

喷砂表面三维粗糙度参数对涂层结合强度的影响

王井¹, 李志永², 罗京帅¹, 陈龙², 蹤雪梅^{1,3}

(1.江苏徐州工程机械研究院, 江苏 徐州 201004; 2.徐州徐工挖掘机械有限公司, 江苏 徐州 221004; 3.高端工程机械智能制造国家重点实验室, 江苏 徐州 221004)

摘要: **目的** 揭示喷砂预处理表面三维粗糙度参数对热喷涂层结合强度的影响规律。**方法** 以喷砂距离和喷砂速度为影响因子, 对 45[#] 钢试样进行喷砂处理, 采用三维光学显微镜测得各工艺参数下喷砂表面的三维形貌及三维粗糙度参数, 并利用“粘接-拉伸”测试方法测得涂层的结合强度。利用回归分析方法, 建立涂层结合强度与三维粗糙度参数间回归数学模型, 并进一步分析三维粗糙度参数的影响机制。**结果** 喷砂预处理表面随机分布着许多不规则形状的凸峰和凹坑, 方向各异, 没有固定的取向, 其整体表面粗糙度 S_a 平均为 4.84 μm , 涂层结合强度平均为 32.8 MPa。涂层结合强度与三维粗糙度参数间存在着非线性相关关系, 且 S_a 、 S_{dr} 、 S_{dq} 、 S_q 对涂层结合强度的影响较为显著。 S_a 和 S_{dr} 越大, 有利于增大涂层与基体的接触面积; S_{dq} 较大时, 所形成的凹坑及凸峰较为尖锐, 有利于为涂层机械结合提供更多的锚固点; 结合界面的 S_q 较大时, 其表面形貌以较深的凹坑为主, 导致凹坑深处易形成残留气孔缺陷, 降低涂层与基体间的润湿效果及结合性能。**结论** S_a 、 S_{dr} 、 S_{dq} 、 S_q 为涂层结合强度的主要影响因素, 且存在非线性回归关系, 各三维粗糙度参数对涂层结合强度的影响机制及趋势与回归数学模型一致。

关键词: 喷砂预处理; 三维粗糙度; 结合强度; 非线性回归分析; 表面形貌; 热喷涂涂层

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)05-0246-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.05.036

Effects of Three-dimensional Roughness Parameters of Sandblasted Surface on Bond Strength of Thermal Spraying Coating

WANG Jing¹, LI Zhi-yong², LUO Jing-shuai¹, CHEN Long², ZONG Xue-mei^{1,3}

(1.Jiangsu Xuzhou Construction Machinery Research Institute, Xuzhou 201004, China;

2.XCMG Excavator Machinery Co., Ltd, Xuzhou 221004, China;

3.State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Advanced Construction Machinery, Xuzhou 221004, China)

ABSTRACT: The work aims to reveal the effects of three-dimensional roughness parameters of sandblasted pretreatment surface on bond strength of thermal spray coating. The effect analysis was carried out on the surfaces of 45[#] steel specimens, which were pretreated with sandblasting at different distances and speeds as the processing parameters. The three-dimensional topography and roughness parameters of the sandblasted surfaces were obtained by the three-dimensional optical microscope. The bond strength of thermal spraying coatings was tested with the testing methods of "bonding-stretching". Using the regression analysis method, the mathematical model between the bond strength and the three-dimensional roughness parameters of coating

收稿日期: 2018-08-07; 修订日期: 2018-10-29

Received: 2018-08-07; Revised: 2018-10-29

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1105800); 江苏省自然科学基金 (BK20170246); 江苏省国际科技合作项目 (BZ2017016)

Fund: Supported by National Key Research and Development Program (2018YFB1105800) and Jiangsu Natural Science Foundation (BK20170246) and Jiangsu International Science and Technology Cooperation Project (BZ2017016)

作者简介: 王井 (1987—), 男, 硕士, 主要研究方向为表面工程。邮箱: jingwang0822@126.com

Biography: WANG Jing (1987—), Male, Master, Research focus: surface engineering. E-mail: jingwang0822@126.com

was established, and the effect mechanism of the three-dimensional roughness parameters was further analyzed. The results indicated that many irregular peaks and pits were randomly distributed on the sandblasted surface without fixed orientation. The average surface roughness and bonding strength of the coating were $4.84\ \mu\text{m}$ and $32.8\ \text{MPa}$, respectively. The relationship between bond strength and 3D roughness parameters is linked by nonlinear correlation. The effect of three-dimensional roughness parameters S_a , S_{dr} , S_{dq} , S_q on the bond strength of the coating is significant. The contact area of coating with the substrate increases with the increasing of S_a and S_{dr} . The larger the S_{dq} is, the sharper the pits and peaks of the blasted surface are, which is beneficial to provide more anchor points for mechanical bonding of the coating. The surface topography of the combined interface with larger S_q mainly consists of deep pits, which leads to the formation of residual porosity defects in the depth of the pit and reduces the wetting effect and bonding performance between coating and substrate. S_a , S_{dr} , S_{dq} , S_q are the main influencing factors for bond strength of thermal spraying coating, and the regression relationship is nonlinear. The effect mechanism and trend of each three-dimensional roughness parameter on the bond strength of the coating are consistent with the regression mathematical model.

