

# Application Research on New Nb-Containing Spring Steel LPD65

Lifu Qin, Zhibao Wang, Dehu Wang, Ke Wang, Xingchao Liu, Wenjun Wang

Shandong Leopard Automotive Holdings Ltd., Zibo Shandong  
Email: qlf\_126@126.com

Received: Feb. 26<sup>th</sup>, 2020; accepted: Mar. 11<sup>th</sup>, 2020; published: Mar. 18<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

For commercial vehicles, the lightweight of suspension systems will require improvement of design stress, which needs higher requirements on the performance of the raw materials-spring steel. Combined with domestic spring steel smelting and industrialization levels, using Nb micro-alloying technology, and using fine grain strengthening and precipitation strengthening methods, a new Nb-containing high-strength spring raw material LPD65 was developed. The tensile strength can reach more than 1500 MPa. And the heat treatment properties, mechanical properties and fatigue properties of the new material LPD65 were studied. The result shows that the new Nb-containing high-strength spring steel LPD65 meets the design requirements of lightweight leaf springs for commercial vehicle suspension systems, and also meets the fatigue life requirements of lightweight suspension leaf springs of OEM.

## Keywords

High-Strength Spring Steel, Heat Treatment Properties, Mechanical Properties, Fatigue Properties

---

## 新型含Nb弹簧钢LPD65应用研究

秦立富, 王治宝, 王德虎, 王科, 刘惺超, 王文军

山东雷帕得汽车技术股份有限公司, 山东 淄博  
Email: qlf\_126@126.com

收稿日期: 2020年2月26日; 录用日期: 2020年3月11日; 发布日期: 2020年3月18日

---

## 摘要

商用车悬架系统的轻量化, 必然要求设计应力提高, 这对悬架系统使用原材料——弹簧钢性能提出了更

高的要求。结合国内弹簧钢冶炼及工业化水平,采用铌元素微合金化技术,通过细晶强化和析出强化等途径,开发抗拉强度大于1500 MPa新型含Nb高强弹簧钢原材料LPD65,并对新型含Nb高强弹簧钢原材料LPD65的热处理性能、力学性能、疲劳性能进行研究。研究显示,新型含Nb高强弹簧钢原材料LPD65满足商用车悬架系统轻量化板簧设计需求,同时满足国内主机厂对轻量化悬架板簧疲劳寿命要求。

## 关键词

高强弹簧钢, 热处理性能, 力学性能, 疲劳性能

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

2019年以来,商用车轻量化需求持续延续,其中悬架系统轻量化成为必然趋势。以商用车中牵引车为例,普通牵引车前悬架3片抛物线板簧,后悬架5片抛物线板簧;轻量化高端牵引车前悬架2片抛物线板簧,后悬架3片抛物线板簧,未来进一步轻量化方案为前悬架单片簧,后悬架轻量化3片簧。然而对于商用车中自卸车来说,同样存在轻量化需求,特别是自卸车后悬架系统轻量化(抛物线少片簧替代普通多片簧)需求也越来越强烈,同时自卸车对于其悬架系统的高疲劳性能要求也越来越高[1]。悬架系统轻量化和高疲劳性能要求,必然要求其设计应力提高,这对商用车悬架系统使用原材料弹簧钢性能提出了更高的要求[2]。结合国内弹簧钢冶炼及工业化水平,采用铌或铌钒微合金化技术,通过细晶强化和析出强化等途径,开发抗拉强度大于1500 MPa新型含Nb高强弹簧钢原材料LPD65,并对新型含Nb高强弹簧钢原材料LPD65的热处理性能、力学性能、疲劳性能进行研究[3][4][5]。满足商用车悬架系统轻量化板簧设计需求,同时满足国内主机厂对轻量化悬架板簧疲劳寿命要求[6][7]。

## 2. 材料制备及试验方法

### 2.1. 高强弹簧钢 LPD65 制备

高强弹簧钢 LPD65 主要化学成份设计见表 1,依据相应板簧设计需求,冶炼规格 28 × 90 mm 规格的弹簧钢原材料,用于材料化学成份、热处理性能和疲劳性能的研究。

Table 1. Chemical compositions of LPD65 (Wt%)

表 1. LPD65 化学成份设计(Wt%)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	S	P
0.40~0.50	0.70~1.10	0.8~1.20	0.7~1.20	≤0.02	0.02~0.10	≤0.003	≤0.016

