

引文格式: 马芳薇, 闵祥禄, 韩巍, 等. K417G铸造高温合金喷丸强化表面完整性试验研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(11): 64-71.

MA Fangwei, MIN Xianglu, HAN Wei, et al. Experimental research on surface integrity of shot peening K417G superalloy[J].

Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(11): 64-71.

K417G铸造高温合金喷丸强化表面完整性 试验研究

马芳薇¹, 闵祥禄¹, 韩巍¹, 梁巧云¹, 袁沛雨², 谭靓²

(1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043;

2. 西北工业大学航空发动机高性能制造工业和信息化部重点实验室, 西安 710072)

[摘要] 为提高涡轮叶片榫齿的疲劳性能, 针对 K417G 铸造高温合金喷丸强化过程, 采用 2 因素 5 水平响应曲面试验方法开展了喷丸强化工艺试验。研究了喷丸强度和覆盖率对表面粗糙度、残余应力、显微硬度和微观组织的影响, 建立了表面粗糙度和表面残余应力的响应曲面预测模型。研究结果表明, 喷丸强度对表面完整性特征的影响最为显著, 覆盖率次之; 喷丸强化工艺参数对表面粗糙度的影响存在饱和点; 表面粗糙度和表面残余应力预测值与实测值误差分别小于 11% 和 41%; 当喷丸强度为 0.13 mmA, 覆盖率为 220% 时可获得的良好表面完整性。

关键词: K417G 铸造高温合金; 喷丸强化; 表面完整性; 表面粗糙度; 残余应力; 显微硬度; 微观组织
中图分类号: V252; TG2 文献标志码: A DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.11.064



马芳薇

高级工程师, 研究方向为航空发动机关键构件高性能制造技术。

K417G 铸造高温合金不仅具有密度小、中温强度高、塑性高等优点, 而且组织稳定性好、抗蠕变能力优异, 在 850 °C 长期时效后不析出 σ 相, 被广泛应用于航空航天和工业燃气轮机等领域, 主要用于制造在 950 °C 下长期工作的燃气涡轮叶片、导向叶片、整体叶盘及其他高温部件^[1-3]。K417G 铸造高温合金涡轮叶片要求在高温、高压、高转速 (“三高”) 极端环境下长寿命、高可靠工作。涡轮叶片榫齿与涡轮盘榫槽表面的最大接触应力高达 1.40 GPa 左右, 极易发生微动磨损并引起疲劳失效, 影响航空发动机的服役安全和使用寿命。

从制造工艺上看, K417G 涡轮叶片采用镍基高温合金无余量等轴熔模精密铸造成形, 仅榫齿或锯齿冠部分留有精加工余量。为保证榫齿精度、提高抗疲劳性能, 榫齿的加工

主要采用精密磨削后再喷丸强化的工艺方法。喷丸强化通过弹丸对零件表面进行冲击可以引入残余压应力, 使表层晶粒细化甚至纳米化, 从而抑制疲劳裂纹的萌生, 提升抗疲劳性能^[4-5]。在进行喷丸强化时, 通常需要考虑喷丸强化设备参数, 包括气体压力、弹丸直径、流量和工作时间等^[6]。而在实际喷丸强化过程中, 为避免变量过多, 喷丸强度和覆盖率是主要的可控参数, 其中喷丸强度与气体压力、弹丸直径、流量有关, 而覆盖率则受工作时间影响较大^[7-8]。喷丸强化参数选择不当会产生表面微裂纹和缺陷, 从而大大降低构件的疲劳性能。因此, 亟须开展喷丸强化工艺参数对表面完整性的影响规律研究, 指导 K417G 铸造高温合金涡轮叶片喷丸强化工艺参数的选取。

国内外学者针对喷丸强化工艺

参数对表面完整性的影响开展了大量研究。Lin 等^[9]建立了基于位错密度本构方程的随机多弹丸喷丸强化模型,分析了喷丸强度、覆盖率和双喷丸对残余应力和位错胞尺寸的影响,结果表明,提高喷丸强度是获得更细小位错单元尺寸和更深的材料组织细化层的有效方法,但同时也会增加表面粗糙度。Wang 等^[10]结合有限元和响应曲面方法,获得了 42CrMo 钢最佳喷丸强化工艺参数(弹丸直径 0.8 mm、弹丸速度 88 m/s、覆盖率 170%),采用该工艺后,42CrMo 钢试样疲劳寿命提高了约 104%。Maleki 等^[11]采用田口法和响应曲面法对 316L 钢喷丸强化表面完整性进行了研究,结果表明,随着喷丸强度的增加,塑性变形层深度、表面显微硬度、表面残余压应力和最大残余压应力均增大。Mohamed 等^[12]研究了气体压力、喷嘴与构件间距离、喷嘴移动速度和喷射角度对覆盖率、饱和度和表面质量的影响,最佳的工艺参数为气压 276 kPa、间距 203 mm、移动速度 5.3 mm/s,在该参数下可增大残余压应力层深度和均匀性,提高喷丸强化加工效率。Jamalian 等^[13]研究了弹丸尺寸和气体压力对 AZ31 镁合金梯度微观组织和机械性能的影响,结果表明,超细晶粒层的厚度与喷丸参数之间存在直接关系,弹丸直径和气体压力最大时 AZ31 镁合金力学性能最佳。

