiMnVB 钢, 同时选取了典型的 60CrMn 钢板弹簧用钢作为对比, 试验钢化学成分见表 1。与 60CrMn 钢相比, 35SiMnVB 钢的特点是低碳、高硅、高锰、含钒和硼, 无铬。

35SiMnVB 钢和 60CrMn 钢的试验材料均采用以下工艺制备: 120 t 顶底复吹转炉冶炼 → LF 精炼 → RH 真空处理 → 连铸(铸坯规格: 360 mm × 450 mm) → 蓄热式步进加热炉加热 → 轧制扁钢(扁钢规格: 厚 6~30 mm × 宽 70 mm)。

1.2 试验方法

(1) 金相及力学性能检验

采用金相显微镜和拉伸试验机对试验钢的金相组织和力学性能进行检验和测试。

(2) 高频疲劳试验

表 1 试验钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steels/%

钢种	C	Si	Mn	Cr	V	B	P	S	O	N
35SiMnVB	0.36	1.15	1.27	0.01	0.100	0.001 6	0.022	0.010	0.001 1	0.004 2
60CrMn	0.60	0.30	0.95	0.85	0.004	0.000 2	0.015	0.017	0.001 2	0.003 7

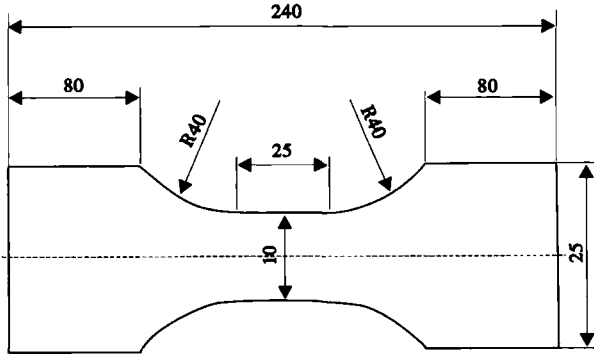


图 1 高频疲劳试样图

Fig. 1 Diagram of high frequency fatigue sample

试验钢在 PLG-100C 高频疲劳试验机上进行疲劳试验,试验周次为 107,应力比为 0.1,直到试样断裂以获得疲劳极限应力。高频疲劳试样如图 1 所示。

(3) 台架疲劳试验

用试验钢制作的某车型变截面少片钢板弹簧总成进行。台架疲劳试验按 QC/T29103-1992 进行,疲劳试验加载的平均变形为 92 mm(由预加负荷 350 kg 对应变形量);振幅为 ±85 mm;要求疲劳寿命 ≥15 万次。

2 试验结果和讨论

2.1 组织和性能检验

试验钢热轧状态下的硬度、脱碳层深度、显微组织、晶粒度、非金属夹杂物等检验结果见表 2。可见,两种试验钢热轧状态均为 F + P 组织;35SiMnVB 钢的晶粒度在 7.0 级以上,比 60CrMn 钢高 1 ~ 1.5 级;脱碳层深度方面,同规格的 35SiMnVB 钢比 60CrMn 钢降低了 0.07 mm 以上;热轧状态硬度方面,35SiMnVB 钢比 60CrMn 钢低 70 HB 以上;其夹杂物评级结果基

本相当,各类夹杂物均 ≤1.0 级。

2.2 高频疲劳极限

试验钢高频疲劳试验结果见表 3,同时比较了喷丸和未喷丸的情况。

从表 3 可见,35SiMnVB 钢比 60CrMn 钢的疲劳寿命高约 30 MPa 左右;就同一钢种而言喷丸比未喷丸的疲劳寿命略高。

2.3 工艺性能

(1) 冷加工工艺性能

35SiMnVB 钢比 60CrMn 钢的热轧状态硬度低(见表 2),因此下料、冲孔等冷加工性能更加优良,且下料刀片和冲头消耗少,能够有效避免崩刃,生产时也更为安全。

(2) 热加工工艺性能

35SiMnVB 钢的碳含量低,热变形抗力低。因此,卷耳、轧锥的抗力也低,有利于表面质量的控制。

(3) 热处理工艺性能

35SiMnVB 钢和 60CrMn 钢的热处理工艺(淬火、回火)及组织、硬度见表 4。35SiMnVB 钢回火组织为屈氏体 + 回火马氏体,60CrMn 钢回火组织为屈氏体,两种钢回火后的硬度相当,约为 45HRC。

可见,35SiMnVB 钢在 860 ~ 900 °C 淬火后,均可获得条状马氏体组织。由于淬火后得到的是条状马氏体,因此,当组织略为变粗亦对性能基本没有影响,表明其热处理工艺性能良好。热处理后的金相组织形貌见图 2 和图 3。

(4) 脱碳敏感性

表 5 为用两种试验钢制造的弹簧片经淬火后的脱碳层深度检验结果。可见,35SiMnVB 钢的脱碳层深度在 0.07 ~ 0.16 mm,60CrMn 钢的脱碳层深度在