### 2.2. 试验方法

LPD65 冶炼完成后,使用 Q4 直读光谱仪进行化学成份检测;用 WDW-G 型电子万能拉伸试验机测试新材料热处理后试样机械力学性能;使用 HR-15A 型号洛氏硬度计检测新材料试样热处理后淬火硬度及回火硬度;用 Nikon MA100 型金相显微镜及 JEOLJEM-1400 型透射电镜,对新材料热处理试样进行组织观察;产品试制完成后,使用 PSJ200 型机械疲劳试验机进行台架疲劳试验及道路试验。

### 3. 结果与讨论

#### 3.1. 化学成分分析

高强弹簧钢 LPD65 化学成份检测(表 2)。由表可知, 不同炉号冶炼的高强弹簧钢 LPD65, 其化学成份均符合化学成份设计要求, 且各种化学元素成份相对均匀, 这表明此化学成份设计满足冶炼要求, 可以实现规模生产。

**Table 2.** Chemical composition analysis of LPD65 (Wt%)

**表 2.** 高强弹簧钢 LPD65 成份分析(Wt%)

炉号	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	S	P
1	0.49	0.7	0.9	0.90	0.013	0.025	0.002	0.015
2	0.52	0.75	1.0	0.85	0.011	0.026	0.001	0.014
3	0.53	0.8	1.2	1.00	0.012	0.028	0.001	0.013

#### 3.2. 力学性能分析

高强弹簧钢 LPD65 热处理后的力学性能要求如表 3 所示。在  $450^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$  的回火范围内, 弹簧钢的强度大于 1450 Mpa, 断面收缩率  $\geq 30\%$ , 断后伸长率  $\geq 9\%$ 。

**Table 3.** Mechanical properties of LPD65 in the conventional heat treatment conditions

**表 3.** 高强弹簧钢 LPD65 热处理力学性能

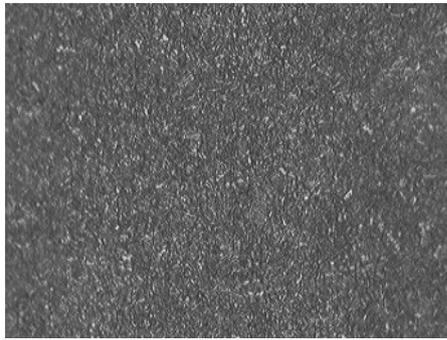
试样 编号	热处理阶段			力学性能			
	淬火		回火	屈服强度	抗拉强度	断后伸长率	断面收缩率
	加热温度( $^{\circ}\text{C}$ )	冷却介质	加热温度( $^{\circ}\text{C}$ )	RP0.2 (N/mm <sup>2</sup> )	Rm (N/mm <sup>2</sup> )	A (%)	Z (%)
	$880 \pm 20$	油	$450 \pm 20$	$\geq 1350$	$\geq 1450$	$\geq 9$	$\geq 30$
1#	880		450	1356	1455	9	32
2#	880		450	1358	1460	8.5	30
3#	880		450	1352	1455	9	33

#### 3.3. 组织结构与强韧化机理分析

图 1 为高强弹簧钢 LPD65 热处理后的金相组织, 为细致的回火屈氏体, 结合 JB3782-84 评级标准判定为 1 级; 图 2 为高强弹簧钢 LPD65 热处理后的晶粒度照片, 依据 GB/T6394-2002 金属平均晶粒度测定方法评定晶粒度为 10 级。图 3 为高强弹簧钢 LPD65 热处理后扫描电镜(1000 倍)形貌, 分析可知为典型回火屈氏体形貌, 且组织分布均匀; 图 4 为高强弹簧钢 LPD65 热处理后扫描电镜(5000 倍)形貌, 在均匀清晰的回火屈氏体形貌之中, 弥散均匀分布碳化物颗粒。综上可知, 高强弹簧钢 LPD65 经过热处理之后, 可获得较细的回火屈氏体组织, 另合金元素, 特别是 Nb 元素的加入, 形成了高性能碳化物的固溶体, 且此种固溶体易偏聚在晶界处, 阻碍晶粒长大。同时, 在位错进行滑移时, 高性能碳化物的固溶体对位错滑移产生钉扎作用, 这也是高强弹簧钢 LPD65 具有较高强度和优良的塑韧性的根本原因。