王琨等^[14]研究了喷丸强化对 DD412 单晶高温合金表面完整性和高温疲劳性能的影响,结果表明,喷丸强化后,表面磨削痕迹被消除,表

层微观组织产生了剧烈塑性变形,硬化层深度在 0.10~0.32 mm,与未喷丸强化试样相比,优化工艺喷丸强化试样在 600 °C/500 MPa 条件下的旋转弯曲疲劳寿命提高 21.7 倍以上。邢宇辉等^[15]研究了喷丸强化对覆铝 7B04-T7451 铝合金表面完整性和疲劳性能影响,结果表明,喷丸强化后试样表面硬度较原始试样略有提高,表面发生剧烈的塑性变形,引入了深度约 150 μm 的残余压应力层,疲劳性能并未获得提高。牛童等^[16]研究了不同喷丸强化工艺对 4Cr5Mo2V 热作模具钢表层形貌与组织、力学性能以及摩擦磨损行为的影响,发现 0.4 mmA+0.2 mmA+0.1 mmA 强度复合喷丸强化后的试样强化效果最好,表面硬度由 520HV_{0.1} 提高到 601HV_{0.1},残余压应力峰值为 -1141 MPa,较高的硬度与残余压应力能够改善材料抵抗粘着磨损与磨粒磨损的能力,使得材料的耐磨性得到大幅改善。朱立华等^[17]研究了不同喷丸强度下 FGH4113A 合金的表面和亚表层微观组织及变形情况,随着喷丸强度的增大,合金表面粗糙度、表面残余压应力和塑性变形层厚度逐渐增大,表面完整性特征与喷丸强度之间有着较好的对数线性关系。

响应曲面法(Response surface methodology, RSM)是一种优化试验设计和分析的方法,主要用于研究多个自变量对响应指标的影响,并对响应指标进行优化。它的基本思想是通过构造一个具体形式的多项式来表达隐式关系。具体方法是,首先设计合理的试验方案并进行一定

数量的试验,然后将试验结果与统计学算法相结合来拟合因素与响应值之间的函数关系,通过对所建立的函数关系分析预测响应值或寻求最优工艺参数。本文针对 K417G 铸造高温合金,采用 2 因素 5 水平响应曲面试验方法,揭示喷丸强化工艺参数对 K417G 铸造高温合金表面完整性的影响规律,探究表面粗糙度和表面残余压应力与喷丸强化工艺参数的定量关系,进而优化合金喷丸强化工艺参数,为 K417G 铸造高温合金涡轮叶片榫齿喷丸强化表面完整性控制提供基础数据和工艺方法支撑。

1 试验及方法

1.1 试验材料

本研究所用材料为 K417G 铸造高温合金,其主要化学成分见表 1^[1]。K417G 是在 K417 合金的基础上,降低 5% 钴和 0.3% 钛研制而成的一种 γ' 相沉淀强化铸造高温合金。K417G 铸造高温合金试样采用等轴熔模铸造工艺制造,其物理及力学性能见表 2^[1]。

K417G 铸造高温合金基体微观组织如图 1 所示,其铸态组织主要由 γ 基体相、γ' 相、碳化物等相组成。γ' 相主要呈球形,分布于白色基体组织 γ 相内,γ 基体相之间相互连接呈网格状分布;碳化物在合金中主要以块状、条状及颗粒状分布。

1.2 试验方案

喷丸强化试验在 KXS-3030P 设备上进行,为研究喷丸强度和覆盖率对 K417G 铸造高温合金表面完整性的影响规律,采用 2 因素 5 水平

表 1 K417G 铸造高温合金主要化学成分(质量分数)^[1]
Table 1 Chemical compositions of K417G superalloy (mass fraction)^[1] %

C	Cr	Ni	Co	Mo	Al	Ti	Fe	V	B
0.13~0.22	8.50~9.50	余量	9.0~11.0	2.50~3.50	4.80~5.70	4.10~4.70	≤1.0	0.60~0.90	0.012~0.024
Zr	Mn	Si	P	S	Pb	Bi	As	Sn	Sb
0.05~0.09	≤0.20	≤0.20	≤0.015	≤0.010	≤0.0005	≤0.0001	≤0.005	≤0.002	≤0.001

表 2 K417G 铸造高温合金物理及力学性能^[1]

Table 2 Physical and mechanical properties of K417G superalloy^[1]

热导率 λ / (W/(m·℃))	比热容 C / (J/(kg·℃))	线膨胀系数 α / (10 ⁻⁶ /℃)	密度 ρ / (g/cm ³)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ / MPa	抗拉强度 σ_b / MPa	延伸率 δ_5 / %	断面收缩率 Ψ / %	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ
13.86	476	10.7	7.85	790	975	11	15.03	206	0.26

外切中心复合 (CCC) 响应曲面设计, 如表 3 所示。弹丸采用铸钢丸 ZG30, 密度为 7.3~7.6 g/cm³, 硬度为 55~62HRC, 直径为 0.3 mm; 喷丸强度采用 A 型阿尔门试片弧高度值表征, 喷嘴直径为 $\phi 8$ mm, 喷嘴与试件垂直距离为 130 mm, 图 2 为喷丸强化试验示意图。

1.3 表面完整性测试

表面粗糙度测试采用 MarSurf XT20 接触式表面粗糙度测量系统进行测量, 取样长度 0.8 mm、评定长度 5.6 mm, 每个试样测量 3 次并求取平均值。表面几何形貌采用