KEY WORDS: sandblasting pretreatment; three-dimensional roughness parameters; bond strength; nonlinear regression analysis; surface topography; thermal spraying coating

热喷涂涂层与基体的结合强度是评价涂层质量的重要指标, 其与基体间主要是以涂层冷凝时收缩咬住预处理表面的凹凸点, 形成机械结合, 即结合性能的优劣直接取决于基体预处理表面的三维形貌特征^[1-3]。目前, 待喷涂加工表面预处理工艺种类较多, 传统的喷砂粗化处理具有工艺简单、效率高、成本低等优点, 在工程应用中比较广泛^[4-5]。因此, 研究喷砂工艺及喷砂表面形貌表征方法, 有利于提升涂层结合性能的工艺优化。

目前, 国内外研究人员针对喷砂工艺参数对涂层结合强度的影响规律已作了大量研究^[6-10]。Mellali 等^[8]探讨了等离子喷涂前的喷砂工艺对不同基体材料(铝合金、铸铁、高强度钢)表面粗糙度、残余应力、砂粒残留及砂粒破碎的影响。马跃进等^[9]研究了喷砂距离、喷砂压力、喷砂角度等工艺参数对涂层结合强度的影响, 并建立了数学模型。宋斌等^[10]研究了砂粒粒径、喷砂压力、喷砂距离等参数对高速电弧喷涂涂层结合强度的影响, 并优化了预处理工艺参数。然而, 零件表面喷砂后的三维形貌还受到基体材料、工作环境、喷砂加工系统特性等多种因素的影响。因此, 喷砂工艺参数的研究无法直接揭示涂层结合强度的变化规律。

近年来, 表面形貌分析技术越来越多地应用于喷砂、机加工等工艺的加工表面质量评价中^[11-16]。Schwankl 等^[14]分别研究了两种砂粒粒度和喷砂压力对铝板表面粗糙度的影响。张来启等^[15]研究了预处理表面粗糙度 R_a 和宏观形貌随工艺参数的变化规律及对涂层结合强度的影响, 但线粗糙度无法反映喷砂表面的整体形貌特征, 无法全面揭示形貌特征对涂层结合强度的影响规律。王春水^[16]等利用三维粗糙度参数对喷砂表面形貌进行表征, 分析了喷砂距离对表面形貌的影响规律, 但没有进一步分析表面形貌对涂层结合性能的影响。

由此, 关于预处理表面形貌特征参数与涂层结合强度之间的关联性及其影响规律的研究尚未见报道。文中利用三维光学显微镜分析不同喷砂工艺所获得的预处理表面形貌特征参数, 分析了表面形貌特征参数对涂层结合强度的影响规律, 并进一步探讨了关键表面形貌特征参数对涂层结合强度的影响机制, 为预处理工艺参数优化及涂层结合强度提升提供参考依据。

1 试验方法

喷砂预处理采用的砂粒为白刚玉, 粒径为 24 目, 其典型形貌特征如图 1 所示, 为不规则多角颗粒。在压缩空气的作用下, 砂粒高速撞击基体表面, 其尖角有利于切削基体表面。

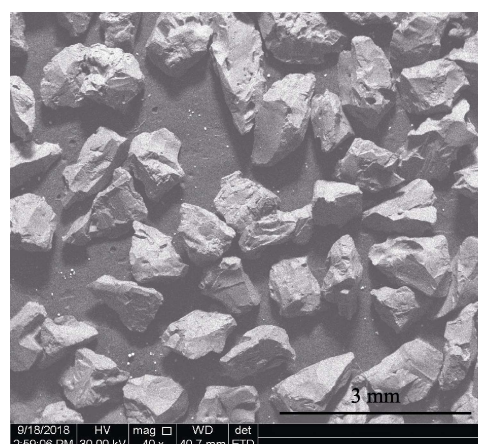


图 1 喷砂砂粒典型形貌特征
Fig.1 Typical morphology of sandblasting sand grains

基体材料为 45# 钢, 直径为 $\phi 20\ \text{mm}$, 厚度为 $5\ \text{mm}$ 。以喷砂距离、喷砂速度作为影响因子, 设计正交试验方案, 其因素水平见表 1, 其他基本工艺参数如下: 喷砂角度为 75° , 喷砂压力为 $0.7\ \text{MPa}$ 。

表 1 喷砂预处理工艺参数
Tab.1 Parameters of sandblasting process

Parameters	Levels				
	$-r$	-1	0	1	r
Sandblasting distance/mm	129.3	150	200	250	270.7
Sandblasting speed/(mm·s ⁻¹)	129.3	150	200	250	270.7

试验过程中采用自动喷砂系统对试样进行喷砂预处理,为减小测量过程误差,获取可靠的测量数据,每组工艺参数分别制备 3 个试样。利用 Inspect S50 钨灯丝扫描电子显微镜对喷砂前后试样的表面形貌进行观察,并利用布鲁克 Contour GT-K1 三维光学显微镜分别对喷砂后每个试样的表面进行检测,选用 10 倍物镜和 0.55 倍放大镜,采样面积为 1267.2 $\mu\text{m} \times 950.4 \mu\text{m}$,并利用后处理软件对喷砂表面形貌及三维粗糙度参数分别进行表征及测量。