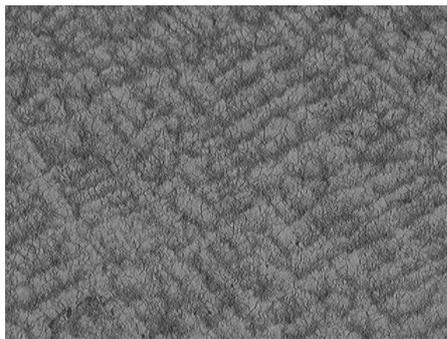
#### 3.4. 工艺性分析

表 4 是高强弹簧钢 LPD65 末端淬透性试验数据, 图 5 是高强弹簧钢 LPD65 的末端淬透性试验曲线。新型高强弹簧钢 LPD65 具有较好的淬透性, 完全能满足高应力少片板簧不同厚度原材料淬透性工艺需求。



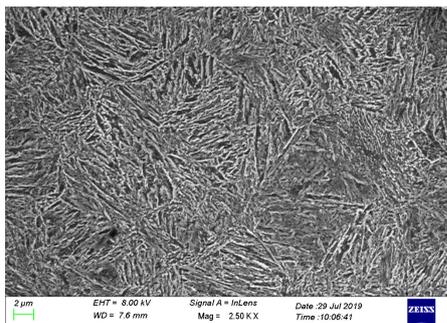
**Figure 1.** Tempered microstructure (500×)

**图 1.** 回火金相组织(500×)



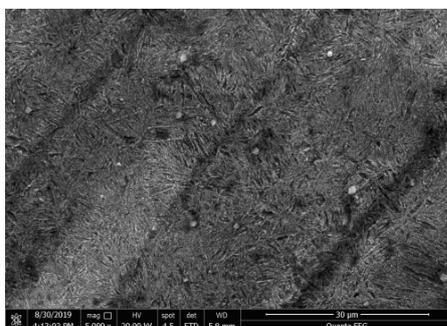
**Figure 2.** Grain size (100×)

**图 2.** 晶粒度(100×)



**Figure 3.** SEM (1000×)

**图 3.** 扫描电镜形貌(1000×)

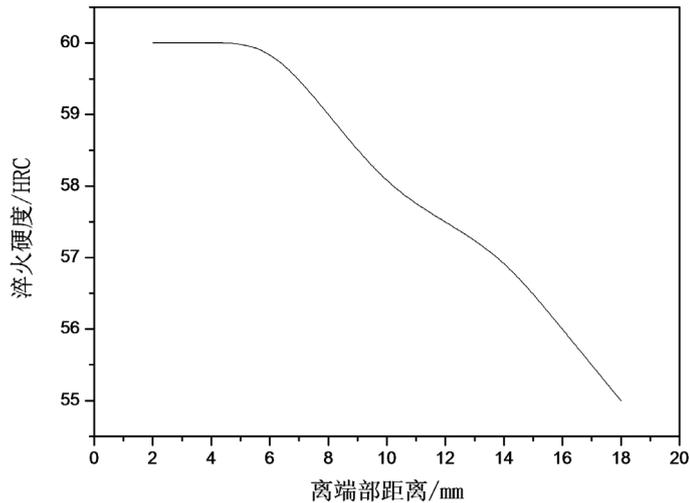


**Figure 4.** SEM (5000×)

**图 4.** 扫描电镜形貌(5000×)

**Table 4.** The hardenability test of LPD65  
**表 4.** LPD65 末端淬透性试验数据

至末端距离(mm)	2	4	6.0	8	10	12	14	16	18
硬度(HRC)	60	60	60	59	58	57.5	57	56	55



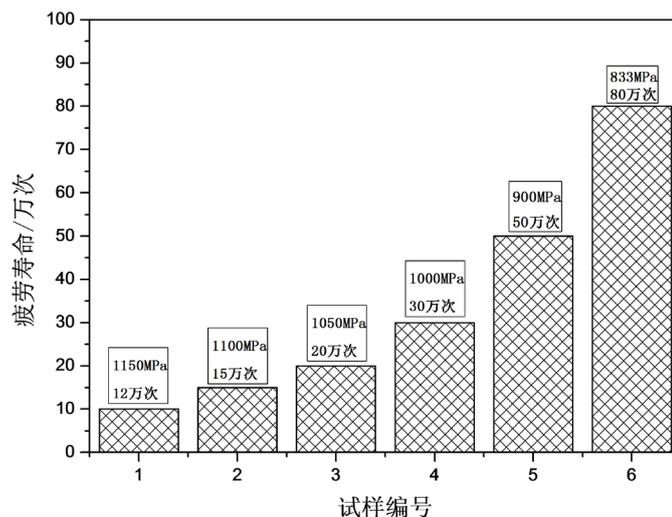
**Figure 5.** Hardenability curve of LPD65  
**图 5.** 高强弹簧钢 LPD65 淬透性曲线