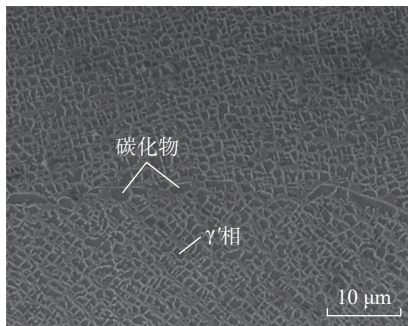


图 1 K417G 铸造高温合金基体微观组织
Fig.1 As-received microstructure of K417G superalloy

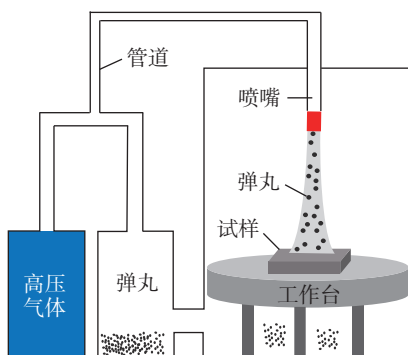


图 2 喷丸强化过程示意图
Fig.2 Schematic diagram of shot peening process

Alicona 全自动刀具扫描仪进行观察, 放大倍数 50 倍, 测量区域大小为 2.85 mm × 2.15 mm。采用 LXRD MG2000 残余应力测试分析系统进行残余应力测试。采用 X 射线测量残余应力时, 针对不同材料必须选择合适的靶材, 根据欧盟标准《X 射线衍射残余应力测定》(EN15305—2008), K417G 铸造高温合金宜选用 Mn 靶进行测试, 具体测量参数为: 靶电压 25 kV、靶电流 20 mA、布拉格角 151.88°、曝光时间 0.5 s、曝光次数 10 次、光斑直径 $\phi 2$ mm。显微硬度测试采用 FM-800 型显微硬度测试仪, 试验力 0.245 N, 保持载荷时间 10 s, 测试前需将试样沿垂直喷丸强化面方向采用慢走丝线切割截得金相试样, 之后进行镶样、磨样和抛光处理。表层微观组织采用捷克

TESCAN VEGA3 LMU 扫描电子显微镜进行观察, 观察时需要同时对显微硬度测试试样进行腐蚀, 以便于把各个组成相显著地区分开来, 腐蚀液为盐酸 20 mL、乙醇 20 mL、氯化铜 1 g 的混合溶液。图 3 为喷丸强化试样表面完整性测试示意图。

2 试验结果与讨论

2.1 表面粗糙度和表面几何形貌

表面粗糙度 R_a 和 R_z 的测试结果见表 3。其中, R_a 为轮廓算术平均偏差, R_z 为微观不平度十点高度, 两者均为常用的表面粗糙度表征参数。K417G 铸造高温合金喷丸强化后微观不平度十点高度 R_z 与轮廓算术平均偏差 R_a 呈强线性相关性, 如图 4 所示。

图 5 为 K417G 铸造高温合金喷

表 3 喷丸强化试验方案及表面完整性测试结果

Table 3 Test plan and surface integrity test results for shot peening strengthening

序号	喷丸强度 f_n / mmA	覆盖率 C / %	表面粗糙度 R_a / μ m	表面粗糙度 R_z / μ m	表面残余应力 σ_r / MPa
01#	0.13	130	1.018	5.569	-535
02#	0.27	130	1.785	8.732	-756
03#	0.13	270	0.955	4.761	-649
04#	0.27	270	1.644	8.143	-767
05#	0.10	200	0.742	4.379	-366
06#	0.30	200	1.526	7.905	-795
07#	0.20	100	1.755	8.734	-783
08#	0.20	300	1.201	6.519	-539
09#	0.20	200	1.351	6.589	-902
10#	0.20	200	1.547	7.741	-860
11#	0.20	200	1.398	7.347	-953
12#	0.20	200	1.521	7.532	-835
13#	0.20	200	1.371	7.165	-718

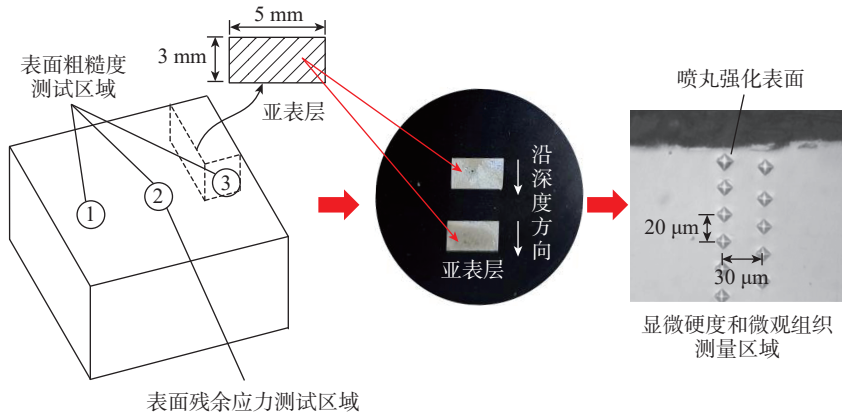


图3 喷丸强化试样表面完整性测试示意图

Fig.3 Schematic diagram of surface integrity testing for shot peening strengthened specimens

丸强度和覆盖率对表面粗糙度 R_a 和 R_z 的影响。图 5 (a) 为覆盖率 200% 时喷丸强度对表面粗糙度的影响。可知, 表面粗糙度 R_a 和 R_z 随喷丸强度的增大先增加后略有减小, 当喷丸强度为 0.27 mmA 时, R_a 和 R_z 达到峰值。喷丸强度从 0.10 mmA 增大到 0.27 mmA 时, 表面粗糙度 R_a 从 0.742 μm 增加到 1.714 μm , 增大 131%, 这是由于喷丸强度的增大, 弹坑撞击时的动能增加, 弹坑深度和宽度也随之增大。当喷丸强度进一步增大到 0.30 mmA 时, 表面塑性变形达到饱和, 导致表面粗糙度 R_a 略有下降。图 5 (b) 为喷丸强度 0.20 mmA 时覆盖率对表面粗糙度的影响。可知, 表面粗糙度 R_a 和 R_z 随喷丸覆盖率的增大而减小, 并在覆盖率增大到 130% 后, 表面粗糙度分别维持在 R_a 1.2~1.4 μm 和 R_z 6~8 μm 。随着覆盖率的增加, 弹坑四周的突起受到后续弹丸的撞击而消失, 表面粗糙度减小, 并达到饱和状态。