采用超音速火焰喷涂技术制备结合强度测试试样表面的热喷涂层,喷涂设备为 Stellite 公司 Jet Kote III 超音速火焰喷涂加工系统。该加工系统以丙烯作为燃气,氧气为助燃气,氩气为送粉气。喷涂粉末采用 WC-12Co,粒度为 15~45 μm 。按照 GB/T 8642—2002 制备结合强度试样,圆柱试样的直径为 $\phi 25 \text{ mm}$,用 E-7 胶进行粘结,并放入保温箱中,恒温 100 $^{\circ}\text{C}$,保温 3 h 进行固化。测试结合强度试样的连接装置结构如图 2 所示,其夹持部位与拉伸试验机连接,拉伸速度为 1 mm/min。为减小测量误差,每组喷砂工艺参数制备 3 个试样,分别进行喷涂,并测量其结合强度,

再取平均值作为该喷砂工艺所获得预处理表面的涂层结合强度。

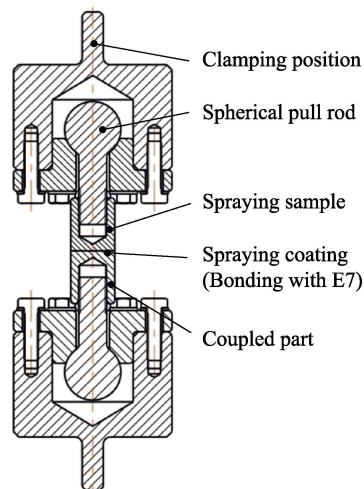


图 2 结合强度测试试样连接装置
Fig.2 Schematic diagram of specimen connection device for bond strength test

2 结果与分析

2.1 喷砂预处理表面形貌特征分析

试样表面喷砂前和喷砂后的典型微观形貌如图 3 所示。由图 3a 可以看出,喷砂前表面整体较为光滑,没有明显的凹坑及凸峰,表面均匀分布着机加工纹路及残留的切屑瘤。由图 3b 可以看出,喷砂后表面整体比较粗糙,凹坑和凸峰的数量明显增多,凹凸不平整性较为明显。

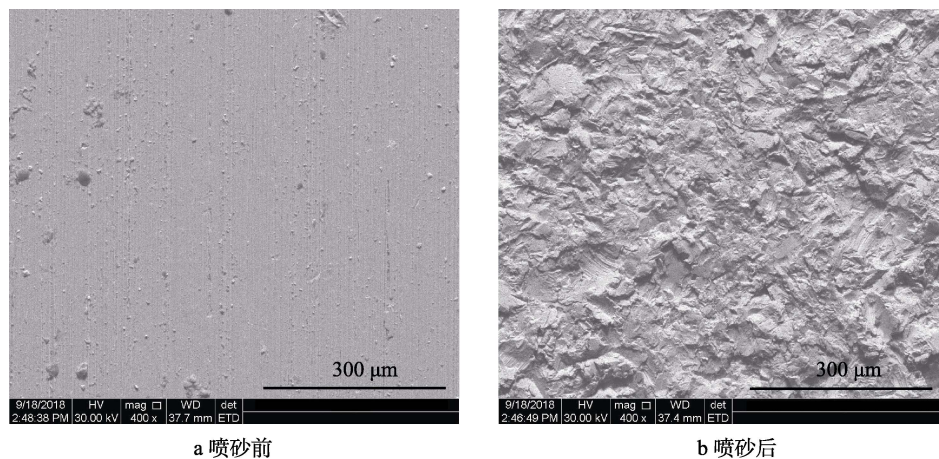


图 3 喷砂前及喷砂后的试样表面形貌 (SEM)

Fig.3 SEM micrographs of the surfaces of the samples before and after sand blasting:
a) the sample before sand blasting; b) the sample after sand blasting

试样表面喷砂预处理后的典型三维形貌特征如图 4 所示,可以看出,经喷砂粗化后,基体表面随机分布着许多不规则形状的凸峰和凹坑,方向各异,没有固定的取向。喷砂后试样表面粗糙度增大,涂层与

基体接触界面的作用面积大幅增加,有利于提升涂层与基体间的结合性能。另外,熔融颗粒高速撞击基体表面,形成薄片,基体表面形成的凹坑和凸峰作为锚固点,有利于涂层的机械结合。通过表面形貌分析发

现,部分喷砂工艺参数所获得喷砂表面的凹坑深度越大,且宽化程度加剧,容易导致结合界面缺陷的产生及锚固点的减少,反而越不利于涂层与基体的结合。因此,需要进一步结合喷砂表面形貌的特征参数,分析其对涂层结合强度的影响规律。

利用后处理软件对喷砂预处理形貌的三维粗糙度参数进行分析计算,再取平均值,见表 2,包括幅

度参数(算术平均偏差 S_a 、高度分布峭度 S_{ku} 、峰顶最大高度 S_p 、均方根偏差 S_q 、高度分布偏度 S_{sk} 、谷底最大深度 S_v 、最大高度 S_z)和综合参数(表面均方根斜率 S_{dq} 、展开界面面积比率 S_{dr})。基于所设计的正交试验方案,在各工艺参数下获得的喷砂试样表面制备热喷涂层,并进行结合强度测试,再取平均值,最后得出涂层的结合强度。