表 2 试验钢组织、硬度及非金属夹杂物检验结果

Table 2 Testing result of microstructure, hardness and non-metallic inclusions of test steels

钢种	规格/ mm × mm	显微组织	晶粒度/ 级	脱碳层深 度/mm	热轧状态 HB 硬度值	非金属夹杂物评级/级			
						A	B	C	D
35SiMnVB	6 × 70	F + P	7.5	0.05	230	1.0	0.5	0	0.5
	7 × 70	F + P	7.5	0.07	230	0.5	0.5	0	0.5
	16 × 70	F + P	7.0	0.11	220	1.0	0.5	0	0.5
60CrMn	6 × 70	F + P	6.0	0.15	310	1.0	0.5	0	0.5
	7 × 70	F + P	6.0	0.14	310	1.0	0.5	0	0.5
	16 × 70	F + P	6.0	0.28	290	0.5	0.5	0	0.5

表 3 试验钢的疲劳极限应力

Table 3 Fatigue limit stress of test steels

钢种	表面条件	极限应力/MPa
35SiMnVB	未喷丸	473
	喷丸	499
60CrMn	未喷丸	448
	喷丸	453

0.12 ~ 0.36 mm, 相比较, 35SiMnVB 钢的脱碳敏感性更小。

2.4 台架疲劳试验

作为广泛应用在汽车上的板簧, 疲劳断裂是板簧失效中最重要的一种, 且疲劳断裂前没有明显的变形。因此, 板簧的抗疲劳性能是保证板簧的高强度和具有较长使用寿命的重要指标^[4]。为了在实

表 4 试验钢热处理后的组织、硬度检验结果

Table 4 Testing result of microstructure and hardness of test steels after heat treatment

钢种	淬火温度/℃	HRC 硬度值		淬火组织	回火温度/℃	回火		规格/ mm × mm
		表面	中心			HRC 硬度	组织	
35SiMnVB	800 ~ 900	55	55	板条马氏体	400 ~ 420	45	屈氏体 + 回火马氏体	6 × 70
	880 ~ 900	55	55		400 ~ 420	45		7 × 70
	880 ~ 900	55	54		400 ~ 420	45		16 × 70
60CrMn	840 ~ 860	61	61	板条 + 片状马氏体	470 ~ 500	44	屈氏体	6 × 70
	840 ~ 860	61	61		470 ~ 500	44		7 × 70
	840 ~ 860	58	56		470 ~ 500	44		16 × 70
	840 ~ 860	58	56		470 ~ 500	44		16 × 70

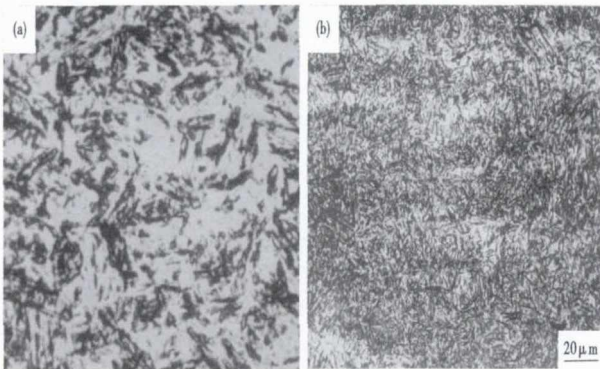


图 2 35SiMnVB 钢(a)和 60CrMn 钢(b)860 ~ 900 °C 淬火组织形貌

Fig.2 Morphology of structure of steel 35SiMnVB (a) and steel 60CrMn(b) quenched at 860 ~ 900 °C

车设计阶段就能快速、准确地提取弹簧总成性能数

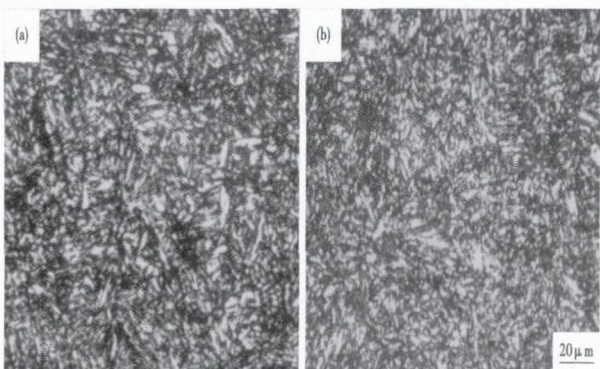


图 3 35SiMnVB 钢(a)和 60CrMn 钢(b)860 ~ 900 °C 淬火, 400 ~ 420 °C 回火组织形貌

Fig.3 Morphology of structure of steel 35SiMnVB (a) and steel 60CrMn(b) quenched at 860 ~ 900 °C and tempered at 400 ~ 420 °C