图 6 为 K417G 铸造高温合金喷丸强化工艺参数对表面几何形貌的影响。可知, 喷丸强度为 0.13 mmA 时, 试样表面仍有磨削痕迹, 同时有大量喷丸弹坑, 经统计弹坑平均直径约 62 μm ; 当覆盖率为 200%, 喷丸强度分别为 0.10 mmA、0.20 mmA 和 0.30 mmA 时, 统计的弹坑平均直径分别约为 46

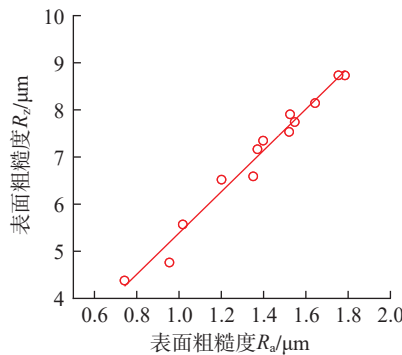
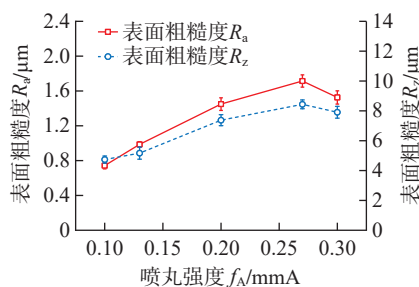
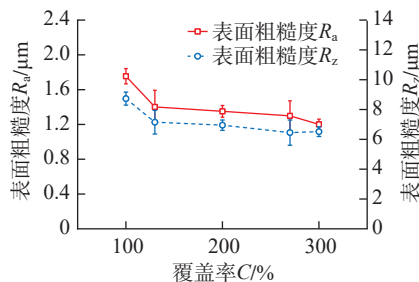


图4 表面粗糙度 R_a 和 R_z 的线性关系

Fig.4 Linear correlation between surface roughness R_a and R_z

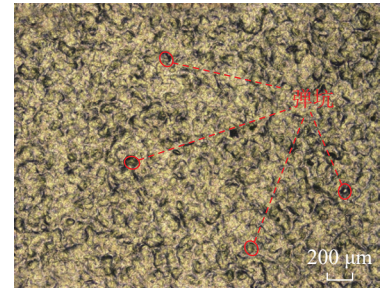


(a) 喷丸强度对表面粗糙度的影响

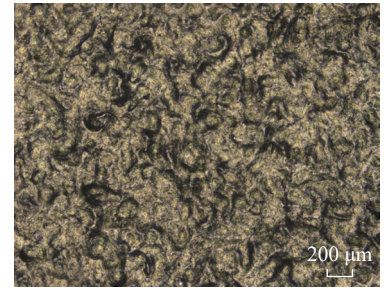


(b) 覆盖率对表面粗糙度的影响

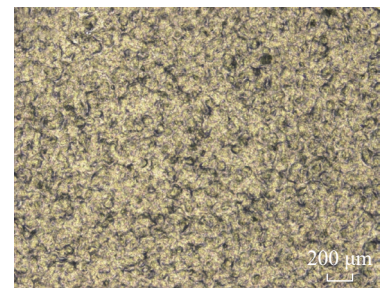
图5 喷丸强化工艺参数对表面粗糙度的影响
Fig.5 Effects of shot peening parameters on surface roughness



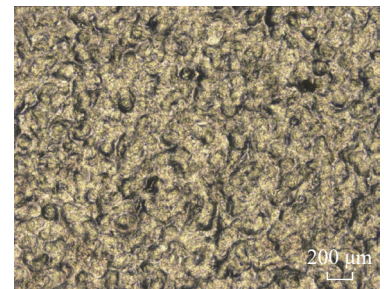
(a) $f_A=0.13 \text{ mmA}$, $C=130\%$



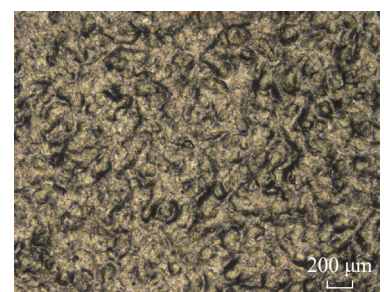
(b) $f_A=0.27 \text{ mmA}$, $C=130\%$



(c) $f_A=0.10 \text{ mmA}$, $C=200\%$



(d) $f_A=0.20 \text{ mmA}$, $C=200\%$



(e) $f_A=0.30 \text{ mmA}$, $C=200\%$

图6 喷丸强化工艺参数对表面几何形貌的影响

Fig.6 Effects of shot peening parameters on surface geometric morphology

μm 、 $114\ \mu\text{m}$ 和 $130\ \mu\text{m}$ ，喷丸强度越大，弹坑的平均直径越大。

在试验过程中，喷丸强度的增大表现为喷丸设备气体压强和弹丸流量的增加，在试样表面则为弹丸冲击速度和能量的增加。在喷丸强度较低的情况下，弹丸冲击速度较低，产生的塑性变形较小，因此表面粗糙度较小，喷丸产生的弹坑直径较小，抛光痕迹尚未去除；随着喷丸强度的增大，试样表面塑性变形增大，表现为表面粗糙度增大，同时抛光痕迹被去除，喷丸产生的弹坑增加且变形程度增大。在试验过程中，覆盖率的增大表现为喷丸设备工作时间的增加。当喷丸覆盖率较小时，弹坑尺寸较小、数量较少且分布较为分散；随着喷丸覆盖率增大，弹丸冲击面积逐渐增加，弹坑数量增加且分布较为均匀，表面粗糙度减小^[18]。