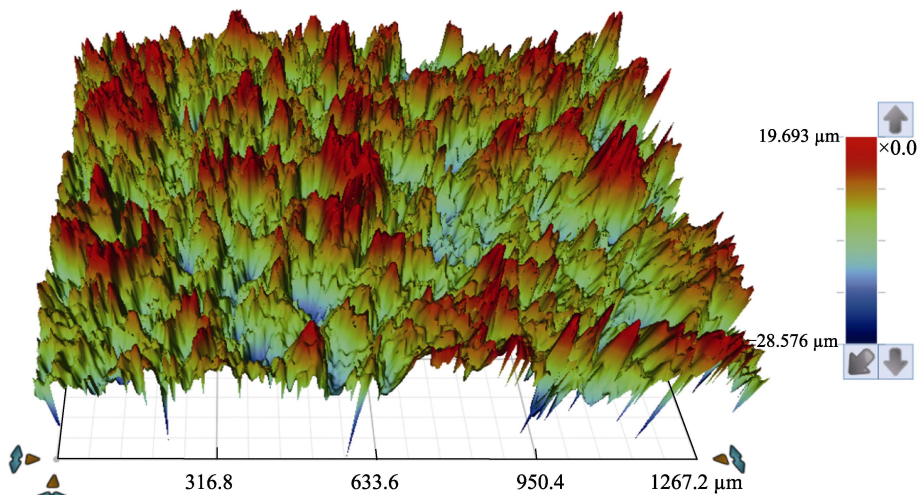


图 4 喷砂预处理表面三维形貌
Fig.4 Three-dimensional topography of sandblasted surface

表 2 喷砂表面三维粗糙度参数
Tab.2 Three-dimensional roughness parameters of sandblasted surface

Sandblasting distance/mm	Sandblasting speed/(mm·s ⁻¹)	Three-dimensional roughness parameters									Bond strength/MPa
		$S_a/\mu\text{m}$	S_{ku}	$S_p/\mu\text{m}$	$S_q/\mu\text{m}$	S_{sk}	$S_v/\mu\text{m}$	$S_z/\mu\text{m}$	$S_{dq}/(^{\circ})$	S_{dr}	
-1	-1	5.40	4.42	22.55	6.98	0.53	37.53	60.08	49.69	53.20	30.34
0	0	4.85	3.91	21.54	6.22	0.41	34.95	56.50	47.42	46.22	27.52
1	1	4.47	3.20	22.16	5.64	0.19	29.79	51.95	48.42	49.29	38.11
1	-1	4.20	3.88	19.47	5.35	0.35	31.93	51.40	46.64	44.00	32.47
0	0	5.45	3.46	24.23	6.92	0.28	34.29	58.52	49.27	51.88	35.63
-1	1	4.53	3.81	19.26	5.79	0.47	32.29	51.56	48.30	48.84	38.05
-r	0	5.27	3.61	23.10	6.74	0.40	34.74	57.84	48.49	54.45	29.62
r	0	5.53	3.28	22.56	6.94	0.28	32.23	54.79	48.46	46.70	31.58
0	-r	4.31	3.96	17.59	5.52	0.48	34.95	52.54	48.16	34.50	29.84
0	r	4.41	4.36	23.28	5.73	0.37	32.93	56.21	48.69	61.89	35.05

2.2 三维粗糙度参数对涂层结合强度影响规律分析

利用回归分析方法,分析表 2 中三维粗糙度参数对涂层结合强度的影响规律,建立回归分析数学模型。由于峰顶最大高度 S_p 代表的是测量区域内最高峰的高度值,无法反映测量区域整体形貌特征,即无法说明测量区域形貌对涂层结合强度的影响规律。同理,谷底最大深度 S_v 、最大高度 S_z 均无法反映测量区域的整体形貌特征。因此,回归分析时不考虑上述

三个影响因素。

2.2.1 线性回归数学模型分析

初步建立多元线性回归数学模型:

$$B = \lambda_0 + \lambda_1 S_a + \lambda_2 S_{dq} + \lambda_3 S_{dr} + \lambda_4 S_{ku} + \lambda_5 S_{sk} + \lambda_6 S_q \quad (1)$$

利用表 2 测量数据进行多元线性回归分析,分析结果见表 3。由表 3 得出线性回归数学模型为:

$$B = -98.2121 + 79.122S_a + 3.1177S_{dq} + 0.4315S_{dr} - 1.0033S_{ku} + 16.4362S_{sk} - 68.9272S_q \quad (2)$$

通常认为,相关系数 R 在 0.8~1 范围内, $F > F_{1-\alpha}(k, n-k-1)$, 显著性概率 $P < \alpha$, 则说明因变量与自变量间

表 3 线性回归分析计算结果
Tab.3 The results of linear regression analysis

Parameters	Evaluation	Confidence interval
λ_0	-98.2121	-312.1343~115.7101
λ_1	79.1220	-105.7682~264.0122
λ_2	3.1177	-1.4451~7.6806
λ_3	0.4315	-0.2761~1.1392
λ_4	-1.0033	-20.7124~18.7057
λ_5	16.4362	-45.5166~78.3889
λ_6	-68.9272	-216.7979~78.9434
R^2	0.6217	
F	2.6579	
P	0.3681	

存在显著的线性相关性,即回归数学模型可以采用。由表 3 可以得出,当显著水平 α 取 0.05 时,相关系数 $R < 0.8$,统计量 $F = 2.6579 < F_{1-0.05}(6,3) = 8.941$,显著性概率 $P > 0.05$ 。因而认为因变量与自变量之间不存在线性相关性,即上述线性回归数学模型不可用。