据, 往往需要进行台架疲劳试验, 精确模拟弹簧总成在实际工况中的运动轨迹及受力状况。

采用 35SiMnVB 钢和 60CrMn 钢各制造了三副弹簧总成进行台架疲劳对比试验。相关技术指标按 QCn29035-1991 进行检验, 台架疲劳试验按 QC/T29103-1992 进行。疲劳试验加载的平均变形: 92 mm (由预加负荷 350 kg 对应变形量); 振幅: ±85 mm。试验结果见表 6。可见, 35SiMnVB 钢的疲劳寿命均在 15 万次以上, 而 60CrMn 钢均在 10 万次以下, 结果表明, 35SiMnVB 钢达到了该型弹簧总成的技术指标要求。

钢板弹簧的疲劳寿命除了与弹簧总成的设计、钢材纯净度、表面质量等因素有关, 还受到组织、脱碳层等因素的影响。表面脱碳是影响弹簧性能的主要因素之一, 研究表明, 钢材表面脱碳 0.1 mm 就会使其疲劳强度明显下降^[5]。35SiMnVB 钢中加入了适量的钒, 降低了钢中碳的活度, 从而降低了钢的脱碳敏感性; 钢中的硼, 可以吸附在奥氏体界面, 降低了晶界作为扩散通道的作用而降低钢脱碳敏感性,

表 5 35SiMnVB 钢和 60CrMn 钢在热处理后脱碳层深度/mm

Table 5 Depth of decarburization of steel 35SiMnVB and steel 60CrMn after heat treatment/mm

钢种	规格	脱碳层深度	标准规定值
35SiMnVB	6 × 70	0.07	≤ 0.18
	7 × 70	0.11	≤ 0.21
	16 × 70	0.16	≤ 0.40
60CrMn	6 × 70	0.12	≤ 0.18
	7 × 70	0.17	≤ 0.21
	16 × 70	0.36	≤ 0.40

表 6 35SiMnVB 钢和 60CrMn 钢的台架疲劳试验结果
 Table 6 Result of bench fatigue test of steel 35SiMnVB and steel 60CrMn

项目	技术指标	钢种	试验数据					
			1	2	3	4	5	
永久变形/mm	0 ± 0.5	35SiMnVB	0	0	0	0	0	
		60CrMn	0	0.5	0	0	0.5	
静载荷弧高/mm	85.0 ± 5.0	35SiMnVB	82.5	83.7	86.2	85.5	82.5	
		60CrMn	84.2	83.5	85.3	81.6	83.5	
刚度/(N · mm ⁻¹)	主簧刚度:37.0 ± 4.0 复合刚度:91.0 ± 10	35SiMnVB	主簧	40.5	40.5	39.3	37.5	37.5
			复合	93.7	94.5	95.5	93.7	92.6
		60CrMn	主簧	37.5	40.5	39.3	36.5	36.5
			复合	94.5	92.6	93.7	92.6	92.6
寿命试验/万次	≥15.0	35SiMnVB	16.2	15.8	16.9	-	-	
		60CrMn	8.5	9.4	9.8	-	-	

从表 3 和表 6 中可以看出,同规格的 35SiMnVB 钢比 60CrMn 钢的脱碳层深度大幅降低。同时,钢中钒所形成的大量细小弥散的 V(C,N) 颗粒的析出强化和组织细化作用,35SiMnVB 钢比 60CrMn 钢的晶粒度提高了 1~1.5 级,使得钢的疲劳裂纹萌生和扩展的抗力提高,从而改善钢的疲劳性能。

3 结论

(1) 通过测试研究表明,30SiMnVB 钢的的表面质量、内在质量、装配质量、基本性能等均满足某车型钢板弹簧总成的技术条件要求。

(2) 与常用的 60CrMn 钢板弹簧用钢相比,30SiMnVB 钢其组织性能、工艺稳定性等更加优良。

(3) 在弹簧总成的疲劳寿命方面,35SiMnVB 钢制作的三副变截面少片弹簧总成台架疲劳寿命均在 15 万次以上,达到了技术条件要求;而 60CrMn 钢的在 8~10 万次的水平,与技术条件要求有较大的差

距。

(4) 综合研究结果表明,35SiMnVB 钢的各项指标达到某车型变截面少片弹簧总成的技术条件要求,是较合适的制造该种车型钢板弹簧总成的材料,具有广泛的推广应用价值。

参考文献

[1] 唐应时,柴天,和进军,等.基于接触摩擦的少片截面钢板弹簧的刚度分析[J].中南大学学报(自然科学版),2009,40(3):694-698.
 [2] 张宁.汽车钢板弹簧设计[D].吉林:吉林大学软件学院,2007.
 [3] 佟刚,任飞,苗卫东.变截面少片钢板弹簧模糊优化设计[J].沈阳航空工业学院学报,2001,18(3):24-26.
 [4] 杨雍福,周培聪,熊真.我国汽车板簧疲劳性能研究进展[J].科技广场,2014,43(3):209-212.
 [5] 马敏图,李志刚,卢向阳.钒对 35SiMnVB 弹簧钢脱碳敏感性的影响[J].特殊钢,2001,22(5):9-11.

邓通武(1978-),男,高级工程师,2002 年东北大学(本科)毕业,优特钢新产品开发,E-mail:dengtww@sina.com

收稿日期:2018-10-11

欢迎订阅 2019 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 0714-6297888-8010