2.2 残余应力和显微硬度

图 7 为 K417G 铸造高温合金喷丸强化工艺参数对表面残余压应力的影响。图 7 (a) 为覆盖率为 200% 时喷丸强度对表面残余应力的影响，可知，当喷丸强度从 $0.10\ \text{mmA}$ 增大到 $0.20\ \text{mmA}$ 时，表面残余压应力从 $366\ \text{MPa}$ 增加到 $799\ \text{MPa}$ ，表面残余压应力在较低喷丸强度范围内对喷丸强度变化表现出显著敏感性。而随着喷丸强度从 $0.20\ \text{mmA}$ 增加 $0.30\ \text{mmA}$ 时，表面残余压应力变化不大，基本在 $750\sim 800\ \text{MPa}$ 范围内。当喷丸强度为 $0.20\ \text{mmA}$ 时，表面残余压应力已达到饱和，喷丸强度继续增大对表面残余压应力影响不大。图 7 (b) 为喷丸强度为 $0.20\ \text{mmA}$ 时覆盖率对表面残余应力的影响，可知，当覆盖率从 100% 增加到 270% 时，表面残余压应力基本在 $645\sim 783\ \text{MPa}$ 范围内波动；当覆盖率为 300% 时，表面残余压应力下降至 $539\ \text{MPa}$ 。喷丸强度在达到一定的阈值前，表面残余压应力较低。这是由于低喷丸强度下，弹丸冲击速度较小，产生的

塑性变形较小，导致引入的残余压应力较小。当喷丸强度逐渐增大，试样表面塑性变形增大，表面残余压应力增大。当喷丸强度进一步增大，表面塑性形变达到过饱和，表面残余压应力变化不明显^[19]。

图 8 为 K417G 铸造高温合金喷丸强化表层显微硬度梯度分布。可知，显微硬度随深度增大呈逐渐减小趋势，即试样表面显微硬度最大，随着深度的增加，显微硬度逐渐减小，直至基体硬度 (K417G 的基体显微硬度为 $390\text{HV}_{0.025}\sim 410\text{HV}_{0.025}$)。当喷丸强度从 $0.10\ \text{mmA}$ 增加到 $0.30\ \text{mmA}$ 时，表面最大显微硬度从 $550\text{HV}_{0.025}$ 增大到 $610\text{HV}_{0.025}$ ，硬化层深度从 $110\ \mu\text{m}$ 增大到 $280\ \mu\text{m}$ 。经喷丸强化后，

K417G 铸造高温合金近表层显微硬度显著提高，最大硬化程度为 52.5% 。

2.3 表层微观组织

图 9 为 K417G 铸造高温合金喷丸强化表层微观组织。K417G 铸造高温合金由网格状细小晶粒组成，尺寸不大于 $3\ \mu\text{m}$ 。图 9 (a) 中未观察到明显的微观缺陷，喷丸强化表面较为平整，塑性变形层厚度约为 $6.4\ \mu\text{m}$ ；图 9 (b) 中可观察到长度 $2\sim 4\ \mu\text{m}$ 的微裂纹，塑性变形层厚度约 $11.4\ \mu\text{m}$ ；图 9 (c) 中喷丸强化表层存在厚度约 $4.4\ \mu\text{m}$ 的细密晶粒层，尺寸小于 $0.5\ \mu\text{m}$ ，晶粒被拉伸伸长；图 9 (d) 中喷丸强化表面较为平整，但观察到 $2\sim 4\ \mu\text{m}$ 大小的喷丸强化产生的弹坑，塑性变形层深度

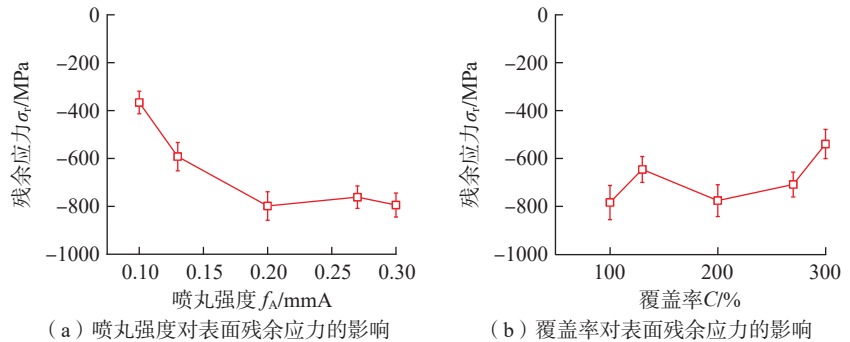


图 7 喷丸强化工艺参数对表面残余应力的影响
Fig.7 Effects of shot peening parameters on surface residual stress

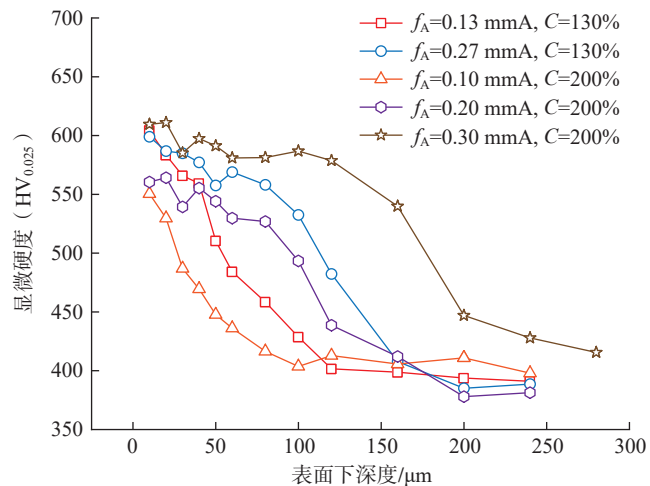


图 8 喷丸强化工艺参数对表层显微硬度梯度分布的影响
Fig.8 Effects of shot peening parameters on surface microhardness gradient distribution