### 3.5. 台架疲劳试验

图 6 是使用高强弹簧钢 LPD65 试制板簧进行台架试验结果。由图 6 可知：

1) 高强弹簧钢 LPD65 试制板簧，在国标台架试验条件，最大试验应力 833 MPa，台架试验疲劳寿命是 80 万次未出现断裂，远远大于国标要求的 10 万次疲劳寿命，接近板簧设计无限寿命 100 万次；

2) 高强弹簧钢 LPD65 试制板簧，在主机厂台架试验条件，最大试验应力 900 MPa，台架试验疲劳寿命是 50 万次未出现断裂，远远大于主机厂要求的 16 万次疲劳寿命；高强弹簧钢 LPD65 试制板簧，在



**Figure 6.** The fatigue test results of leaf spring using LPD65  
**图 6.** 高强弹簧钢 LPD65 试制板簧台架试验结果

主机厂台架试验条件,最大试验应力 1000 MPa,台架试验疲劳寿命是 30 万次未出现断裂,远远大于主机厂要求的 12 万次疲劳寿命;高强弹簧钢 LPD65 试制板簧,在主机厂台架试验条件,最大试验应力 1050MPa,台架试验疲劳寿命是 20 万次未出现断裂,远远大于主机厂要求的 12 万次疲劳寿命;高强弹簧钢 LPD65 试制板簧,在主机厂台架试验条件,最大试验应力 1100 MPa,台架试验疲劳寿命是 15 万次未出现断裂,远远大于主机厂要求的 12 万次疲劳寿命,具有优异的疲劳特性;

3) 高强弹簧钢 LPD65 试制板簧,最大试验应力 1150 MPa,台架试验疲劳寿命是 12 万次未出现断裂,也可以满足主机厂 12 万次疲劳寿命的要求,达到行业内绝对领先水平。

#### 4. 结论

1) 研制新型含 Nb 高强弹簧钢 LPD65,适用于商用车高应力、轻量化板簧产品。

2) 新型含 Nb 高强弹簧钢 LPD65 具有良好的热处理性能和淬透性,热处理后抗拉强度大于 1450 MPa,略低于材料预想抗拉强度目标,后续需进一步进行热处理工艺研究,实现抗拉强度大于 1500 MPa 设计目标。LPD65 中 Nb 元素的加入,形成了高性能碳化物的固溶体,其对位错滑移产生钉扎作用,使得高强弹簧钢具有高强度和优良的塑韧性。

3) 新型含 Nb 高强弹簧钢 LPD65,试制板簧台架疲劳寿命优异,在国标的试验应力条件下,疲劳寿命接近 100 万次无限寿命;在高应力 1150 MPa 试验应力条件下,台架疲劳寿命可达到 12 万次未断,处于行业内绝对领先水平。

#### 参考文献

- [1] 陈耀明. 汽车悬架论文集[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2012.
- [2] 成龙, 崔俊杰, 单小伟. 变截面钢板弹簧早期应力疲劳问题分析[J]. 机械工程与技术, 2014, 3(3): 83-89.
- [3] 祖荣祥. 弹簧钢的合金化研究[J]. 钢铁研究学报, 1997, 9(1): 50-56.
- [4] 赵海民, 惠卫军, 聂义宏, 等. 60Si2CrVA 高强度弹簧钢的超高周疲劳破坏行为[J]. 材料研究学报, 2008, 22(5): 526-532.
- [5] 刘娟, 陈雨来, 江海涛. 60Si2Mn 弹簧钢的热变形抗力及其数学模型[J]. 机械工程材料, 2011, 35(11): 44-46.
- [6] 缪华. 60Si2Mn 弹簧热处理新工艺探讨[J]. 材料热处理技术, 2008, 37(8): 72-73.
- [7] 冶金工业信息研究院. GBT 33164.1-2016, 汽车悬架系统用弹簧钢 第 1 部分: 热轧扁钢[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2016.