

喷丸强化对 12Cr 马氏体热强钢疲劳性能的影响

王 欣^a, 钟 平^b, 陆 峰^a

(北京航空材料研究院 a. 第五研究室 b. 第三研究室, 北京 100095)

摘 要: 对 12Cr 马氏体热强钢 1Cr12Ni3Mo2VN 进行不同工艺的喷丸。研究了不同工艺产生的残余应力场分布和 1Cr12Ni3Mo2VN 钢室温及高温疲劳性能。结果表明, 喷丸强度和表面覆盖率共同影响 1Cr12Ni3Mo2VN 钢残余应力场分布; 1Cr12Ni3Mo2VN 钢室温疲劳性能主要与喷丸强度有关, 经过特定工艺喷丸后, 室温疲劳性能提高了 6 倍; 表面覆盖率对 1Cr12Ni3Mo2VN 钢室温疲劳性能影响较小, 对高温疲劳性能具有明显的影响, 经过 0.12A、100% 覆盖率喷丸后, 高温疲劳性能提高了 2 倍, 表面覆盖率升高将导致 1Cr12Ni3Mo2VN 钢高温疲劳性能下降, 当覆盖率提高到 400%, 高温疲劳寿命基本没有提高, 与原始试样相当。

关键词: 残余应力; 喷丸; 室温疲劳; 高温疲劳; 表面覆盖率

中图分类号: TG115.57; TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2012)02-0081-05

Effect of Shot Peening on the Fatigue Property of 12Cr Martensitic Refractory Steel

WANG Xin^a, ZHONG Ping^b, LU Feng^a

(a. Laboratory of Number 5, b. Laboratory of Number 3, Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095)

Abstract: Shot peening with different parameter was carried into execution on 12Cr martensitic refractory 1Cr12Ni3Mo2VN steel. The residual stress field and the fatigue property on high-temperature(HT) and room-temperature(RT) were investigated. The results show that the residual stress profile is mainly affected by shot peening intensity and surface coverage. The RT fatigue property has a clear and main correlation with the intensity, and the RT fatigue life increases by 6 times after the shot peening with given parameters. Afterward, the surface coverage, which is independent of RT fatigue property, has a significant impact on HT fatigue property of 1Cr12Ni3Mo2VN steel. The HT fatigue life, which would decrease with the increase of surface coverage, increases by two times after the shot peening with 0.12A intensity and 100% coverage. However, the HT fatigue life, compared with the original samples, does not increase when the coverage is of 400%.

Key words: residual stress; shot peening (SP); room-temperature (RT) fatigue; high-temperature (HT) fatigue; surface coverage

0 引 言

1Cr12Ni3Mo2VN 是一种含 12% Cr 的马氏体热强不锈钢^[1-2]。该钢具有较高的中温抗蠕变性能和抗腐蚀性能, 良好的焊接性能和成型性能, 可在 500℃ 以下使用。该型号热强钢导热性

较好, 线膨胀系数小, 有较高减振性, 在先进发动机上得到广泛应用。

发动机零件在中高温环境服役, 随着发动机整体振动的影响, 承力部位会受到高周疲劳的作用, 容易发生疲劳失效。喷丸强化是目前航空工

收稿日期: 2011-10-24; 修回日期: 2012-02-08

作者简介: 王欣(1983—), 男(汉), 福建福州人, 工程师, 硕士; 研究方向: 表面形变强化和表面完整性

网络出版日期: 2012-03-23 14:52; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120323.1452.001.html>

引文格式: 王欣, 钟平, 陆峰. 喷丸强化对 12Cr 马氏体热强钢疲劳性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 81-85.