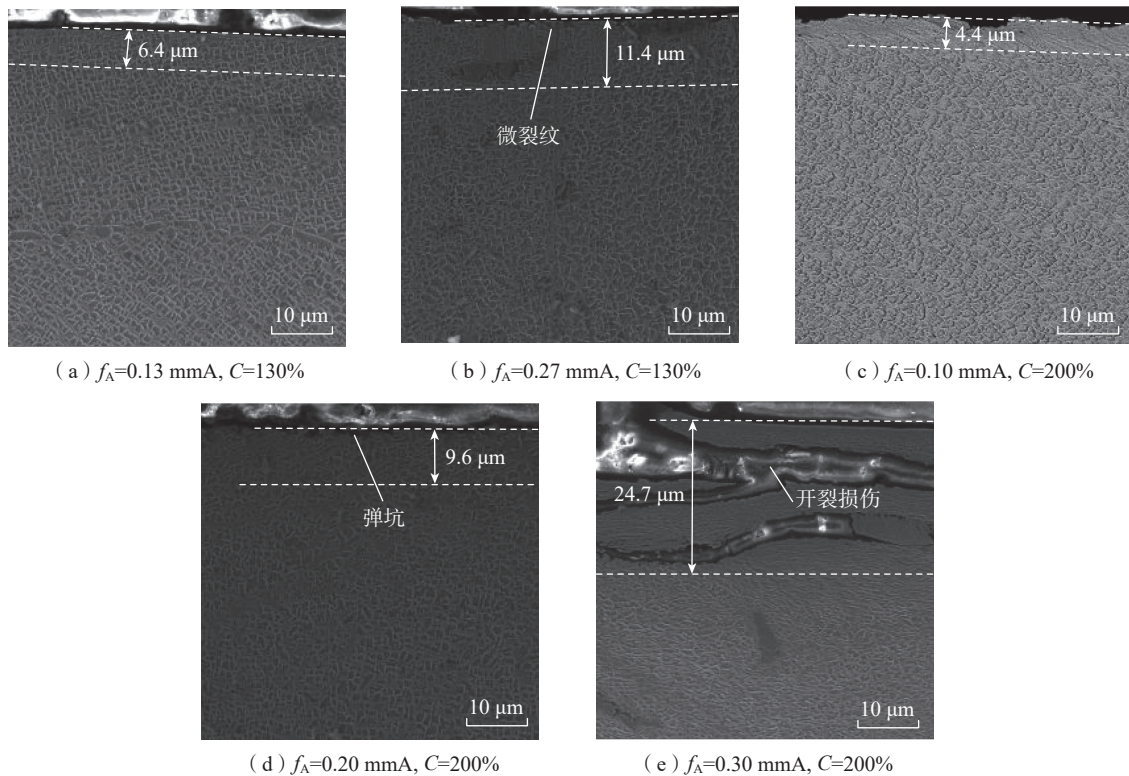


图9 喷丸强化工艺参数对表层微观组织的影响

Fig.9 Effects of shot peening process parameters on the microstructure of the surface layer

约 $9.6 \mu\text{m}$ ；图 9 (e) 中表面产生强烈损伤，裂纹长度达到 $50\sim 60 \mu\text{m}$ ，损伤区域深度约 $24.7 \mu\text{m}$ ，晶粒尺寸向裂纹拓展方向被拉长。由以上微观组织可知，K417G 铸造高温合金表层塑性变形层与喷丸强度存在显著关系。当喷丸强度为 0.1 mmA 时，喷丸强化表层塑性变形程度较小，同时磨削产生的塑性变形层未被去除；当喷丸强度为 0.13 mmA 时，磨削产生的塑性变形层因弹丸冲击而去除，喷丸强化表面较为平整；当喷丸强度为 0.27 mmA 时，试样表面产生微小缺口或微裂纹；当喷丸强度为 0.30 mmA 时，表面产生强烈损伤，出现开裂，试样表面被破坏。

2.4 表面粗糙度和表面残余应力预测模型

运用 2 因素 5 水平外切中心复合响应曲面法，采用多元线性回归方法对表 3 中数据进行处理，建立了表面粗糙度和表面残余应力与喷丸强化工艺参数的经验模型，即

$$\begin{cases} R_a = -0.287 + 16.406f_A - 0.002C - 29.569f_A^2 \\ R_z = -0.076 + 70.176f_A - 0.008C - 123.960f_A^2 \\ \sigma_r = 1075.390 - 11692.200f_A - 6.300C + \\ 25014.158f_A^2 + 0.017C^2 \end{cases}$$

式中，喷丸强度 f_A 取值范围为 $0.10\sim 0.30 \text{ mmA}$ ；覆盖率 C 取值范围为 $100\%\sim 300\%$ 。

为检验拟合模型的显著性，对表面粗糙度和表面残余应力预测模型进行方差分析，表面粗糙度 R_a 模型自由度为 3，残差的自由度为 9，查阅方差 F 检验表可知，在显著性水平 $\alpha=0.01$ ，置信度 99% 的条件下， $F_{0.01}(9,10)=4.95$ 。模型统计量 F 值为 $32.23 > F_{0.01}(9,10)$ ，同时，表面粗糙度 R_z 和表面残余应力 σ_r 的统计量 F 值分别为 39.82 和 6.62，均大于 $F_{0.01}(9,10)$ ，因此所建表面粗糙度和表面残余应力预测模型具有显著性。对比模型预测值和实测值可得，表面粗糙度和表面残余应力预测值与实测值误差分别小于 11% 和 41%。