2.2.2 非线性回归数学模型分析

由于表 2 分析计算结果中自变量 S_a 、 S_{dq} 、 S_{dr} 、 S_{ku} 、 S_{sk} 、 S_q 与结合强度之间的函数关系模型不明确,因此选取幂函数作为初步的非线性回归数学模型,其数学方程为:

$$B = \lambda_0 \cdot S_a^{\lambda_1} \cdot S_{dq}^{\lambda_2} \cdot S_{dr}^{\lambda_3} \cdot S_{ku}^{\lambda_4} \cdot S_{sk}^{\lambda_5} \cdot S_q^{\lambda_6} \quad (3)$$

为便于求解,将上述方程两边取对数,使原方程由非线性函数转换为线性函数:

$$\lg 2B = \lg 2\lambda_0 + \lambda_1 \lg 2S_a + \lambda_2 \lg 2S_{dq} + \lambda_3 \lg 2S_{dr} + \lambda_4 \lg 2S_{ku} + \lambda_5 \lg 2S_{sk} + \lambda_6 \lg 2S_q \quad (4)$$

令 $y = \lg 2B$, $X_0 = \lg 2\lambda_0$, $X_1 = \lg 2S_a$, $X_2 = \lg 2S_{dq}$, $X_3 = \lg 2S_{dr}$, $X_4 = \lg 2S_{ku}$, $X_5 = \lg 2S_{sk}$, $X_6 = \lg 2S_q$ 。因此,上述方程转变为:

$$y = X_0 + \lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 + \lambda_3 X_3 + \lambda_4 X_4 + \lambda_5 X_5 + \lambda_6 X_6 \quad (5)$$

基于表 2 测量数据结果,进行多元线性回归分析,回归系数分析计算结果见表 4。

表 4 非线性回归分析计算结果
Tab.4 The results of nonlinear regression analysis

Parameters	Evaluation	Confidence interval
X_0	-19.2499	-48.4024~-9.9027
λ_1	13.7812	11.4503~39.0127
λ_2	5.2626	0.5997~11.1250
λ_3	0.6477	0.1512~1.4466
λ_4	0.0479	-2.1529~2.2487
λ_5	0.1817	0.0593~0.7226
λ_6	-15.2104	-40.9664~-10.5456
R^2	0.8826	
F	11.7585	
P	0.0523	

由表 4 分析计算结果可以得出,当显著水平 α 取 0.05 时,相关系数 $R > 0.8$,统计量 $F > F_{1-0.05}(6,3) = 8.941$,显著性概率 $P > 0.05$,说明回归数学模型具有一定的可行性。同时,还可看出,回归系数 λ_4 的置信区间包含零点。表明喷砂表面三维粗糙度参数 S_{ku} 对涂层结合强度的影响不太显著,需进一步分析回归数学模型的残差,分析得到时序残差如图 5 所示。通过观察可以发现,大部分误差条都通过零线,而第五个样本点的误差条偏离零线较远,说明为奇异点,在后续模型优化过程中应将该样本数据进行去除。

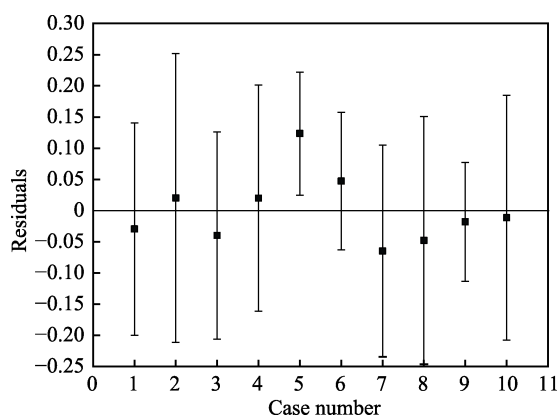


图 5 回归分析残差

Fig.5 Residual plot of regression analysis

为进一步分析得出对涂层结合强度影响较为显著的喷砂表面三维粗糙度参数,利用逐步回归分析方法对回归数学模型进行优化,分析结果见表 5。可以看出,喷砂表面三维粗糙度参数 S_{ku} 、 S_{sk} 对涂层结合强度的影响不显著,可以将其去除。去除影响因子 S_{ku} 、 S_{sk} 和第五组样本数据,对试验数据进行多元线性回归分析,回归系数分析计算结果见表 6。

表 5 逐步回归分析计算结果
Tab.5 The results of stepwise regression analysis

Independent variable	Coeff.	t-stat	p-val
X_1	7.7177	3.327	0.0208
X_2	4.6459	2.8207	0.0371
X_3	0.4352	2.6989	0.0428
X_4	0.3043	0.461	0.6688
X_5	0.1857	1.3443	0.25
X_6	-8.8674	-3.647	0.0148

由表 6 分析计算结果可得到线性转换后的幂函数回归数学模型方程为:

$$y = -17.6617 + 7.7177 X_1 + 4.646 X_2 + 0.4352 X_3 - 8.8674 X_6 \quad (6)$$

由分析结果可以得出,当显著水平 α 取 0.05 时,相关系数 $R = 0.9107 > 0.8$,统计量 $F = 6.0716 > F_{1-0.05}(4,5) = 5.192$,显著性概率 $P < 0.05$,且各个变量的置信区间

表 6 去除部分参数后的线性回归分析计算结果
Tab.6 The results of linear regression analysis after removal of some parameters