业最常用的抗疲劳强化技术,喷丸在金属表面产生弹塑性形变梯度,主要强化机制是残余压应力强化和组织强化作用^[3-6]。残余应力对其疲劳性能影响的主要表现为残余压应力使疲劳断裂抗力增高,而残余拉应力使疲劳断裂抗力下降^[7-8],喷丸产生的残余压应力场一般可提高金属构件的疲劳寿命。目前,国内对于 1Cr12Ni3Mo2VN 等热强不锈钢喷丸强化残余应力的研究还比较少^[9],喷丸参数(喷丸强度和表面覆盖率)对于残余应力以及室温高温疲劳性能影响还没有做过相关研究。此外,表面覆盖率是一种重要的喷丸控制参数,在国外已经有一些关于表面覆盖率影响喷丸强化效果的研究^[10],而在国内,相关的研究报道还不常见^[11]。文中研究针对发动机用热强不锈钢,分析了喷丸强度和表面覆盖率这两个重要喷丸检验参数对其残余应力以及高温、室温疲劳性能的影响。

1 材料与试验

研究材料是抚钢冶炼的马氏体热强不锈钢 1Cr12Ni3Mo2VN。其名义成分(质量分数)与力学性能如表 1 和表 2 所示。

表 1 1Cr12Ni3Mo2VN 钢的名义成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of 1Cr12Ni3Mo2VN steel

Element	C	Si	Mn	S	P
w/%	0.13	0.16	0.70	0.001	≤0.018
Element	Ti	Cu	Sb	Cr	Ni
w/%	≤0.02	≤0.15	≤0.01	11.42	2.78
Element	Mo	V	N	Co	Fe
w/%	1.67	0.30	0.036	≤0.010	Bal.

表 2 1Cr12Ni3Mo2VN 钢的室温力学性能
Table 2 Tensile properties of 1Cr12Ni3Mo2VN steel at room temperature

σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ_5 /%	Ψ /%
1 257	1 019	18.6	73.3

采用方块试样测试残余应力场,在院标 Q/6S 977^[10]中选择高温与室温的旋转弯曲疲劳试样,见图 1 和图 2。

在气动式喷丸机上,按照航空工业标准 HB/Z 26,

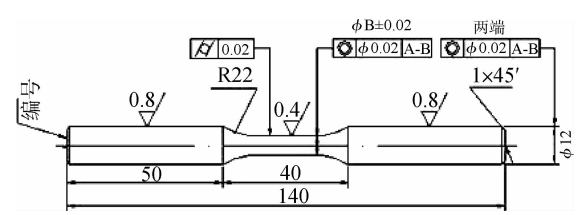


图 1 光滑旋转弯曲疲劳试样(室温)^[12]
Fig. 1 Smooth rotating-bending fatigue sample(RT)^[12]

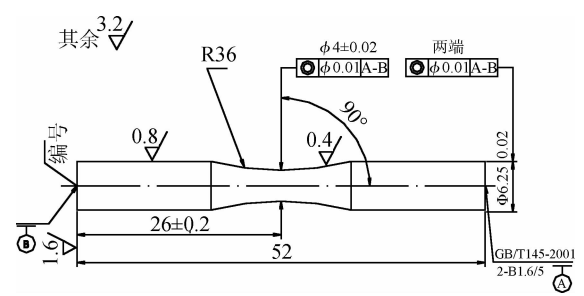


图 2 光滑旋转弯曲疲劳试样(高温)^[12]
Fig. 2 Smooth rotating-bending fatigue sample(HT)^[12]

采用铸钢弹丸 S230(名义直径 0.60 mm)对试样分组进行喷丸,喷丸后检验参数如表 3 所示。其中 AR 组为未喷丸的原始试样,原始试样经过精磨,表面粗糙度 R_a 为 $0.4 \mu\text{m}$ 。喷嘴与试样的距离为 130 mm,与试样法线夹角为 90° ,并采用放大镜进行观察表面覆盖率。

表 3 1Cr12Ni3Mo2VN 钢喷丸检验参数
Table 3 Test parameters of shot peening on 1Cr12Ni3Mo2VN steel

No.	Surface coverage /%	Intensity/ A
SP1	100	0.12
SP2	200	0.12
SP3	400	0.12
SP4	100	0.15
SP5	100	0.18
As received(AR)	0	0

残余应力场测试采用 X 射线衍射测试+电解除薄交替的方法完成,X 射线衍射残余应力测试采用 Xstress-3000 型 X 射线衍射残余应力测试仪,靶材为 CrK_α 靶。按 HB 5152 要求进行了室温旋转弯曲疲劳试验,应力幅为 800 MPa;按 HB 5153 要求进行了高温高周旋转弯曲疲劳试