图 10 为喷丸强化工艺参数交互

作用对表面粗糙度和表面残余应力的影响。可知，表面粗糙度随喷丸强度的增加而增大，随覆盖率的增加而减小，当喷丸强度 0.27 mmA 、覆盖率 130% 时，表面粗糙度 R_a 达到最大值，为 $1.785 \mu\text{m}$ ，这是因为喷丸强度的增加使表面变形加剧。由图 10 (a) 可知，当喷丸强度小于 0.23 mmA 时， R_a 增长速率较大，在高喷丸强度和低覆盖率下， R_a 值较大，响应曲面图呈现双曲面。图 10 (b) 为表面粗糙度 R_z 的响应曲面模型图，由于表面粗糙度 R_z 和 R_a 存在强线性相关性，所以表面粗糙度 R_z 与 R_a 变化趋势相同。图 10 (c) 给出了表面残余应力的响应曲线模型图，表面残余应力随着喷丸强度和覆盖率的增加呈现先减小后增大的趋势，当喷丸强度 $f_A=0.24 \text{ mmA}$ ，覆盖率 $C=200\%$ 时，表面残余压应力 σ_r 达到最大，为 884 MPa ，响应曲面图呈现椭球面。由图 10 (a) 和 (c) 可知，在给定的喷丸强度参数范围内，表面粗糙度和表面残余应力

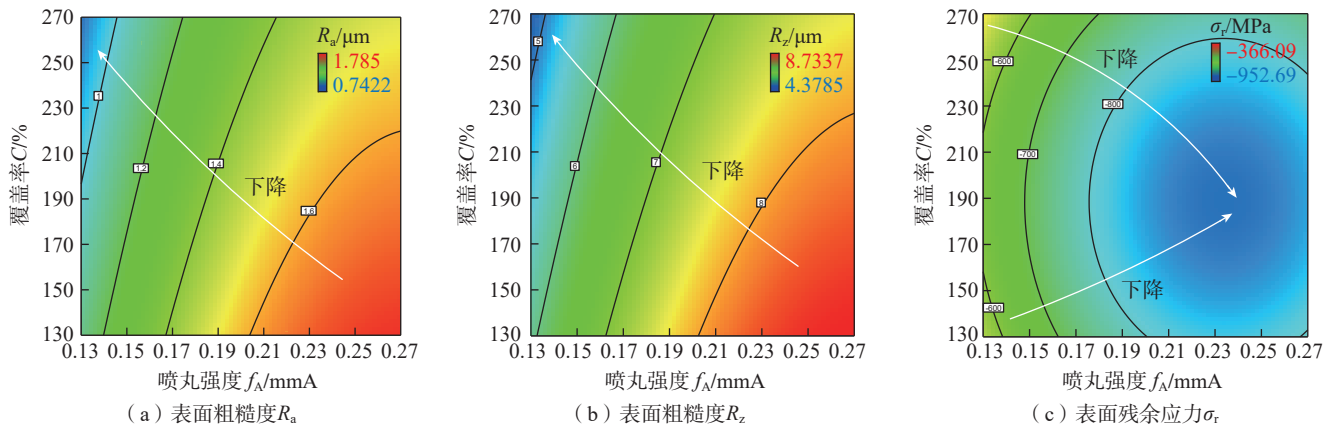


图 10 喷丸强化工艺参数交互作用对表面粗糙度和表面残余应力的影响

Fig.10 Interaction effect of shot peening process parameters on surface roughness and residual stress

随喷丸强度 f_A 的变化相比于喷丸覆盖率更敏感。从表面粗糙度和表面残余应力预测模型中也可知,喷丸强度的系数远大于覆盖率,说明喷丸强度对表面粗糙度与残余应力的影响最为显著。

综合响应曲面模型可以预测,当喷丸强度 $f_A=0.13$ mmA,覆盖率 $C=220\%$ 时,K417G 铸造高温合金表面粗糙度 R_a 和 R_z 最小,分别约为 $0.71 \mu\text{m}$ 和 $5.227 \mu\text{m}$,表面残余压应力最大,约为 606 MPa。

3 结论

本文基于响应曲面方法开展了 K417G 铸造高温合金喷丸强化表面完整性试验研究,得出如下主要结论。

(1) K417G 铸造高温合金喷丸强化后表面粗糙度随着喷丸强度的增加而增大,随着覆盖率的增加而减小,当喷丸强度 0.27 mmA、覆盖率 130% 时,表面粗糙度达到最大值,约为 $1.785 \mu\text{m}$;喷丸强化后,表面几何形貌为形状不规则随机分布的弹坑,弹坑数量和尺寸随喷丸强度和覆盖率的增加而增加。

(2) 喷丸强化后 K417G 铸造高温合金表面残余压应力在 $366\sim 799$ MPa 范围,表层出现了加工硬化,硬化层深度约 $110\sim 280 \mu\text{m}$;表面残余压应力和显微硬度均随喷丸强度的

增大而增大;喷丸强化表层产生了严重的塑性变形,当喷丸强度大于 0.27 mmA 时,表层产生微裂纹、开裂损伤等缺陷。

(3) 通过响应曲面法优选的喷丸强化工艺参数为喷丸强度 0.13 mmA、覆盖率 220% ,此时表面粗糙度为 $R_a 0.71 \mu\text{m}$ 和 $R_z 5.227 \mu\text{m}$,表面残余压应力为 606 MPa。

参考文献

[1] 《中国航空材料手册》编辑编委会. 中国航空材料手册: 第2卷[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
 Editorial Committee of China Aeronautical Materials Manual. China aeronautical materials handbook: Volume 2[M]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
 [2] DU B N, YANG J X, CUI C Y, et al. Effects of grain refinement on the microstructure and tensile behavior of K417G superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 623: 59-67.
 [3] 卞宏友, 朱明昊, 李英, 等. 激光沉积修复GH536/GH738合金的组织及力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(3): 542-549.
 BIAN Hongyou, ZHU Minghao, LI Ying, et al. Microstructure and mechanical properties of laser deposition repair of GH536/GH738 superalloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(3): 542-549.
 [4] LU J Z, LUO K Y, YANG D K, et al. Effects of laser peening on stress corrosion cracking (SCC) of ANSI 304 austenitic stainless

steel[J]. Corrosion Science, 2012, 60: 145-152.