Parameters	Evaluation	Confidence interval
X_0	-17.6617	-39.4122~4.0887
λ_1	7.7177	1.7548~13.6807
λ_2	4.6460	0.4120~8.8800
λ_3	0.4352	0.0207~0.8496
λ_6	-8.8674	-15.1177~-2.6172
R^2	0.8293	
F	6.0716	
P	0.037	

均不包含零点。说明经过逐步回归分析优化后，线性转换幂函数模型具有较强的相关性。将数学模型还原回幂函数回归数学模型，得到数学模型：

$$B = 2^{-17.6617} \cdot S_a^{7.7177} \cdot S_{dq}^{4.646} \cdot S_{dr}^{0.4352} \cdot S_q^{-8.8674} \tag{7}$$

2.3 影响机制分析

2.3.1 S_a 和 S_{dr}

S_a 为喷砂表面形貌凹坑和凸峰的算术平均高度，是以 Ra 为面进行扩展的参数，是单位面积区域内，凹坑和凸峰相对于平均面各点高度差的绝对值的平均值，其计算公式为：

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x, y)| dx dy \tag{8}$$

S_{dr} 为界面扩展面积比，代表了区域的扩展面积（表面积）相对于定义区域的面积的增量，其计算公式为：

$$S_{dr} = \frac{1}{A} \left[\iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial Z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial Z(x, y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \right] \tag{9}$$

实际提取的喷砂试样的表面形貌如图 6 所示，可以看出，试样形貌左侧区域的表面凹坑和凸峰相对于

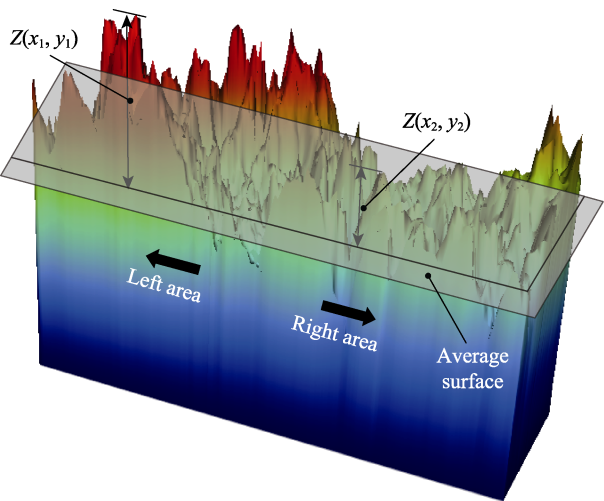


图 6 三维粗糙度参数 S_a 和 S_{dr} 影响机制
Fig.6 The effect mechanism of three-dimensional roughness parameter S_a and S_{dr} on bond strength of the coating

平均面的高度差较大，而右侧区域所形成的凹坑和凸峰相对于平均面的高度差较小，即 $S_{a左} > S_{a右}$ 。从图 6 还可以看出，当取样面积一定时， S_a 越大的区域，所形成的凹坑和凸峰相对于平均面的高度差越大，数量越多，有利于增大区域的表面积，即展开界面面积比率 S_{dr} 增大，涂层与基体的接触面积也增大。此外，高度差相对较大的凸峰及凹坑还可以为喷涂层形成过程中提供更多的锚固点，有利于进一步提高涂层结合强度。故涂层的结合性能与喷砂预处理表面的 S_a 和 S_{dr} 成正比。

2.3.2 S_{dq}

S_{dq} 为均方根斜率，是通过定义区域所有点斜率的均方根计算得出的参数，其计算公式为：

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[\left(\frac{\partial Z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial Z(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy} \tag{10}$$

由式（10）可以得出， S_{dq} 为喷砂预处理表面单位面积区域内各点斜率的均方根。如图 7 所示，实线为提取的试样表面局部区域 A 的实际轮廓曲线，虚线为该局部区域假设的对比分析轮廓曲线。可以看出，实线所示的 A 区域轮廓深度较深，且底部轮廓较为平缓，各点斜率值 $\partial z/\partial x$ 近似为 0，计算得出 S_{dq} 的相对较小。虚线所示的 A 区域轮廓表面凹坑及凸峰均匀分布，不存在平缓区域，计算得出的 S_{dq} 相对较大。进一步分析可以得出，当喷砂预处理表面的 S_{dq} 较小时，其凹坑和凸峰的锐度不足，为宽化、敞开型，且凹坑和凸峰的分布不均匀，不易形成锚固点，进而导致涂层与基体件的机械结合性能较差。当 S_{dq} 较大时，即所形成的凹坑及凸峰较为尖锐，平缓区域较少，数目更多、深度适中的凹坑和凸峰有利于为涂层的机械结合提供更多的锚固点，有利于提升涂层结

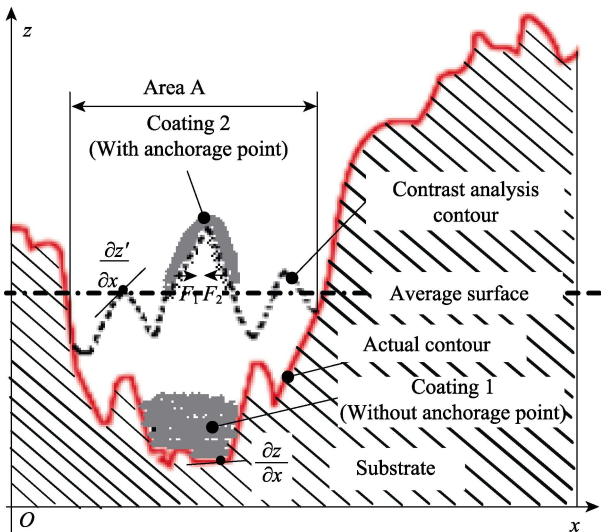


图 7 三维粗糙度参数 S_{dq} 影响机制
Fig.7 The effect mechanism of three-dimensional roughness parameter S_{dq} on bond strength of the coating