验,温度为 500℃,应力幅为 500 MPa。高温疲劳试验进行到 1×10^4 、 2×10^4 、 5×10^4 、 1×10^5 周次时,各取出 3 件试样进行表面残余应力测试,确定高温服役时应力松弛曲线。

2 结果与分析

2.1 残余应力分布

图 3 可知,原始试样经过精磨,表面存在数值深度均很小的残余压应力。喷丸后残余应力场发生了重大改变。以下采用“四特征值”^[6]——表面残余应力、最大残余应力、最大残余应力对应深度以及应力场深度表征其残余应力场:① 相比磨削试样,表面残余压应力数值明显增大(−450 MPa~−620 MPa);② 随着表面覆盖率以及喷丸强度的增大,表面残余压应力减小(−618 MPa 到 −550 MPa 再到 −470 MPa);③ 最大残余应力值(−750 MPa 左右)基本不变;④ 最大残余应力对应深度值,随着喷丸强度以及表面覆盖率的增大而增大;⑤ 残余应力场的深度随着喷丸强度的增大而增大。

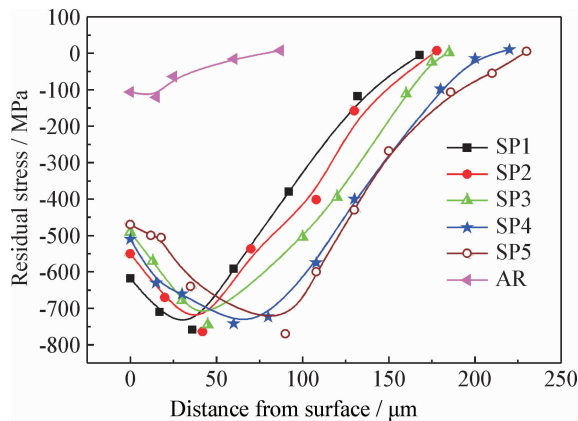


图 3 1Cr12Ni3Mo2VN 钢表面残余应力分布
Fig. 3 Residual stress profile of 1Cr12Ni3Mo2VN steel shot-peened with different parameters

首先,残余应力是一种金属由于弹塑性形变产生的内应力,喷丸残余应力的实质是通过弹丸冲击,使表面层发生弹塑性形变和加工硬化,约束次表层弹性形变而产生的内应力。随着喷丸强度和喷丸覆盖率的增大,表面加工硬化(塑性形变)加剧^[13],造成表面屈服而发生残余应力松弛,因此表面残余压应力数值随喷丸强度和喷丸覆盖率的增大而减小。其次,喷丸产生的最大残余压应力是表面层组织的弹性形变受到塑性形

变的约束达到“极限”的结果,最大残余压应力处的弹性形变量最大,且代表该材料喷丸后能够达到的最大弹性形变量,因此是该材料喷丸后表现的一种本征属性(约为 $0.75 \sigma_{0.2}$)。此外,喷丸强度与喷丸能量成正比,喷丸能量增大,则导致喷丸强化影响层加深,使残余压应力场深度增加。

2.2 室温疲劳性能

图 4 为喷丸后 1Cr12Ni3Mo2VN 钢室温的平均疲劳寿命对比。图 4 可知,在室温、800 MPa 应力幅的疲劳试验条件下,原始试样的疲劳寿命约为 20 000 周次,经过不同参数喷丸强化后 1Cr12Ni3Mo2VN 钢的疲劳寿命均有一定的增加。增幅最大的是经过 SP4 组喷丸后,疲劳寿命为 150 000 周次左右,增长了 6 倍;寿命增益最小的 SP5 组喷丸后,疲劳寿命为 50 000 周次,增长了 2 倍。随着喷丸强度的增长,1Cr12Ni3Mo2VN 钢的疲劳寿命呈现先上升再下降的趋势。此外,经过相同喷丸强度,不同表面覆盖率喷丸后,疲劳寿命基本相同。