[5] AMANOV A, KARIMBAEV R, MALEKI E, et al. Effect of combined shot peening and ultrasonic nanocrystal surface modification processes on the fatigue performance of AISI 304[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 358: 695-705.

[6] CHEN M, JIANG C H, XU Z, et al. Surface layer characteristics of SAF2507 duplex stainless steel treated by stress shot peening[J]. Applied Surface Science, 2019, 481: 226-233.

[7] MALEKI E, UNAL O. Fatigue limit prediction and analysis of nano-structured AISI 304 steel by severe shot peening via ANN[J]. Engineering with Computers, 2021, 37(4): 2663-2678.

[8] MALEKI E, UNAL O, REZA KASHYZADEH K. Surface layer nanocrystallization of carbon steels subjected to severe shot peening: Analysis and optimization[J]. Materials Characterization, 2019, 157: 109877.

[9] LIN Q J, LIU H J, ZHU C C, et al. Effects of different shot peening parameters on residual stress, surface roughness and cell size[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 398: 126054.

[10] WANG X L, WANG Z, WU G, et al. Combining the finite element method and response surface methodology for optimization of shot peening parameters[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 129: 105231.

[11] MALEKI E, UNAL O, REZA KASHYZADEH K. Influences of shot peening parameters on mechanical properties and fatigue behavior of 316 L steel: Experimental, taguchi method and response surface methodology[J]. Metals and Materials International, 2021, 27(11):

4418-4440.

[12] MOHAMED A O, FARHAT Z, WARKENTIN A, et al. Effect of a moving automated shot peening and peening parameters on surface integrity of Low carbon steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 277: 116399.

[13] JAMALIAN M, FIELD D P. Effects of shot peening parameters on gradient microstructure and mechanical properties of TRC AZ31[J]. Materials Characterization, 2019, 148: 9-16.

[14] 王琨, 罗学昆, 宋尽霞, 等. 喷丸对DD412单晶高温合金表面完整性和疲劳性能的影响[J]. 材料工程, 2024, 52(7): 152-161.

WANG Kun, LUO Xuekun, SONG Jinxia, et al. Effects of shot peening on surface integrity and fatigue properties of DD412 single crystal superalloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(7): 152-161.

[15] 邢宇辉, 崔丽, 付雪松, 等. 喷丸强

化覆铝7B04-T7451铝合金的表面完整性及疲劳性能研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(11): 94-101.

XING Yuhui, CUI Li, FU Xuesong, et al. Investigation on surface integrity and fatigue properties of aluminum-clad 7B04-T7451 alloy treated by shot peening[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(11): 94-101.

[16] 牛童, 王昕宇, 吴晓春. 喷丸工艺对4Cr5Mo2V钢表面性能与磨损行为的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(12): 153-159.

NIU Tong, WANG Xinyu, WU Xiaochun. Effect of shot peening process on surface properties and wear behavior of 4Cr5Mo2V steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(12): 153-159.

[17] 朱立华, 肖磊, 郭建政, 等. 喷丸强度对FGH4113A高温合金微观组织的影响及定量表征[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(7): 2415-2423.

ZHU Lihua, XIAO Lei, GUO Jianzheng, et al. Effect of shot peening intensity on FGH4113A

superalloy microstructure and quantitative characterization[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(7): 2415-2423.

[18] MYLONAS G I, LABEAS G. Numerical modelling of shot peening process and corresponding products: Residual stress, surface roughness and cold work prediction[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 205(19): 4480-4494.

[19] ULLAH H, RAUF A, ULLAH B, et al. Explicit dynamics simulation of shot peening process induced by various types of shots impacts[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018, 40(2): 110.

通信作者: 谭靓, 副研究员, 博士, 研究方向为关键构件多工艺复合抗疲劳加工技术。

Experimental Research on Surface Integrity of Shot Peening K417G Superalloy

MA Fangwei¹, MIN Xianglu¹, HAN Wei¹, LIANG Qiaoyun¹, YUAN Peiyu², TAN Liang²

(1. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co. Ltd., Shenyang 110043, China;

2. Key Laboratory of High Performance Manufacturing for Aero Engine, Ministry of Industry and Information Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[ABSTRACT] To improve the fatigue performance of turbine blade tenon, the surface integrity characteristics of K417G superalloy were studied by using a two-factor five-level response surface test method. The effects of shot peening intensity and coverage on surface roughness, residual stress, microhardness, and microstructure of K417G superalloy were investigated. Two response surface models of surface roughness and surface residual stress were established. The results show that, compared with shot peening coverage, shot peening intensity has a more significant effect on surface integrity characteristics. There is a saturation point of surface roughness with the increase of shot peening parameters. The error between the predicted and measured values of surface roughness and residual stress is less than 11% and 41%, respectively. When shot peening intensity is 0.13 mmA and coverage is 220%, better surface integrity characteristics can be obtained.

Keywords: K417G superalloy; Shot peening; Surface integrity; Surface roughness; Residual stress; Microhardness; Microstructure

(责编 阳光)