合强度。故喷砂预处理表面的 S_{dq} 越大, 涂层结合强度越高。

2.3.3 S_q

S_q 是评价预处理表面单位面积区域内各点相对于平均面高度差的根均方, 即区域内各点高度差的标准偏差。实际提取的试样表面局部区域的形貌特征如图 8 所示, 可以看出, 平均面以上各点相对于平均面的高度差 $Z'(x,y)$ 小于平均面以下各点相对于平均面的高度差 $Z(x,y)$, 差异性较大, 即该区域的 S_q 计算值较大。从图 8 还可以看出, 该类区域的形貌特征以较深的凹坑为主。在喷涂过程中, 由于凹坑深度较深, 熔融粉末粒子在飞行过程中, 由于受到凹坑侧壁的粘连作用, 一方面熔融粒子无法到达凹坑底部, 进而在凹坑底部易形成残留气孔缺陷; 另一方面熔融粒子到达基体表面的速度将大幅下降, 不利于涂层与基体间的润湿效果, 进而影响涂层与基体件的结合性能。因此, 喷砂预处理表面 S_q 值越大, 涂层与基体间的结合性能越低。

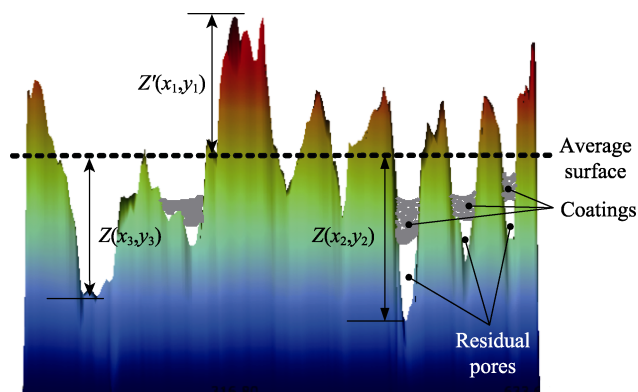


图 8 三维粗糙度参数 S_q 影响机制

Fig.8 The effect mechanism of three-dimensional roughness parameter S_q on bond strength of the coating

综合三维粗糙度参数对涂层结合强度的影响机制分析结果, S_a 、 S_{dr} 、 S_{dq} 、 S_q 对涂层结合强度影响规律与回归分析数学模型分析结果一致, 说明回归分析模型可以揭示三维粗糙度参数对涂层结合强度的影响规律。

3 结论

利用三维光学显微镜测得不同喷砂工艺所获得预处理表面的三维粗糙度参数, 建立了三维粗糙度参数对涂层结合强度的影响规律数学模型, 并结合数学模型进一步探讨了三维粗糙度参数对涂层结合强度的影响机制。主要结论如下:

1) 喷砂表面三维形貌显示, 基体喷砂表面随机分布着许多不规则形状的凸峰和凹坑, 方向各异, 没有固定的取向。

2) 预处理表面三维粗糙度参数 S_a 、 S_{dr} 、 S_{dq} 、 S_q 对涂层结合强度的影响较为显著, 且存在非线性回归关系, 分析得出的回归模型为 $B = 2^{-17.6617} \cdot S_a^{7.7177} \cdot S_{dq}^{4.646} \cdot S_{dr}^{0.4352} \cdot S_q^{-8.8674}$ 。

3) S_a 与 S_{dr} 主要反映涂层结合界面的面积增大程度, 影响涂层与基体的接触面积。 S_{dq} 主要反应预处理表面凹坑及凸峰的尖锐程度, 影响涂层机械结合锚固点数量。 S_q 主要反应预处理表面凹坑及波峰相对平均面的偏离程度, 影响涂层结合界面缺陷的数量及涂层与基体间的润湿效果。

参考文献:

- [1] WIELAGE B, WANK A, POKHMURSKA H. Development and trends in HVOF spraying technology[J]. Surface and coatings technology, 2006, 201: 2032-2037.
- [2] 杨震晓, 刘敏, 邓春明, 等. 热喷涂基体表面预处理技术的研究进展[J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 8-14. YANG Zhen-xiao, LIU Min, DENG Chun-ming, et al. Review on the pretreatment of substrate for thermal spray process[J]. China surface engineer, 2012, 25(2): 8-14.
- [3] LI C J, WANG Y Y. Effect of particle state on the adhesive strength of HVOF sprayed metallic coating[J]. Journal of thermal spray technology, 2002, 11(4): 523-524.
- [4] JAMES D, XIAO H, RICHARDS N L, et al. Examination of a grit-blasting process for thermal spraying using statistical methods[J]. Journal of thermal spray technology, 2005, 14(4): 471-479.
- [5] 郝建军, 李会平, 马跃进, 等. 喷砂预处理在铸铁零件修复中的应用研究[J]. 农业机械学报, 2003, 24(4): 120-122. HAO Jian-jun, LI Hui-ping, MA Yue-jin, et al. Application research of sandblasting pretreatment in repair of cast iron parts[J]. Transactions of the chinese society for agricultural machinery, 2003, 24(4): 120-122.
- [6] MARTINELLI C S M. Co-Cr alloy: Sandblasting and percentage variation in surface roughness[J]. Dental materials, 2013, 29(1): 35-37.
- [7] 杨晖, 潘少明. 超音速等离子喷涂 WC-12Co 涂层的结合机理[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(3): 187-190. YANG Hui, PAN Shao-ming. Bonding mechanism of WC-12Co coatings prepared by supersonic plasma spraying on 45 steel[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2009, 30(3): 187-190.
- [8] MELLALI M, GRIMAUD A, LEGER A C, et al. Alumina grit blasting parameters for surface preparation in the plasma spraying operation[J]. Journal of thermal spray technology, 1997, 6(4): 217-226.