喷丸提高钢的室温疲劳性能并不少见,下面着重分析喷丸工艺对于表面完整性和室温疲劳的影响。喷丸后钢表面主要有残余应力、表面形貌和组织等三个重要的表面完整性变化,喷丸工艺实施后,残余压应力场数值越大,深度越深,喷丸后表面越平整,加工硬化越剧烈,则室温疲劳性能越好。

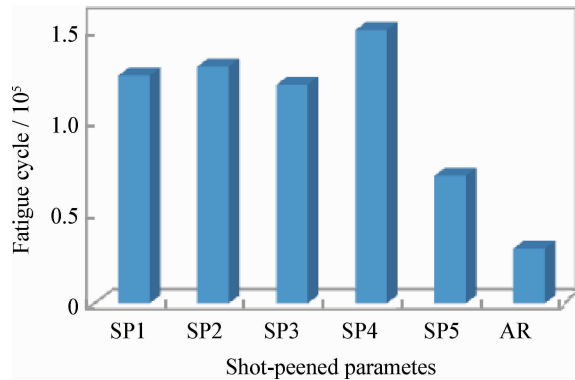


图 4 不同工艺喷丸后 1Cr12Ni3Mo2VN 钢疲劳寿命
Fig. 4 RT fatigue life of 1Cr12Ni3Mo2VN steel shot-peened with different parameters

当喷丸强度从 0.12 A 提高到 0.15 A 时,表面残余压应力数值降低了 13%(从 −600 MPa 降低到 −520 MPa),且表面粗糙度随喷丸强度增大有一定提高,但残余压应力层的深度增大了 37%

(从 $160\mu\text{m}$ 提高到 $220\mu\text{m}$), 残余应力场深度加深带来的强化效果大于表面残余应力减小和粗糙度上升带来的不利影响, 因此, SP4 组疲劳寿命长于 SP1 组。当喷丸强度从 0.15 A 提高到 0.18 A 时, 强化层深度增加 (从 $220\mu\text{m}$ 提高到 $230\mu\text{m}$) 带来的优化效果有限, 而表面残余压应力数值进一步减小 (从 -520 MPa 降低到 -470 MPa), 且粗糙度继续增长, 因此, 强度增加带来的弱化因素大于强化因素, 使得 SP5 组疲劳性能较 SP4 组有所下降。结果表明, 对于热强钢, 喷丸强度有一个临界值, 大于或小于该值时, 都不利于疲劳寿命优化, 需要在工业应用中引起注意。

此外, 经过不同表面覆盖率、相同喷丸强度的 SP1、SP2、SP3 组室温疲劳寿命比较接近, 说明 $1\text{Cr}12\text{Ni}3\text{Mo}2\text{VN}$ 钢的室温疲劳性能与喷丸强度相关, 喷丸表面覆盖率关联较小。

2.3 高温疲劳性能

图 5 为不同覆盖率喷丸后 $1\text{Cr}12\text{Ni}3\text{Mo}2\text{VN}$ 钢 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下平均疲劳寿命对比。从图 5 可知, 在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 500 MPa 的旋转弯曲疲劳试验条件下, 原始试样的疲劳寿命为 $420\ 000$ 周次左右, 经过 100% 和 200% 表面覆盖率喷丸后疲劳寿命分别提高了 114% 和 78% , 而经过 400% 表面覆盖率喷丸后 $1\text{Cr}12\text{Ni}3\text{Mo}2\text{VN}$ 钢的疲劳寿命基本没有提高。试验结果说明: ① 随着表面覆盖率的提高, $1\text{Cr}12\text{Ni}3\text{Mo}2\text{VN}$ 钢的高温高周疲劳性能下降; ② 在高温疲劳试验下, 喷丸的强化延寿效果有一定的减弱。

对于表面覆盖率提高对高温疲劳性能的不利影响, 从残余应力角度可以有如下解释。喷丸在 $1\text{Cr}12\text{Ni}3\text{Mo}2\text{VN}$ 钢表面产生了高位错密度组织, 组织内表面能较大, 且表面能随喷丸表面覆盖率增大而增大, 在温度场的驱动下, 表面能越大, 残余应力越不稳定, 因此, 在高温下, 高表面覆盖率产生的残余应力容易松弛, 如图 6。图中说明喷丸残余应力在高温疲劳的最初周次内迅速下降而后趋于稳定。超高覆盖率的 SP3 组高温疲劳下稳定时残余应力约为 -320 MPa , 比喷丸后即测的残余应力衰减了 40% , 而覆盖率较低的两组仅衰减了 30% 和 31% 。由于残余压应力的松弛, 残余压应力抵抗外加拉载荷的作用削弱, 强化效果下降, 对 $1\text{Cr}12\text{Ni}3\text{Mo}2\text{VN}$ 钢喷丸表面覆盖率越高, 高温疲劳寿命越短。

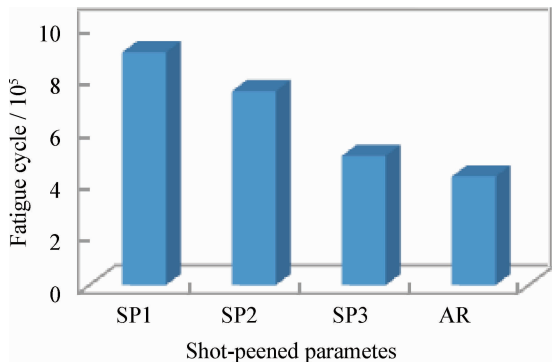


图 5 不同表面覆盖率喷丸后 $1\text{Cr}12\text{Ni}3\text{Mo}2\text{VN}$ 钢高温疲劳寿命

Fig. 5 HT fatigue life of $1\text{Cr}12\text{Ni}3\text{Mo}2\text{VN}$ steel shot-peened with different surface coverage

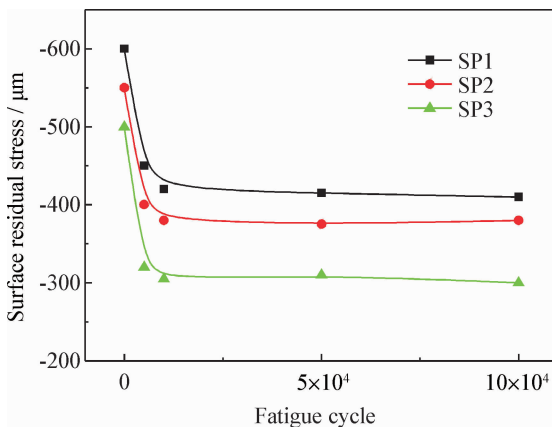


图 6 经过一定疲劳周次后的表面残余应力

Fig. 6 Surface residual stress after fatigue cycles

3 结 论

(1) $1\text{Cr}12\text{Ni}3\text{Mo}2\text{VN}$ 钢喷丸后, 残余压应力场分布受到喷丸强度和表面覆盖率的共同影响, 表面残余压应力随喷丸强度和表面覆盖率的增大而减小, 残余压应力场深度随喷丸强度的增大而增大。

(2) 当 $1\text{Cr}12\text{Ni}3\text{Mo}2\text{VN}$ 钢在室温疲劳时, 存在一个喷丸强度的临界值, 大于或小于该值, 都不能有效提高该材料的室温疲劳寿命, 而表面覆盖率变化对于 $1\text{Cr}12\text{Ni}3\text{Mo}2\text{VN}$ 钢室温疲劳寿命影响不大。

(3) 喷丸表面覆盖率对 $1\text{Cr}12\text{Ni}3\text{Mo}2\text{VN}$ 钢高温残余应力稳定性有重要影响, 随表面覆盖率增大, 高温下残余应力稳定性下降, 超高表面覆盖率喷丸后, 高温疲劳性能与未喷丸的原始试样相近。

参考文献

[1] 杨钢, 刘新权, 杨沐鑫. 1Cr12Ni3Mo2VN(M152)耐热钢的脆化机制 [J]. 特钢技术, 2009, 15(61): 14-24.