- 43-54.
- [18] 苏国胜. 高速切削锯齿形切屑形成过程与形成机理研究[D]. 山东: 山东大学, 2011: 11-19.
SU Guo-sheng. Formation mechanism and characterization of sawtooth chip in high speed cutting[D]. Shandong: Shandong University, 2011: 11-19.
- [19] TURLEY D M, DOYLE E D, RAMALINGAM S. Calculation of shear strains in chip formation in titanium[J]. Materials science & engineering, 1982, 55(1): 45-48.
- [20] DUAN C Z, WANG M J, PANG J Z, et al. A calculational model of shear strain and strain rate within shear band in a serrated chip formed during high speed machining[J]. Journal of materials processing technology, 2006, 178 (1-3): 274-277.
- [21] KOMANDURI R, HOU Z B. On thermoplastic shear instability in the machining of a titanium alloy (Ti-6Al-4V)[J]. Metallurgical & materials transactions A, 2002, 33(9): 2995.
- [22] 杨奇彪. 高速切削锯齿形切屑的形成机理及表征[D]. 山东: 山东大学, 2012: 24-25.
YANG Qi-biao. Formation mechanism and characterization of sawtooth chip in high speed cutting[D]. Shandong: Shandong University, 2012: 24-25.
- [23] GURRUTXAGA-LERMA B. Adiabatic shear banding and the micromechanics of plastic flow in metals[J]. International journal of solids & structures, 2017, 132-133: 153-170.
- [24] JOMAA W. Non-conventional turning of hardened AISI D2 tool steel[J]. Science and technology of welding and joining, 2017(11): 379-383.
- [25] KOUADRI S, NECIB K, SAMIR A, et al. Quantification of the chip segmentation in metal machining: Application; to machining the aeronautical aluminium alloy AA2024-T351 with cemented; carbide tools WC-Co[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2013, 64(64): 102-113.
-
- (上接第 252 页)
- [9] 马跃进, 郝建军, 马爱军, 等. 铸铁零件电弧喷涂前的喷砂预处理工艺研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 78-81.
MA Yue-jin, HAO Jian-jun, MA Ai-jun, et al. Study on sand blasting pretreatment process for cast iron parts before arc spraying[J]. Transactions of the chinese society of agricultural engineering, 2002, 18(4): 78-81.
- [10] 宋斌, 陈铭, 陈利修. 喷砂预处理工艺对涂层结合强度的影响[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(3): 70-72.
SONG Bin, CHEN Ming, CHEN Li-xiu. The impact of sandblasting preprocessing on bonding strength of high velocity arc spraying coating[J]. Machine design and research, 2013, 29(3): 70-72.
- [11] TANGO R N, PEREIRA P C, MACEDO V C, et al. Effect of sandblasting on Y-TZP roughness and biofilm formation: Preliminary study[J]. Dental materials, 2011, 27(1): 170-174.
- [12] 朱鹏超, 张利军, 邵博. 等离子喷涂镍基涂层表面形貌的研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(10): 166-168.
ZHU Peng-chao, ZHANG Li-jun, SHAO Bo. Study on surface morphology of nickel-based coating prepared by supersonic plasma[J]. Hot working technology, 2016, 45(10): 166-168.
- [13] ZAHOUANI H, ASSOUL M, VARGIOLU R, et al. The morphological tree transform of surface motifs-incidence in tribology[J]. International journal of machine tools & manufacture, 2001, 41(13/14): 1961-1979.
- [14] SCHWANKL M, KELLNER R, SINGER R F, et al. The Influence of sandblasting on the morphology of electroless deposited zinlayers on aluminum sheets[J]. Applied surface science, 2013, 283(15): 202-208.
- [15] 张来启, 张少杰, 曾红杰, 等. 喷砂预处理对 HVOF 喷涂 TiAl-Nb/NiCrAl 涂层结合强度的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(12): 105-109.
ZHANG Lai-qi, ZHANG Shao-jie, ZENG Hong-jie, et al. Effect of grit blasting pre-treatment on bond strength of TiAl-Nb/NiCrAl coatings sprayed by high velocity oxy-fuel[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2011, 32(12): 105-109.
- [16] 王春水, 何胜馨, 张二亮, 等. 喷砂表面的多尺度分析与表征[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 127-131.
WANG Chun-shui, HE Sheng-xin, ZHANG Er-liang, et al. Analysis and characterization of sandblasted surfaces using multi-scale analysis[J]. Surface technology, 2015, 44(6): 127-131.