[2] 廖洪军, 姚长责, 王敏. 汽轮机叶片钢 1Cr12Ni3Mo2VN 热处理工艺 [J]. 宝钢技术, 2009, (1): 56-59.

[3] 刘锁. 金属材料的疲劳性能与喷丸强化工艺 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1977: 3-9.

[4] 高玉魁. 喷丸对 TC18 钛合金拉-拉疲劳性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 9(33): 1000-1002.

[5] 宋颖刚, 高玉魁, 陆峰. TC21 钛合金喷丸强化层微观组织结构及性能变化 [J]. 航空材料学报, 2010, 30(2): 40-44.

[6] 王仁智. 残余应力测定的基本知识——第五讲 金属材料与零件的表面完整性与疲劳断裂抗力间的关系 [J]. 理化检验-物理分册, 2007, 43: 535-539.

[7] 王仁智, 姜传海. 圆柱螺旋弹簧的正断/切断型疲劳断裂模式与提高其疲劳断裂抗力的途径 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(6): 7-14.

[8] 王仁智. 工程金属材料/零件的表面完整性及其断裂抗力

[J]. 中国表面工程, 2011, 24(5): 55-57.

[9] 王永芳, 刘禹炯, 冉广. 1Cr12Ni3Mo2VN 钢高频淬火过渡区的喷丸强化和残余应力 [J]. 金属热处理, 2006, 31(5): 53-56.

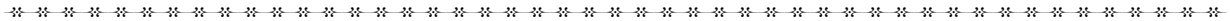
[10] Prevey P S, Cammett J T. Effect of shot peening coverage on residual stress, cold work and fatigue in a Ni-Cr-Mo low alloy steel [R]. Lambda Research Cincinnati OH.

[11] 王欣, 蔡建明, 王强, 等. 喷丸表面覆盖率对于 Ti60 高温钛合金疲劳性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(5): 58-63.

[12] Q/6S 977-2004. 金属力学性能试样图册[S].

[13] Cammett J T, Prevey P S, Jayaraman N. The effect of shot peening coverage on residual stress, cold work and fatigue in a nickel-base superalloy [R]. U. S. naval aviation depot.

作者地址: 北京市海淀区温泉镇环山村 100095
Tel: (010) 6249 6450
E-mail: rasheed990918@163.com



• 本刊理事介绍 •

黄卫东

黄卫东,教授,博士生导师,1956 年生。1989 年获西北工业大学工学博士学位,1991 年任西北工业大学教授,西北工业大学首批“英才培养计划”入选者。1998 年获国家杰出青年科学基金资助,由于在实验室建设上的突出贡献,黄卫东教授于 1999 年任凝固技术国家重点实验室主任,2001 年被聘为教育部长江计划特聘教授。主要学术兼职有中国铸造学会副理事长,《铸造技术》杂志主编等。主要研究领域:凝固与晶体生长理论,高性能致密金属零件的激光快速成形技术,大型复杂薄壁铸件精密铸造技术。发表学术论文 283 篇,出版国防重点专著《激光立体成形》。授权中国发明专利 9 项,国防发明专利 1 项,实用新型专利 1 项。培养硕士生 30 人,已毕业 20 人,博士生 41 人,已毕业 17 人。获得省部级科技一等奖 2 项,二等奖 3 项,三等奖 1 项。获得的主要荣誉奖有:1991 年国家教委和国务院学位委员会表彰的“做出突出贡献的中国博士学位获得者”,“航空航天部优秀青年教师”,1992 年获“国务院政府特殊津贴”,1999 年航空工业总公司“有突出贡献的优秀中青年科技专家”;2000 年国家人事部“百千万人才工程”第一、二层次人选;2001 年度中国高校自然科学二等奖,1999~2001 年度陕西省铸造基金一等奖。获 2009 和 2002 年度陕西省科学技术一等奖,2003 年“国防科技工业百名优秀博士”,2004 年“国家重点实验室计划 20 周年先进个人”,获国家科技部颁发的“金牛奖”,2005 年中国科协“西部开发突出贡献奖”,2006 年首届“陕西省优秀科技工作者”,2010 年宝钢优秀教师称号。